

基于遥感技术的三峡库区 农业干旱评价研究

土壤学 专业 硕士研究生 刘 静

指导教师 刘洪斌 研究员

摘 要

干旱是制约我国及世界上农业发展最主要的因素之一,干旱的频繁发生及其给农业造成的巨大损失引起了各级政府部门的高度重视。因此探索一些可行的方法监测旱情,以便采取相应的措施和对策,对工农业生产和人民生活都有非常重要的意义。利用遥感技术可以在很高时间分辨率和空间分辨率上获取地表光谱信息进行干旱监测,这使得遥感监测干旱成为目前干旱监测研究的重点。但是现有的遥感监测并没有对干旱监测模型在不同区域和不同时期内的适应性进行分析,因此影响了旱情监测精度。为了提高遥感监测干旱的精度,有必要在研究区域的特定时期内对干旱监测指数的适应性进行分析,以满足更准确的旱情监测的需要。

本文在系统地分析当前国内外干旱遥感监测研究现状及其发展趋势的基础上,以重庆市为研究区域,基于 2005、2006 年实测土壤含水量数据和 NASA 网站上提供的 1999-2007 年的 MODIS 产品数据,针对重庆市夏伏早期干旱的实际情况,选择植被状态指数法(VCI)、温度植被旱情指数法(TVDI)和植被供水指数法(VSWI),结合实测土壤相对含水量数据,生成研究区域夏伏早期土壤相对含水量空间分布图,并对对比分析以上三种干旱监测模型在本研究区域夏伏旱时期干旱监测的适应性,在此基础上定量地分析了 2006 年重庆市特大干旱发生的时间和空间的变化情况。研究的主要内容和结论如下:

(1)利用植被状态指数法(VCI)、温度植被旱情指数法(TVDI)和植被供水指数法(VSWI)反演研究区域 2005、2006 年夏伏早期的土壤相对含水量分布图,分析了上述三种干旱监测指数对旱情的反映情况。结果表明,三个指数的反演结果在旱情变化趋势上与实际情况相吻合。其中 VSWI 和 VCI 的反演结果在空间分布上的一致性比较高,而 TVDI 的反演结果存在相对差异。

(2)利用实测土壤相对含水量数据,对干旱监测模型反演的土壤相对含水量进行验证,并讨论各种干旱监测模型在本研究区域的适应性。结果表明,三种干旱监测模型反演的结果与实测值的相关性均达到显著水平,虽然在不同的干旱年际,不同指数对土壤含水量反演的适应性不尽相同,但是在整体上看植被供水指数法(VSWI)是研究区域在夏伏期最适应的干旱监测模型,而温度植被旱情指数(TVDI)和植被状态指数(VCI)在不同的年际,对研究区域干旱监测的适应性不尽相同。

(3) 基于最适应研究区域 2006 年特大干旱的干旱监测方法 VSWI 进行旱情监测的结果, 统计分析了研究区域各区县的旱情等级情况。结果表明, 干旱分为三个阶段, 其中旱情发生初期 (6 月 26 日-7 月 11 日) 有 6.27% 和 1.21% 面积的区域分别处于轻旱和中旱状况, 没有重旱的情形; 干旱中期 (8 月 13 日-8 月 28 日) 轻旱、中旱和重旱的比例分别为 44.80%、13.65% 和 26.79%; 干旱解除期 (8 月 29 日-9 月 13 日) 83.07% 的土壤含水量恢复了正常, 仅有 15.34% 处于轻旱, 0.88% 处于中旱, 0.10% 处于重旱。空间分布上, 在干旱发生的初期, 东南部受旱最严重, 有 20% 的区域面积受旱; 到干旱中期, 旱情向西部发展, 西北部受旱最严重, 受旱面积高达 98%, 其次是西南部, 其受旱面积达 95%; 在旱情解除期, 东南部和东北部恢复得最快。

(4) 根据重庆市土地利用现状图, 统计分析了各种土地利用类型干旱情况。结果表明: 不同土地利用现状受干旱影响的变化程度不同。水田受干旱影响变化最大, 在旱情初期水田的湿润比例高达到 32.12%; 旱情中期水田重旱比例最高, 达到 42.48%; 旱情解除后, 仍有 0.18% 面积的水田处于重旱的情况; 其次是旱地和其他用地; 受干旱影响最小的是林地和草地。

关键词: 干旱 遥感技术 土壤相对含水量 干旱指数 土地利用

A Study of Three Gorge Region Agriculture Drought Evaluation Based on Remote Sensing

Speciality: Soil Science

Candidate: Liu Jing

Supervisor: Professor Liu Hong-bin

Abstract

Drought is one of main constraints of agricultural development not only in China but also around the world. The frequent occurrences of drought and the consequent to huge agricultural, industrial, and national economic losses have attracted government's high attention. The development of monitoring drought is thus an important element in reducing risk, increasing industrial and agricultural productivity. Using remote sensing technology to get surface spectrum information to monitor the drought at a very high time resolution and spatial resolution is the hotspot of drought monitoring research. However, the current remote sensing monitoring models lack in the adaptability analysis of region and period. In order to improve the accuracy of remote sensing drought monitoring model, it is necessary to study the adaptability of drought monitoring indices in a specific period of test area.

