

摘要

Gumbel分布和指数分布都是我国水文频率分析中的较为常用线型,国内外更是将其广泛地应用于暴雨频率分布线型的选择上,但在国内很少有人对这两种分布的线性矩法进行深入研究。因此,本文分析整理出Gumbel分布和指数分布的线性矩及其参数,并通过统计试验方法分析了两种分布线性矩法的性能及具有历史洪水(暴雨)信息公式的适用性。结果表明,Gumbel分布和指数分布的线性矩法具有优良的统计特性,特别是具有良好的不偏性,总体上讲,线性矩法要优于传统的参数估计方法,希望本文对Gumbel分布和指数分布的线性矩法的研究能够促进线性矩法更广泛的应用于实践。

四阶线性矩作为选优统计量来优选水文频率分布线型已经在国外应用,证明是一种很好的方法。本文将四阶线性矩检验法引入暴雨频率分布线型的选择,利用国内几个流域大量的实测暴雨资料,对国内外暴雨频率分析中最常用的4种线型进行计算拟合,分析四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性,并与国内常用的其他4种选优统计量得出的结果进行比较。四阶线性矩检验法的结果表明三参数的对数正态分布与各流域的实测暴雨资料拟合最好,这与概率点据相关系数检验法(PPCC)、拟优确定性系数(QD)、拟优平方和准则法(RMSE)、拟优绝对值准则法(MAE)4种方法的结论基本一致,很好地鉴别了暴雨资料的分布线型,四阶线性矩检验法可以作为检验暴雨频率分布线型选择的方法,四阶线性矩检验法扩展了暴雨线型检验的方法。

通过对前人文献中暴雨资料的计算拟合,可知黄金分割搜索法有很好的精度,可以用于暴雨公式的拟合。同时将这种方法应用于10种不同短历时暴雨公式,通过各流域126个雨量站的大量暴雨资料的计算拟合和比较,分析了得出的两种精度最高的公式。

关键词: 线性矩法、统计实验、线型选择、四阶线性矩检验法、黄金分割搜索法、短历时暴雨公式

Abstract

Gumbel distribution and Exponential distribution are commonly used in hydrologic frequency analysis in China, they are commonly applied in the choice of storm frequency distribution, but studies on L-Moments based on Gumbel distribution and Exponential distribution are seldom in China. So After introducing L-moments of Gumbel distribution and Exponential distribution, their relationships with distribution parameters, a suitable formula of sample L-moments in consideration of the historical flood(precipitation) informations is proposed. Then the statistical performance of L-moments for estimation of population parameters' quantiles and suitability of the historical flood formula proposed are analysed by Monte-Carlo method, at the same time, the comparison with the Moment method and the Curve-fitting methods with absolute criteria and square criteria is done. The results of Monte-Carlo experiments show that not only the unbiasedness of parameters and quantiles estimation by L-moment method is best, but also it has good efficiency. L-moment method is the best one in the four estimation methods. Generally speaking, L-Moment is a good parameter estimation method with good statistical characteristic. So we hope that L-Moment will be more commonly used in practice.

Fourth-order L-Moments was used as statistical quantities in choice of hydrology frequency distribution abroad, and was proved it has good robust. So we introduce Fourth-order L-Moments into the choice of design storm frequency distribution and examine its suitability, then compare it with another four statistical quantities. The results show that Fourth-order L-Moments tests is significant if the LN3 (three-parameter lognormal) distribution is used as for the study area, this result is same as another four statistical quantities. Fourth-order L-Moments was a good method in the choice of design storm frequency distribution.

Many calculation of rainstorm data in other's article proved that method of golden section search is a precise method in optimizing parameters of the rainstorm formulation of the short duration. At the same time, we analysis the accuracy of 10 rainstorm formula of the short duration using the method of golden section search.

Keywords: L-Moments, Mont-Carlo method, Choice of Distribution of precipitation, Fourth-order L-Moments, Method of golden section search, Rainstorm formula of the short duration

学位论文独创性声明:

本人所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。如不实,本人负全部责任。

论文作者(签名): 李兴凯

2008年03月

学位论文使用授权说明:

河海大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社有权保留本人所送交学位论文的复印件或电子文档,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外,允许论文被查阅和借阅。论文全部或部分内容的公布(包括刊登)授权河海大学研究生院办理。

论文作者(签名): 李兴凯

2008年03月

第一章 绪论

1.1 研究目的

参数估计方法是水文频率计算中的重要内容。当前在水文统计中,矩法(MOM)计算简便,但统计特性较差,由矩法估计的参数及由此得出的设计值总是系统偏小,其中尤以 C_s 偏小最为明显,在样本容量较小时,其统计参数估计有界^[1],而且计算高阶矩时抽样误差很大;极大似然法(MXL)具有较好的统计特性,但计算较繁、对于P-III分布当 $C_v \geq 2$ 时,似然方程无解,因而应用受到限制;权函数虽然减小了所谓的“矩差”,提高了 C_s 的计算精度,但此法没有解决均值和变系数的估计精度问题。我国常采用适线法(FIT),虽然能灵活性的综合各类信息,但拟合优度缺乏客观标准,计算因人而异;计算机适线在给定绘点公式和适线准则的条件下,虽可客观地给出 C_v 和 C_s 的估计值,但其随给定的公式、准则等而变化,因而耗费及时较多;1979年美国的Greenwood^[2]等人提出了一种新的参数估计方法—概率权重矩法(PWM),具有较好的统计特性。之后,Hosking于1990年定义了线性矩(L-moment),它源于概率权重矩,是概率权重矩的线性组合。大量研究结果表明,线性矩法具有良好的性能,较矩法好得多,与概率权重矩法相当。

Gumbel和指数分布都是研究暴雨分布的常用线型,但是在国内很少有人对基于这两种线型的线性矩法进行研究。因此,本文对基于Gumbel分布和指数分布的线性矩法进行了初步研究。

暴雨频率分布线型的选择和短历时暴雨强度公式的选择对防涝、排涝、排水设施规划和工程设计具有重大意义。暴雨频率分布线型的选择是暴雨公式拟合的前提,暴雨公式是各种水系统规划与设计的基本依据之一,是计算暴雨地面径流和确定工程设计流量的重要依据,它的精确性直接关系到工程建设的科学性。各种防洪、排水系统的投资与该系统的设计流量有直接关系:设计流量大,投资高;设计流量小,投资低;而设计流量计算的基本依据之一即是暴雨公式,故合理推求暴雨公式十分重要。近年来,虽有些单位或个人对暴雨线型有不同程度的研究,但只是局限于某一地区,都不系统、完整,不同专家对暴雨线型的选用有着不同的认识,不能很好的形成统一,再就是研究方法存在局限,本研究将在这方面作进一步深入研究。另一个研究重点是在暴雨强度公式的选用上,国内所选用的公

式型式单一，大多数地区编制的暴雨强度公式很古老，用的暴雨资料长度有限，大多是应用 80 年以前数据编制，其实用性和准确性已经难以满足工程规划和设计的要求。

四阶线性矩作为选优统计量来优选水文频率分布线型已经在海外应用，证明是一种很好的方法。本文将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择，利用国内几个流域大量的实测暴雨资料，对国内外暴雨频率分析中最常用的 4 种线型进行了计算拟合，分析了四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 参数估计方法研究现状

参数估算是水文频率计算中的重要内容。目前，统计参数估算大体可分为两类：一类是参数估算法，即先假定总体分布线型，然后采用统计方法，根据样本估计总体分布所含的参数，如矩法，权函数法、概率权重矩法等；另一类是适线法，它首先假定理论频率曲线的线型并估计样本的频率，然后根据样本点据估计出所选线型的参数，使样本点据与理论频率曲线拟合最好。

矩法是经典的参数估计方法，也是其他方法的基础。矩法是用样本矩代替总体矩，并通过矩和参数之间的关系来估计频率曲线统计参数的一种方法。矩法是一种最简单的参数估计方法，也是水文频率计算中广泛使用的一种方法。采用矩法估计频率曲线参数存在的主要问题是：由矩法估计的参数及由此得出的设计值会系统偏小，其中尤以 C_s 偏小最为明显。在我国，这种系统偏差，常被称为求矩差或矩差。

针对矩法的这种缺陷，美国海森和福斯特、美国水资源协会等提出了一些修正公式^[9]。但这些修正公式的效果都不好。1954 年我国林平一先生通过模拟计算指出，不仅偏态系数，而且其它参数都有求矩差。此后有人又作进一步的研究，如文献^{[10][11]}指出求矩差是由于以有限的样本矩代替连续分布频率曲线矩以及使用的经验频率公式把 $(0, 1)$ 区间分成 $(n+1)$ 等分而不是 n 等分的积分表达式而引起的。因而，求矩差不是随机误差，而是系统误差，而且矩的阶数越高，这种误差越大。在 P-III 型分布的三个参数中，偏态系数 C_s 是三阶中心矩的函数，要用样本的三阶矩估计，误差是很大的。只有当 $n \rightarrow \infty$ 时，上述系统误差才会消失。一般地，

对于正偏分布，求矩差是负的，即样本矩小于相应的分布频率曲线矩，对于负偏分布，则为正值。正因如此，在水文频率计算中，一般用矩法估计量作统计参数的初步估计值。

针对矩法存在的问题，国内学者马秀峰于 1984 年提出了权函数^[7]，在样本矩的计算中引入了一个正态概率密度函数作为权函数，增加了靠近均值部分的权重，减小了两端部分的权重，从而减小了所谓的“矩差”，提高了 C_s 的计算精度。此外，该方法计算 C_s 时只需要用到二阶矩，因此该方法具有降阶的作用。但此法没有解决均值和变差系数的估计精度问题，而且在计算 E_1 、 H_1 时，仍采用等权的有限和代替积分，限制了计算精度的进一步提高。

刘治中^[8]对上述单权函数法作了改进，提出数值积分权函数法。它将开型数值积分法与权函数法相结合，用数值积分法计算 E_x 、 C_v 、 E_1 、 H_1 ，使估计精度进一步提高。

刘光文^[9]在此基础上提出了双权函数法，引入第二权函数来提高变差系数 C_v 的精度，同时提出采用数值积分公式计算权重函数矩，以提高计算精度，并通过统计检验证明了数值积分单、双权函数法的优越性。

此后，陈元芳^{[10][11][12][13]}对权函数法进行了进一步研究，并提出了具有历史洪水(暴雨)时马秀峰权函数法(适于 P-III 分布)估计公式，参数值比常规矩法要稳健得多。基于权函数法和线性矩法的优点，陈元芳等^[11]提出了混合权函数法，该方法采用线性矩法估计 C_v ，具有良好的不偏性克服了传统权函数法估计 C_v 时的缺陷。

极大似然法(MXL)具有较好的统计特性，但计算较繁、对于 P-III 分布当 $C_v \geq 2$ 时，似然方程无解，因而应用受到限制；我国常采用适线法(FIT)，虽然能灵活性的综合各类信息，但拟合优度缺乏客观标准，计算因人而异；计算机适线在给定绘点公式和适线准则的条件下，虽可客观地给出 C_v 和 C_s 的估计值，但其随给定的公式、准则等而变化，因而耗费及时较多。

1979 年美国的 Greenwood^[2]等人提出了一种新的参数估计方法—概率权重矩法(PWM)，具有较好的统计特性。同时 Greenwood^[2]等认为，概率权重矩法只适用于分布函数的反函数能解析表达的分布，如耿贝尔(Gumbel)分布、Weibull 分布、Wakeby 分布等。但丁晶等^{[14][15]}采用数值方法，将概率权重矩法应用于分布函数的反函数不能解析表达的 P-III 型分布，进一步扩展了概率权重矩法的应用。而且该

法不仅利用样本序列各项大小的信息，而且还利用序位的信息；在估计概率权重矩时，只需 x 值的一次方，避免了高次方引起的较大误差。此外，该法还简便、客观。在此之后，丁晶又提出了用概率权重矩法估计 LN3 的参数的思路和基本公式，并建立了专用数表，将数表以近似的式子表示了出来。经验证近似公式满足工程水文计算的要求，且方便可行。

在 Greenwood 1979 年定义概率权重矩之后，Hosking 于 1990 年定义了线性矩 (L-moment)，这引起了国外水文学者的高度兴趣，并作了一系列的研究工作^{[46][47][48]}，主要研究内容是在连序样本、不同总体分布下，该估计方法的总体统计性能，如何用于地区综合，线型鉴别等。在国内，陈元芳等^{[49][51]}在 Hosking 研究的基础上，对基于 P-III 型分布、对数正态分布的线性矩法参数估计进行了研究，并提出了适合于含历史洪水特大值的不连序样本的线性矩估算公式。结果表明线性矩法比矩法、适线法有较大优越性，是一种具有优良统计性能的参数估计方法。

1.2.2 暴雨公式研究现状

国内外对暴雨公式进行了大量的研究，归纳起来主要包括三部分研究内容：第一部分又分为暴雨资料的整理与选样以及由选样方法不同而进行的频率转化两个问题；第二部分是暴雨资料的频率计算及频率线型的选择；第三部分又包括暴雨公式型式选择与参数拟合两个问题。其中前两个部分统称为暴雨资料的统计，它与暴雨资料的多少、暴雨公式的应用地区及其重现期的要求等密切相关。第三部分称为暴雨公式的确定，它的精确程度直接关系到设计暴雨以及由暴雨推求出的排水设计流量的大小，从而影响排水工程和防洪工程的设计规模，最终影响工程的投资预算和可靠性。

1、暴雨选样方法

编制暴雨公式依据的资料是当地的自记雨量记录。记录年数一般在 20 年以上，最少也要在 10 年以上^[16]。当记录年数只有 10 年或略长一点时，雨量记录必须是连续的。暴雨资料的选样工作对城市暴雨强度公式的精确度起基础性的作用，直接影响成果的代表性和可靠性。不同选样方法所选资料的频率强度是不同的，可概括为年最大值法和非年最大值法^[17]两种类型，其中非年最大值法又分为年多个样法、超大值法和超定量法。

年最大值法是指每年选一个最大值，这种方法独立性好，若自一记雨量资料的记录很长，设计重现期较大，这种方法引起的误差将会减小。但是该法会遗漏一

些数值较大在年内排第二或第三的雨样，使小重现期的暴雨偏小。因该法选样简单，资料易得，国外于上世纪七十年代开始运用^{[18][19]}于城市暴雨强度公式的统计。

年多个样法^[20]是按照不同历时每年取最大的6~8个最大雨样统一排序，再取资料年数的3~4倍的最大雨样作为统计的基础资料，该法始用于我国试行的排水规范中，它避开了暴雨雨样标准的不确定性，并兼顾了当时各地的暴雨资料年份不足的缺陷性，不会遗漏较大的雨样，在小重现期($T=0.25\sim 0.5$)部分比较真实地反映暴雨的统计规律。自上世纪60年代初到目前为止，我国大部分城市仍沿用这种选样方法。但年多个样法需要很多资料，收集困难，统计也较困难、繁琐，西方国家自上世纪70年代就在城市排水设计中减少此法的应用，而采用年超大值法^{[18][19]}。

年超大值法^[21]是全部资料N年中分别按不同历时大小排序取前面最大的N组雨量，平均每年选一组，与年多个样法的不同点在于减少了统计中的一些小暴雨资料。该方法资料易得，统计工作量小。

超定量法是选取全部资料N年中超过规定的雨量门槛值的全部记录，选择个数与资料年数无关。超定量选样方法在城市暴雨强度公式的编制中引用较少。

自上世纪八十年代开始，邓培德教授在《城市暴雨公式统计方法的研究》^[17]中建议我国城市暴雨资料选样采用年最大值法，因为我国许多城市已积累较长的自记雨量记录，且设计重现期已较原来提高，并且应用年最大值法还可以解决目前年多个样资料缺乏的问题。此后，国内有部分水文工作者将年最大值选样方法运用于城市暴雨资料的统计工作之中，并取得了很多成果，使用年最大值法的呼声也越来越高。1995年周黔生发表了“暴雨资料的选样方法采用年最大值法更实用”一文^[20]。1996年，邓培德在《暴雨选样与频率分布模型及其应用》^[21]中论证了不同选样方法的关系及其相应的频率分布计算，并指出改用年最大值法后频率分布计算要改用相应的模型，且要对设计重现期作相应的修正，便可以获得相当于现行的计算强度。

2、暴雨选样方法间频率转化问题

按照《给水排水设计手册》第五册(城市排水)^[22]中规定“城市暴雨公式常用于历时较短，重现期较低的情况，通常用年多个样法或超定量法”。但年多个样法和年超定量法需要很多资料，收集困难，统计也较困难、繁琐，工作量大。且自上世纪八十年代起，我国气象与水文部门只统计年最大值，不再统计年多个样值，

使得年多个样值资料很少或没有,造成资料短缺,无法满足工程设计的要求;而年最大值资料容易统计,且从上世纪 60 年代到现在,年最大值资料也有近 50 年的资料,完全可以改用年最大值法进行选样。在西方国家,自 70 年代就在城市排水设计中减少年多个样法或超定量法的应用,而采用年超大值法^{[16][19]},由此可以看出,像年多个样法或超定量法这种统计困难的选样方法最终会被取代。

但用年最大值法取代年多个样法或超定量法在工程设计中还存在设计重现期不同的问题。因此,这就要求在年多个样法与年最大值法之间寻求频率的转化关系式,即利用年最大值资料推算年多个样的设计值。1996 年,邓培德在《暴雨选样与频率分布模型及其应用》^[21]中论证了不同选样方法的关系及其相应的频率分布计算,并指出改用年最大值法后频率分布计算要改用相应的模型,且要对设计重现期作相应的修正,便可以获得相当于现行的计算强度。文章提出的论证和计算方法为改用年最大值法选样提供了适用条件。2004 年,杨智硕、朱颖元^[7]对暴雨不同选样间的频率转化问题进行了较系统的研究。

3、暴雨频率线型选择

19 世纪末,美国的 Hercher 和 Rafter 首先应用了频率曲线(当时称为历时曲线)。1896 年, Horton 把频率分析法用于径流研究,当时多为正态分布的应用。1921 年, Hall 设想用皮尔逊曲线族来适配水文资料。1924 年, Foster 提出了 P-III 曲线的方法,为了方便频率计算,制成了离均系数 Φ 值表,并得到了广泛的应用。到了 20 世纪 40 年代,水文频率分析法的应用越来越多,出现了其他一些频率分布型式,如 Gumbel 分布(即极值 I 型分布)、克里茨基-闵克里分布及对数皮尔逊 III 型分布等,使频率曲线有了更多的备选线型。我国在这方面的研究最早始于 20 世纪 30 年代初期。1933 年,周震伦应用正态分布和 P-III 型分布对美国雨量作了计算研究。1937 年,陈椿庭对我国长江、黄河等洪水流量,用正态分布和 P-III 型分布进行了频率分析。此后,将各种线型不断引入我国的水文研究中,使我们对频率线型有了更多的选择。

频率分布线型的选择对城市暴雨公式的精确制定起到重要作用。因为它直接关系到编制公式所用的“降雨强度-降雨历时-重现期(即 IDF)经验数据表的可靠性。关于得到 IDF 经验数据通常提到两种方法:(1)经验频率法(直接用实测的经验频率强度统计暴雨公式);(2)用某种频率分布线型或是某种理论曲线对各历时选出的实测降雨资料进行调整,然后确定暴雨公式。这样就要确定频率分布线型,目

前国内外一般采用四种分布线型：①年最大值选样方法，极值分布曲线——耿贝尔曲线^[23~28]。②美国周文德教授主张把水文现象的统计规律解释为对数正态分布，提出用对数正态分布曲线^[29]。③邓培德教授为代表的学者主张用指数分布曲线——指数分布曲线^{[26][28][30]}。④夏宗尧主张用传统的皮尔逊Ⅲ型分布曲线^{[31][32][33]}。在国内，自上世纪50年代初以来，水利部门多应用④法，50年代开始应用于城市暴雨公式的统计中。目前来说用③还是④法一直处于争论之中。周教授于1981年6月14日在第二届城市暴雨排水国际会议上的发言，指出：“皮尔逊Ⅲ型分布线型是包含一个偏态系数的三参数模型。如果可用资料年限不够，则得不到可靠的偏态系数，为获得一个始终一致和比较协调的结果，两参数的数学模型更加切合实际”^[29]。1983年6月江苏省暴雨公式鉴别会议上，刘光文教授和詹道江教授认为：“频率曲线在水利与城市暴雨中所用区间不一样，城市暴雨的统计历时短，重现期低，皮尔逊Ⅲ型分布在这很小区间内不一定最优越，主张使用指数分布曲线型”^[17]。90年代以来，金光炎发表了《城市设计暴雨频率计算问题》^[34]和《城市设计暴雨频率曲线线型的研究》^[35]等文章，对暴雨频率曲线线型做了较深入的研究。

4、暴雨公式参数拟合

由于国内外提出的暴雨公式为超定非线性，公式参数的求解实际上是一个无约束条件下非线性公式参数的优化问题。关于公式参数的优化求解，一直处于不断研究之中。过去常用图解法^[37]，此类方法实际上根据历年暴雨记录表，在确定的理论频率曲线上，按计算重现期对应的频率截取理论频率强度整理成暴雨强度(i)-降雨历时(d)-重现期(f)关系曲线图，再逐步确定固定重现期的公式和包括重现期的公式的参数。该法全过程不但需要反复调整，工作量大，而且由于采用关系图试凑的参数具有一定的任意性，误差多次传递后得到的结果并不一定是最佳拟合参数，有时也无法考虑实际计算中的一些特殊要求。后来人们开始应用最小二乘法、或者将图解法和最小二乘法相结合的计算方法^[38]，这些方法虽原理简单，但计算过程繁琐，工作量大，且计算精度受人为因素影响较大。后来随着计算技术及计算工具的发展，许多学者将单纯形法^[39]、迭代法^[40]、Gauss-Newton法^[41]、Levenberg-Marquardt法(即在前者的基础上引入阻尼因子加以改进)^[42]、带因子-迭代法^[43]等优化方法应用于暴雨公式参数求解，避免了传统方法中存在的缺点，提高了暴雨公式参数求解精度。在智能算法领域，免疫演化算法^[44]和加速遗传算法(AGA)^[45]也在暴雨强度公式的参数优化问题中得到应用和发展。但是这两种算法理

论深奥，编程也较困难。

1.3 研究内容及重点

本文的主要内容有设计暴雨统计参数的估算问题、暴雨频率分布线型的选择和暴雨公式精度的拟合选优三个方面。

1) Gumbel 分布、指数分布线性矩法的研究

Gumbel和指数分布都是研究暴雨分布的常用线型，也广泛应用于水利及其他领域，但是在国内很少有人对基于这两种线型的线性矩法进行研究。因此，本文在分析整理出基于Gumbel分布的线性矩及其参数的基础上，提出了可考虑历史洪水(暴雨)信息的线性矩公式，通过统计试验分析了该分布线性矩法的性能及历史洪水(暴雨)公式的适用性。同时，将线性矩法与两种不同准则的优化适线法、矩法作了比较。

2) 设计暴雨频率分布线型的计算分析

四阶线性矩作为选优统计量对设计暴雨频率分布线型进行优选已经在国外应用，但在国内还很少人人涉猎。本文将四阶线性矩检验法引入暴雨频率分布线型的选择，利用国内几个流域大量的实测暴雨资料，对国内外暴雨频率分析中最常用的 4 种线型进行计算拟合，分析四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性，并与国内常用的其他 4 种选优统计量得出的结果进行比较。

3) 暴雨公式的优选

在应用线性矩法分析得出各流域优势线型的基础上，编制了“雨强-历时-重现期(i-d-f)经验数据表后，采用黄金分割法与迭代法相结合的拟合方法，对 10 种不同暴雨公式模型进行拟合计算，选出了精度最高的两种暴雨公式模型。

1.4 技术路线

技术路线图如图 1.1 所示。

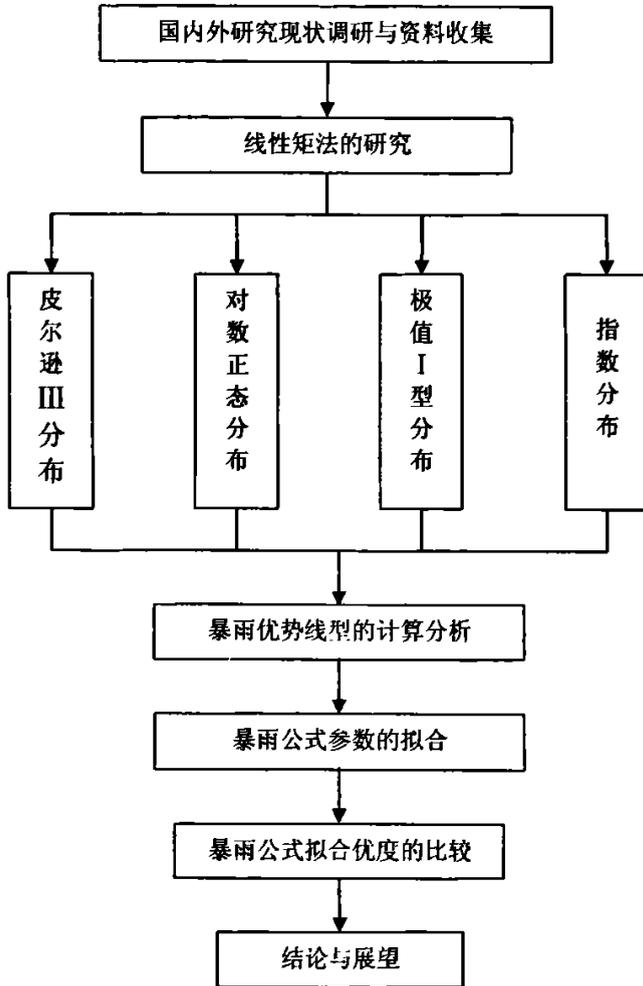


图 1.1 技术路线框图

第二章 考虑历史洪水信息的 Gumbel 分布及指数分布 线性矩法研究

本文上一章对暴雨资料的选样方法进行了系统的分析介绍,详细阐述了各种选样方法的选样过程和优缺点。经过分析比较,最终确定选用选样方法简单,气象和水文部门统计容易的年最大值法作为本文的选样方法。

本章接下来在 2.1 节介绍了具有优良统计性能的线性矩法及其特性,并给出了连序样本和非连序样本的线性矩公式。在接下来的 2.2、2.3 两节分别对皮尔逊 III 型分布、对数正态分布进行了介绍,并将国内学者对两种分布线性矩法的研究进行了总结;在 2.4、2.5 节中,作者在前人的基础上,对 Gumbel 分布、指数分布的线性矩法进行了系统的研究,得出了一些有价值的结论。

2.1 线性矩法(L-M)介绍

在 Greenwood 1979 年定义概率权重矩之后, Hosking 于 1990 年定义了线性矩(L-moment),这引起了国外水文学者的高度兴趣,并作了一系列的研究工作^{[46][47][48]},主要研究内容是在连序样本、不同总体分布下,该估计方法的总体统计性能,并与矩法比较,如何用于地区综合,线型鉴别等。在国内,文献^{[49][51]}在 Hosking 研究的基础上,对基于 P-III 型分布、对数正态分布的线性矩法参数估计进行了研究,并提出了适合于含历史洪水(暴雨)特大值的不连序样本的线性矩估算公式。结果表明线性矩法比矩法、适线法有较大优越性,是一种具有优良统计性能的参数估计方法。

2.1.1 线性矩的定义

设随机变量为 X , 其取值为 x , 分布函数为 $F(x)$, 密度函数为 $f(x)$ 。

1979 年, Greenwood 定义的概率权重矩是

$$\alpha_r = \int_0^1 x(1-F(x))^r dF(x) \quad (2.1)$$

$$\beta_r = \int_0^1 xF(x)^r dF(x) \quad (2.2)$$

概率权重矩往往难于直接用于解释概率分布几种参数,如尺度、形状参数的含义。事实上,以上信息可以用概率权重矩线性组合来表示,如分布尺度参数可以

用 $\alpha_0 - 2\alpha_1$ 或 $2\beta_1 - \beta_0$ 的倍数表示 (Landwehr, Matalas, Hosking 等), 而形状参数可用 $6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$ 表示 (Stedinger)。在此基础上, Hosking 等定义了线性矩 λ_r (L-Moment):

$$\lambda_r = \int_0^1 x P_{r-1}^*(F(x)) dF(x) \tag{2.3}$$

其中
$$P_r^*(u) = \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k} \binom{r+k}{k} u^k}{(k!)^2 (r-k)!} \tag{2.4}$$

一般地, 这种定义的线性矩与概率权重矩的关系如下:

$$\lambda_{r+1} = (-1)^r \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k} \binom{r+k}{k}}{(k!)^2 (r-k)!} \alpha_k = \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k} \binom{r+k}{k}}{(k!)^2 (r-k)!} \beta_k \tag{2.5}$$

具体地讲, 两种矩的前四阶关系是

$$\begin{cases} \lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0 \\ \lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \\ \lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \end{cases} \tag{2.6}$$

从以上式子可知, 线性矩是概率权重矩的线性组合, 因此, 它们之间应该具有非常密切的联系。

为了便于定义无因次的线性矩, Hosking 还提出了线性矩系数 (L-Momentratios):

$$\tau_r = \lambda_r / \lambda_2 \quad r=3,4 \tag{2.7}$$

此外, 定义了反映尺度特征的系数 L-Cv, 即 τ_2

$$\tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1 \tag{2.8}$$

τ_3 反映形状 (偏态) 特征, 故也称 L-skewness, τ_4 反映峰度特征, 故称 L-Kurtosis。

2.1.2 线性矩特性

a. 存在性

当分布期望值存在, 则各阶线性矩存在。

b. 单一性

当分布期望值存在, 则线性矩唯一, 即不存在两个分布有相同的线性矩。

c. 数值范围

λ_1 可取任何值, λ_1 其实就是分布数学期望; $\lambda_2 \geq 0$; 对所有 $r \geq 3, |\tau_r| < 1$ 。

d. 线性性

设随机变量 X, Y 为线性函数关系, 即 $Y=aX+b$, 则对应的两个随机变量线性矩 λ_r 及 λ_r^* 的关系如下:

$$\lambda_1^* = a\lambda_1 + b, \quad \lambda_2^* = |a|\lambda_2$$

$$\tau_r^* = (\text{Sign}(a))^r \tau_r$$

其中 $r > 3$, Sign 为符号函数。

e. 对称性

若 X 是以均值 μ 为中心的对称分布, 则所有奇数阶线性矩系数, $\tau_r = 0 (r = 3, 5, 7, \dots)$ 。

2.1.3 样本线性矩计算

1、连序样本下线性矩计算公式

设样本 X 为 $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$, $x_{i:n}$ 为由小到大排列的低 i 个样本值, n 为样本容量。则线性矩 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 对应的样本矩 l_1, l_2, l_3 计算公式如下:

$$l_1 = b_0, l_2 = 2b_1 - b_0, l_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \quad (2.9)$$

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i:n}, b_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=2}^n \frac{(i-1)}{(n-1)} x_{i:n}, b_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=3}^n \frac{(i-1)(i-2)}{(n-1)(n-2)} x_{i:n} \quad (2.10)$$

式中: b_0, b_1, b_2 为样本的概率权重。

这样只要给定样本 $x_{1:n}, x_{2:n}, \dots, x_{n:n}$, 则可计算出 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及 $\tau_3 = \lambda_3/\lambda_2$ 。

2、具有历史洪水(暴雨)情况下样本线性矩计算公式

设水文样本 X 最大重现期 N , 历史洪水(暴雨)个数为 a , 实测期历史洪水(暴雨)个数 l , 实测期样本长度为 n , 则系列中水文数据总个数为 $n_0 = n - l + a$, 令由小至大排列样本为 $\{x'_m, m = 1, 2, \dots, n_0\}$, 则

$$b_0 = \frac{1}{N} \left[\frac{N-a}{n_0-a} \sum_{m=1}^{n_0-a} x'_m + \sum_{m=n_0-a+1}^{n_0} x'_m \right] \quad (2.11)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \left[\frac{N-a}{n_0-a} \sum_{m=1}^{n_0-a} \frac{m-1}{n_0-a-1} \frac{N-a-1}{N-1} x'_m + \sum_{m=n_0-a+1}^{n_0} \frac{N-n_0+m-1}{N-1} x'_m \right] \quad (2.12)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \left[\frac{N-a}{n_0-a} \sum_{m=1}^{n_0-a} \frac{(m-1)(m-2)}{(n_0-a-1)(n_0-a-2)} \frac{(N-a-1)(N-a-2)}{(N-1)(N-2)} x'_m \right. \\ \left. + \sum_{m=n_0-a+1}^{n_0} \frac{(N-n_0+m-1)(N-n_0+m-2)}{(N-1)(N-2)} x'_m \right] \quad (2.13)$$

这样只要给定样本 $x'_1, x'_2, \dots, x'_{n_0}$, 则可计算出 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及 $\tau_3 = \lambda_3/\lambda_2$ 。

2.1.4 皮尔逊III型分布线性矩计算

2.1.4.1 皮尔逊III型分布型式及设计值推求

英国生物学家皮尔逊创始了一族分布曲线, 包括 13 种分布线型, 其中的 P-III 型曲线在我国广泛应用于水文频率分析中, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x-a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x-a_0)] \quad (2.14)$$

式中: $\Gamma(\alpha)$ 为 α 的伽玛函数; α, β, a_0 分别为 P-III 型分布的形状、尺度和位置参数, $\alpha > 0, \beta > 0$ 。

P-III 型曲线的方程式中有三个参数, 这些参数经过适当的换算, 可以用均值 Ex 、离差系数 C_v 和偏态系数 C_s 来表示:

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} \\ \beta = \frac{2}{Ex C_v C_s} \\ a_0 = Ex \left(1 - \frac{2C_v}{C_s} \right) \quad (2.15)$$

在一般的水文计算中, 通常会需求出指定频率 p 所相应的随机变量取值 x_p , 这就要求分析密度曲线, 并且通过对密度曲线进行积分, 从而求出等于及大于 x_p 的累积频率, 计算公式如下:

$$P = P(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{+\infty} (x-a_0)^{\alpha-1} \exp[-\beta(x-a_0)] dx \quad (2.16)$$

经过标准化变换后, 简化后可得:

$$P(\Phi > \Phi_p) = \int_{\Phi_p}^{+\infty} f(\Phi, C_s) d\Phi \quad (2.17)$$

上式中被积函数只含有一个待定参数 C_s , 其他两个参数 \bar{x} 和 C_v 都包含在 Φ

中, 因而只要假定一个 C_s 值, 便可通过上式积分求得 p 与 Φ 之间的关系。

而且, P-III型曲线的形状也与 C_v 及 C_s 的大小密切联系: 随着 C_v 值的增大, 曲线越来越陡; 当 C_s 增大时, 曲线上段变陡, 下段趋平。因此, 在实际应用中, 常用适线法调整参数来改善曲线的拟合程度。

只要求出均值 Ex 、离差系数 C_v , 再由 C_s 及 p 值查取相应的 Φ_p 值, 然后按 $x_p = Ex(1 + C_v\Phi_p)$, 算出各种频率的设计值。

2.1.4.2 密度函数中参数与线性矩的关系

若 α 、 β 、 a_0 已知, 则可求得 $\lambda_1, \lambda_2, \tau_3, \tau_4$ [46]。

$$\lambda_1 = a_0 + \alpha / \beta \quad (2.18)$$

$$\lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha+0.5)}{\sqrt{\pi}\beta\Gamma(\alpha)} \quad (2.19)$$

$$\tau_3 = 6I_{\frac{1}{3}}(\alpha, 2\alpha) - 3 \quad (2.20)$$

式中, $I_x(p, q)$ 为不完全 Beta 函数比率

$$I_x(p, q) = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt \quad (2.21)$$

为求得 τ_3 、 τ_4 , 需采用近似算法, 下列公式可将误差控制在 10^{-6} 以下 [46], 具有足够高的精度。

若 $\alpha \geq 1$

$$\tau_3 \approx \alpha^{-\frac{1}{2}} \frac{A_0 + A_1\alpha^{-1} + A_2\alpha^{-2} + A_3\alpha^{-3}}{1 + B_1\alpha^{-1} + B_2\alpha^{-2}} \quad (2.22)$$

$$\tau_4 \approx \frac{C_0 + C_1\alpha^{-1} + C_2\alpha^{-2} + C_3\alpha^{-3}}{1 + D_1\alpha^{-1} + D_2\alpha^{-2}} \quad (2.23)$$

若 $\alpha < 1$

$$\tau_3 \approx \frac{1 + E_1\alpha + E_2\alpha^2 + E_3\alpha^3}{1 + F_1\alpha + F_2\alpha^2 + F_3\alpha^3} \quad (2.24)$$

$$\tau_4 \approx \frac{1 + G_1\alpha + G_2\alpha^2 + G_3\alpha^3}{1 + H_1\alpha + H_2\alpha^2 + H_3\alpha^3} \quad (2.25)$$

式(2.22)~(2.25)中的系数如表 2.1。

表 2.1 皮尔逊III分布近似估算系数表

系数	取值	系数	取值	系数	取值	系数	取值
A0	3.257350E-01	C0	1.226017E-01	E1	2.380758E+00	G1	2.123583E+00
A1	1.686915E-01	C1	5.373013E-02	E2	1.593179E+00	G2	4.167021E+00
A2	7.832724E-02	C2	4.338438E-02	E3	1.161837E-01	G3	3.192530E+00
A3	-2.912054E-03	C3	1.110128E-02	F1	5.153330E+00	H1	9.055144E+00
B1	4.669710E-01	D1	1.832447E-01	F2	7.142526E+00	H2	2.665000E+01
B2	2.425541E-01	D2	2.016604E-01	F3	1.974506E+00	H3	2.619367E+01

2.1.4.3 分布统计特征参数与线性矩的关系

当已知 $\lambda_1, \lambda_2, \tau_3$, 则可求得分布参数 α ^[46] 及常用统计参数 Ex, Cv, Cs 。

若 $|\tau_3| < 1/3$, 令 $Z = 3\pi\tau_3^2$, 则

$$\alpha \approx \frac{1 + 0.2906 Z}{Z + 0.1882 Z^2 + 0.0442 Z^3} \quad (2.26)$$

若 $1/3 < |\tau_3| < 1$, 令 $Z = 1 - |\tau_3|$, 则

$$\alpha \approx \frac{0.36067 Z - 0.59567 Z^2 + 0.2536 Z^3}{1 - 2.7886 Z + 2.56096 Z^2 + 0.77045 Z^3} \quad (2.27)$$

上述公式的计算精度在 5×10^{-5} 以上。

求出 α 值后, 按下式计算基于线性矩的 P-III 型分布的三个常用统计参数值

$$\begin{cases} Ex = \lambda_1 \\ Cv = \frac{\lambda_2 \pi^{1/2} \alpha^{1/2} \Gamma(\alpha)}{\lambda_1 \Gamma(\alpha + 1/2)} \\ Cs = 2\alpha^{-1/2} \text{Sign}(\tau_3) \end{cases} \quad (2.28)$$

2.1.5 三参数对数正态分布线性矩计算

2.1.5.1 三参数对数正态分布形式及设计值推求

设 $\eta = \ln(\xi - c)$ 为符合正态分布 $N(a_\eta, \sigma_\eta^2)$ 的随机变量, 则称 ξ 为符合三参数对数正态分布, 对于水文变量而言, c 应大于等于 0。 ξ 的分布密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{(x-c)\sigma_\eta\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(x-c)-a_\eta]^2}{2\sigma_\eta^2}\right\} \quad (c < x < \infty) \quad (2.29)$$

当均值 Ex 、离差系数 Cv 和偏态系数 Cs 已知时, 借助于《水文统计常用表》, 再由 Cs 及 p 值查取相应的 Φ_p 值, 然后按 $x_p = Ex(1 + Cv\Phi_p)$, 算出各频率设计值。

2.1.5.2 密度函数中参数与线性矩的关系

若 c 、 σ_η 、 a_η 已知, 则可求得 $\lambda_1, \lambda_2, \tau_3, \tau_4$ ^{[46] [50]}。

$$\lambda_1 = c + e^{a_\eta + \frac{\sigma_\eta^2}{2}} \quad (2.30)$$

$$\lambda_2 = -e^{a_\eta + \frac{\sigma_\eta^2}{2}} \left\{ 1 - 2\Phi(\sigma_\eta / \sqrt{2}) \right\} \quad (2.31)$$

其中 $\Phi(\cdot)$ 表示标准正态分布的分布函数。

为求得 τ_3 、 τ_4 , 需采用近似算法, 下列公式可将 τ_3 、 τ_4 误差分别控制在 2×10^{-7} 和 5×10^{-7} 以下, 具有足够高的精度。

$$\tau_3 \approx \sigma_\eta \frac{A_0 + A_1 \sigma_\eta^2 + A_2 \sigma_\eta^4 + A_3 \sigma_\eta^6}{1 + B_1 \sigma_\eta^2 + B_2 \sigma_\eta^4 + B_3 \sigma_\eta^6} \quad (2.32)$$

$$\tau_4 \approx \tau_4^0 + \sigma_\eta^2 \frac{C_0 + C_1 \sigma_\eta^2 + C_2 \sigma_\eta^4 + C_3 \sigma_\eta^6}{1 + D_1 \sigma_\eta^2 + D_2 \sigma_\eta^4 + D_3 \sigma_\eta^6} \quad (2.33)$$

$\tau_4^0 = 0.12260172$, 式(2.32)、(2.33)中的系数见表 2.2。

表 2.2 对数正态分布近似估算系数表

系数	取值	系数	取值	系数	取值
A0	4.860251E-01	C0	1.875659E-01	E1	2.0466534
A1	4.493076E-03	C1	-2.535215E-03	E2	-3.6544371
A2	8.802704E-04	C2	2.699510E-04	E3	1.8396733
A3	1.150708E-06	C3	-1.844668E-06	F1	-0.20360244
B1	6.466292E-02	D1	8.232562E-02	F2	-2.0182173
B2	3.309041E-03	D2	4.268145E-03	F3	1.2420401
B3	7.42907E-05	D3	1.165369E-04	F3	-0.21741801

2.1.5.3 密度函数中参数、分布统计特征参数与线性矩之间的关系

当已知 $\lambda_1, \lambda_2, \tau_3$, 则可求得分布参数 σ_η, a_η, c ^{[46] [50]} 及常用统计参数 Ex, C_V, C_S 。

当 $|\tau_3| \leq 0.94$, $|\sigma_\eta| \leq 3$ 时, 则

$$\sigma_\eta \approx \tau_3 \frac{E_0 + E_1 \tau_3^2 + E_2 \tau_3^4 + E_3 \tau_3^6}{1 + F_1 \tau_3^2 + F_2 \tau_3^4 + F_3 \tau_3^6} \quad (2.34)$$

$$a_\eta = l_n \left(\frac{-\lambda_2 e^{-\sigma_\eta^2/2}}{1 - 2\Phi(\sigma_\eta/\sqrt{2})} \right) \quad (2.35)$$

$$c = \lambda_1 - e^{a_\eta + \frac{\sigma_\eta^2}{2}} \quad (2.36)$$

式(2.34)中的系数如表 2.3。

求出 a_η 、 σ_η 值后，按下式计算基于线性矩的对数正态分布的三个常用统计参数数值

$$\begin{cases} EX = \lambda_1 \\ C_v = \frac{1}{\lambda_1} \sqrt{\exp(2a_\eta + \sigma_\eta^2)[\exp(\sigma_\eta^2) - 1]} \\ C_s = [\exp(\sigma_\eta^2) + 2] \sqrt{\exp(\sigma_\eta^2) - 1} \end{cases} \quad (2.37)$$

2.2 考虑历史洪水信息的 Gumbel 分布线性矩法

2.2.1 耿贝尔 (Gumbel) 分布形式及设计值推求

Gumbel 分布的密度函数为

$$f(x) = \alpha \times \exp[-\alpha(x - \mu) - e^{-\alpha(x - \mu)}] \quad -\infty < x < +\infty \quad (2.38)$$

式中： μ —位置参数， α —尺度参数。

对任意给定的频率 p ，由 $p = P(x > x_p)$ 求解与频率 p 对应的设计值 x_p 为

$$x_p = \mu - \frac{1}{\alpha} \ln[-\ln(1-p)] \quad (2.39)$$

2.2.2 耿贝尔 (Gumbel) 分布参数与线性矩的关系

2.2.2.1 密度函数中参数与线性矩的关系

线性矩 λ_1 、 λ_2 、 τ_3 、 τ_4 定义见 2.1 节，由文献[46]可知线性矩与密度函数中参数或特征参数关系式如下：

若 μ 、 α 已知，则由文献[46]给出线性矩公式如下：

$$\begin{cases} \lambda_1 = \mu + \frac{\gamma}{\alpha} \\ \lambda_2 = \frac{\ln 2}{\alpha} \\ \tau_3 = 0.1699 = \ln(9/8) / \ln 2 \\ \tau_4 = 0.1504 = (16 \ln 2 - 10 \ln 3) / \ln 2 \end{cases} \quad (2.40)$$

式中: γ —欧拉常数, $\gamma = 0.57721566\dots$;

λ_1 、 λ_2 、 τ_3 、 τ_4 —分别表示分布函数线性矩的均值、均方差、偏态系数、峰度系数。

反之, 若 λ_1 、 λ_2 已知, 则根据式(2.40)得出分布参数 μ 、 α 为^[46]

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\lambda_2}, \quad \mu = \lambda_1 - \frac{\gamma}{\alpha} \quad (2.41)$$

2.2.2.2 密度函数中参数、分布统计特征参数和线性矩的关系

若 λ_1 、 λ_2 或 μ 、 α 已知, 分布统计特征参数与线性矩及密度函数中参数关系如下:

$$\begin{cases} Ex = \lambda_1 = \mu + \frac{\gamma}{\alpha} \\ Cv = \frac{\pi \lambda_2}{\lambda_1 \sqrt{6} \ln 2} = \frac{\pi}{(\alpha \mu + \gamma) \sqrt{6}} \\ Cs = 1.13954710 \dots \end{cases} \quad (2.42)$$

反之, 若 Ex 、 Cv 已知, 则

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\pi}{\sqrt{6} Ex Cv} \\ \mu = Ex - \frac{\sqrt{6} \gamma Ex Cv}{\pi} \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = Ex \\ \lambda_2 = -\frac{\sqrt{6} \ln 2 Ex Cv}{\pi} \end{cases} \quad (2.44)$$

2.2.3 统计试验研究

文献[49][50]已对基于 P-III分布、对数正态分布的矩法、适线法及线性矩法进行了统计试验比较研究, 本文主要对基于 Gumbel 分布的矩法、线性矩法、适线法进行统计试验对比研究。

2.2.3.1 方法优劣评价标准

本文以统计参数、设计值的不偏性及有效性为依据评价估计方法的优劣:

1、无偏性

设 θ 是未知参数 θ_0 的估计量, 如果对任意自然数 n 都有

$$E(\theta) = \theta_0 \quad (2.45)$$

则称 θ 为 θ_0 的无偏估计量。

无偏估计量是没有“系统误差”的, 如果 $E(\theta) > \theta_0$, 说明 θ 有大于 θ_0 的倾向, 如果 $E(\theta) < \theta_0$, 说明 θ 有小于 θ_0 的倾向, 而当 $E(\theta) = \theta_0$ 时, 说明 θ 与 θ_0 无系统的偏差。对无偏估计量 θ 来讲, 虽然不同的样本, 它的取值也不同, 但这些取值的平均数等于参数 θ_0 。其实对于无偏估计量, 其抽样误差就等于抽样方差, θ 的取值在真值 θ_0 的附近摆动。