This paper presented a case study for Chongqing, where the occurrence of drought in summer with a high frequency. On the basis of systematic analyses of the remote sensing monitoring researches and the development trend at home and abroad, Vegetation Condition Index (VCI), Temperature-Vegetation Dryness Index (TVDI), Vegetation Supply Water Index (VSWI) and the measured soil relative moisture data were selected to create water content spatial distribution map, using the MODIS data provided by NASA, 2005-2007 measured soil moisture data and the practical condition. A comparative analysis of VCI, TVDI, and VSWI was carried out to evaluate the adaptability of drought monitoring models. Then the severe summer drought in 2006 was quantitatively analyzed in temporal and spatial. The main contents and conclusions were as follows.

(1) The distribution maps of soil relative moisture in summer in 2005 and 2006 were created using VCI, TVDI, and VSWI, respectively. The results indicated that the trends of summer drought were accord with the local conditions. The retrieval accuracy showed in order of $VSWI > VCI > TVDI$.

(2) The validation and adaptability of the drought monitoring models were investigated using the measured relative soil water content. Significant correlations were found between the retrieval data and the observations. Although, different indices are applicable to different drought

conditions. VSWI was the optimum model in the study area during research period, TVDI and VCI has different adaptability in different years.

(3) The drought severity levels of year 2006 were examined using VSWI model. Statistical analysis indicated that the drought fell into three successive phases. During pre-drought (from Jun. 26 to Jul. 11), the areas of light, middle, and heavy drought occupied 6.27%, 1.21%, and 0%, respectively. During the middle stage (from Aug. 13 to Aug. 28), the areas of light, moderate, and heavy drought occupied 44.80%, 13.65%, and 26.79%, respectively. During the post-drought (from Aug. 29 to Sep. 13), 83.07% of soil water regained normal range and the areas of light, moderate, and heavy drought occupied 15.34%, 0.88%, and 0.10%, respectively. Meanwhile, the spatial distribution maps showed that the trends of drought condition during the three phases. During the pre-drought, severe drought occurred in the southeast, where 20% area suffered drought. During the middle phase, drought severity extended to the west, the worst severe drought existed in the northwest followed by southwest, drought areas were 98%, and 95%, respectively. During the post-drought, the southeast and northeast regions regained normal conditions quickly.

(4) There was a significant drought difference across the land use types. The impact of drought exhibited in order of paddy field > dry land and other land use type > forest and grass. For example, during the severe drought of year 2006, in the pre-drought stage, the moist ratio of paddy field was 32.12%, in the middle and post-drought phases, the ratio of severe drought were 42.48%, 0.18%, respectively.

Key words: Drought Remote sensing Relative soil moisture Drought index
Land use

独创性声明

学位论文题目: 基于遥感技术的三峡库区农业干旱评价研究

本人提交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中引用他人已经发表或出版过的研究成果,文中已加了标注。

学位论文作者: 刘静

签字日期: 2008 年 6 月 8 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解西南大学有关保留、使用学位论文的规定,有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘,允许论文被查阅和借阅。本人授权西南大学研究生部可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书, 本论文: ☐ 不保密, ☐ 保密期限至 年 月止)。

学位论文作者签名: 刘静

导师签名: 刘洪斌

签字日期: 2008 年 6 月 8 日

签字日期: 2008 年 6 月 8 日

第1章 文献综述

干旱一直是我国及世界农业发展最主要的制约因素之一。与其它自然灾害相比,干旱出现的频率高,持续时间长,影响的范围大,对农业生产造成的损失最重。干旱不但直接造成粮食减产和经济损失,而且严重影响了农业的可持续发展和社会的稳定。随着人口增长、开垦耕地增加和复种指数提高,农业和工业用水需求量的增大,以及在全球环境变化的大环境下,干旱化趋势还在进一步发展^[1],干旱及其带来的灾害已引起世界各国政府、科学家和公众重视^[2]。有效地监测旱情的动态变化并进行准确的预报,对当地政府和农业管理部门及时了解旱情程度和分布,采取积极有效的防、抗措施,科学指挥农业生产,减少干旱带来的损失具有重要的意义。干旱的监测已成为当今世界的重要课题之一^[3]。要有效的进行干旱监测,首先要了解干旱。