(1) 统计参数的不偏性

统计参数 Ex, Cv, Cs 的不偏性以其 N_s 次统计试验的均值为标准进行评价。均值愈接近于总体值, 则不偏性愈好。统计参数 Ex, Cv, Cs 的均值计算公式如下:

$$EEx = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} Ex_i \quad (2.46)$$

$$ECv = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} Cv_i \quad (2.47)$$

$$ECs = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} Cs_i \quad (2.48)$$

式中 EEx, ECv, ECs ——在 N_s 次统计试验中 Ex, Cv, Cs 的平均值;

Ex_i, Cv_i, Cs_i ——第 i 个试验样本的 Ex, Cv, Cs 。

(2) 设计值的不偏性

设计值 (x_p) 的不偏性以相对偏差均值 (Bx_p) 为标准进行评价。 Bx_p 为正值表示设计值偏大, 负值则表示偏小, $|Bx_p|$ 越大, 表示偏差越大; 一般认为, 一种好的参数估计方法应该是 Bx_p 略大于 0, 但 $|Bx_p|$ 一般不应超过 5%;。 Bx_p 计算公式为:

$$Bx_p = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (X_{pi} - X_{p0})}{N_s \cdot X_{p0}} \times 100\% \quad (2.49)$$

式中 p ——设计频率；

x_p ——相应设计频率 p 的总体设计值；

x_{pi} ——第 i 个试验样本相应设计频率 p 的设计值估计值。

2、有效性

由于无偏估计量的取值都是围绕待估参数摆动，其好坏标准应当在样本容量相同时，摆动愈小愈好，而刻画摆动程度的指标是方差，方差愈小，摆动愈小，抽样误差也愈小。因此方差愈小的无偏估计量愈好，这就是有效性的概念。

设 $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ 是总体参数 θ_1, θ_2 的无偏估计量，若对一切 n ，满足

$$D(\hat{\theta}_1) < D(\hat{\theta}_2) \quad (2.50)$$

都成立，称 $\hat{\theta}_1$ 较 $\hat{\theta}_2$ 有效。

(1) 统计参数的有效性

统计参数 Ex, Cv, Cs 的有效性以其 N_s 次统计试验的均方误为标准进行评价。均方误愈小，说明方法愈有效。统计参数 Ex, Cv, Cs 的均方误公式为：

$$SEx = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (Ex_i - Ex_0)^2} \quad (2.51)$$

$$SCv = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (Cv_i - Cv_0)^2} \quad (2.52)$$

$$SCs = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} (Cs_i - Cs_0)^2} \quad (2.53)$$

式中 SEx, SCv, SCs ——在 N_s 次统计试验中 Ex, Cv, Cs 的均方误；

Ex_i, Cv_i, Cs_i ——第 i 个试验样本的 Ex, Cv, Cs ；

Ex_0, Cv_0, Cs_0 ——总体分布的 Ex, Cv, Cs 。

(2) 设计值的有效性

设计值 (x_p) 的有效性以相对根均方误 (Sx_p) 为标准进行评价。 Sx_p 越小, 则有效性越好。一般认为, 一种好的参数估计方法 Sx_p 应尽可能小。 Sx_p 计算公式为:

$$Sx_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_s} (X_{pi} - X_{p0})^2}{N_s \cdot X_{p0}}} \times 100\% \quad (2.54)$$

式中 p —— 设计频率;

x_p —— 相应设计频率 p 的总体设计值;

x_{p_i} —— 第 i 个试验样本相应设计频率 p 的设计值估计值。

2.2.3.2 统计试验方案设计

(1) 连序样本

实测系列长度 n 取 30、50, 总体参数 Ex_0 取 1.0, Cv_0 取 0.3、0.5、1.0。

(2) 不连序样本

最大重现期 N 取 100, n 取 30、50, 历史洪水(暴雨)个数 a 取 1, 3, Ex_0, Cv_0 取值同连序样本。

在以上各种统计试验中: $p_1=0.01$, $p_2=0.001$, $N_s=10000$ 。

2.2.3.3 统计试验结果

表 2.3 Gumbel 分布参数、设计值不偏性有效性计算成果

总体参数与样本组成				估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a									
0.3	30	30	0	MOM	1.00	0.30	0.06	0.05	-0.84	-0.73	19.44	14.97
0.3	30	30	0	L-M	1.00	0.30	0.06	0.04	0.22	0.13	17.86	13.89
0.3	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.06	0.05	2.44	1.94	19.30	14.85
0.3	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	0.33	0.06	0.06	5.38	4.32	22.51	17.09
0.5	30	30	0	MOM	1.00	0.49	0.09	0.07	-0.97	-0.80	26.58	21.02
0.5	30	30	0	L-M	1.00	0.50	0.09	0.07	0.37	0.35	24.85	19.83
0.5	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	0.52	0.09	0.07	3.40	2.95	27.04	21.39
0.5	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.09	0.09	6.59	5.70	30.86	24.11
1.0	30	30	0	MOM	1.00	1.00	0.18	0.18	-0.94	-0.84	41.99	34.17
1.0	30	30	0	L-M	1.00	1.02	0.18	0.17	0.64	0.60	38.66	31.79
1.0	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	1.06	0.18	0.19	4.14	3.80	41.84	34.10
1.0	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	1.11	0.18	0.22	7.86	7.19	48.55	39.02
0.3	50	50	0	MOM	1.00	0.30	0.04	0.04	-0.45	-0.35	15.25	11.69
0.3	50	50	0	L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.17	0.15	13.67	10.61
0.3	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.04	1.75	1.44	14.29	11.03
0.3	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	3.92	3.20	16.73	12.73
0.5	50	50	0	MOM	1.00	0.50	0.07	0.06	-0.48	-0.43	20.50	16.16
0.5	50	50	0	L-M	1.00	0.50	0.07	0.05	0.21	0.16	18.74	14.93
0.5	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	0.52	0.07	0.06	2.06	1.75	19.88	15.72
0.5	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.07	0.07	4.87	4.16	23.04	17.96
1.0	50	50	0	MOM	1.00	1.00	0.14	0.13	-0.61	-0.54	34.04	27.71
1.0	50	50	0	L-M	1.00	1.01	0.14	0.12	0.25	0.25	30.91	25.44
1.0	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	1.03	0.14	0.13	2.34	2.16	32.19	26.35
1.0	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	1.07	0.14	0.16	5.60	5.13	37.80	30.49
0.3	100	30	1	MOM	1.00	0.29	0.05	0.04	-1.14	-0.95	15.52	12.05
0.3	100	30	1	L-M	1.00	0.30	0.05	0.04	0.12	0.08	15.64	12.18
0.3	100	30	1	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.05	0.04	2.28	1.83	16.83	12.97
0.3	100	30	1	FIT(OLS)	1.00	0.33	0.05	0.05	5.21	4.21	18.86	14.25
0.5	100	30	1	MOM	1.00	0.49	0.09	0.07	-1.34	-1.10	21.52	17.15
0.5	100	30	1	L-M	1.00	0.50	0.09	0.06	0.25	0.26	21.80	17.46
0.5	100	30	1	FIT(ABS)	1.00	0.52	0.09	0.07	2.88	2.52	23.67	18.78
0.5	100	30	1	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.09	0.09	6.24	5.40	26.32	20.45
1.0	100	30	1	MOM	1.00	1.01	0.17	0.18	-1.31	-1.20	33.08	27.18
1.0	100	30	1	L-M	1.00	1.02	0.17	0.17	0.34	0.31	33.45	27.60
1.0	100	30	1	FIT(ABS)	1.00	1.07	0.17	0.19	3.90	3.55	37.12	30.23
1.0	100	30	1	FIT(OLS)	1.00	1.12	0.17	0.25	8.11	7.40	41.36	32.97
0.3	100	50	1	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.77	-0.62	12.77	9.93
0.3	100	50	1	L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.10	0.09	12.43	9.73
0.3	100	50	1	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	1.54	1.26	13.38	10.38
0.3	100	50	1	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	3.80	3.09	14.98	11.42
0.5	100	50	1	MOM	1.00	0.50	0.07	0.06	-0.72	-0.61	18.91	14.97
0.5	100	50	1	L-M	1.00	0.50	0.07	0.05	0.14	0.13	18.02	14.40
0.5	100	50	1	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.07	0.06	1.88	1.62	19.27	15.29
0.5	100	50	1	FIT(OLS)	1.00	0.53	0.07	0.07	4.80	4.13	22.27	17.33

续表 2.3 Gumbel 分布参数、设计值不偏性有效性计算成果

总体参数与样本组成				估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a									
1.0	100	50	1	MOM	1.00	1.00	0.13	0.13	-1.07	-0.96	28.40	23.18
1.0	100	50	1	L-M	1.00	1.01	0.13	0.12	0.12	0.13	27.29	22.45
1.0	100	50	1	FIT(ABS)	1.00	1.03	0.13	0.13	2.21	1.87	29.21	23.86
1.0	100	50	1	FIT(OLS)	1.00	1.07	0.13	0.16	5.27	4.82	33.32	26.75
0.3	100	30	3	MOM	1.00	0.29	0.05	0.04	-1.08	-0.85	13.50	10.48
0.3	100	30	3	L-M	1.00	0.30	0.05	0.03	0.05	0.07	13.77	10.77
0.3	100	30	3	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.05	0.04	2.08	1.71	14.53	11.21
0.3	100	30	3	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.05	0.05	4.46	3.64	17.28	12.95
0.5	100	30	3	MOM	1.00	0.50	0.09	0.06	-1.20	-1.06	18.58	14.92
0.5	100	30	3	L-M	1.00	0.50	0.09	0.06	0.12	0.08	19.18	15.48
0.5	100	30	3	FIT(ABS)	1.00	0.52	0.09	0.07	2.79	2.36	20.61	16.35
0.5	100	30	3	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.09	0.09	5.52	4.70	23.56	18.17
1.0	100	30	3	MOM	1.00	1.01	0.17	0.17	-1.24	-1.13	29.43	24.24
1.0	100	30	3	L-M	1.00	1.02	0.17	0.17	0.14	0.13	30.28	25.01
1.0	100	30	3	FIT(ABS)	1.00	1.06	0.17	0.19	3.40	3.10	33.10	26.93
1.0	100	30	3	FIT(OLS)	1.00	1.11	0.17	0.24	6.72	6.13	37.52	29.87
0.3	100	50	3	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.69	-0.57	12.27	9.52
0.3	100	50	3	L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.10	0.07	11.95	9.35
0.3	100	50	3	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	1.29	1.04	12.84	9.95
0.3	100	50	3	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	3.54	2.86	14.77	11.20
0.5	100	50	3	MOM	1.00	0.50	0.06	0.05	-0.70	-0.61	17.18	13.58
0.5	100	50	3	L-M	1.00	0.50	0.06	0.05	0.08	0.05	16.21	12.95
0.5	100	50	3	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.06	0.05	1.72	1.45	17.42	13.98
0.5	100	50	3	FIT(OLS)	1.00	0.53	0.06	0.07	4.41	3.76	21.04	16.28
1.0	100	50	3	MOM	1.00	1.00	0.13	0.14	-0.92	-0.82	25.88	21.19
1.0	100	50	3	L-M	1.00	1.01	0.13	0.13	0.08	0.09	25.19	20.80
1.0	100	50	3	FIT(ABS)	1.00	1.04	0.13	0.14	2.23	2.05	27.44	22.42
1.0	100	50	3	FIT(OLS)	1.00	1.07	0.13	0.17	4.99	4.56	31.30	25.07

注：MOM 表示矩法，L-M 表示线性矩法，FIT(ABS) 表示绝对值准则的适线法，FIT(OLS) 表示平方和准则的适线法。

2.2.3.4 统计试验结果分析

通过大量计算分析，可得出如下基本结论：

(1) 对 Gumbel 分布的连序样本和不连序样本来讲，无论是不偏性还是有效性，线性矩法均明显好于矩法和适线法，矩法会出现偏小情况而平方和准则的适线法出现较多偏大结果。只是在样本容量较少的情况下，对 Gumbel 分布的不连序样本来讲，矩法的有效性稍优于线性矩法及其他方法(见图 2.1、图 2.2)。

(2) 当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 a 相同时，随着 n 的增加，各种参数估算方法的不偏性、有效性均有所改善，并以有效性的改善最为明显。

(3) 当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 n 、 a 相同时, 随着 Cv_0 的减小, 各种参数估算方法的不偏性、有效性均有所改善, 并以有效性的改善最为明显。

(4) 当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 n 相同时, 考虑历史洪水(暴雨)后, 各种参数估算方法的不偏性(矩法除外)、有效性比不考虑历史洪水(暴雨)均有所改善, 并以有效性的改善最为明显, 并且考虑的历史洪水(暴雨)越多, 改善越明显。这说明, 在设计洪水计算中, 采用较长的洪水系列并考虑历史洪水(暴雨), 可提高计算精度; 同时, Cv 越大, 抽样误差越大。

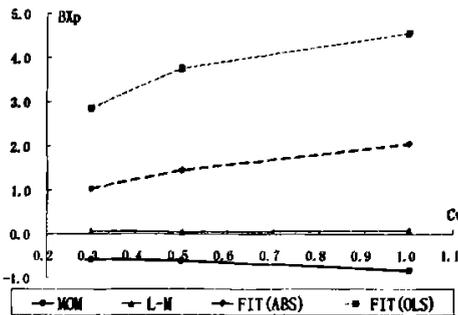


图 2.1 $Cv - Bx_p$ 关系图

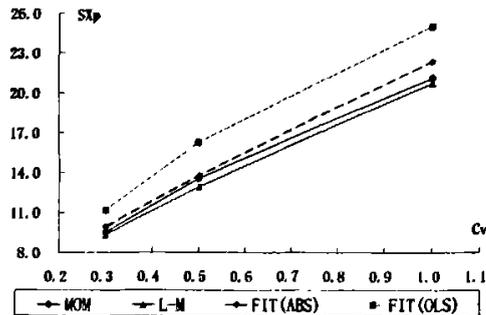


图 2.2 $Cv - Sx_p$ 关系图

2.2.4 参数稳定性分析

设计洪水计算要求以较长系列的水文资料作基础。用短期资料计算设计洪水, 成果可靠度较差, 但是当充分利用历史洪水(暴雨)后, 计算成果可以得到改善, 这是我国水利水电工程实践得到的一条重要经验。

但是, 无论是历史洪水(暴雨)洪峰流量(降雨量)、时段洪量(时段降雨量)的确定, 还是历史洪水(暴雨)重现期的确定, 都存在一定得的不确定性。本文参数稳定性分析的基本思路是: 鉴于历史洪水(暴雨)量及重现期一般会存在一定的误差, 于是给其一个变化幅度, 以 Gumbel 分布为例, 分析线性矩法和绝对值准则适线法在洪水峰、量及重现期变化后参数的不偏性及有效性变化状况。

2.2.4.1 参数稳定性优劣评价标准

采用与 2.4.3.1 相同的标准, 进行统计参数 Ex, Cv, Cs 及设计值 x_p 的不偏性、有效性评价, 详见式(2.36)~(2.49)及(2.51)~(2.54)。

2.2.4.2 统计试验方案设计

(1) 历史洪水(暴雨)量及重现期的变化幅度

历史洪水(暴雨)量 Q 按偏大 5%、偏大 10%两种情况考虑, 在成果表中分别表示为 $Q \times 1.05$ 和 $Q \times 1.10$; 历史洪水(暴雨)重现期 N 按偏差 ± 10 年、 ± 20 年四种情况考虑, 在成果表中分别表示为 $N+10$ 、 $N-10$ 、 $N+20$ 、 $N-20$ 。

(2) 总体参数及样本组成

n 取 50, a 取 1, Ex_0 、 Cv_0 、 N 与 2.5.3.3 取值相同。

在以上各种统计试验中: $p_1=0.01$, $p_2=0.001$, $N_s=10000$ 。

2.2.4.3 统计试验结果

表 2.4 Gumbel 分布稳定性分析成果表(一)

总体参数与样本组成				历史洪水(暴雨)值	估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
Cv0	N	n	a										
0.3	100	50	1	Q×1.05	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	0.46	0.41	12.83	9.88
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.82	0.70	12.26	9.53
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	2.30	1.90	13.41	10.33
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.33	0.04	0.05	5.69	4.65	16.63	12.50
0.3	100	50	1	Q×1.10	MOM	1.00	0.31	0.04	0.03	1.38	1.17	13.14	10.10
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.31	0.04	0.03	1.25	1.07	12.39	9.63
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	2.62	2.18	13.64	10.49
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.33	0.04	0.05	7.10	5.81	18.11	13.55
0.5	100	50	1	Q×1.05	MOM	1.00	0.50	0.07	0.05	0.54	0.51	18.08	14.35
0.5	100	50	1		L-M	1.00	0.51	0.07	0.05	0.95	0.86	17.43	13.96
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.52	0.07	0.06	2.83	2.47	19.25	15.27
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.55	0.07	0.08	6.70	5.80	23.31	18.05
0.5	100	50	1	Q×1.10	MOM	1.01	0.51	0.07	0.06	1.42	1.29	18.48	14.64
0.5	100	50	1		L-M	1.01	0.51	0.07	0.05	1.36	1.24	17.58	14.07
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.01	0.52	0.07	0.06	3.17	2.79	19.52	15.47
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.01	0.55	0.07	0.08	8.08	7.01	25.04	19.30
1.0	100	50	1	Q×1.05	MOM	1.01	1.01	0.14	0.14	0.46	0.48	27.61	22.59
1.0	100	50	1		L-M	1.01	1.02	0.14	0.12	0.99	0.96	26.62	21.98
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	1.01	1.04	0.14	0.14	3.21	2.98	29.33	23.99
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	1.01	1.10	0.14	0.18	7.53	6.92	35.23	28.13
1.0	100	50	1	Q×1.10	MOM	1.01	1.02	0.14	0.14	1.39	1.34	28.12	22.97
1.0	100	50	1		L-M	1.01	1.02	0.14	0.13	1.30	1.26	26.80	22.13
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	1.01	1.04	0.14	0.14	3.57	3.33	29.72	24.29
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	1.01	1.11	0.14	0.19	8.88	8.17	37.47	29.81
0.3	100	50	3	Q×1.05	MOM	1.00	0.31	0.04	0.03	1.33	1.12	12.47	9.66
0.3	100	50	3		L-M	1.00	0.31	0.04	0.03	1.42	1.19	12.02	9.40
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	2.88	2.38	13.49	10.40
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.33	0.04	0.05	6.61	5.41	17.26	12.94
0.3	100	50	3	Q×1.10	MOM	1.01	0.31	0.04	0.04	3.34	2.81	13.68	10.52
0.3	100	50	3		L-M	1.01	0.31	0.04	0.03	2.55	2.17	12.58	9.80
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	0.32	0.04	0.04	3.95	3.30	14.37	11.05
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	0.35	0.04	0.06	9.53	7.83	20.67	15.38

续表 2.4 Gumbel 分布稳定性分析成果表(一)

总体参数与样本组成				历史洪水(暴雨)值	估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a										
0.5	100	50	3	Q×1.05	MOM	1.00	0.51	0.07	0.05	1.12	0.98	17.84	14.16
0.5	100	50	3		L-M	1.00	0.51	0.07	0.05	1.38	1.20	17.21	13.77
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.52	0.07	0.06	3.13	2.70	18.86	14.92
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.55	0.07	0.08	7.15	6.15	23.91	18.42
0.5	100	50	3	Q×1.10	MOM	1.01	0.52	0.07	0.06	3.00	2.64	19.02	15.01
0.5	100	50	3		L-M	1.01	0.51	0.07	0.05	2.45	2.16	17.77	14.19
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	0.53	0.07	0.06	4.18	3.65	19.83	15.65
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	0.57	0.07	0.09	9.90	8.56	27.53	21.08
1.0	100	50	3	Q×1.05	MOM	1.01	1.02	0.14	0.14	1.22	1.17	26.64	21.76
1.0	100	50	3		L-M	1.01	1.02	0.14	0.13	1.58	1.49	25.76	21.25
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	1.05	0.14	0.15	3.59	3.33	28.63	23.33
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	1.10	0.14	0.19	7.96	7.31	35.55	28.24
1.0	100	50	3	Q×1.10	MOM	1.01	1.03	0.14	0.15	2.94	2.79	28.08	22.85
1.0	100	50	3		L-M	1.01	1.03	0.14	0.13	2.57	2.45	26.45	21.78
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	1.05	0.14	0.15	4.63	4.34	29.96	24.37
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	1.12	0.14	0.21	10.52	9.70	39.98	31.61

注: MOM 表示矩法, L-M 表示线性矩法, FIT(ABS) 表示绝对值准则的适线法, FIT(OLS) 表示平方和准则的适线法。

表 2.5 Gumbel 分布稳定性分析成果表(二)

总体参数与样本组成				重现期	估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a										
0.3	100	50	1	N-10	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.38	-0.30	13.36	10.35
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.21	0.18	12.84	10.05
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	1.55	1.27	13.85	10.76
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	4.35	3.54	15.94	12.11
0.3	100	50	1	N+10	MOM	1.00	0.29	0.04	0.03	-1.32	-1.10	13.26	10.29
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.50	-0.44	12.77	10.00
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	0.91	0.70	13.61	10.58
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	3.33	2.67	15.14	11.53
0.5	100	50	1	N-10	MOM	1.00	0.50	0.06	0.05	-0.22	-0.14	17.97	14.21
0.5	100	50	1		L-M	1.00	0.50	0.06	0.05	0.57	0.54	17.25	13.77
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.51	0.06	0.05	2.32	2.04	18.70	14.81
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.54	0.06	0.07	5.39	4.68	21.78	16.91
0.5	100	50	1	N+10	MOM	1.00	0.49	0.06	0.05	-1.34	-1.15	17.82	14.10
0.5	100	50	1		L-M	1.00	0.50	0.06	0.05	-0.26	-0.22	17.13	13.67
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.51	0.06	0.05	1.60	1.37	18.36	14.54
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.53	0.06	0.07	4.10	3.52	20.62	16.04
1.0	100	50	1	N-10	MOM	1.00	1.00	0.14	0.14	-0.52	-0.46	28.78	23.64
1.0	100	50	1		L-M	1.00	1.01	0.14	0.13	0.20	0.20	27.67	22.94
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	1.04	0.14	0.14	2.17	1.99	29.73	24.47
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	1.08	0.14	0.18	6.07	5.54	34.39	27.67

续表 2.5 Gumbel 分布稳定性分析成果表(二)

总体参数与样本组成				重现期	估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CVO	N	n	a										
1.0	100	50	1	N+10	MOM	0.99	1.00	0.14	0.14	-1.84	-1.73	28.58	23.50
1.0	100	50	1		L-M	0.99	1.01	0.14	0.13	-0.76	-0.74	27.52	22.84
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	0.99	1.04	0.14	0.14	1.33	1.16	29.30	24.14
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	0.99	1.08	0.14	0.17	4.56	4.11	32.65	26.34
0.3	100	50	3	N-10	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	0.22	0.22	12.40	9.57
0.3	100	50	3		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.90	0.78	11.91	9.27
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	2.05	1.71	12.96	9.99
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	4.65	3.82	15.59	11.77
0.3	100	50	3	N+10	MOM	1.00	0.29	0.04	0.03	-1.63	-1.38	12.15	9.39
0.3	100	50	3		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.74	-0.66	11.65	9.08
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.03	0.50	0.34	12.32	9.52
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.31	0.04	0.04	2.44	1.92	14.07	10.65
0.5	100	50	3	N-10	MOM	1.00	0.50	0.07	0.05	0.51	0.49	17.30	13.79
0.5	100	50	3		L-M	1.00	0.51	0.07	0.05	1.30	1.17	16.85	13.55
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.52	0.07	0.05	2.95	2.59	18.52	14.72
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.54	0.07	0.07	5.81	5.04	21.90	17.03
0.5	100	50	3	N+10	MOM	1.00	0.49	0.07	0.05	-1.68	-1.52	16.91	13.51
0.5	100	50	3		L-M	1.00	0.50	0.07	0.05	-0.62	-0.61	16.42	13.23
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.51	0.07	0.05	0.99	0.78	17.43	13.91
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.53	0.07	0.07	3.17	2.65	19.52	15.24
1.0	100	50	3	N-10	MOM	1.00	1.01	0.13	0.13	0.63	0.61	27.06	22.17
1.0	100	50	3		L-M	1.00	1.02	0.13	0.12	1.50	1.40	26.33	21.72
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	1.05	0.13	0.14	3.53	3.26	28.67	23.40
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	1.09	0.13	0.17	6.80	6.24	34.16	27.31
1.0	100	50	3	N+10	MOM	0.99	1.00	0.13	0.13	-1.94	-1.89	26.38	21.67
1.0	100	50	3		L-M	0.99	1.02	0.13	0.13	-0.71	-0.77	25.62	21.18
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	0.99	1.04	0.13	0.14	1.29	1.05	26.97	22.10
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	0.99	1.08	0.13	0.17	3.73	3.27	30.46	24.45
0.3	100	50	1	N-20	MOM	1.00	0.30	0.04	0.03	0.26	0.25	13.53	10.48
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	0.70	0.61	12.95	10.13
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.31	0.04	0.03	1.94	1.61	14.06	10.91
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	4.95	4.05	16.46	12.49
0.3	100	50	1	N+20	MOM	1.00	0.29	0.04	0.03	-1.68	-1.41	13.28	10.31
0.3	100	50	1		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	-0.76	-0.67	12.77	10.00
0.3	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.03	0.68	0.51	13.55	10.54
0.3	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.04	2.86	2.28	14.86	11.33
0.5	100	50	1	N-20	MOM	1.01	0.50	0.07	0.06	1.11	1.04	18.43	14.61
0.5	100	50	1		L-M	1.01	0.51	0.07	0.05	1.58	1.45	17.68	14.15
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.01	0.52	0.07	0.06	3.35	2.97	19.66	15.58
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.01	0.54	0.07	0.07	6.83	5.95	23.38	18.15
0.5	100	50	1	N+20	MOM	1.00	0.49	0.07	0.05	-1.23	-1.08	17.71	14.08
0.5	100	50	1		L-M	1.00	0.50	0.07	0.05	-0.35	-0.35	17.21	13.79
0.5	100	50	1		FIT(ABS)	1.00	0.51	0.07	0.05	1.82	1.55	18.66	14.82
0.5	100	50	1		FIT(OLS)	1.00	0.53	0.07	0.07	4.18	3.57	20.70	16.13

续表 2.5 Gumbel 分布稳定性分析成果表(二)

1.0	100	50	1	N-20	MOM	1.01	1.01	0.13	0.13	0.24	0.27	28.85	23.56
1.0	100	50	1		L-M	1.01	1.01	0.13	0.13	0.80	0.78	27.38	22.56
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	1.01	1.04	0.13	0.14	2.65	2.47	29.45	24.05
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	1.01	1.09	0.13	0.17	6.77	6.22	34.98	28.05
1.0	100	50	1	N+20	MOM	0.99	0.99	0.13	0.13	-2.42	-2.29	28.42	23.24
1.0	100	50	1		L-M	0.99	1.01	0.13	0.13	-1.16	-1.14	27.10	22.33
1.0	100	50	1		FIT(ABS)	0.99	1.03	0.13	0.14	0.90	0.74	28.42	23.26
1.0	100	50	1		FIT(OLS)	0.99	1.07	0.13	0.16	3.69	3.29	31.50	25.38
0.3	100	50	3	N-20	MOM	1.01	0.31	0.04	0.03	1.66	1.46	12.86	9.96
0.3	100	50	3		L-M	1.01	0.31	0.04	0.03	2.33	2.01	12.54	9.79
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	0.31	0.04	0.03	3.53	2.98	13.88	10.71
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	0.33	0.04	0.05	6.20	5.15	16.84	12.73
0.3	100	50	3	N+20	MOM	1.00	0.29	0.04	0.03	-2.11	-1.82	12.09	9.41
0.3	100	50	3		L-M	1.00	0.30	0.04	0.03	-1.07	-0.97	11.67	9.15
0.3	100	50	3		FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.03	0.24	0.09	12.09	9.41
0.3	100	50	3		FIT(OLS)	1.00	0.31	0.04	0.04	1.75	1.32	13.34	10.16
0.5	100	50	3	N-20	MOM	1.01	0.51	0.07	0.05	2.00	1.84	18.56	14.72
0.5	100	50	3		L-M	1.01	0.51	0.07	0.05	2.69	2.43	18.02	14.40
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	1.01	0.52	0.07	0.06	4.26	3.78	19.77	15.63
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	1.01	0.55	0.07	0.08	7.50	6.56	24.27	18.80
0.5	100	50	3	N+20	MOM	0.99	0.49	0.07	0.05	-2.50	-2.29	17.37	13.85
0.5	100	50	3		L-M	0.99	0.50	0.07	0.05	-1.26	-1.23	16.77	13.46
0.5	100	50	3		FIT(ABS)	0.99	0.51	0.07	0.05	0.36	0.16	17.41	13.86
0.5	100	50	3		FIT(OLS)	0.99	0.52	0.07	0.07	2.11	1.66	19.20	14.99
1.0	100	50	3	N-20	MOM	1.02	1.02	0.13	0.13	2.34	2.28	28.37	23.19
1.0	100	50	3		L-M	1.02	1.03	0.13	0.12	3.01	2.89	27.46	22.62
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	1.02	1.05	0.13	0.14	4.98	4.69	30.22	24.64
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	1.02	1.09	0.13	0.18	8.76	8.14	37.13	29.66
1.0	100	50	3	N+20	MOM	0.98	1.00	0.13	0.13	-2.92	-2.85	26.55	21.82
1.0	100	50	3		L-M	0.98	1.02	0.13	0.13	-1.54	-1.59	25.66	21.23
1.0	100	50	3		FIT(ABS)	0.98	1.04	0.13	0.14	0.42	0.20	26.64	21.86
1.0	100	50	3		FIT(OLS)	0.98	1.07	0.13	0.17	2.46	2.06	29.41	23.67

注: MOM 表示矩法, L-M 表示线性矩法, FIT(ABS) 表示绝对值准则的适线法, FIT(OLS) 表示平方和准则的适线法。

2.2.4.4 统计试验结果分析

通过对各种情况的计算分析, 可得出如下基本结论:

(1) 对于有效性而言, 从图 2.6、图 2.8、图 2.10 可以很直观的看出: 对于 $Q \times 1.05$ 、 $Q \times 1.10$ 、 $N \pm 10$ 年、 $N \pm 20$ 年各种情况, 均表明: 线性矩法的有效性要优于适线法。当历史洪峰、量 Q 偏大时, 线性矩法和适线法的有效性均变差; 对于重现期 N 的变化, 随着 N 的偏小, 两种方法的有效性均变差, 相反, 当 N 偏大幅度不大时, 两种方法有效性均变好。

(2)对于不偏性,从图 2.5 可以很直观的看出:对 $Q \times 1.05$ 、 $Q \times 1.10$ 两种情况,线性矩的 BX_p 值大多在 0 附近略偏正,说明线性矩要比适线法要好。对 $N \pm 10$ 年、 $N \pm 20$ 年而言,从图 2.7、图 2.9 可以看出:当 N 值增大时, BX_p 值趋于负偏,且增加越多,负偏越多;当 N 值减小时, BX_p 值趋于正偏,且减小越多,正偏越多。但与适线法相比,线性矩法的 BX_p 值分布在 0 周围很小的范围内,总体来讲,线性矩法要好于适线法。

综上所述,对 Gumbel 分布而言,线性矩法的参数估计更稳定,历史洪水(暴雨)误差对其影响较小。

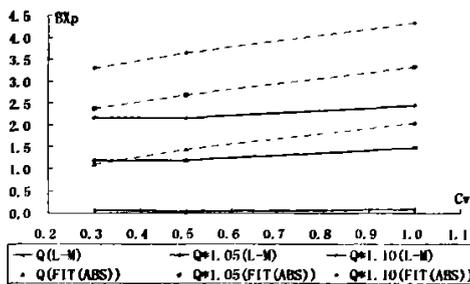


图 2.5 Q 变化时的稳定性分析 (BX_p)

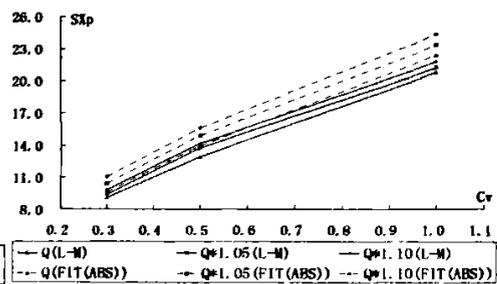


图 2.6 Q 变化时的稳定性分析 (SX_p)

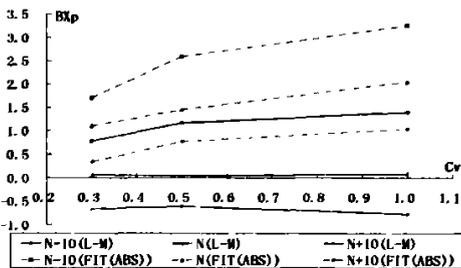


图 2.7 N 变化时的稳定性分析 (BX_p)

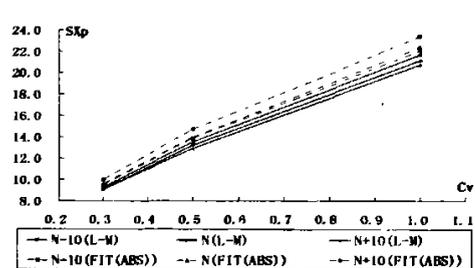


图 2.8 N 变化时的稳定性分析 (SX_p)

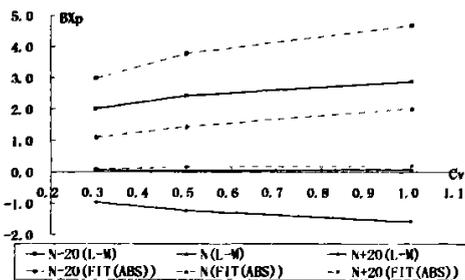


图 2.9 N 变化时的稳定性分析 (BX_p)

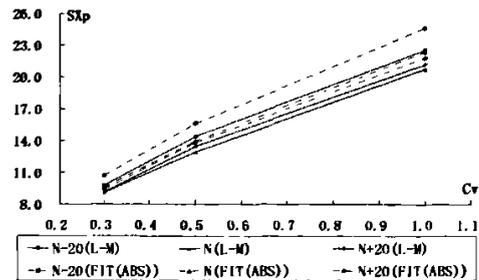


图 2.10 N 变化时的稳定性分析 (SX_p)

2.2.5 小结

本节在分析整理出基于Gumbel分布线性矩及其参数的基础上,通过统计试验分析了该分布线性矩法的性能及历史洪水(暴雨)公式的适用性。同时,将线性矩法与两种不同准则的优化适线法、矩法作了比较。大量计算结果表明,线性矩法不仅参数及设计值不偏性能最好,而且具有较好的有效性。总体上讲,线性矩法是四种方法中最好的一种。此外,针对历史洪水(暴雨)取值及其重现期存在着一定误差,利用Monte-Carlo模拟分析技术,对不同估计方法对历史洪水(暴雨)误差影响作了计算分析。结果表明线性矩法参数估计的稳定性也最好,历史洪水(暴雨)误差对其影响较小。

2.3 考虑历史洪水信息的指数分布线性矩

2.3.1 指数分布形式及设计值推求

指数分布的密度函数为

$$f(x) = \alpha \times \exp[-\alpha(x - \mu)] \quad \alpha > 0, -\infty < \mu < +\infty, \mu < x \quad (2.55)$$

式中: μ —位置参数, α —尺度参数。

对任意给定的频率 p , 由 $p = P(x > x_p)$ 求解与频率 p 对应的设计值 x_p 为

$$x_p = \mu - \frac{1}{\alpha} \ln(p) \quad (2.56)$$

2.3.2 指数分布参数与线性矩的关系

2.3.2.1 密度函数中参数与线性矩的关系

线性 λ_1 、 λ_2 、 τ_3 、 τ_4 定义见 2.2 节, 由文献[46]可知线性矩与密度函数中参数或特征参数关系式如下:

若 μ 、 α 已知, 则由文献[46]给出线性矩公式如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta + 1/\alpha \\ \lambda_2 = 1/(2\alpha) \\ \tau_3 = 1/3 \\ \tau_4 = 1/6 \end{cases} \quad (2.57)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 τ_3 、 τ_4 —分别表示分布函数线性矩的均值、均方差、偏态系数、峰度系数。

反之, 若 λ_1 、 λ_2 已知, 则根据式(2.57)得出分布参数 μ 、 α 为^[46]

$$\alpha = 1/(2\lambda_2), \beta = \lambda_1 - 1/\alpha \quad (2.58)$$

2.3.2.2 密度函数中参数、分布统计特征参数和线性矩的关系

若 λ_1 、 λ_2 或 μ 、 α 已知, 分布统计特征参数与线性矩及密度函数中参数关系如下:

$$\begin{cases} Ex = \beta + 1/\alpha \\ Cv = 1/(\alpha\beta + 1) \\ Cs = 2 \end{cases} \quad (2.59)$$

反之, 若 Ex 、 Cv 已知, 则

$$\begin{cases} \alpha = 1/ExCv \\ \mu = Ex - ExCv \end{cases} \quad (2.60)$$

2.3.3 统计试验研究

文献[49][50]已对基于 P-III分布、对数正态分布的矩法、适线法及线性矩法进行了统计试验比较研究, 本文主要对基于指数分布的矩法、线性矩法、适线法进行统计试验对比研究。

2.3.3.1 参数估计方法优劣评价标准

参数估计方法优劣评价标准同 2.4.3.1 节。

2.3.3.2 统计试验方案设计

(1) 连序样本

实测系列长度 n 取 30、50, 总体参数 EX_0 取 1.0, Cv_0 取 0.3、0.5、1.0。

(2) 不连序样本

最大重现期 N 取 100, n 取 30、50, 历史洪水(暴雨)个数 a 取 1, 3, Ex_0, Cv_0 取值同连序样本。

在以上各种统计试验中: $p_1=0.01$, $p_2=0.001$, $N_s=10000$ 。

2.3.3.3 统计试验结果

表 2.6 指数分布参数、设计值不偏性有效性计算成果

总体参数与样本组成				估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a									
0.3	30	30	0	MOM	1.00	0.29	0.06	0.06	-1.86	-1.51	28.32	21.13
0.3	30	30	0	LM	1.00	0.30	0.06	0.05	0.06	0.05	25.64	19.39
0.3	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	0.30	0.06	0.05	0.78	0.63	26.97	20.32
0.3	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	0.33	0.06	0.07	6.14	4.99	33.60	24.81
0.5	30	30	0	MOM	1.00	0.48	0.09	0.09	-2.24	-1.92	39.58	30.40
0.5	30	30	0	LM	1.00	0.50	0.09	0.07	0.07	0.07	35.85	27.90
0.5	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.09	0.07	1.71	1.48	36.38	28.29
0.5	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	0.55	0.09	0.11	7.98	6.88	45.98	34.98
1.0	30	30	0	MOM	1.00	0.97	0.18	0.16	-2.30	-2.09	59.52	47.12
1.0	30	30	0	LM	1.00	1.00	0.18	0.11	0.21	0.21	53.85	43.22
1.0	30	30	0	FIT(ABS)	1.00	1.02	0.18	0.11	2.04	1.88	54.87	43.99
1.0	30	30	0	FIT(OLS)	1.00	1.11	0.18	0.20	9.34	8.56	69.19	54.26
0.3	50	50	0	MOM	1.00	0.29	0.04	0.05	-1.08	-0.88	22.39	16.66
0.3	50	50	0	LM	1.00	0.30	0.04	0.04	0.08	0.07	19.73	14.92
0.3	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.04	0.66	0.54	20.44	15.41
0.3	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.06	5.13	4.17	25.52	18.84
0.5	50	50	0	MOM	1.00	0.49	0.07	0.07	-1.27	-1.08	30.68	23.54
0.5	50	50	0	LM	1.00	0.50	0.07	0.05	0.09	0.08	27.23	21.23
0.5	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.07	0.05	1.13	0.98	27.40	21.36
0.5	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.07	0.08	6.13	5.28	34.65	26.38
1.0	50	50	0	MOM	1.00	0.98	0.14	0.13	-1.45	-1.34	46.86	37.04
1.0	50	50	0	LM	1.00	1.00	0.14	0.08	0.00	0.00	41.39	33.23
1.0	50	50	0	FIT(ABS)	1.00	1.01	0.14	0.08	1.15	1.05	41.58	33.39
1.0	50	50	0	FIT(OLS)	1.00	1.08	0.14	0.16	6.97	6.37	52.67	41.31
0.3	30	100	1	MOM	1.00	0.29	0.05	0.05	-1.66	-1.36	21.74	16.36
0.3	30	100	1	LM	1.00	0.30	0.05	0.04	0.06	0.05	22.05	16.74
0.3	30	100	1	FIT(ABS)	1.00	0.30	0.05	0.05	1.14	0.93	22.98	17.37
0.3	30	100	1	FIT(OLS)	1.00	0.33	0.05	0.06	6.52	5.29	26.78	19.66
0.5	30	100	1	MOM	1.00	0.48	0.09	0.07	-1.99	-1.71	30.13	23.36
0.5	30	100	1	LM	1.00	0.50	0.09	0.06	0.07	0.07	30.70	24.00
0.5	30	100	1	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.09	0.06	1.68	1.46	31.60	24.63
0.5	30	100	1	FIT(OLS)	1.00	0.55	0.09	0.10	7.97	6.87	36.81	27.85
1.0	30	100	1	MOM	1.00	0.98	0.17	0.14	-2.14	-1.96	46.05	36.80
1.0	30	100	1	LM	1.00	1.00	0.17	0.10	0.13	0.12	46.67	37.62
1.0	30	100	1	FIT(ABS)	1.00	1.03	0.17	0.11	2.00	1.83	47.99	38.56
1.0	30	100	1	FIT(OLS)	1.00	1.12	0.17	0.23	9.29	8.51	56.24	43.84
0.3	50	100	1	MOM	1.00	0.29	0.04	0.04	-1.08	-0.88	19.01	14.24
0.3	50	100	1	LM	1.00	0.30	0.04	0.04	0.15	0.12	18.06	13.70
0.3	50	100	1	FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.04	0.83	0.68	18.78	14.20
0.3	50	100	1	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.05	5.04	4.10	22.64	16.70

续表 2.6 指数分布参数、设计值不偏性有效性计算成果

总体参数与样本组成				估计方法	EEX	ECV	SEX	SCV	Bxp1	Bxp2	Sxp1	Sxp2
CV0	N	n	a									
0.5	50	100	1	MOM	1.00	0.49	0.07	0.06	-1.17	-1.00	26.30	20.27
0.5	50	100	1	LM	1.00	0.50	0.07	0.05	0.19	0.18	24.96	19.49
0.5	50	100	1	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.07	0.05	1.20	1.04	25.64	19.97
0.5	50	100	1	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.07	0.08	6.14	5.30	31.33	23.77
1.0	50	100	1	MOM	1.00	0.99	0.13	0.12	-1.30	-1.18	39.41	31.34
1.0	50	100	1	LM	1.00	1.00	0.13	0.08	0.15	0.15	37.58	30.27
1.0	50	100	1	FIT(ABS)	1.00	1.02	0.13	0.08	1.29	1.19	38.69	31.10
1.0	50	100	1	FIT(OLS)	1.00	1.09	0.13	0.16	7.08	6.49	47.09	36.85
0.3	30	100	3	MOM	1.00	0.29	0.05	0.04	-1.47	-1.21	18.26	13.75
0.3	30	100	3	LM	1.00	0.30	0.05	0.04	0.05	0.02	18.81	14.32
0.3	30	100	3	FIT(ABS)	1.00	0.31	0.05	0.04	1.29	1.03	19.31	14.58
0.3	30	100	3	FIT(OLS)	1.00	0.33	0.05	0.06	5.37	4.34	23.24	16.97
0.5	30	100	3	MOM	1.00	0.49	0.08	0.06	-1.53	-1.31	25.64	19.91
0.5	30	100	3	LM	1.00	0.50	0.08	0.05	0.12	0.11	26.57	20.85
0.5	30	100	3	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.08	0.06	1.78	1.54	27.02	21.06
0.5	30	100	3	FIT(OLS)	1.00	0.55	0.08	0.10	6.71	5.78	32.58	24.52
1.0	30	100	3	MOM	1.00	0.99	0.16	0.14	-1.55	-1.42	38.93	31.15
1.0	30	100	3	LM	1.00	1.01	0.16	0.10	0.17	0.15	40.10	32.43
1.0	30	100	3	FIT(ABS)	1.00	1.03	0.16	0.12	2.21	2.02	41.10	32.97
1.0	30	100	3	FIT(OLS)	1.00	1.11	0.16	0.23	7.93	7.25	49.82	38.62
0.3	50	100	3	MOM	1.00	0.30	0.04	0.04	-0.92	-0.75	16.92	12.68
0.3	50	100	3	LM	1.00	0.30	0.04	0.03	0.22	0.18	16.14	12.27
0.3	50	100	3	FIT(ABS)	1.00	0.30	0.04	0.03	0.82	0.67	16.80	12.71
0.3	50	100	3	FIT(OLS)	1.00	0.32	0.04	0.05	4.71	3.83	20.73	15.23
0.5	50	100	3	MOM	1.00	0.49	0.06	0.06	-0.94	-0.81	23.82	18.36
0.5	50	100	3	LM	1.00	0.50	0.06	0.04	0.23	0.20	22.68	17.74
0.5	50	100	3	FIT(ABS)	1.00	0.51	0.06	0.05	1.08	0.92	23.43	18.27
0.5	50	100	3	FIT(OLS)	1.00	0.54	0.06	0.08	5.69	4.90	29.14	22.02
1.0	50	100	3	MOM	1.00	0.99	0.13	0.12	-1.07	-0.98	36.04	28.65
1.0	50	100	3	LM	1.00	1.00	0.13	0.08	0.17	0.15	34.32	27.68
1.0	50	100	3	FIT(ABS)	1.00	1.02	0.13	0.08	1.22	1.12	35.41	28.47
1.0	50	100	3	FIT(OLS)	1.00	1.08	0.13	0.17	6.52	5.97	44.09	34.36

注：MOM 表示矩法，L-M 表示线性矩法，FIT(ABS) 表示绝对值准则的适线法，FIT(OLS) 表示平方和准则的适线法。

2.3.3.4 统计试验结果分析

通过大量计算分析,可得出如下基本结论:

(1)对指数分布的连序样本和不连序样本来讲,无论是不偏性还是有效性,线性矩法均明显好于矩法和适线法。只是在样本容量较少的情况下,矩法的有效性优于其他方法,线性矩法与矩法接近。矩法的不偏性会出现偏小情况。总体上讲,线性矩法的统计特性要优于矩法和适线法。

(2)当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 a 相同时,随着 n 的增加,各种参数估算方法的不偏性、有效性均有所改善,并以有效性的改善最为明显。

(3)当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 n 、 a 相同时,随着 Cv_0 的减小,各种参数估算方法的不偏性、有效性均有所改善,并以有效性的改善最为明显。

(4)当 Ex_0 、 Cv_0 、 N 、 n 相同时,考虑历史洪水(暴雨)后,各种参数估算方法的不偏性没有得到改善,而有效性比不考虑历史洪水(暴雨)有明显改善,并且考虑的历史洪水(暴雨)越多,改善越明显。这说明,在设计洪水计算中,采用较长的洪水系列并考虑历史洪水(暴雨),可提高计算精度;同时, Cv 越大,抽样误差越大。

2.3.4 小结

本节在分析整理出基于指数分布线性矩及其参数的基础上,通过统计试验分析了该分布线性矩法的性能及历史洪水(暴雨)公式的适用性。同时,将线性矩法与两种不同准则的优化适线法、矩法作了比较。大量计算结果表明,线性矩法的参数及设计值具有较好的有效性。总体上讲,线性矩法是四种方法中最好的一种。