1.1 干旱的概念

干旱是一种因长期无降水和少降水或降水异常偏少而造成干燥,是土壤缺水的一种现象。它的发生比较缓慢,不易察觉,可以出现在任何时候和任何地区。影响干旱的因素很多,有气候因素、地理位置因素、地貌因素、水文因素、植被因素、土壤地质条件因素、人类活动因素等等。因此尽管关于干旱已有大量的研究,但由于其复杂性和研究目的不同,还没有一个可以被普遍接受的干旱定义^[4]。世界气象组织定义干旱为“在较大范围内相对长期平均水平而言降水减少,从而导致自然生态系统和雨养农业生产力下降”;Willhite^[5]等认为干旱是由于降水不足而导致的水资源短缺的、正常的、周期性发生的天气现象;Palmer^[6]提出干旱是“一个持续的、异常的水分缺乏”;张景书^[7]认为干旱是“在一定时期内降水量显著减少,引起土壤水分亏缺,从而不能满足农作物正常生长所需水分的一种气候现象”。虽然各种定义的表述不尽相同,但是这些定义中包含干旱的核心即是水分缺乏。

1.2 干旱的分类及评价指标

1.2.1 干旱的分类

由于干旱涉及气象、农业、水文和社会经济等学科,不同的学科着眼点不同,对干旱理解的不同,因此对干旱的分类亦不同。美国气象学会^[8]总结各种干旱定义,综合各种因素的考虑,将干旱分为气象干旱、农业干旱、水文干旱以及社会经济干旱。

气象干旱是指由降水和蒸发不平衡所造成的水分短缺现象。在一个相对长的时期内,某一地区的蒸发量大于降水量,或降水量异常偏少。气象干旱主要考虑从降水量、降水百分数、降水距平百分率、气温、蒸发、无降水连续日数等要素来建立干旱指标^[9]。

农业干旱又可称作土壤干旱,是指土壤水分和作物需水的不平衡所造成的水分短缺现象,由于某一时段内,某一地区土壤中有效水分已不能满足农作物生长的需要,导致农作物不同程度受损^[10],这种干旱主要由土壤水分与作物自身生理功能决定。

水文干旱指标是由降水和地表水或地下水不平衡所造成的水分短缺,难以满足需水要求的水文现象,它反映出径流量低于正常值且水库库存枯竭^[11]。水文干旱主要是由过量的砍伐森林、水土流失、降雨量的减少等因素而造成。

社会经济干旱则是指由自然系统与人类社会经济系统中,水资源供需不平衡所造成的水资源短缺影响生产、消费等社会经济活动的现象,是从人类活动受到影响的角度去看待干旱,体现了人类对水的供求关系^[12]。

四种干旱,其实都与水的缺乏有关^[13]。其中气象干旱是最基本的,研究得比较多。各种干旱无不源于气象干旱的发生。农业干旱是对气象干旱的集中反映,是干旱监测研究的核心内容,社会经济干旱是干旱影响的社会系统。

1.2.2 干旱评价指标

干旱评价指标是旱情描述的数值表达,是反映干旱成因和程度的量度,是研究干旱或者对干旱进行预测预警,或进行干旱的减灾及治理和进行农业发展规划的重要标准。对干旱进行客观、精确、定量的划分成等级表示干旱的程度,对于决策者、公众乃至科研人员来说更加实用和直观。由于干旱成因及其影响的复杂性,干旱指标都是建立在特定的地域和时间范围内,有其相应的时空尺度^[14]。从观测干旱的角度不同,相应的指标也有所差别。一般分为如下几种:

(1) 气象干旱指标

气象干旱指标的建立主要考虑降水量、降水百分数、降水距平百分率、气温、蒸发、无降水连续日数等要素,根据指标涉及的因素不同可将气象干旱指标分为单因子指标和多因子指标。单因子指标主要有^[15]:降水距平百分率、标准差指标、无雨日数、标准化降水指数(SPI)等;多气象要素结合的干旱指标有^[16]:Palmer 干旱指数、相对湿度指数、Z 指数、降水温度均一化指标、德马顿(De.martonne)干旱指标、标准化降水和温度指标、对数形式的干旱等级指标、严重干旱的评估方法。

气象干旱指标反映了该时段作物或植物的气象环境,抓住了引起干旱的主要因子是降水缺少,具有可大范围监测干旱、不同地区旱情可进行比较等优点,但由于仅从降水情况并不能完全反映干旱的程度,没有考虑下垫面的水分需求状况,不能准确表达出干旱造成的影响。