第三章 暴雨频率分布线型的优选

在上一章研究的基础上,本章采用统计特性优良的线性矩法作为暴雨序列的参数估计方法,将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择,对各流域不同历时的暴雨资料,采用国内外暴雨频率分析中最常用的4种线型进行计算拟合,并与国内常用的其他4种检验法进行分析比较,以期能得到相对最优的暴雨频率分布线型,来指导实际的工程规划设计工作。

3.1 研究资料的选择

本章主要选取了我国长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域、淮河流域、松辽河流域、浙闽台河流以及藏滇国际河流等流域总计126个测站的暴雨资料,所选历时有10min、20min、30min、45min、60min、90min、2h、3h、4h、6h、9h、12h、24h共13个时段。本章采用统计特性优良的线性矩法作为序列的参数估计方法,对各流域不同历时的暴雨资料采用国内外暴雨频率分析中最常用的四种线型进行计算拟合。将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择,分析了四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性,并与国内常用的其他4种检验法进行分析比较,统计各个流域暴雨的优势线型,同时分析暴雨线型的区域性。

收集到的实测暴雨资料数据基本情况参见表3.1。

表3.1 各流域暴雨序列情况表

珠江流域			藏滇国际河流		
序号	测站	年数	序号	测站	年数
1	宝安站	23	1	勐海站	21
2	惠阳站	23	2	甸头站	17
3	河源站	23	3	勐省站	17
4	连平站	23	4	清华农场	20
5	龙川站	23	5	炼城站	21
6	毛枝站	21	6	甸南站	17
7	东方站	23	7	金顶站	21
8	陵水站	23	8	龙潭寨	19
9	琼中站	23	9	忠爱桥	20
10	文昌站	21	10	麻木站	18
11	佒县站	22	11	董户村	21

续表 3.1 各流域暴雨序列情况表

海河流域			松辽流域		
序号	测站	年数	序号	测站	年数
1	阜城站	22	1	福利屯	25
2	杨柳青	20	2	鹤立站	27
3	第六堡	19	3	向阳山水库	20
4	献县站	20	4	倭肯站	25
5	衡水站	22	5	大盘道	22
6	艾辛庄	19	6	荒沟站	22
7	马村站	22	7	西桥站	25
8	黄北坪	22	8	长汀子	27
9	邢家湾	20	9	中和站	18
10	朱庄站	20	10	一面坡	26
11	路罗站	20	11	秦家站	25
12	临济关	20	12	龙凤山水库	25
13	徘徊站	20	13	沈家营	23
14	阎庄站	20	14	道河站	28
15	黄壁庄水库	24	15	保安站	16
16	地都站	22	16	宝清站	17
17	阳泉站	25	17	新城村	16
18	小觉站	22	18	梨树镇	18
19	会里站	23	19	穆棱站	23
20	南庄站	27	20	东风站	24
21	济胜桥	23	21	宁家屯	22
22	豆罗站	27	22	宋集屯水库	21
23	界河铺	27	23	西沟站	20
24	芦庄站	24	24	台安站	15
25	王家会	29	25	新民站	22
26	上苑站	21	26	铁岭站	22
淮河流域			浙闽台河流		
序号	测站	年数	序号	测站	年数
1	明光站	23	1	闸口站	26
2	蚌埠站	26	2	富阳站	26
3	佛子岭	23	3	桐庐站	26
4	白莲崖	25	4	屯溪站	26
5	磨子滩	25	5	兰溪站	26
6	鲇鱼山	27	6	金华站	26
7	梅山站	27	7	永康站	26
8	七邻站	25	8	衢县站	26
9	黄泥庄	25	9	常山站	26

续表 3.1 各流域暴雨序列情况表

长江流域			黄河流域		
序号	测站	年数	序号	测站	年数
1	箐口塘	20	1	河津站	23
2	鱼洞站	20	2	汾河水库	27
3	新华站	21	3	柴庄站	28
4	甸尾站	21	4	东庄站	27
5	小河站	22	5	石滩站	24
6	楚雄小河口	20	6	南关站	22
7	西河驿	22	7	义棠站	28
8	大同站	20	8	盘陀站	28
9	罗田站	21	9	芦家庄	28
10	麻城站	22	10	独堆站	28
11	东湖站	20	11	董茹站	28
12	通城站	23	12	兰村站	28
13	南京站	26	13	寨上站	27
14	青阳站	24	14	汾河水库	28
15	大通站	25	15	上静游	28
16	岳西站	24	16	静乐站	28
17	宿松站	25	17	岔上站	28

3.2 线型优选方法

3.2.1 概率点据相关系数检验法 (PPCC)

若一个待检样本的实际分布服从假设分布, 则排序后的观测值 $x(i)$ 与假设分布的理论值, 即 $x(i)$ 的统计均值 $y(i)$ 的概率点据存在近似线性关系。因此, 可将 PPCC 优选统计量定义为 $x(i)$ 与 $y(i)$ 之间的相关系数, 即

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - x_m)(y(i) - y_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x(i) - x_m)^2 \sum_{i=1}^n (y(i) - y_m)^2}} \quad (3.1)$$

式中, $x(i)$ 和 x_m 分别表示排序后的实测值和实测样本的均值; $y(i)$ 和 y_m 分别是假设分布相应于 x 的理论值和均值。

也就是说, PPCC 检验法是根据实测样本序列排序后各观测值 $x(i)$ 和经验频率 p_i 推求出假设分布上 p_i 对应的期望值 $y(i)$, 然后求两序列 $x(i)$ 、 $y(i)$ 的相关系数 r , 并按一定的检验准则判断是否拒绝假设分布。

3.2.2 拟优确定性系数检验法(QD)

确定性系数 QD 作为统计特征量来分析频率分布线型, 描述实测值 $x(i)$ 和假设分布理论值 $y(i)$ 的拟合程度, 定义为:

$$QD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x(i) - y(i))^2}{\sum_{i=1}^n (x(i) - x_m)^2} \quad (3.2)$$

3.2.3 拟优平方和准则法(RMSE)

一个具体的物理随机变量到底服从什么分布, 往往不能从物理分析中得到, 而只能通过观测资料的统计分析确定, 在讨论水文频率计算中, 要假定水文变量服从某一分布, 这些假定是否符合实际都需要检验。

本文采用的拟优平方和准则法, 其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x(i) - y(i))^2} \quad (3.3)$$

3.2.4 拟优绝对值准则法(MAE)

平均绝对误差 MAE 作为统计特征量来分析频率分布线型, 描述实测值 $x(i)$ 和假设分布理论值 $y(i)$ 的拟合程度, 定义为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x(i) - y(i)| \quad (3.4)$$

3.2.5 四阶线性矩检验法(TW4)

Hosking 等^[46]建议采用线性矩法进行分布线型的选择, 后来许多学者相继将该方法应用于洪水和枯水频率分析问题中, 且得到了不少富有成效的研究成果。Pandey 等人^[54]于 2001 年利用四阶线性矩系数 τ_4 来确定序列长度较短样本的分布函数的线型, 其判定原则是如果某个分布函数的 4 阶线性矩系数和样本的 4 阶线性矩系数之差的绝对值最小, 那么该分布函数即为最优的分布函数, 该方法已经被 Pandey 等人从理论和实际应用中加以论证。

本文将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择, 对我国长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域、淮河流域、松辽河流域、浙闽台河流以及藏滇国际河流等流域总计 126 个测站的暴雨资料进行拟合计算, 并与以上国内常用的

概率点据相关系数检验法(PPCC)、拟优确定性系数(QD)、拟优平方和准则法(RMSE)、拟优绝对值准则法(MAE) 4种检验方法等4种选优统计量进行了分析比较进行初步的研究,分析四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性,计算公式如下:

$$TW4 = |\tau_4 - t_4| \quad (3.5)$$

3.3 计算成果的比较与分析

3.3.1 计算成果

表 3.2 长江流域暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

长江流域			选优统计量									
序号	测站	年数	r		QD		RMSE		MAE		TW4	
			优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	箐口塘	20	P3	46.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	76.9	LN3	62.1
2	鱼洞站	20	LN3	46.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	69.8
3	新华站	21	P3	53.8	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	61.5	P3	52.5
4	甸尾站	21	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	48.6
5	小河站	22	EXP	53.8	EXP	69.2	EXP	69.2	EXP	61.5	EXP	52.5
6	楚雄小河口	20	LN3	53.8	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	84.6	LN3	46.7
7	西河驿	22	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	61.5	LN3	62.1
8	大同站	20	P3	38.5	EXP	69.2	EXP	69.2	EXP	53.8	EXP	46.7
9	罗田站	21	LN3	38.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	50.5
10	麻城站	22	LN3	30.8	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	61.5	P3	39.0
11	东湖站	20	LN3	61.5	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	92.3	LN3	54.4
12	通城站	23	LN3	61.5	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	100	LN3	64.0
13	南京站	26	P3	61.5	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	P3	67.8
14	青阳站	24	P3	61.5	LN3	100	LN3	100	LN3	84.6	LN3	75.5
15	大通站	25	LN3	46.2	LN3	69.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	60.2
16	岳西站	24	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	84.6	LN3	64.0
17	宿松站	25	LN3	61.5	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	100	LN3	64.0

注: r 为概率点据相关系数检验法, RMSE 为拟优平方和准则检验法, MAS 为拟优绝对值准则检验法, QD 为拟优确定性系数检验法, T4W 位四阶线性矩检验法。P3 表示皮尔逊III型分布, LN3 表示三参数对数正态分布, GUM 表示 Gumbel 分布, EXP 表示指数分布。“优势分布”表示在对应检验法下对应测站实测暴雨资料所符合的最好的分布线型,“时段比例”表示对应测站在 12 个时段中在对应检验法下表明“优势分布”为最好的时段的比例。

表 3.3 黄河流域暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

黄河流域			选优统计量									
序号	测站	年数	r		QD		RMSE		MAE		TW4	
			优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	河津站	23	EXP	38.5	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	61.5	LN3	37.1
2	浍河水库	27	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	65.9
3	柴庄站	28	LN3	53.8	EXP	53.8	EXP	53.8	LN3	61.5	EXP	54.8
4	东庄站	27	LN3	69.2	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	48.6
5	石滩站	24	LN3	53.8	EXP	69.2	EXP	69.2	LN3	76.9	EXP	56.3
6	南关站	22	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	65.9
7	义棠站	28	LN3	46.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	64.0
8	盘陀站	28	P3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	92.3	P3	68.2
9	芦家庄	28	LN3	69.2	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	56.3
10	独堆站	28	LN3	84.6	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	92.3	LN3	64.0
11	董茹站	28	LN3	76.9	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	84.6	LN3	75.5
12	兰村站	28	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	65.9
13	寨上站	27	LN3	53.8	LN3	100	LN3	100	LN3	84.6	LN3	73.6
14	汾河水库	28	LN3	69.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	53.8	EXP	52.8
15	上静游	28	LN3	38.5	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	100	LN3	58.2
16	静乐站	28	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	69.2	LN3	46.7
17	岔上站	28	LN3	53.8	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	100	LN3	65.9

表 3.4 珠江流域暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

珠江流域			选优统计量									
序号	测站	年数	r		QD		RMSE		MAE		TW4	
			优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	宝安站	23	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	100	LN3	53.8
2	惠阳站	23	LN3	69.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	76.9	LN3	61.5
3	河源站	23	LN3	69.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	38.5
4	连平站	23	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	69.2	LN3	53.8
5	龙川站	23	LN3	69.2	P3	61.5	P3	61.5	LN3	69.2	LN3	69.2
6	毛枝站	21	P3	53.8	LN3	100	LN3	100	LN3	100	LN3	76.9
7	东方站	23	LN3	61.5	EXP	53.8	EXP	53.8	LN3	61.5	LN3	61.5
8	陵水站	23	P3	38.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	53.8
9	琼中站	23	LN3	69.2	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	61.5
10	文昌站	21	LN3	46.2	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	84.6	LN3	84.6
11	佒县站	22	LN3	53.8	LN3	76.9	LN3	69.2	LN3	76.9	LN3	69.2

表 3.5 海河流域暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

海河流域			选优统计量									
序号	测站	年数	r		QD		RMSE		MAE		TW4	
			优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	阜城站	22	LN3	76.9	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	56.3
2	杨柳青	20	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	54.4
3	第六堡	19	P3	61.5	LN3	100	LN3	100	LN3	100	LN3	79.4
4	献县站	20	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	69.2	LN3	62.1
5	衡水站	22	P3	53.8	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	84.6	EXP	56.7
6	艾辛庄	19	LN3	69.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	100	LN3	77.5
7	马村站	22	LN3	84.6	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	76.9	LN3	56.3
8	黄北坪	22	P3	53.8	LN3	100	LN3	100	LN3	100	LN3	77.5
9	邢家湾	20	LN3	38.5	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	92.3	LN3	60.2
10	朱庄站	20	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	67.8
11	路罗站	20	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	46.2	LN3	58.2
12	临洛关	20	LN3	76.9	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	77.5
13	徘徊站	20	LN3	69.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	46.2	P3	60.9
14	阎庄站	20	LN3	69.2	LN3	100	LN3	100	LN3	84.6	LN3	77.5
15	黄壁庄	24	LN3	92.3	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	75.5
16	地都站	22	LN3	61.5	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	61.5	LN3	42.8
17	阳泉站	25	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	53.8	LN3	48.6
18	小觉站	22	LN3	53.8	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	71.7
19	会里站	23	LN3	46.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	69.2	P3	64.0
20	南庄站	27	LN3	61.5	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	73.6
21	济胜桥	23	LN3	46.2	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	46.2	LN3	42.8
22	豆罗站	27	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	65.9
23	界河铺	27	LN3	92.3	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	92.3	LN3	62.1
24	芦庄站	24	LN3	69.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	69.2	LN3	46.7
25	王家会	29	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	84.6	LN3	67.8
26	上苑站	21	LN3	38.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	76.9	EXP	48.6

表 3.6 淮河流域暴雨序列在不同检验法下优势测站线型分布情况

淮河流域			选优统计量									
序号	测站	年数	r		QD		RMSE		MAE		TW4	
			优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	明光站	23	LN3	38.5	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	92.3
2	蚌埠站	26	LN3	46.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	53.8	LN3	53.8
3	佛子岭	23	LN3	61.5	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	53.8	LN3	92.3
4	白莲崖	25	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	61.5
5	磨子滩	25	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	69.2
6	鲇鱼山	27	LN3	61.5	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	46.2
7	梅山站	27	LN3	53.8	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	69.2	EXP	61.5
8	七邻站	25	LN3	46.2	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	69.2	EXP	76.9
9	黄泥庄	25	LN3	69.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	100	LN3	69.2

表 3.7 松花江流域、辽河流域暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

松辽流域			选优统计量									
			r		QD		RMSE		MAE		TW4	
序号	测站	年数	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	福利屯	25	LN3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	65.9
2	鹤立站	27	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	53.8	LN3	60.2
3	向阳山	20	LN3	69.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	100	LN3	77.5
4	倭肯站	25	LN3	38.5	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	84.6	LN3	42.8
5	大盘道	22	LN3	61.5	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	76.9	LN3	46.7
6	荒沟站	22	LN3	46.2	EXP	38.5	EXP	38.5	LN3	53.8	EXP	33.2
7	西桥站	25	LN3	69.2	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	71.7
8	长汀子	27	LN3	69.2	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	69.2	LN3	62.1
9	中和站	18	P3	53.8	LN3	100	LN3	100	LN3	92.3	LN3	75.5
10	一面坡	26	P3	53.8	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	92.3	P3	60.2
11	秦家站	25	LN3	84.6	LN3	100	LN3	100	LN3	100	LN3	85.2
12	龙凤山	25	P3	53.8	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	100	LN3	73.6
13	沈家营	23	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	76.9	LN3	42.8
14	道河站	28	P3	69.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	84.6	LN3	73.6
15	保安站	16	LN3	61.5	EXP	92.3	EXP	92.3	EXP	53.8	EXP	64.0
16	宝清站	17	LN3	69.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	69.2	LN3	46.7
17	新城村	16	LN3	69.2	EXP	92.3	EXP	92.3	EXP	53.8	EXP	65.9
18	梨树镇	18	LN3	53.8	EXP	84.6	EXP	84.6	LN3	69.2	EXP	62.1
19	穆棱站	23	LN3	84.6	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	56.3
20	东风站	24	LN3	53.8	P3	53.8	P3	53.8	LN3	53.8	LN3	42.8
21	宁家屯	22	LN3	76.9	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	71.7
22	宋集屯	21	LN3	61.5	LN3	76.9	LN3	76.9	EXP	55.8	LN3	56.8
23	西沟站	20	P3	53.8	LN3	84.6	LN3	84.6	EXP	51.9	P3	57.7
24	台安站	15	P3	69.2	EXP	61.5	EXP	61.5	LN3	53.8	EXP	50.5
25	新民站	22	LN3	30.8	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	76.9	LN3	42.8
26	铁岭站	22	LN3	92.3	P3	69.2	P3	69.2	LN3	76.9	P3	65.9

表 3.8 浙闽台河流暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况

浙闽台河流			选优统计量									
			r		QD		RMSE		MAE		TW4	
序号	测站	年数	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	闸口站	26	EXP	38.5	EXP	61.5	EXP	61.5	EXP	53.8	P3	30.8
2	富阳站	26	LN3	46.2	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	76.9	LN3	61.5
3	桐庐站	26	P3	46.2	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	76.9	LN3	69.2
4	屯溪站	26	LN3	53.8	EXP	46.2	EXP	46.2	LN3	76.9	EXP	46.2
5	兰溪站	26	LN3	38.5	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	76.9	LN3	61.5
6	金华站	26	P3	46.2	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	84.6	LN3	61.5
7	永康站	26	LN3	84.6	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	76.9
8	衢县站	26	LN3	92.3	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	61.5
9	常山站	26	LN3	61.5	LN3	84.6	LN3	84.6	LN3	92.3	LN3	53.8

表 3.9 藏滇国际河流暴雨序列在不同检验法下测站优势线型分布情况表

藏滇国际河流			选优统计量									
			r		QD		RMSE		MAE		T4W	
序号	测站	年数	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)	优势线型	所占比例 (%)
1	勐海站	21	GUM	46.2	EXP	38.5	EXP	38.5	LN3	38.5	LN3	61.5
2	甸头站	17	P3	53.8	P3	38.5	P3	38.5	LN3	46.2	EXP	61.5
3	勐省站	17	P3	61.5	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	76.9	LN3	38.5
4	清华农场	20	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	53.8	LN3	69.2	LN3	53.8
5	炼城站	21	LN3	46.2	LN3	100	LN3	100	LN3	76.9	LN3	53.8
6	甸南站	17	P3	61.5	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	92.3	LN3	100
7	金顶站	21	LN3	46.2	LN3	76.9	LN3	76.9	LN3	53.8	LN3	69.2
8	龙潭寨	19	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	61.5	LN3	53.8	LN3	69.2
9	忠爱桥	20	LN3	30.8	LN3	69.2	LN3	69.2	LN3	76.9	LN3	69.2
10	麻木站	18	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	46.2	LN3	53.8	LN3	69.2
11	董户村	21	LN3	38.5	EXP	46.2	EXP	46.2	LN3	69.2	LN3	92.3

表 3.10 各流域暴雨序列不同检验法下流域优势线型分布情况

流域名称	优选统计量	测站个数	优势线型	优势线型的测站个数	优势线型所占比例 (%)	流域名称	优选统计量	测站个数	优势线型	优势线型的测站个数	优势线型所占比例 (%)
长江流域	r	17	LN3	12	70.6	黄河流域	r	17	LN3	15	88.2
	QD		LN3	15	88.2		QD		LN3	15	88.2
	RMSE		LN3	15	88.2		RMSE		LN3	15	88.2
	MAE		LN3	15	88.2		MAE		LN3	17	100
	T4W		LN3	12	70.6		T4W		LN3	13	76.5
海河流域	r	26	LN3	23	88.5	松辽流域	r	26	LN3	20	76.9
	QD		LN3	26	100		QD		LN3	19	73.1
	RMSE		LN3	26	100		RMSE		LN3	19	73.1
	MAE		LN3	26	100		MAE		LN3	22	84.6
	T4W		LN3	22	84.6		T4W		LN3	18	69.2
淮河流域	r	9	LN3	9	100	珠江流域	r	11	LN3	9	81.8
	QD		LN3	9	100		QD		LN3	9	81.8
	RMSE		LN3	9	100		RMSE		LN3	9	81.8
	MAE		LN3	9	100		MAE		LN3	11	100
	T4W		LN3	7	77.8		T4W		LN3	11	100
浙闽台河流	r	9	LN3	6	66.7	藏滇国际河流	r	11	LN3	7	63.6
	QD		LN3	7	77.8		QD		LN3	8	72.7
	RMSE		LN3	7	77.8		RMSE		LN3	8	72.7
	MAE		LN3	8	88.9		MAE		LN3	11	100
	T4W		LN3	7	77.8		T4W		LN3	10	90.9

表 3.11 各流域暴雨序列在 5 种检验法的结果相加统计下流域优势线型分布情况

流域名称	测站个数	优势线型	优势线型的测站个数	所占比例(%)
长江流域	17	LN3	14	82.4
黄河流域	17	LN3	13	77.8
海河流域	26	LN3	24	92.3
松辽流域	26	LN3	20	84.6
淮河流域	9	LN3	7	77.8
浙闽台河流	11	LN3	8	88.9
珠江流域	9	LN3	11	100
藏滇国际河流	11	LN3	8	72.7

3.3.2 计算成果比较与分析

本文将四阶线性矩检验法引入暴雨频率分布线型的选择，利用国内几个流域大量的实测暴雨资料，对国内外暴雨频率分析中最常用的 4 种线型进行计算拟合，分析四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性，并与国内常用的其他 4 种选优统计量得出的结果进行比较，得到如下结论：

(1) 线性矩法与其它参数估计方法相比具有优良的稳健性。因此，应用线性矩法对暴雨资料进行参数估计，所求参数及其设计值的不偏性和有效性就更好。由线性矩中的四阶线性矩(τ_4)作为判定准则进行我国暴雨分布线型的选择，结果更能反映当地暴雨的实际情况。

(2) 由表 3.2-表 3.9 的统计结果，可知四阶线性矩检验法检验及概率点据相关系数检验法(PPCC)、拟优确定性系数(QD)、拟优平方和准则法(RMSE)、拟优绝对值准则法(MAE) 4 种检验方法计算的结果均表明：在各个流域，三参数对数正态分布与实测暴雨资料拟合最好，为最优的暴雨频率分布线型；只有在极少个别测站，指数分布或 P-III 分布为最优的暴雨分布线型。

(3) 由表 3.2-表 3.9 可以得出：对于全部 126 个测站的暴雨资料，拟优确定性系数(QD)和拟优平方和准则法(RMSE)的检验结果完全相同。而四阶线性矩法检验的结果同这两种方法检验的结果基本一致，所以从另一个侧面也反映出四阶线性矩可以用于作为选择暴雨频率分布线型的准则。

(4) 由表 3.10 和表 3.11 的统计结果，可得到如下结论：在我国绝大多数地区，对于暴雨序列，三参数对数正态分布效果要比 P-III 更好，这跟国内以前的研究成果相一致。

(5) 四阶线性矩检验法作为选择暴雨频率分布线型的准则得出的结果与国内其他 4 种检验法得出的结果一致，很好地鉴别了暴雨资料的分布线型，四阶线性矩检验法可以作为检验暴雨频率分布线型选择的方法。

第四章 短历时暴雨公式类型的选择

4.1 研究资料的选择

本章主要选取了我国长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域、淮河流域、松辽河流域、浙闽台河流以及藏滇国际河流等流域总计 126 个测站的暴雨资料，所选历时为 10min、20min、30min、45min、60min、90min、120min 共 7 个时段。本章采用统计特性优良的线性矩法作为暴雨序列的参数估计方法，对各流域不同历时的暴雨资料采用上章研究得出的“优势线型”——三参数对数正态分布。

4.2 暴雨公式类型选择

在城市暴雨公式推求的过程中，暴雨公式的类型选择，也是很重要的一个环节，因为它直接影响着由频率分布规律所确定的 I-D-F 的规律性。关于公式的选择，应符合客观暴雨规律，同时要求公式类型在统计与应用上简易与方便。过去国内外许多学者对城市暴雨公式类型作了不少的研究，提出了许多类型，见表 4-1。

在这些公式中，美、英等国多采用公式 10，前苏联广泛选用公式 6，日本选用 4，而我国给排水设计手册和规范^[36]提到公式 4、公式 6 和公式 10 三个公式。

表 4-1 国内外常用单一重现期暴雨公式表

编号	公式型式	参数个数	当 $t=0$ 的强度值	极值
1	$i = \frac{A}{t}$	1	∞	$i(\infty) = 0$
2	$i = A - bt$	2	A	$i\left(\frac{A}{b}\right) = 0$
3	$i = A - b \cdot \ln t$	2		$i\left(e^{\frac{A}{b}}\right) = 0$
4	$i = \frac{A}{t+b}$	2	∞	$i(\infty) = 0$
5	$i = \sqrt{\frac{A}{t^a}}$	2	∞	$i(\infty) = 0$

续表 4-1 国内外常用单一重现期暴雨公式表

编号	公式型式	参数个数	当 t=0 的强度值	极值
6	$i = \frac{A}{t^n}$	2	∞	$i(\infty) = 0$
7	$i = \frac{A}{t} + b$	2	∞	$i(\infty) = 0$
8	$i = \frac{A}{\sqrt{t+b}}$	2	$\frac{A}{b}$	$i(\infty) = 0$
9	$i = \frac{A}{(b \cdot t + 1)^p}$	3	A	$i(\infty) = 0$
10	$i = \frac{A}{(t+b)^p}$	3	$\frac{A}{b^n}$	$i(\infty) = 0$

4.3 暴雨公式拟合方法

4.3.1 最小二乘法

对于变量 X 的 n 个观测值 x_1, x_2, \dots, x_n ，它们的平均值

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4-1)$$

是所要测定的变量 X 的最理想取值。

事实上，最理想的取值 X，应当使它与 n 个观察值的差的总和为最小。但考虑到 $(x - x_i), (i = 1, 2, \dots, n)$ 可能有正有负，如果直接地把它相加，势必使某些差的值相抵消，影响了偏离的真实性，这显然是不合理的。于是，人们想到了用 $(x - x_i)^2, (i = 1, 2, \dots, n)$ 来替代相应的差。这样一来，最理想的取值 X 应当使函数

$$\begin{aligned} y &= (x - x_1)^2 + (x - x_2)^2 + \dots + (x - x_n)^2 \\ &\dots = nx^2 - 2(\sum x_i)x + \sum x_i^2 \end{aligned} \quad (4-2)$$

取极小值。这是关于 X 的二次函数，易知当(4-1)成立时 y 取极小。同样的原理可以用于二维的情形，只是计算要稍为复杂一些，我们将要得到的结果，在数学上非常有名，叫做最小二乘法。它是德国数学家高斯，于公元 1795 年创立的。

现在假定我们观察到 n 个经验点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，如果我们认定这 n 个经验点 $M_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是对直线 $y = Ax + B$ 上的点在观测时的误差。那么，这些经验点 $M_i(x_i, y_i)$ 与直线上相应点 $N_i(x_i, Ax_i + B)$ 之间的以下变量

$$y = \sum [y_i - (Ax_i + B)]^2 \quad (4-3)$$

应当取极小值。

函数 y 显然可以写成 A 的二次函数

$$y = \left(\sum x_i^2 \right) A^2 - 2 \left[\sum x_i (y_i - B) \right] A + \sum (y_i - B)^2 \quad (4-4)$$

对 B 求导数，整理得：

$$\left(\sum x_i^2 \right) A + \left(\sum x_i \right) B = \sum x_i y_i \quad (4-5)$$

同理，函数 y 又可以写成 B 的二次函数，而当这一函数取极小值时，又得：

$$\left(\sum x_i \right) A + nB = \sum y_i \quad (4-6)$$

这样，由方程组

$$\begin{cases} \left(\sum x_i^2 \right) A + \left(\sum x_i \right) B = \sum x_i y_i \\ \left(\sum x_i \right) A + nB = \sum y_i \end{cases} \quad (4-7)$$

便可以确定参数 A 、 B 的值。

4.3.2 黄金分割搜索法

黄金分割搜索法具体步骤如下：

1、确定极小值所在区间：

任选区间初始点 a 和 b 后，按如下步骤计算：

①确定下降方向：计算 $f(a)$ 和 $f(b)$ 。

若 $f(a) > f(b)$ ，则下降方向为从 a 到 b ，沿 $a \rightarrow b$ 方向按黄金比率选取一点 c ，并计算 $f(c)$ ；

若 $f(a) \leq f(b)$ ，将点 a 和 b 位置进行交换，则此时下降方向仍是从 a 到 b ，沿此方向按黄金比率选取 c ，并计算 $f(c)$ ；

②若 $f(b) < f(c)$ ，则 $[a, c]$ 即为所求区间，计算结束；

若 $f(b) \geq f(c)$ ，由 $(a, f(a))$ ， $(b, f(b))$ ， $(c, f(c))$ 进行二次插值，求其极小值点 u 及 $u_{lim} = b + 1.618034(c - b)$ 。

③若 u 在 b 和 c 之间，计算 $f(u)$ ，并做出判断：

若 $f(u) \leq f(c)$ ，则 $[b, c]$ 即为所求区间，计算结束；

若 $f(u) > f(b)$ ，则 $[a, u]$ 即为所求区间，计算结束；

若上面两条均不满足，则用黄金比率重新选点 $u = c + 1.618034(c - b)$ ，并计算 $f(u)$ 。

④当 u 在 c 和 u_{lim} 之间时, 若 $f(u) > f(c)$, 则极小值点所在区间即为 $[b, u]$, 结束; 若 $f(u) \leq f(c)$, 则去掉离对应的极小值点最远的点, 此时显然为 a , 将 c 和 u 看作新的 b, c , 计算 $u=c+1.618034(c-b)$ 及 $f(u)$, 把此时的 b, c, u 记为新的 a, b, c , 转到②。

2、黄金分割法求满足精度要求的极小值

设已知初始三点 a, b, c , 且 $f(b) < f(a), f(b) < f(c)$, b 在 a 和 c 之间, 不妨设 $a < b < c$ 。

①在 (a, c) 中按黄金比率在选择一点 $d \neq b$, 且若 $b-a > c-b$, 则将点 d 选在 (a, b) 中, 否则选在 (b, c) 中, 此时为说明算法, 不妨设 $b-a > c-b$, 则 d 在 (a, b) 中, 计算 $f(b), f(d)$, 转到②。

②检验区间长度是否已很小, 即若

$$\frac{|c-a|}{|b+d|} < \varepsilon$$

则转到④, 否则转到③。

③若 $f(b) < f(d)$, 将 d, b, c 分别看作一组新的 a, b, c , 转到①, 否则, 将 a, d, b 分别看作一组新的 a, b, c 。

④若 $f(b) < f(d)$, 则将 $f(b)$ 看作极小值的近似值, b 为极小值点, 否则将 d 作为极小值点, $f(d)$ 作为极小值点。

4.4 计算成果的比较与分析

4.4.1 计算结果的评价方法

绝对均方差 σ_1 按下式计算:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum (i_g - i_j)}{M}} \quad (4-8)$$

相对均方差 σ_2 按下式计算:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum ((i_g - i_j) / i_g)}{M}} \quad (4-9)$$

式中: i_g —— $i-d-f$ 表中的暴雨强度值, mm/min;

i_j ——按所推求的总公式计算出的暴雨强度值, mm/min;

M ——降雨历时的项数。

4.4.2 暴雨公式拟合方法精度检验

本文采用国内一些文献中的数据资料进行暴雨公式拟合,资料采用计算降雨5、10、15、20、30、45、60、90、120min共九个历时,结果如下:

表 4-2 利用部分文献中的数据拟合公式 10 的结果

文献资料	重现期	n	A	b	绝对均方差	相对均方差
文献[52] 资料	200	0.6376	27.6059	8.2698	0.0014	0.0006
	100	0.6368	25.0394	8.2064	0.0024	0.0010
	50	0.6300	21.9204	7.9292	0.0027	0.0012
	20	0.6344	19.1728	8.0842	0.0033	0.0023
	10	0.6343	16.7751	8.1092	0.0026	0.0024
	5	0.6169	13.1593	6.8272	0.0071	0.0047
	2	0.6289	10.9405	7.9127	0.0021	0.0024
	平均				0.0031	0.0021
文献[53] 资料	200	0.7316	42.1128	12.6789	0.0021	0.0009
	100	0.7243	36.1933	11.9658	0.0321	0.0168
	50	0.7032	29.4204	11.1940	0.0267	0.0096
	20	0.7320	27.4215	10.0364	0.0025	0.0017
	10	0.7270	23.0328	9.9095	0.0020	0.0011
	5	0.7389	20.1492	10.3458	0.0020	0.0014
	2	0.7224	13.7186	9.7773	0.0017	0.0030
	平均				0.0099	0.0049
文献[51] 资料	100	0.5628	14.7316	7.6633	0.0687	0.0349
	50	0.5776	14.2905	7.9975	0.0550	0.0316
	20	0.5898	13.0710	8.0274	0.0460	0.0301
	10	0.6140	12.9067	8.6939	0.0392	0.0287
	5	0.6289	11.9165	8.6491	0.0301	0.0261
	2	0.6700	11.4567	9.2803	0.0193	0.0196
	平均				0.0431	0.0285

《室外排水设计规范》^[30]规定重现期在0.25年~10年的平均绝对均方差不易大于0.05mm/min,在较大强度的地方,平均相对均方差不易大于5%。由表1中的计算结果可以看出按三种优化准则的计算方法对文献[51][52][53]中提供的暴雨资料拟合暴雨公式的精度全部符合要求,尤其是按文献[52][53]中的暴雨资料拟合的精度远远好于规范中所要求的精度。

4.4.3 计算成果

本文对各流域126个测站的暴雨资料采用黄金分割法和最小二乘法进行暴雨公式参数的拟合选优,现将各流域部分暴雨资料的拟合结果列于表4-3。

表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		长江流域						黄河流域					
测站名称		新华站		小河站		青阳站		东庄站		静乐站		岔上站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式一	200	1.481	0.463	1.876	0.595	1.145	0.377	1.699	0.550	0.979	0.441	0.678	0.316
	100	1.360	0.461	1.625	0.574	1.105	0.392	1.501	0.530	0.841	0.411	0.654	0.335
	50	1.241	0.460	1.393	0.553	1.058	0.407	1.310	0.509	0.722	0.387	0.626	0.354
	20	1.087	0.459	1.115	0.524	0.983	0.426	1.066	0.477	0.579	0.358	0.580	0.383
	10	0.970	0.460	0.924	0.499	0.914	0.437	0.887	0.449	0.478	0.336	0.536	0.406
	5	0.850	0.464	0.746	0.472	0.828	0.444	0.709	0.416	0.381	0.313	0.481	0.430
	2	0.673	0.478	0.521	0.427	0.663	0.434	0.458	0.357	0.255	0.285	0.371	0.457
	平均	1.094	0.464	1.171	0.521	0.956	0.417	1.090	0.470	0.605	0.362	0.561	0.383
公式二	200	0.358	0.217	0.224	0.124	0.384	0.269	0.216	0.144	0.229	0.204	0.332	0.356
	100	0.326	0.213	0.221	0.135	0.345	0.258	0.212	0.157	0.223	0.224	0.294	0.330
	50	0.255	0.204	0.204	0.165	0.267	0.236	0.199	0.193	0.207	0.281	0.211	0.273
	20	0.255	0.204	0.204	0.165	0.267	0.236	0.199	0.193	0.207	0.281	0.211	0.273
	10	0.225	0.200	0.193	0.180	0.237	0.230	0.191	0.214	0.196	0.308	0.177	0.249
	5	0.193	0.196	0.178	0.197	0.211	0.226	0.182	0.238	0.180	0.336	0.145	0.227
	2	0.145	0.188	0.149	0.224	0.179	0.234	0.165	0.287	0.146	0.373	0.103	0.206
	平均	0.251	0.203	0.196	0.170	0.270	0.242	0.195	0.204	0.198	0.287	0.210	0.273
公式三	200	0.092	0.065	0.062	0.025	0.101	0.093	0.089	0.044	0.036	0.036	0.124	0.170
	100	0.075	0.059	0.035	0.015	0.085	0.085	0.074	0.040	0.037	0.043	0.105	0.152
	50	0.046	0.046	0.026	0.025	0.058	0.070	0.043	0.035	0.054	0.093	0.070	0.111
	20	0.046	0.046	0.026	0.025	0.058	0.070	0.043	0.035	0.054	0.093	0.070	0.111
	10	0.037	0.042	0.035	0.038	0.050	0.067	0.035	0.041	0.059	0.119	0.058	0.095
	5	0.031	0.039	0.041	0.052	0.045	0.066	0.032	0.055	0.061	0.146	0.047	0.082
	2	0.022	0.036	0.041	0.069	0.043	0.073	0.042	0.098	0.057	0.183	0.036	0.074
	平均	0.050	0.048	0.038	0.036	0.063	0.075	0.051	0.050	0.051	0.102	0.073	0.114
公式四	200	0.060	0.040	0.030	0.016	0.043	0.031	0.078	0.044	0.032	0.030	0.045	0.063
	100	0.043	0.032	0.016	0.011	0.034	0.028	0.067	0.041	0.024	0.028	0.038	0.057
	50	0.031	0.025	0.019	0.013	0.026	0.026	0.057	0.038	0.016	0.020	0.034	0.053
	20	0.022	0.017	0.030	0.022	0.019	0.024	0.044	0.034	0.010	0.013	0.035	0.050
	10	0.021	0.015	0.034	0.030	0.017	0.023	0.033	0.028	0.012	0.021	0.053	0.071
	5	0.021	0.017	0.035	0.035	0.016	0.024	0.021	0.021	0.014	0.034	0.037	0.053
	2	0.018	0.018	0.028	0.035	0.017	0.029	0.005	0.011	0.015	0.052	0.034	0.063
	平均	0.031	0.023	0.028	0.023	0.025	0.026	0.043	0.031	0.018	0.028	0.039	0.058
公式五	200	0.163	0.063	0.206	0.084	0.139	0.062	0.265	0.111	0.132	0.086	0.085	0.049
	100	0.145	0.061	0.163	0.075	0.132	0.062	0.240	0.109	0.122	0.087	0.068	0.041
	50	0.129	0.060	0.127	0.066	0.125	0.061	0.214	0.106	0.105	0.079	0.053	0.034
	20	0.110	0.060	0.088	0.056	0.113	0.060	0.179	0.101	0.080	0.063	0.036	0.027
	10	0.096	0.061	0.065	0.049	0.103	0.059	0.151	0.095	0.063	0.052	0.027	0.027
	5	0.083	0.062	0.049	0.043	0.091	0.057	0.119	0.087	0.047	0.043	0.020	0.029
	2	0.062	0.061	0.037	0.045	0.069	0.052	0.065	0.062	0.026	0.033	0.014	0.033
	平均	0.112	0.061	0.105	0.060	0.110	0.059	0.176	0.096	0.082	0.063	0.043	0.034

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		长江流域						黄河流域					
测站名称		新华站		小河站		青阳站		东庄站		静乐站		岔上站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式六	200	0.163	0.063	0.206	0.084	0.139	0.062	0.265	0.111	0.132	0.086	0.085	0.049
	100	0.145	0.061	0.163	0.075	0.132	0.062	0.240	0.109	0.122	0.087	0.068	0.041
	50	0.129	0.060	0.127	0.066	0.125	0.061	0.214	0.106	0.105	0.079	0.053	0.034
	20	0.110	0.060	0.088	0.056	0.113	0.060	0.179	0.101	0.080	0.063	0.036	0.027
	10	0.096	0.061	0.065	0.049	0.103	0.059	0.151	0.095	0.063	0.052	0.027	0.027
	5	0.083	0.062	0.049	0.043	0.091	0.057	0.119	0.087	0.047	0.043	0.020	0.029
	2	0.062	0.061	0.037	0.045	0.069	0.052	0.065	0.062	0.026	0.033	0.014	0.033
	平均	0.112	0.061	0.105	0.060	0.110	0.059	0.176	0.096	0.082	0.063	0.043	0.034
公式七	200	1.481	0.463	1.876	0.595	1.145	0.377	1.699	0.550	0.979	0.441	0.678	0.316
	100	1.360	0.461	1.625	0.574	1.105	0.392	1.501	0.530	0.841	0.411	0.654	0.335
	50	1.241	0.460	1.393	0.553	1.058	0.407	1.310	0.509	0.722	0.387	0.626	0.354
	20	1.087	0.459	1.115	0.524	0.983	0.426	1.066	0.477	0.579	0.358	0.580	0.383
	10	0.970	0.460	0.924	0.499	0.914	0.437	0.887	0.449	0.478	0.336	0.536	0.406
	5	0.850	0.464	0.746	0.472	0.828	0.444	0.709	0.416	0.381	0.313	0.481	0.430
	2	0.673	0.478	0.521	0.427	0.663	0.434	0.458	0.357	0.255	0.285	0.371	0.457
	平均	1.094	0.464	1.171	0.521	0.956	0.417	1.090	0.470	0.605	0.362	0.561	0.383
公式八	200	0.137	0.073	0.149	0.084	0.125	0.087	0.200	0.121	0.103	0.105	0.100	0.073
	100	0.120	0.072	0.117	0.075	0.116	0.084	0.182	0.121	0.098	0.112	0.079	0.064
	50	0.104	0.072	0.090	0.067	0.108	0.082	0.164	0.121	0.088	0.108	0.060	0.056
	20	0.087	0.072	0.063	0.058	0.096	0.078	0.140	0.120	0.073	0.095	0.039	0.047
	10	0.075	0.073	0.047	0.053	0.086	0.075	0.120	0.117	0.063	0.087	0.026	0.041
	5	0.064	0.074	0.037	0.050	0.076	0.071	0.097	0.112	0.052	0.079	0.018	0.039
	2	0.047	0.070	0.031	0.058	0.059	0.067	0.060	0.094	0.035	0.068	0.012	0.036
	平均	0.090	0.072	0.076	0.064	0.095	0.078	0.138	0.115	0.073	0.093	0.048	0.051
公式九	200	0.056	0.033	0.023	0.012	0.037	0.028	0.033	0.020	0.032	0.028	0.045	0.046
	100	0.038	0.025	0.016	0.011	0.029	0.024	0.027	0.019	0.025	0.025	0.031	0.035
	50	0.023	0.017	0.013	0.011	0.022	0.021	0.022	0.019	0.016	0.019	0.019	0.024
	20	0.009	0.009	0.011	0.011	0.016	0.018	0.017	0.018	0.009	0.011	0.006	0.009
	10	0.009	0.009	0.010	0.012	0.014	0.017	0.014	0.017	0.010	0.012	0.004	0.005
	5	0.012	0.012	0.010	0.013	0.013	0.016	0.010	0.015	0.012	0.020	0.010	0.016
	2	0.011	0.013	0.012	0.017	0.012	0.015	0.005	0.009	0.011	0.027	0.012	0.028
	平均	0.022	0.017	0.013	0.012	0.020	0.020	0.018	0.017	0.017	0.020	0.018	0.023
公式十	200	0.056	0.033	0.023	0.012	0.037	0.028	0.033	0.020	0.032	0.028	0.045	0.046
	100	0.038	0.025	0.016	0.011	0.029	0.024	0.027	0.019	0.025	0.025	0.031	0.035
	50	0.023	0.017	0.013	0.011	0.022	0.021	0.022	0.019	0.016	0.019	0.019	0.024
	20	0.009	0.009	0.011	0.011	0.016	0.018	0.017	0.018	0.009	0.011	0.006	0.009
	10	0.009	0.009	0.010	0.012	0.014	0.017	0.014	0.017	0.010	0.012	0.004	0.005
	5	0.012	0.012	0.010	0.013	0.013	0.016	0.010	0.015	0.012	0.020	0.010	0.016
	2	0.011	0.013	0.012	0.017	0.012	0.015	0.005	0.009	0.011	0.027	0.012	0.028
	平均	0.022	0.017	0.013	0.012	0.020	0.020	0.018	0.017	0.017	0.020	0.018	0.023

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		海河流域						松辽流域					
测站名称		黄北坪		邢家湾		上苑站		荒沟站		长汀子		保安站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式一	200	1.350	0.495	1.802	0.497	0.811	0.399	0.711	0.352	0.732	0.326	1.063	0.234
	100	1.263	0.489	1.650	0.492	0.746	0.391	0.657	0.343	0.673	0.316	0.957	0.233
	50	1.171	0.482	1.496	0.486	0.681	0.383	0.601	0.335	0.614	0.305	0.855	0.234
	20	1.042	0.472	1.290	0.478	0.594	0.373	0.524	0.323	0.535	0.290	0.725	0.239
	10	0.936	0.462	1.127	0.471	0.527	0.365	0.462	0.313	0.473	0.278	0.627	0.248
	5	0.815	0.450	0.954	0.462	0.456	0.356	0.395	0.304	0.407	0.267	0.528	0.264
	2	0.610	0.422	0.682	0.445	0.347	0.341	0.288	0.290	0.305	0.252	0.382	0.315
	平均	1.027	0.467	1.286	0.476	0.595	0.373	0.520	0.323	0.534	0.290	0.734	0.252
公式二	200	0.283	0.187	0.447	0.227	0.256	0.292	0.282	0.316	0.323	0.320	0.781	0.427
	100	0.267	0.189	0.402	0.221	0.241	0.288	0.271	0.319	0.308	0.329	0.675	0.425
	50	0.230	0.197	0.305	0.210	0.209	0.283	0.239	0.329	0.270	0.352	0.449	0.414
	20	0.230	0.197	0.305	0.210	0.209	0.283	0.239	0.329	0.270	0.352	0.449	0.414
	10	0.213	0.203	0.264	0.206	0.195	0.284	0.222	0.334	0.250	0.364	0.359	0.403
	5	0.195	0.211	0.224	0.204	0.179	0.287	0.201	0.341	0.227	0.378	0.273	0.384
	2	0.163	0.234	0.167	0.207	0.152	0.297	0.158	0.351	0.186	0.397	0.156	0.324
	平均	0.226	0.203	0.302	0.212	0.206	0.288	0.230	0.331	0.262	0.356	0.449	0.399
公式三	200	0.078	0.045	0.155	0.096	0.093	0.115	0.097	0.133	0.108	0.134	0.317	0.220
	100	0.065	0.042	0.127	0.086	0.079	0.110	0.092	0.135	0.101	0.137	0.259	0.210
	50	0.041	0.041	0.073	0.065	0.060	0.105	0.083	0.143	0.087	0.148	0.147	0.179
	20	0.041	0.041	0.073	0.065	0.060	0.105	0.083	0.143	0.087	0.148	0.147	0.179
	10	0.035	0.043	0.055	0.057	0.058	0.107	0.079	0.148	0.082	0.154	0.108	0.163
	5	0.032	0.047	0.042	0.050	0.058	0.113	0.074	0.155	0.076	0.163	0.075	0.144
	2	0.032	0.063	0.031	0.047	0.056	0.128	0.061	0.164	0.065	0.180	0.039	0.109
	平均	0.046	0.046	0.079	0.067	0.066	0.112	0.081	0.146	0.087	0.152	0.156	0.172
公式四	200	0.065	0.034	0.125	0.079	0.073	0.065	0.053	0.060	0.033	0.034	0.058	0.040
	100	0.051	0.029	0.098	0.068	0.053	0.055	0.044	0.055	0.024	0.028	0.039	0.026
	50	0.038	0.023	0.074	0.056	0.036	0.044	0.036	0.050	0.016	0.022	0.034	0.017
	20	0.023	0.016	0.047	0.041	0.021	0.034	0.028	0.045	0.009	0.016	0.040	0.021
	10	0.013	0.011	0.033	0.030	0.019	0.031	0.024	0.042	0.009	0.015	0.042	0.030
	5	0.007	0.009	0.025	0.022	0.023	0.035	0.021	0.040	0.010	0.015	0.038	0.036
	2	0.008	0.012	0.022	0.020	0.027	0.047	0.019	0.040	0.009	0.018	0.013	0.020
	平均	0.029	0.019	0.061	0.045	0.036	0.044	0.032	0.047	0.016	0.021	0.038	0.027
公式五	200	0.151	0.068	0.137	0.048	0.149	0.087	0.109	0.069	0.087	0.046	0.140	0.034
	100	0.139	0.066	0.123	0.043	0.124	0.077	0.094	0.063	0.086	0.048	0.159	0.043
	50	0.127	0.065	0.112	0.041	0.100	0.067	0.080	0.057	0.084	0.050	0.172	0.054
	20	0.113	0.065	0.102	0.043	0.072	0.053	0.063	0.048	0.081	0.054	0.175	0.070
	10	0.103	0.064	0.096	0.048	0.053	0.044	0.050	0.041	0.077	0.056	0.164	0.081
	5	0.093	0.065	0.089	0.056	0.038	0.037	0.037	0.035	0.070	0.058	0.141	0.089
	2	0.077	0.066	0.070	0.065	0.021	0.031	0.022	0.028	0.053	0.054	0.077	0.080
	平均	0.115	0.065	0.104	0.049	0.080	0.057	0.065	0.049	0.077	0.052	0.147	0.064