(2) 农业干旱指标

农业干旱的发生评价方面是利用以作物需水机能为标准的作物产量水分指数和作物水分亏缺指数,以及利用作物需水与可供水的比作为主要的指标。常见的农业干旱的评价指标有:降水量指标、土壤含水量、作物干旱指标、作物需水量指标、综合类指标、Palmer 指标等。降水量指标作为一种简便、实用的指标广泛地应用于干旱的宏观监测中。土壤含水量指标作为一种传统的旱情评价指标,除简便、直观、资料容易获得外,还有利于方便建立起土壤—一大气—植物三者间的水分交换关系。作物干旱指标和需水量指标近年得到了飞速的发展;综合类指标因其概念明确,考虑因素多,具有广泛的理论和实用价值。

(3) 水文干旱指标

水文干旱指标一般用 5 个整数(-2, -1, 0, 1, 2)来表示不同等级的径流量。王劲松^[22]等研制了适合灌溉区应用的径流量干旱指数。Richard^[17]在对美国干旱指数的评价中总结了两个水文干旱指标,一为地表供水指数(SWSI),是 1981 年为美国克罗拉多州开发的经验水文指数。Wilhite、Glantz 和 Garen^[18]指出经验水文指数作为地表水状况的度量,弥补了 Palmer 指数未考虑降雪、水库蓄水、流量以及高地形降水情况的不足;二是利用长期平均的年径流

量资料,提出了发生水文干旱事件的随机模式,用它进行区域干旱频率分析。水文干旱指标有较强的专业性,对于水调、灌溉有很好的指导意义。但是河流流量监测站的选取有很大的局限性,流量受上游用水的影响很大,同时某地的降水量对下游的流量贡献大,对于本地的流量影响小等矛盾在实际工作中不好解决。

(4) 社会经济干旱指标

社会经济干旱是利用自然资源与社会需水作为评价的标准,如经济气候指数,水分供需指数等指标进行社会经济干旱的评价。

1.3 干旱监测研究现状与进展

从干旱的定义和分类可知,干旱是一种非常复杂的自然现象。干旱的定义复杂、评价指标多、影响因子多等特点,给干旱监测带来许多不确定性的问题,干旱监测成为各国学者研究的热点。目前国内外所使用的主要的干旱监测方法大致分为两类:一是基于地面气候数据的干旱监测方法;二是综合反映气象、农业、水文要素的新兴的干旱遥感监测方法。主要是通过卫星遥感获取地面信息,并利用地物表面的光谱、时间、空间和方向信息从不同侧面定性或半定量地评价土壤水分分布状况^[19]。

1.3.1 基于地面气候数据的干旱监测方法

基于地面气候数据的干旱监测方法主要有气象干旱监测方法、农业干旱监测方法、水文干旱监测方法等传统方法。这些方法及相应的指标主要是利用地面观测点的降水量、土壤墒情和其他气象资料间接判断旱情。一般采用称重法、土壤湿度计法、负压计法、蒸渗法、中子仪法、电阻法、时域反射法等方法来获取干旱指数。传统的干旱监测方法虽然可以获取较为准确的干旱数据,但有限站点上观测数据,不仅样点少代表性有限,而且该方法采样速度慢,需要花费大量的人力物力,难以迅速而及时获得大面积土壤水分和作物的干旱信息,使得大范围的旱情监测和评估缺乏实际需要的时效性和代表性。

1.3.2 基于卫星遥感信息的干旱监测方法及研究进展

基于卫星遥感信息的干旱监测是通过对地观测卫星搭载的传感器,获取地物在不同状态下辐射或反射的光谱信号,根据这些光谱信号计算干旱指标反演土壤水分含量进行干旱评价。卫星遥感进行干旱监测技术相对传统的监测技术,具有不可比拟的潜在优势,主要表现在:监测数据的时效性(快速更新性)、大范围的数据一致性、监测结果的客观性和技术成本的廉价性等,弥补传统旱情监测的不足;遥感手段还能解决传统方法不能很好解决的干旱的空间分布和时间变化制图,因而得到了世界各国的广泛重视,利用遥感手段已成为监测大区域范围内干旱时空分布和变化的主要方法。随着遥感技术和计算机科学与技术的迅速发展,多时相、多光谱遥感数据为应用遥感技术进行面上的干旱监测提供了保证,使得基于遥感技术研究区域干旱具有广阔的应用前景,成为干旱监测的热点和前沿。

利用遥感技术探测土壤水分开始于上世纪七十年代初,在40多年的研究中,取得了大量的研究成果。遥感波段的应用从可见光到短波,再到热红外,最后是微波。利用各波段数据计算各种反映干旱指数的模型已经有很多。从研究对象的角度对土壤含水量遥感监测模型

来分,主要有两个方面:一是从土壤表层水分状况以及植被蒸发和水分亏缺为对象研究干旱,最主要的模型方法是针对裸地 and 低植被覆盖条件下的基于热惯量理论的表现热惯量法,以及针对植被覆盖条件下的基于热平衡方程理论的作物缺水指数法和冠层温度法等;二是利用地表反射率和发射率,结合植被长势变化来研究干旱状况,不计算出含水量而是直接给出作物长势的受旱程度的方法,如距平植被指数法,结合植被指数和陆地表面温度的干旱监测法和微波散射系数法等。

(一) 热惯量法原理及研究现状

热惯量是物质对温度变化热反应的一种量度,反映了物质与周围环境能量交换的能力。水有较大的热容量和热传导率,因此含水量较高的土壤具有较大的热惯量。土壤热惯量是土壤热特性的一种综合量度,也是土壤密度、热容量和热传导关系的函数。土壤热惯量是阻止温度变化的一个度量,它反映了土壤的热学特征。热惯量可由遥感监测地表土壤反射率和温度的变化得到。其计算式如下:

$$P = \sqrt{\lambda \rho c} * 100\%$$

式中, P 为热惯量, λ 为热导率, ρ 为土壤密度, c 为比热。式中三个参数无法直接利用遥感数据。热惯量法是国内外研究较多的一种遥感监测土壤水分的方法。

国外:最早推算热惯量的简单模式的是 Waston^[20] 等,他于1971年首次提出了利用地表温度日较差来推算热惯量,具体方法是利用卫星提供的可见光-近红外反射率和热红外通道对温度的敏感性,探测出昼夜温差,从而得到热惯量。Kahle^[21]对土壤热惯量模式做了进一步改进和简化,提出了热惯量概念模型。1978年热容量制图卫星(HCMM)发射成功,随后具有较高分辨率的TIROSS、NOAA系列气象卫星相继投入使用,推动了土壤水分遥感监测方法的研究。Rosema^[22]等在模型的基础上提出了热惯量的计算模式。由于热惯量模型所需要的参数依然过多,主要包括影响陆地表面辐射能量平衡的所有参数,其中有些参数是近地表气温、陆地表面温度、空气湿度、风速及表面粗糙度等的函数,所以获取地表热惯量并不具有很好的操作性。Price^[23]在能量平衡方程的基础上简化潜热蒸发(散)形式,引入地表综合参量 B 概念(B 为土壤辐射率,比热及温度等气象要素的函数),并系统地描述了热惯量的遥感成像原理,提出了表现热惯量(P_{ATI} , Apparent Thermal Inertia)的概念,其计算式如下:

$$ATI = \frac{1 - A}{T_{\text{白}} - T_{\text{夜}}}$$

式中 A 是全波段反照率, $T_{\text{白}}$ 为白天的最高温度, $T_{\text{夜}}$ 为夜晚的最低温度。研究表明,土壤含水量与其表现热惯量存在着正相关关系,使得采用卫星提供的可见光、近红外波段反射率和热红外辐射温度差来计算热惯量并估算出土壤水分成为可能。

国内:我国应用土壤热惯量遥感模型监测干旱起步于80年代末期,并得到了长足的发展。隋洪智等^[24]使用 NOAA/AVHRR 数据计算热惯量,得到植被覆盖度较低条件下土壤表现热惯量与土壤水分的一元线性关系。朱永豪等^[25]发现土壤光谱反射特性与土壤含水量可能并非总成线性关系,这也成为后来热惯量模式修正的依据。表现热惯量是热惯量的简化模型,它与

真实热惯量之间有一定的关系。刘兴文^[26]等论证了“真实热惯量”与地表反照率、日夜温差之间有非线性关系，因而建立二元三次回归模型，对河南地区进行了应用性实验，并得出该模式可用于大范围旱涝灾害预报的结论。肖乾广等^[27]从土壤的热性质出发，在求解热传导方程的基础上引入了“遥感土壤水分最大信息层”概念，并以此理论建立了多时相的综合土壤湿度统计模型，认为采用幂函数模型比线性模型好。

为减少非遥感因子在热惯量法中的干扰，张仁华等^[28]根据土壤水分可供率与热惯量或表观热惯量之间的密切定量的联系，提出了由微分热惯量派生的相对热惯量和相对余热惯量（即相对热惯量变化量）推算波文比模型，实现了以全遥感信息反演裸地蒸发（潜热通量）的目标，但将模型扩展到浓密植被区应用还需进一步改进；李星敏等^[29]利用NOAA/AVHRR资料计算了真实热惯量、表观热惯量、亮温差与土壤水分关系，发现考虑地形、植被和土壤类型因素时，下垫面越均一，表观热惯量与土壤相对湿度的相关性越好。刘振华，赵时英^[30]考虑植被因素的影响，改进遥感热惯量模型，使其应用范围从裸土扩展到植被覆盖区，拓宽了适用范围。但由于地表和大气条件参数难以获取，影响了模型的反演精度，并且边界条件确定上还有待于进一步改善，不能完全适用于植被覆盖区。