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		海河流域						松辽流域					
测站名称		黄北坪		邢家湾		上苑站		荒沟站		长汀子		保安站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式六	200	0.151	0.068	0.137	0.048	0.149	0.087	0.109	0.069	0.087	0.046	0.140	0.034
	100	0.139	0.066	0.123	0.043	0.124	0.077	0.094	0.063	0.086	0.048	0.159	0.043
	50	0.127	0.065	0.112	0.041	0.100	0.067	0.080	0.057	0.084	0.050	0.172	0.054
	20	0.113	0.065	0.102	0.043	0.072	0.053	0.063	0.048	0.081	0.054	0.175	0.070
	10	0.103	0.064	0.096	0.048	0.053	0.044	0.050	0.041	0.077	0.056	0.164	0.081
	5	0.093	0.065	0.089	0.056	0.038	0.037	0.037	0.035	0.070	0.058	0.141	0.089
	2	0.077	0.066	0.070	0.065	0.021	0.031	0.022	0.028	0.053	0.054	0.077	0.080
	平均	0.115	0.065	0.104	0.049	0.080	0.057	0.065	0.049	0.077	0.052	0.147	0.064
公式七	200	1.350	0.495	1.802	0.497	0.811	0.399	0.711	0.352	0.732	0.326	1.063	0.234
	100	1.263	0.489	1.650	0.492	0.746	0.391	0.657	0.343	0.673	0.316	0.957	0.233
	50	1.171	0.482	1.496	0.486	0.681	0.383	0.601	0.335	0.614	0.305	0.855	0.234
	20	1.042	0.472	1.290	0.478	0.594	0.373	0.524	0.323	0.535	0.290	0.725	0.239
	10	0.936	0.462	1.127	0.471	0.527	0.365	0.462	0.313	0.473	0.278	0.627	0.248
	5	0.815	0.450	0.954	0.462	0.456	0.356	0.395	0.304	0.407	0.267	0.528	0.264
	2	0.610	0.422	0.682	0.445	0.347	0.341	0.288	0.290	0.305	0.252	0.382	0.315
	平均	1.027	0.467	1.286	0.476	0.595	0.373	0.520	0.323	0.534	0.290	0.734	0.252
公式八	200	0.124	0.075	0.127	0.049	0.138	0.107	0.109	0.094	0.093	0.079	0.204	0.086
	100	0.112	0.075	0.110	0.045	0.115	0.098	0.096	0.089	0.090	0.085	0.203	0.100
	50	0.101	0.075	0.096	0.044	0.093	0.089	0.084	0.085	0.088	0.091	0.197	0.116
	20	0.089	0.076	0.084	0.049	0.068	0.078	0.069	0.079	0.085	0.100	0.180	0.135
	10	0.081	0.077	0.076	0.057	0.052	0.071	0.057	0.075	0.080	0.105	0.160	0.147
	5	0.074	0.080	0.070	0.067	0.039	0.064	0.046	0.072	0.074	0.110	0.131	0.152
	2	0.064	0.085	0.055	0.080	0.025	0.058	0.031	0.069	0.059	0.109	0.070	0.127
	平均	0.092	0.077	0.088	0.056	0.076	0.081	0.070	0.080	0.081	0.097	0.163	0.123
公式九	200	0.063	0.030	0.095	0.048	0.072	0.068	0.054	0.055	0.026	0.020	0.053	0.024
	100	0.048	0.025	0.070	0.038	0.054	0.055	0.044	0.048	0.019	0.017	0.042	0.021
	50	0.035	0.019	0.048	0.029	0.037	0.042	0.035	0.041	0.013	0.015	0.033	0.018
	20	0.019	0.012	0.023	0.017	0.019	0.024	0.024	0.032	0.008	0.013	0.023	0.015
	10	0.009	0.006	0.011	0.010	0.008	0.012	0.016	0.024	0.009	0.013	0.018	0.014
	5	0.001	0.001	0.012	0.011	0.003	0.004	0.009	0.015	0.010	0.015	0.013	0.013
	2	0.008	0.010	0.017	0.019	0.008	0.016	0.002	0.005	0.009	0.017	0.005	0.009
	平均	0.026	0.015	0.039	0.025	0.029	0.031	0.026	0.031	0.013	0.016	0.027	0.016
公式十	200	0.063	0.030	0.095	0.048	0.072	0.068	0.054	0.055	0.026	0.020	0.053	0.024
	100	0.048	0.025	0.070	0.038	0.054	0.055	0.044	0.048	0.019	0.017	0.042	0.021
	50	0.035	0.019	0.048	0.029	0.037	0.042	0.035	0.041	0.013	0.015	0.033	0.018
	20	0.019	0.012	0.023	0.017	0.019	0.024	0.024	0.032	0.008	0.013	0.023	0.015
	10	0.009	0.006	0.011	0.010	0.008	0.012	0.016	0.024	0.009	0.013	0.018	0.014
	5	0.001	0.001	0.012	0.011	0.003	0.004	0.009	0.015	0.010	0.015	0.013	0.013
	2	0.008	0.010	0.017	0.019	0.008	0.016	0.002	0.005	0.009	0.017	0.005	0.009
	平均	0.026	0.015	0.039	0.025	0.029	0.031	0.026	0.031	0.013	0.016	0.027	0.016

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		淮河流域						珠江流域					
测站名称		蚌埠站		白莲崖		黄泥庄		宝安站		东方站		陵水站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式一	200	1.149	0.313	1.545	0.587	1.651	0.516	2.589	0.878	2.575	0.854	2.286	0.683
	100	1.096	0.325	1.433	0.590	1.563	0.521	2.306	0.817	2.345	0.819	2.112	0.674
	50	1.048	0.342	1.321	0.592	1.469	0.526	2.033	0.756	2.115	0.782	1.934	0.662
	20	0.977	0.366	1.172	0.595	1.333	0.532	1.688	0.676	1.807	0.728	1.687	0.642
	10	0.915	0.388	1.057	0.595	1.217	0.534	1.437	0.615	1.565	0.682	1.487	0.620
	5	0.840	0.414	0.935	0.592	1.083	0.533	1.190	0.555	1.309	0.629	1.265	0.589
	2	0.704	0.462	0.746	0.578	0.846	0.518	0.857	0.477	0.912	0.536	0.898	0.512
	平均	0.961	0.373	1.173	0.590	1.309	0.526	1.729	0.682	1.804	0.718	1.667	0.626
公式二	200	0.487	0.318	0.256	0.180	0.290	0.185	0.121	0.047	0.292	0.118	0.290	0.116
	100	0.442	0.307	0.230	0.170	0.268	0.179	0.134	0.058	0.266	0.116	0.265	0.115
	50	0.337	0.270	0.178	0.150	0.222	0.168	0.170	0.097	0.214	0.116	0.217	0.117
	20	0.337	0.270	0.178	0.150	0.222	0.168	0.170	0.097	0.214	0.116	0.217	0.117
	10	0.292	0.253	0.158	0.144	0.203	0.164	0.184	0.121	0.194	0.120	0.200	0.122
	5	0.244	0.234	0.140	0.140	0.184	0.162	0.195	0.149	0.175	0.130	0.187	0.132
	2	0.172	0.203	0.114	0.143	0.159	0.168	0.200	0.197	0.150	0.160	0.177	0.170
	平均	0.330	0.265	0.179	0.154	0.221	0.170	0.167	0.110	0.215	0.125	0.222	0.127
公式三	200	0.129	0.111	0.102	0.071	0.073	0.053	0.054	0.025	0.183	0.080	0.077	0.033
	100	0.115	0.106	0.077	0.059	0.062	0.047	0.041	0.021	0.143	0.068	0.061	0.028
	50	0.085	0.087	0.036	0.035	0.038	0.033	0.011	0.007	0.066	0.041	0.034	0.019
	20	0.085	0.087	0.036	0.035	0.038	0.033	0.011	0.007	0.066	0.041	0.034	0.019
	10	0.072	0.078	0.026	0.028	0.028	0.027	0.007	0.006	0.042	0.031	0.026	0.016
	5	0.059	0.069	0.019	0.023	0.019	0.023	0.022	0.020	0.025	0.022	0.023	0.016
	2	0.038	0.053	0.014	0.020	0.021	0.027	0.044	0.053	0.019	0.020	0.030	0.032
	平均	0.083	0.084	0.044	0.039	0.040	0.035	0.027	0.020	0.078	0.043	0.041	0.024
公式四	200	0.027	0.020	0.088	0.067	0.053	0.039	0.072	0.028	0.260	0.109	0.147	0.064
	100	0.025	0.021	0.068	0.057	0.042	0.033	0.063	0.026	0.218	0.101	0.125	0.058
	50	0.022	0.016	0.053	0.049	0.032	0.027	0.055	0.025	0.177	0.091	0.104	0.051
	20	0.024	0.015	0.041	0.041	0.019	0.019	0.046	0.024	0.123	0.074	0.080	0.044
	10	0.028	0.018	0.036	0.037	0.012	0.014	0.040	0.024	0.084	0.058	0.064	0.038
	5	0.031	0.023	0.032	0.035	0.013	0.012	0.036	0.025	0.047	0.039	0.050	0.033
	2	0.030	0.031	0.023	0.029	0.025	0.023	0.036	0.035	0.007	0.007	0.035	0.030
	平均	0.027	0.020	0.048	0.045	0.028	0.024	0.050	0.027	0.131	0.069	0.086	0.045
公式五	200	0.201	0.075	0.155	0.070	0.220	0.087	0.081	0.036	0.163	0.069	0.034	0.017
	100	0.179	0.073	0.126	0.061	0.199	0.083	0.083	0.039	0.116	0.054	0.041	0.021
	50	0.154	0.068	0.101	0.052	0.178	0.079	0.086	0.043	0.072	0.037	0.050	0.027
	20	0.122	0.062	0.076	0.044	0.149	0.074	0.089	0.048	0.029	0.017	0.061	0.035
	10	0.099	0.057	0.063	0.041	0.127	0.069	0.088	0.051	0.036	0.017	0.066	0.041
	5	0.079	0.053	0.054	0.042	0.103	0.064	0.083	0.052	0.064	0.036	0.069	0.047
	2	0.053	0.048	0.048	0.048	0.065	0.054	0.060	0.043	0.093	0.069	0.062	0.050
	平均	0.127	0.062	0.089	0.051	0.149	0.073	0.081	0.045	0.082	0.043	0.055	0.034

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		淮河流域						珠江流域					
测站名称		蚌埠站		白莲崖		黄泥庄		宝安站		东方站		陵水站	
公式	重现期	DT1	DT2										
公式六	200	0.201	0.075	0.155	0.070	0.220	0.087	0.081	0.036	0.163	0.069	0.034	0.017
	100	0.179	0.073	0.126	0.061	0.199	0.083	0.083	0.039	0.116	0.054	0.041	0.021
	50	0.154	0.068	0.101	0.052	0.178	0.079	0.086	0.043	0.072	0.037	0.050	0.027
	20	0.122	0.062	0.076	0.044	0.149	0.074	0.089	0.048	0.029	0.017	0.061	0.035
	10	0.099	0.057	0.063	0.041	0.127	0.069	0.088	0.051	0.036	0.017	0.066	0.041
	5	0.079	0.053	0.054	0.042	0.103	0.064	0.083	0.052	0.064	0.036	0.069	0.047
	2	0.053	0.048	0.048	0.048	0.065	0.054	0.060	0.043	0.093	0.069	0.062	0.050
	平均	0.127	0.062	0.089	0.051	0.149	0.073	0.081	0.045	0.082	0.043	0.055	0.034
公式七	200	1.149	0.313	1.545	0.587	1.651	0.516	2.589	0.878	2.575	0.854	2.286	0.683
	100	1.096	0.325	1.433	0.590	1.563	0.521	2.306	0.817	2.345	0.819	2.112	0.674
	50	1.048	0.342	1.321	0.592	1.469	0.526	2.033	0.756	2.115	0.782	1.934	0.662
	20	0.977	0.366	1.172	0.595	1.333	0.532	1.688	0.676	1.807	0.728	1.687	0.642
	10	0.915	0.388	1.057	0.595	1.217	0.534	1.437	0.615	1.565	0.682	1.487	0.620
	5	0.840	0.414	0.935	0.592	1.083	0.533	1.190	0.555	1.309	0.629	1.265	0.589
	2	0.704	0.462	0.746	0.578	0.846	0.518	0.857	0.477	0.912	0.536	0.898	0.512
	平均	0.961	0.373	1.173	0.590	1.309	0.526	1.729	0.682	1.804	0.718	1.667	0.626
公式八	200	0.184	0.119	0.129	0.068	0.173	0.096	0.052	0.024	0.198	0.088	0.040	0.019
	100	0.163	0.113	0.101	0.057	0.155	0.091	0.046	0.025	0.149	0.073	0.029	0.016
	50	0.138	0.104	0.077	0.047	0.137	0.086	0.045	0.028	0.103	0.056	0.025	0.017
	20	0.108	0.091	0.053	0.038	0.113	0.079	0.050	0.036	0.047	0.031	0.030	0.025
	10	0.086	0.081	0.041	0.034	0.094	0.073	0.054	0.043	0.019	0.012	0.037	0.033
	5	0.066	0.071	0.034	0.035	0.075	0.067	0.056	0.050	0.037	0.025	0.042	0.041
	2	0.041	0.057	0.032	0.043	0.047	0.057	0.046	0.050	0.069	0.072	0.044	0.053
	平均	0.112	0.091	0.066	0.046	0.113	0.078	0.050	0.037	0.089	0.051	0.035	0.029
公式九	200	0.025	0.017	0.086	0.058	0.047	0.039	0.052	0.022	0.163	0.069	0.030	0.016
	100	0.025	0.020	0.063	0.046	0.038	0.033	0.040	0.019	0.116	0.054	0.028	0.017
	50	0.021	0.016	0.043	0.034	0.030	0.028	0.030	0.016	0.072	0.037	0.026	0.018
	20	0.018	0.013	0.022	0.019	0.019	0.019	0.021	0.013	0.029	0.017	0.024	0.019
	10	0.016	0.011	0.011	0.010	0.012	0.013	0.017	0.012	0.017	0.011	0.023	0.019
	5	0.015	0.011	0.007	0.008	0.007	0.007	0.014	0.012	0.010	0.006	0.021	0.019
	2	0.012	0.013	0.007	0.010	0.009	0.010	0.010	0.010	0.006	0.005	0.014	0.015
	平均	0.019	0.014	0.034	0.026	0.023	0.021	0.026	0.015	0.059	0.028	0.024	0.017
公式十	200	0.025	0.017	0.086	0.058	0.047	0.039	0.052	0.022	0.139	0.061	0.030	0.016
	100	0.025	0.020	0.063	0.046	0.038	0.033	0.040	0.019	0.091	0.045	0.028	0.017
	50	0.021	0.016	0.043	0.034	0.030	0.028	0.030	0.016	0.056	0.031	0.026	0.018
	20	0.018	0.013	0.022	0.019	0.019	0.019	0.021	0.013	0.028	0.017	0.024	0.019
	10	0.016	0.011	0.011	0.010	0.012	0.013	0.017	0.012	0.017	0.011	0.023	0.019
	5	0.015	0.011	0.007	0.008	0.007	0.007	0.014	0.012	0.010	0.006	0.021	0.019
	2	0.012	0.013	0.007	0.010	0.009	0.010	0.010	0.010	0.006	0.005	0.014	0.015
	平均	0.019	0.014	0.034	0.026	0.023	0.021	0.026	0.015	0.050	0.025	0.024	0.017

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		浙闽台河流						藏滇国际河流					
测站名称		闸口站		桐庐站		屯溪站		勐海站		清华农场		董户村	
公式	重现期	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2
公式一	200	2.509	0.690	1.039	0.420	1.946	0.665	1.624	0.737	1.629	0.718	1.449	0.623
	100	2.127	0.644	0.990	0.422	1.692	0.628	1.423	0.675	1.331	0.636	1.270	0.588
	50	1.778	0.597	0.938	0.424	1.457	0.591	1.233	0.615	1.072	0.559	1.103	0.552
	20	1.366	0.533	0.860	0.427	1.174	0.544	1.002	0.536	0.785	0.466	0.901	0.505
	10	1.087	0.483	0.793	0.428	0.979	0.508	0.839	0.478	0.606	0.404	0.760	0.469
	5	0.834	0.430	0.712	0.427	0.800	0.474	0.686	0.421	0.461	0.351	0.628	0.433
	2	0.528	0.354	0.564	0.417	0.576	0.432	0.493	0.347	0.319	0.305	0.460	0.386
	平均	1.461	0.533	0.842	0.423	1.232	0.549	1.043	0.544	0.886	0.491	0.939	0.508
公式二	200	0.138	0.066	0.309	0.232	0.145	0.070	0.058	0.055	0.103	0.076	0.178	0.104
	100	0.162	0.084	0.283	0.229	0.163	0.091	0.079	0.074	0.134	0.112	0.176	0.119
	50	0.207	0.144	0.226	0.225	0.194	0.150	0.135	0.143	0.187	0.211	0.178	0.168
	20	0.207	0.144	0.226	0.225	0.194	0.150	0.135	0.143	0.187	0.211	0.178	0.168
	10	0.216	0.178	0.203	0.225	0.198	0.178	0.154	0.181	0.194	0.258	0.177	0.195
	5	0.218	0.218	0.180	0.226	0.193	0.206	0.167	0.224	0.189	0.304	0.173	0.224
	2	0.204	0.288	0.149	0.235	0.168	0.237	0.172	0.290	0.157	0.347	0.157	0.264
	平均	0.193	0.160	0.225	0.228	0.179	0.155	0.129	0.159	0.164	0.217	0.174	0.177
公式三	200	0.180	0.083	0.090	0.077	0.123	0.078	0.143	0.105	0.117	0.069	0.128	0.080
	100	0.122	0.065	0.074	0.070	0.078	0.054	0.107	0.086	0.066	0.040	0.095	0.060
	50	0.021	0.015	0.044	0.055	0.028	0.023	0.040	0.037	0.041	0.059	0.046	0.036
	20	0.021	0.015	0.044	0.055	0.028	0.023	0.040	0.037	0.041	0.059	0.046	0.036
	10	0.019	0.019	0.035	0.052	0.038	0.041	0.022	0.023	0.056	0.095	0.042	0.048
	5	0.042	0.051	0.029	0.051	0.048	0.063	0.022	0.039	0.063	0.129	0.044	0.068
	2	0.062	0.109	0.025	0.057	0.049	0.085	0.036	0.084	0.055	0.155	0.046	0.096
	平均	0.067	0.051	0.049	0.060	0.056	0.053	0.058	0.059	0.063	0.086	0.064	0.060
公式四	200	0.133	0.062	0.062	0.044	0.110	0.064	0.104	0.077	0.073	0.042	0.134	0.077
	100	0.093	0.050	0.047	0.035	0.076	0.047	0.079	0.066	0.038	0.024	0.105	0.063
	50	0.061	0.039	0.034	0.026	0.053	0.034	0.059	0.055	0.020	0.016	0.080	0.050
	20	0.032	0.025	0.020	0.015	0.039	0.028	0.038	0.042	0.022	0.030	0.054	0.037
	10	0.021	0.016	0.013	0.010	0.037	0.033	0.027	0.033	0.025	0.040	0.040	0.032
	5	0.019	0.015	0.011	0.010	0.036	0.042	0.019	0.026	0.022	0.045	0.029	0.032
	2	0.019	0.027	0.006	0.011	0.029	0.047	0.014	0.020	0.012	0.036	0.019	0.033
	平均	0.054	0.033	0.028	0.022	0.054	0.042	0.048	0.046	0.030	0.033	0.066	0.046
公式五	200	0.325	0.122	0.080	0.051	0.224	0.116	0.229	0.137	0.201	0.108	0.183	0.115
	100	0.267	0.112	0.088	0.055	0.177	0.099	0.201	0.129	0.152	0.089	0.147	0.100
	50	0.216	0.103	0.095	0.059	0.137	0.083	0.177	0.120	0.113	0.072	0.115	0.086
	20	0.158	0.088	0.101	0.066	0.097	0.064	0.150	0.109	0.075	0.052	0.082	0.068
	10	0.121	0.077	0.103	0.072	0.074	0.051	0.131	0.101	0.055	0.041	0.063	0.056
	5	0.089	0.064	0.100	0.076	0.057	0.041	0.114	0.093	0.043	0.036	0.050	0.046
	2	0.053	0.044	0.080	0.075	0.040	0.034	0.093	0.084	0.040	0.042	0.040	0.041
	平均	0.176	0.087	0.092	0.065	0.115	0.070	0.156	0.110	0.097	0.063	0.097	0.073

续表 4-3 不同重现期短历时暴雨公式拟合精度对照表(部分)