热惯量遥感反演需要研究区上空昼夜两幅图像进行严格配准以得出昼夜温差。在实际应用中，由于受到云的影响，同一研究地区昼夜无云的图像较难获得，昼夜图像象元的精确配准精度也难得到保证；热惯量的计算基本上是建立在统计学的基础上的，估算含水量精度比较高，而且易于实现，但该方法仅适用于裸土和低覆盖地区，对于植被覆盖较为复杂的地表误差相对较大。

（二）蒸散与作物缺水指数法原理及研究现状

在利用热惯量法监测干旱的同时，人们也已经认识到植物体的温度和土壤可利用水的多少有关，认为其主要原理是植物蒸腾作用降低了叶温，土壤水分不足会引起叶片气孔阻力的增大，减少叶片蒸腾，从而增加冠层温度，而冠层温度的增加反过来又会引起气孔的关闭。红外测温仪的出现使植物群体冠层温度的测定得以实现。在此原理上提出了作物缺水指数

（Crop Water Stress Index, CWSI），其计算如下：

$$CWSI = (dT - dT_i) / (dT_w - dT_i)$$

式中，dT是作物冠层温度与气温差，dT_i是作物冠层温度与气温差的上限，即作物没有蒸腾情况。dT_w是作物冠层温度与气温差的下限，即作物水分充足的情况，CWSI为0，表示没有水分胁迫；CWSI为1，表示水分胁迫最大。

国外：作物缺水指数最初是以能量平衡为基础提出的。Bartholic等^[31]首先利用飞机红外遥感测得不同水分状态下的土壤和作物冠层温度，这为遥感数据代替手工测得数据提供了实践的基础。K.W.Brown等^[32]根据能量平衡-作物阻抗原理，提出了一个作物阻抗-蒸散模型，为将热红外遥感温度应用到蒸散模型中提供了理论依据。Soer等^[33]人通过测定冠层辐射温度测算日蒸散来了解旱情。

由于蒸散作用与能量和土壤水分含量关系密切，当能量较高，土壤水分供给充足时，蒸散作用较强，冠层温度处于较低状态；反之，土壤水分亏缺时，蒸散作用较弱，冠层温度较高。Idso^[34]最早提出了作物缺水指数CWSI。在植被覆盖条件下，根层水分的胁迫引起冠层温

度升高。叶片温度与土壤含水量和植物水分胁迫有关, 该研究提出了作物水分胁迫指数可用来监测作物根层土壤的有效水分。但在作物生长的早期冠层较为稀少时CWSI应用效果较差。另外它所需要的冠层温度是纯粹的冠层温度, 因此CWSI一般不能使用航空和卫星遥感获取的分率较低的地表混合温度信息。David^[35]提出农田蒸散的双层模型, 该模型把地表覆盖分为植被层和土壤层, 并在能量上和温度上有所区分, 其中引入了植被覆盖度的变量, 实现了对部分植被覆盖地区旱情的监测。Morane^[36]在能量平衡双层模型的基础上, 将该指数加以推广改进, 提出了水分亏缺指数(WDI), 使用冠层气温差与蒸散量建立关系, 既而得到旱情判断标准。其计算公式如下:

$$WDI=1-Ed/Ep$$

式中, Ed指白天实际蒸腾蒸发量, Ep指蒸散发能力, 即潜在蒸腾蒸发量。Zhongbo Su等^[37]根据CWSI的原理, 提出DSI (Drought Stress Index) 指数。在中国北方地区进行研究, 实验结果表明, DSI与降水量的多少是一致的。在作物生长季节, DSI越高, 降水不足, 植被根区的相对含水量越少, 反之, 相对含水量越多。

国内: 作物缺水指数 (CWSI) 得到广泛应用。田国良等^[38]建立了CWSI与土壤水分之间的线性方程; 并根据作物缺水指数半定量给出了土壤旱情分布图; 武晓波等^[39]选用作物缺水指数和热惯量法结合地面气象资料及卫星资料对旱情进行了监测; 赵昕奕等^[40]采用改进的植被缺水指数, 其中引入了阶段作物系数的概念, 使指数更能直接反映作物状态以及土壤水分状况, 实现了对黄淮平原冬小麦旱情监测; 齐述华^[41]用WDI法进行了中国干旱情况的监测, 并利用120个农业气象观测站的表层土壤水分进行对比分析, 结果表明, 水分亏缺指数能够有效应用于完全植被或部分植被覆盖条件下干旱监测; 刘安麟等^[42]对作物缺水指数法进行简化, 对陕西省关中地区春季干旱进行了监测效果较好。但简化后的模型仍依靠下垫面植被覆盖状况和地面风速、水汽压等气象要素, 宋小宁等^[43]建立了基于亚像元尺度的双层蒸散模型, 进行区域地表蒸发量估算, 然后用实际蒸散与潜在蒸散获得改进的地表缺水指数 (SWDI), 进而划分该区域的地表缺水等级, 估算表层土壤水分含量。

在有植被覆盖的情况下, 作物缺水指数法精度高于热惯量法, 但其计算复杂, 一些要素依赖地面气象台站, 实时性不能保证。同时, 无论是CWSI经验模式还是理论模式都是在能够得到冠层温度的基础上, 而遥感获取陆地表面温度往往是冠层温度与土壤背景温度的混合温度, 特别是在作物生长初期。由于地表干燥土壤 (下层土壤水分仍然充足) 的背景温度往往比气温高很多, 利用CWSI会过高地估计作物水分胁迫。

(三) 植被指数法原理及研究现状

植被指数法(Vegetation Index, VI)即是利用植物状态进行干旱监测。其原理是植被在近红外波段具有较高的反射率, 在可见光红光波段由于叶绿素的强吸收而在此波段具有较低的反射率, 吸收70%-80%的红光, 反射了大部分绿光, 而裸露地和岩石在这两个波段的反射率相当, 云和水体在红光波段的反射率比近红外波段的反射率大。在水分胁迫条件下, 植被生长受到限制, 绿色植被反射率发生变化, 可见光波段反射率增加, 近红外波段反射率降低, 使得归一化植被指数发生变化, 从而可利用它进行旱情监测。归一化植被指数 (NDVI) 计算式如下:

$$NDVI = (P_{NIR} - P_{red}) / (P_{NIR} + P_{red})$$

式中 P_{NIR} 为近红外波段的反射率, P_{red} 为红外波段的反射率。由于NDVI可以消除大部分与仪器定标、太阳角、地形、云阴影和大气条件有关辐照度的变化, 增强了对植被的响应能力, 是目前已有的40多种植被指数中应用最广的一种。

国外: 1969年Jordan提出最早的一种植被指数——比值植被指数(RVI) $RVI = P_{NIR}/P_{red}$, 对于浓密植物反射的红光辐射很小, RVI将无限增大; Deering在此基础上提出了归一化差值植被指数NDVI, 其值的范围为(-1, 1); Lozana-Garcia^[44]等利用NDVI对美国印定安那州1988年的重旱进行分析监测, 表明NDVI能够对极旱有较好的反映; Kogan^[45]根据不同地表覆盖类型多年NDVI变化情况对NDVI进行了归一化, 提出了植被状态指数(VCI), 经研究表明VCI能够较好地反映降水动态变化; Kanfman和Tanre^[46]发展了抗大气植被指数(ARVI), 以有效减少植被指数对大气的依赖; Bawa^[47]等发现利用同季相象元的NDVI多年时间序列资料进行比较, 有利于消除植被季节变化的影响, 同时相同植被覆盖条件的NDVI值也更具有可比性。

国内: 毛学森等通过对冬小麦NDVI变化与水分胁迫的关系研究结果表明, NDVI对土壤水分变化并不敏感, 而土壤水分改变首先影响小麦植株体形态, 进而影响冬小麦的NDVI。因为NDVI监测干旱具有滞后性, 直接利用NDVI监测土壤水分难度较大, 陈维英等^[48]引入距平植被指数监测干旱取得了较好效果, 认为采用距平植被指数监测农作物干旱比只用NDVI的瞬时值优越。冯强等^[49]应用VCI进行全国干旱监测, 并确定全国逐旬旱情分布, 监测结果表明, VCI在作物生长期应用于大范围旱情遥感监测, 有效且简便易行; 郭铤等^[50]针对VCI在极端干旱的沙漠戈壁地区会出现虚假的高值, 提出了改进的植被状态指数(RVCI), 有效地改进沙漠戈壁VCI的不合理情况, 扩大了植被状态指数的研究范围; 陈云浩等^[51]利用条件植被指数法对我国北方不同土地覆盖类型下的土壤水分含量进行了监测。这几种方法都是以多年积累资料为基础, 使用干旱时段的植被指数与多年平均值做比较, 根据差值大小来确定作物受旱程度。此类方法不能够直接反演出土壤含水量, 但是因为它考虑到多年的作物生长状况, 因此实际应用的意义很大, 尤其是对农业生产的旱情监测。但因为用植被指数法检测作物缺水要在土壤缺水已引起植被生长受阻的情况下才能实现, 因此直接使用植被指数监测土壤水分的反应会有一定的滞后性。

(四) 结合植被指数和温度方法原理及研究进展

为了消除土壤背景的影响, 有必要利用光谱植被指数和陆面温度的复合信息来评价区域干旱。其中一个应用广泛的方法是结合陆地表面温度和植被指数, 这种方法通常被称为VI-Ts法。基于 T_s -NDVI的特征空间为梯形或三角形的原理, 发展了多种干旱监测方法。