流域		浙闽台河流						藏滇国际河流					
测站名称		闸口站		桐庐站		屯溪站		勐海站		清华农场		董户村	
公式	重现期	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2	DT1	DT2
公式六	200	0.325	0.122	0.080	0.051	0.224	0.116	0.229	0.137	0.201	0.108	0.183	0.115
	100	0.267	0.112	0.088	0.055	0.177	0.099	0.201	0.129	0.152	0.089	0.147	0.100
	50	0.216	0.103	0.095	0.059	0.137	0.083	0.177	0.120	0.113	0.072	0.115	0.086
	20	0.158	0.088	0.101	0.066	0.097	0.064	0.150	0.109	0.075	0.052	0.082	0.068
	10	0.121	0.077	0.103	0.072	0.074	0.051	0.131	0.101	0.055	0.041	0.063	0.056
	5	0.089	0.064	0.100	0.076	0.057	0.041	0.114	0.093	0.043	0.036	0.050	0.046
	2	0.053	0.044	0.080	0.075	0.040	0.034	0.093	0.084	0.040	0.042	0.040	0.041
	平均	0.176	0.087	0.092	0.065	0.115	0.070	0.156	0.110	0.097	0.063	0.097	0.073
公式七	200	2.509	0.690	1.039	0.420	1.946	0.665	1.624	0.737	1.629	0.718	1.449	0.623
	100	2.127	0.644	0.990	0.422	1.692	0.628	1.423	0.675	1.331	0.636	1.270	0.588
	50	1.778	0.597	0.938	0.424	1.457	0.591	1.233	0.615	1.072	0.559	1.103	0.552
	20	1.366	0.533	0.860	0.427	1.174	0.544	1.002	0.536	0.785	0.466	0.901	0.505
	10	1.087	0.483	0.793	0.428	0.979	0.508	0.839	0.478	0.606	0.404	0.760	0.469
	5	0.834	0.430	0.712	0.427	0.800	0.474	0.686	0.421	0.461	0.351	0.628	0.433
	2	0.528	0.354	0.564	0.417	0.576	0.432	0.493	0.347	0.319	0.305	0.460	0.386
	平均	1.461	0.533	0.842	0.423	1.232	0.549	1.043	0.544	0.886	0.491	0.939	0.508
公式八	200	0.244	0.120	0.070	0.064	0.171	0.114	0.175	0.134	0.151	0.100	0.157	0.113
	100	0.197	0.113	0.075	0.070	0.130	0.098	0.151	0.129	0.112	0.085	0.123	0.100
	50	0.157	0.105	0.079	0.076	0.098	0.082	0.131	0.125	0.084	0.073	0.094	0.087
	20	0.115	0.095	0.083	0.085	0.069	0.065	0.112	0.121	0.062	0.061	0.065	0.072
	10	0.091	0.088	0.084	0.092	0.055	0.054	0.100	0.119	0.052	0.058	0.050	0.064
	5	0.072	0.081	0.081	0.098	0.046	0.047	0.091	0.120	0.047	0.062	0.042	0.060
	2	0.052	0.073	0.065	0.098	0.036	0.045	0.080	0.124	0.045	0.080	0.038	0.062
	平均	0.132	0.097	0.077	0.083	0.086	0.072	0.120	0.124	0.079	0.074	0.081	0.080
公式九	200	0.075	0.027	0.035	0.029	0.097	0.043	0.055	0.035	0.048	0.026	0.133	0.071
	100	0.060	0.024	0.029	0.025	0.075	0.040	0.032	0.027	0.030	0.020	0.105	0.063
	50	0.048	0.022	0.024	0.020	0.054	0.034	0.025	0.022	0.020	0.016	0.079	0.052
	20	0.032	0.020	0.018	0.014	0.030	0.025	0.018	0.017	0.014	0.014	0.048	0.037
	10	0.021	0.017	0.013	0.010	0.019	0.018	0.013	0.013	0.014	0.016	0.029	0.024
	5	0.010	0.013	0.009	0.009	0.015	0.016	0.008	0.009	0.013	0.019	0.013	0.013
	2	0.003	0.005	0.005	0.011	0.010	0.013	0.003	0.006	0.011	0.022	0.002	0.005
	平均	0.036	0.018	0.019	0.017	0.043	0.027	0.022	0.018	0.021	0.019	0.059	0.038
公式十	200	0.075	0.027	0.035	0.029	0.097	0.043	0.055	0.035	0.048	0.026	0.133	0.071
	100	0.060	0.024	0.029	0.025	0.075	0.040	0.032	0.027	0.030	0.020	0.105	0.063
	50	0.048	0.022	0.024	0.020	0.054	0.034	0.025	0.022	0.020	0.016	0.079	0.052
	20	0.032	0.020	0.018	0.014	0.030	0.025	0.018	0.017	0.014	0.014	0.048	0.037
	10	0.021	0.017	0.013	0.010	0.019	0.018	0.013	0.013	0.014	0.016	0.029	0.024
	5	0.010	0.013	0.009	0.009	0.015	0.016	0.008	0.009	0.013	0.019	0.013	0.013
	2	0.003	0.005	0.005	0.011	0.010	0.013	0.003	0.006	0.011	0.022	0.002	0.005
	平均	0.036	0.018	0.019	0.017	0.043	0.027	0.022	0.018	0.021	0.019	0.059	0.038

注: DT1 表示绝对均方差 σ_1 , DT2 表示相对均方差 σ_2 。

表 4-4 各流域短历时暴雨公式拟合平均精度

流域	准则	公式一	公式二	公式三	公式四	公式五	公式六	公式七	公式八	公式九	公式十
松辽流域	DT1	1.157	0.364	0.123	0.079	0.136	0.136	1.157	0.127	0.049	0.047
	DT2	0.597	0.425	0.167	0.070	0.092	0.092	0.597	0.131	0.042	0.041
海河流域	DT1	1.706	0.420	0.146	0.107	0.209	0.209	1.706	0.180	0.069	0.066
	DT2	0.751	0.384	0.139	0.073	0.114	0.114	0.751	0.142	0.044	0.043
长江流域	DT1	1.128	0.257	0.094	0.087	0.135	0.135	1.128	0.118	0.057	0.057
	DT2	0.486	0.212	0.073	0.052	0.066	0.066	0.486	0.077	0.029	0.029
黄河流域	DT1	0.789	0.236	0.074	0.046	0.107	0.107	0.789	0.096	0.029	0.029
	DT2	0.412	0.288	0.107	0.042	0.072	0.072	0.412	0.100	0.026	0.026
淮河流域	DT1	0.581	0.158	0.052	0.034	0.044	0.044	0.581	0.040	0.017	0.015
	DT2	0.250	0.118	0.044	0.025	0.025	0.025	0.250	0.030	0.012	0.011
珠江流域	DT1	0.585	0.163	0.056	0.062	0.075	0.075	0.585	0.061	0.035	0.031
	DT2	0.376	0.105	0.036	0.036	0.038	0.038	0.276	0.039	0.019	0.018
浙闽台流域	DT1	0.403	0.118	0.039	0.023	0.057	0.057	0.403	0.051	0.016	0.016
	DT2	0.215	0.137	0.051	0.019	0.038	0.038	0.215	0.052	0.014	0.014
藏滇流域	DT1	0.224	0.072	0.046	0.072	0.078	0.086	0.153	0.039	0.033	0.005
	DT2	0.161	0.067	0.033	0.041	0.044	0.058	0.092	0.026	0.019	0.004

注：同上。

4.4.4 计算成果分析

(1)由表 4.2 中的计算结果可以看出按三种优化准则的计算方法对文献 [51][52][53] 中提供的暴雨资料拟合暴雨公式有很好的精度,尤其是按文献 [52][53] 中的暴雨资料拟合的精度远远好于满足我国《室外排水设计规范》规定精度所要求的精度。可见通过黄金分割搜索法对短历时暴雨公式进行参数拟合的结果有很好的精度,完全可以用于短历时暴雨公式的拟合。

(2)由表 4-3 可以得出,对于短历时的暴雨公式来说,公式 3、4、9、10 都满足了我国《室外排水设计规范》规定的精度,可以用于城市规划中编制短历时的暴雨公式。

(3)由表 4-4 可以得出,南方的暴雨资料比北方的暴雨资料能够更好的与各种短历时暴雨公式拟合,而且从整体上讲,各种短历时暴雨公式的精度由北向南越来越好。

(4)表 4-3 和表 4-4 均表明:对我国长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域、淮河流域、松辽河流域、浙闽台河流以及藏滇国际河流等流域总计 126 个测站的暴雨资料来说,公式 9 和公式 10 为 10 个公式中精度最高,能够更好的拟合各流域的暴雨资料。

(5)随着短历时暴雨公式参数的增加,拟合越加复杂,但公式的拟合精度也越来越高。公式 5 和公式 6 同为两参数公式,它们之间可以通过变换进行相互转化,因此它们有着相同的拟合精度。

第五章 结论与展望

5.1 结论

本文通过统计试验方法对基于 Gumbel 分布、指数分布的线性矩法进行了研究,并将其与传统的参数估计方法进行了比较;将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择,分析了四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性,并与国内常用的其他 4 种选优统计量进行了分析比较;在此基础上,利用实测资料,采用黄金分割法与迭代法相结合的拟合方法,对 10 种不同暴雨公式模型进行拟合计算,选出了精度最高的两种暴雨公式模型。结论如下:

(1) 本文对 Gumbel、指数分布的线性矩法(L-Moment)进行了研究,并于传统参数估计方法在统计性能方面的差异进行介绍与分析计算,并通过统计试验分析了线性矩法在两种分布中的统计性能及历史洪水(暴雨)公式的适用性。

(2) 对 Gumbel 分布的连序样本和不连序样本来讲, Gumbel 分布的线性矩法不仅参数及设计值不偏性能最好,而且具有较好的有效性,其统计特性要优于矩法和适线法; b、针对历史洪水(暴雨)取值及其重现期存在着一定误差,对不同估计方法对历史洪水(暴雨)误差影响作了计算分析。结果表明基于 Gumbel 分布的线性矩法参数估计的稳定性也最好,历史洪水(暴雨)误差对其影响较小。

(3) 对指数分布的连序样本和不连序样本来讲,无论是不偏性还是有效性,线性矩法均明显好于矩法和适线法。只是在样本容量较少的情况下,矩法的有效性优于其他方法,线性矩法与矩法接近。矩法的不偏性会出现偏小情况。总体上讲,其统计特性要优于矩法和适线法。

(4) 线性矩法与其它参数估计方法相比具有优良的稳健性,应用线性矩法对暴雨资料进行参数估计,所求参数及其设计值的不偏性和有效性就更好。由线性矩中的四阶线性矩(τ_4)作为判定准则进行我国暴雨分布线型的选择,结果更能反映当地暴雨的实际情况。

(5) 四阶线性矩检验法检验及概率点据相关系数检验法(PPCC)、拟优确定性系数(QD)、拟优平方和准则法(RMSE)、拟优绝对值准则法(MAE) 4 种检验方法计算的结果结果一致,均表明三参数对数正态分布与个流域实测暴雨资料拟合最好,为最优的暴雨频率分布线型。四阶线性矩检验法作为选择暴雨频率分布线型的准则,

很好的鉴别了暴雨资料的分布线型，四阶线性矩检验法可以作为检验暴雨频率分布线型选择的方法。

(6) 通过黄金分割搜索法对短历时暴雨公式进行参数拟合的结果有很好的精度，满足我国《室外排水设计规范》规定精度所要求的精度。完全可以用于短历时暴雨公式的拟合。

(7) 对于短历时的暴雨公式来说，南方的暴雨资料比北方的暴雨资料能够更好的与各种短历时暴雨公式拟合，而且从整体上讲，各种短历时暴雨公式的精度由北向南越来越好。

(8) 随着短历时暴雨公式参数的增加，拟合越加复杂，但公式的拟合精度也越来越高。公式 5 和公式 6 同为两参数公式，它们之间可以通过变换进行相互转化，它们有着相同的拟合精度。公式 3、4、9、10 都满足了我国《室外排水设计规范》规定的精度，其中公式 9 和公式 10 的拟合精度为所研究的十个公式中最高，均可以用于城市规划中编制短历时的暴雨公式。

5.2 问题与展望

本论文在前人研究的基础上,通过统计试验方法对基于 Gumbel 分布、指数分布的线性矩法进行了研究,并将其与传统的参数估计方法进行了比较;将四阶线性矩检验法引入了暴雨频率分布线型的选择,分析了四阶线性矩检验法作为暴雨频率分布线型的选择准则的适用性;利用实测资料,采用黄金分割法与迭代法相结合的拟合方法,对 10 种不同暴雨公式模型进行拟合计算,选出了精度最高的两种暴雨公式模型。但本论文还存在一些问题,有待作进一步的研究:

(1) 线性矩是目前水文频率分析计算的最新发展之一,国内学者在这方面作了一系列的研究工作,但仍有较大的研究空间,如线性矩法如何用于地区综合等。

(2) 水文频率分析计算主要用于分析洪水峰量的统计变化特性,探讨频率与洪水峰量之间的定量关系,推求洪水峰量的设计值,给水利水电工程提供必要的依据。我国率先将历史洪水资料应用于洪水频率计算,无疑是一个重大突破,本论文对 Gumbel 分布和指数分布的线性矩法进行了研究。由于历史洪水的信息量仍然有限,希望本论文提出的方法在应用于实践后,能够考虑比历史洪水考证年代更远的古洪水,以增加洪水系列的信息量,为洪水频率分析提供新的途径。

(3) 在水文频率分析计算过程中,我国长期以来一直使用 P-III 分布曲线,但是使用过程中也暴露出一些问题,如实测点据与曲线明显脱离等不合理现象。特别在偏态系数较大 ($C > 2$) 时,频率曲线尾部趋平,不符合多数干旱、半干旱地区中小河流的水文特征。随着科技进步及实测资料的延长,国内有关学者进一步研究表明,对数正态分布在不少地区也能比较好拟合洪水系列,尤其对于暴雨系列,对数正态分布效果要比 P-III 更好。在以后的水文频率分析研究中,作者认为应该加强对对数正态分布线型矩法的深入研究。

(4) 《室外排水设计规范》中暴雨选样规定用年多个样法。但是年多个样法需要很多资料,收集困难,统计也较困难、繁琐,工作量大;且自八十年代起,我国气象与水文部门只统计年最大值;加之到八十年代中期,我国许多城市已积累较长的自记雨量记录,且设计重现期已较原来提高,并且应用年最大值法还可以解决目前年多个样资料缺乏的问题。采用年最大值法作为暴雨资料的选择方法已经成熟,因此,在改用年最大值法后频率分布计算要改用相应的模型及对设计重现期作相应的修正,都是以后值得研究的方面。

参考文献

- [1] Kirby, W., Algebraic boundedness of sample statistics. *Water Resources Res*, Vol.10, no.2, 1974.
- [2] Greenwood J.A., Landwehr, J.M. and Matalas N.C. Probability Weighted Moments: Definition and Relation to Parameters of Several Distributions Expressible in Inverse Form. *Water Resources Res*, Vol.15, no.5, 1979.
- [3] 能源部、水利部水利水电规划设计总院. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] 水利部北京水利科学研究所水文研究所. 水文计算经验汇编[C]. 北京: 水利出版社, 1958.
- [5] 朱元甦. 水文计算中确定统计特性数方法的商榷[J]. 华东水利学院学报, 1958.
- [6] 陈志恺等. 频率计算中的求矩差[J]. 水利学报, 1963(1).
- [7] 马秀峰. 计算水文频率参数的权函数法[J]. 水文, 1984(3).
- [8] 刘治中. 数值积分函数法推求 P-III型分布参数[J]. 水文, 1987(7).
- [9] 刘光文. 皮尔逊III型分布参数估计[J]. 水文, 1990(4-5): 1~15.
- [10] 陈元芳等. P-III型参数估计方法的研究[J]. 河海大学学报, 1992(3).
- [11] 陈元芳. 现行几种权函数法的比较[A], 2000 年中国水文展望研讨会文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1991.
- [12] 陈元芳. 一种可考虑历史洪水(暴雨)的马氏权函数法研究[J]. 水科学进展, 1994, 5(3): 174~178.
- [13] 陈元芳, 候玉, 董爱红. 评价参数估计优劣标准及几种权函数法的比较研究[J]. 浙江水利科技, 2001(6): 8~10.
- [14] 丁晶、宋德敦、杨荣富. 估计 P-III型参数的新方法——概率权重矩法[J]. 成都科技大学学报, 1988(2).
- [15] 宋德敦、丁晶. 概率权重矩法及其在 P-III型分布中的应用[J]. 水利学报, 1988(3).
- [16] 北京市政设计院. 给水排水设计手册(第5册, 城市排水)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 48~101.
- [17] 邓培德. 城市暴雨公式统计方法的研究[J]. 同济大学学报, 1985, 1.
- [18] Kibber D.F., Urban stormwater hydrology. *American Geophysical union's Water Resource Monograph*, 1982.
- [19] Ammell V., Harremoes petal. Review of rainfall data application for design and analysis, *Water science and Technology*, Vol.16, no.8, 1984.
- [20] 周黔生. 暴雨资料的选择采用年最大值法更实用[J]. 给水排水, 1995(6).
- [21] 邓培德. 暴雨选样与频率分布模型及其应用. 给水排水, 1996, 22(2): 5~9.
- [22] 杨智硕. 暴雨选样间的频率转换问题探讨. 福州大学学报, 2005, 4, 33(2): 230~233.
- [23] 夏宗尧. 求指数曲线及 P-III曲线与经验点最佳拟合参数解中一些问题讨论[M]. 湖南给水

- 排水, 1997, 3.
- [24] Chow Vert: A General Formula for Hydrologic Frequency Analysis. Trans, AGU, Vol.32, 1951.
- [25] Chow Venler: Frequency Analysis of Hydrologic Data with special Application to Rainfall Intensities, University of Illions Bulletin, July, 1953.
- [26] P.G. Guest: Numerical Methods of curve Fitting. Cambridge at the University press, 1960.
- [27]王敏, 谭向诚. 北京城市暴雨和雨型的研究[J]. 水文, 1994(3).
- [28]邓培德. 极值分布和指数分布的降雨公式的统计方法[J]. 西南给水排水, 1982(4).
- [29]周文德. 城市暴雨排水设计问题预测——概率的考虑[M]. 水文, 1983(1).
- [30]邓培德. 雨水沟道设计暴雨的统计方法[J]. 给水排水, 1979, 4.
- [31]夏宗尧. 编制暴雨强度公式中应用 P-III曲线与指数曲线的比较[M]. 中国给水排水, 1990(3).
- [32]夏宗尧. 评《城市暴雨公式统计的若干问题》[M]. 中国给水排水, 1997(5).
- [33]徐枚值. 对 P-III型频率曲线离均系数中值的计算[M]. 南京市勘测设计院, 1981, 3.
- [34]金光炎. 城市设计暴雨频率计算问题[J]. 水文, 2000(2): 14~18.
- [35]金光炎. 城市设计暴雨频率曲线线型的研究[J]. 水文, 2002, 2: 20~26.
- [36]中华人民共和国国家标准. 室外排水设计规范[S]. (GBJ14-97).
- [37]牛赫超, 刘月辉. 暴雨公式的图解法[J]. 气象, No. 3, 1991.
- [38]北京市市政设计院主编, 《给排水设计手册》(第五册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [39]张爱英, 赵家敏等. 短历时暴雨强度公式研究及应用软件介绍[J]. 山东气象, 2003, 23(1). 32~33.
- [40]赵建国. 迭代法求解暴雨公式参数[J]. 给水排水, 1997, 23(12): 9~12.
- [41]张子贤. 用牛顿-高斯法确定暴雨公式系数[J]. 河海大学学报, 1995, 23(5): 106~111.
- [42]李树常. 用麦考卡尔特法推求暴雨公式参数[J]. 给水排水, 1999, 25(2): 26~28.
- [43]任伯帆. 带因子-迭代法求解城市暴雨强度公式[J]. 中国给水排水, No. 3, 2002.
- [44]倪长健, 丁晶, 李祚泳. 免疫进化算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(6): 59~61.
- [45]杨晓华, 张国桃. 加速遗传算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 71~76.
- [46] Hosking J. R. M., Wallis J R. Regional Frequency Analysis—an Approach Based on L-Moments [M], London: Cambridge University Press, 1997.
- [47] Pearson C. P. New Zealand Regional Flood Frequency Analysis using L-moments [J]. Journal of Hydrology, 1991.
- [48] Wallis J. R., Regional Frequency Studies using L-moments [A]. In: Young P. C., In Concise

- Encyclopedia of Environmental Systems [C]. Pergamon, Oxford, 1993.
- [49] 陈元芳、沙志贵、陈剑池、陈民. 具有历史洪水(暴雨)时 P-III 分布线性矩法的研究[J]. 河海大学学报, 2001(4).
- [50] 陈元芳等. 可考虑历史洪水(暴雨)对数正态分布线性矩法的研究[J]. 河海大学学报, 2003(1).
- [51] 杨开等, 暴雨强度公式中系数B统计算法一例, 水文, 1996, 25(4).
- [52] 李祚泳等, 暴雨强度公式参数的遗传优化, 气象, 2003, 28(5).
- [53] 李祚泳等, 基于遗传算法的暴雨强度公式参数的优化, 高原气象, 2003, 22(5).
- [54] Pandey M.D., Gelder P.H.A.J.M., Vrijling J.K. Assessment of an L-kurtosis-based criterion for quantile estimation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2001, 6: 284-291.
- [55] Sherman, C.W., Frequency and Intensity of Excessive Rainfalls at Boston Massachusetts, Transactions, ASCE, Vol. 95, 951- 960, 1932.
- [56] Yarnell, D.L., Rainfall intensity-hequency data. U.S. Department of Agriculture, Misc. Publ. No. 204, Washington, D.C., 1935.
- [57] Bell F.C., Generalized rainfall-duration-frequency relationships. J. Hydraul. Div., A.S.C.E., 95(hyl), 311-327, 1969.
- [58] Chen C.L., Rainfall intensity-duration-frequency formulas, J.Hydraul. Eng., 109(12), 1603-1621, 1983.
- [59] Aron G., Wall D.J., White E.L., and Dunn C.N., Regional rainfall intensity-duration-frequency curves for Pennsylvania, Water Resour, Bull, 23(3), 479-485, 1987.
- [60] Canterford R.P., Pescod N.R., Pearce N.H., Turner L.H. and Atkinson R.J., Frequency analysis of Australian rainfall data as used for flood analysis and design, regional Flood Frequency Analysis, Proc. Int. Symp. On Flood Frequency and Risk Analyses , May 14-17, 1986, Louisiana State University, Baton Rouge, USA, Reidel, Boston, MA, 293-302, 1987.
- [61] 水利部和能源部. 水利水电工程设计洪水计算规范(SL-93) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [62] 熊明等. 我国工程水文分析计算的新进展[J]. 水文, 1999(5).
- [63] 王俊德. 水文统计[M], 高等学校教材. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [64] 朱元生. 水文计算中确定统计特性数方法的商榷[J]. 华东水利学院学报, 1958
- [65] 陈志恺等. 频率计算中的求矩差[J]. 水利学报, 1963(1).
- [66] 金光炎. 水文统计原理和方法[M]. 北京: 中国工业出版社, 1964.
- [67] 金光炎. 广义极值分布及其在水文中的应用[J]. 水文, 1998(2).
- [68] 邱林、陈守煜等. P-III型分布参数估计的模糊加权优化适线法[J]. 水利学报, 1998(1).
- [69] 邓育仁、丁晶等. 水文计算中的模糊优化适线法[A]. 全国水文计算进展和展望学术讨论会论文选集[C]. 南京: 河海大学出版社, 1991.

致 谢

本文是在导师陈元芳教授悉心指导下完成的。导师高尚的品格、严谨的治学态度、深厚的学术造诣、谦和儒雅的学者风范和丰富的工作经验使作者受益匪浅，是作者一生艰苦创业、立身处世的榜样。在导师的细心指导和无微不至的关怀下，本论文的研究工作才得以不断地进展。在三年的硕士期间，作者在学习、科研、以及生活上始终得到导师无微不至的关怀和帮助，值此论文完成之际，作者谨向陈老师致以崇高的敬意和诚挚的感谢！愿陈老师身体健康、事业顺利！

深深感谢我敬爱的父母、祖母给予了我无限的理解、关怀和鼓励，深深感谢家人的无私奉献，愿你们身体健康、笑口常开！

感谢感谢师兄陈国新博士、陈民博士、陈其幸硕士、肖治国硕士、师姐李娟硕士，感谢师兄马斌勋硕士、赵利红硕士，感谢同门许睢硕士、王文鹏硕士、郭芳硕士、李淑会硕士，感谢师弟刘勇硕士、陈星硕士，师妹黄琴硕士、陈叶昉硕士，愿我们的情意地久天长，愿你们学习进步、心想事成！

感谢舍友李庆航博士、李永涛硕士、李舟硕士，感谢朋友康颖硕士、司鸿颖硕士，愿我们的友谊永存，愿你们今后的人生更加丰富多彩！

感谢河海大学水文水资源学院、研究生院的各位领导和老师给予的支持、关心和帮助！

感谢2005级水文水资源专业所有硕士在学习上的讨论与帮助，在生活中的理解与宽容，相聚河海是我们的缘分，愿你们今后的日子永远顺心如意！

谨以此文献给所有关心和帮助过我的老师、亲人、同学、朋友，祝愿你们万事如意、一生平安！

李兴凯

2008年3月于严恺馆408室