国外: Nemani和Running^[52]最早提出了利用VI-Ts来研究蒸散, 从此这方面的理论和应用研究发展迅速。Friedl等^[53]认为VI-Ts之间的负相关性主要由土壤背景温度和冠层温度差及植被覆盖度等引起, 此外也有人认为这种现象是由植被冠层蒸腾的降温作用引起的, 也就是说参与蒸腾的叶面积的空间变异是 T_s 空间变异的来源之一。Price^[54]发现当研究区域的植被覆盖度范围较大, 以遥感资料得到的 T_s 和NDVI为横纵坐标得到的散点图呈三角形。Carlson等^[55]在不依靠气象数据的情况下利用VI-Ts法建立了由SVAT模型估算了土壤有效含水率; Moran等^[56]结合光谱植被指数和温度来研究遥感估算蒸散量; Prihodko等^[57]发现 T_s /NDVI斜率与地表蒸散

速率有一定函数的关系,并且可以用来计算气温;Boegh等^[58]根据对各种植被类型的NDVI-Ts线性关系,将遥感获得的Ts数据分解为稀疏植被条件下的叶温和土壤温度;Sandholt^[59]等在研究土壤湿度时提出了温度植被干旱指数(Temperature-Vegetation Dryness Index ,TVDI)的概念。计算式如下:

$$TVDI = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$

式中, $T_{\max}$ 为不同植被指数条件下的最高下垫面温度, $T_{\min}$ 相应地将不同植被指数下的最低下垫面温度,在Ts-NDVI特征空间中,只要知道裸地下和完全植被覆盖下的温度值,可以计算任意植被覆盖度情况下的指数值。TVDI方法反演土壤湿度的特点是模型参数可由图像数据直接获得,计算简单方便,并与土壤湿度有关。但TVDI只表示同一图像水分状况的相对值。Kimura^[60]改变湿边的构造,提出了改进的温度植被干旱指数(MTVDI),提高了干旱指数与实测值的相关性。

国内:在国内也进行了大量结合植被指数和温度方法来监测干旱的研究。肖乾广,陈维英等^[61]按照NDVI和陆地表面温度比值作为植被供水指数(VSWI)来评价干旱情况,植被供水指数通过融合热红外和反射数据来确定土壤水分状况和地表有效水分。计算式如下:

$$VSWI = Ts/NDVI$$

NDVI和Ts可以由遥感数据分别计算得到,很容易计算VSWI。作物受到干旱影响时, Ts有增大趋势, NDVI值有减小的趋势, VSWI增大。王鹏新^[62]基于NDVI和LST的散点图是三角形(特征空间)的特点,提出了条件温度植被指数VTCL,定义如下:

$$VTCLi = \frac{LST_{NDVIMAX} - LST_{NDVii}}{LST_{NDVIMAX} - LST_{NDVIMIN}}$$

式中, $LST_{NDVIMAX}$, $LST_{NDVIMIN}$ 分别表示在研究区域内,当NDVI值等于某一特定值时地表温度的最大值和最小值。并应用其监测研究区内土壤表层含水量,结果表明VTCL适用于研究某一特定年内某一时期这一区域的干旱。辛景峰^[63]利用小窗口内NDVI与Ts呈负相关的性质,根据窗口内像素点NDVI与Ts之间的拟合斜率来评价土壤含水量。张顺谦等^[64]分析了Ts-NDVI特征空间属性和TVDI指数干旱监测能力,提出了适合四川伏旱TVDI计算模型、分级标准和影响评估方法。许国鹏等^[65]利用MODIS数据提取改进型调整植被指数(MSAVI)得到了改进型温度植被旱情指数(MTVDI)并应用于湖北省旱情监测,结果表明,MTVDI能较好地反映区域相对旱情的空间差异;王鹏新等^[66]比较了基于植被指数和地表温度的干旱监测方法对于干旱监测的效果,结果表明,结合植被和地表温度的干旱监测方法更适合于研究区域的干旱。

目前结合地表温度和植被指数的特征空间指数法是高植被覆盖区应用较广泛的监测方法,但该方法也存在着缺陷。最重要的问题就是计算出的指数与真实土壤水分之间的转换,目前的研究中主要利用实测土壤水分数据来进行回归,但是回归相关系数不高,可信度差。而且该方法存在不同时间、不同区域的特征空间指数不可对比分析的问题。

(五) 微波遥感方法原理及其研究现状

热惯量和特征空间方法都是基于可见光与近红外及热红外遥感进行土壤水分监测,而当地球表面被云层覆盖时,它们则变得无能为力。微波对云层有较强的穿透力,而且不受光照条件限制,能够全天时、全天候、多极化工作,因此人们普遍认为微波遥感信息能够非常有效地探测土壤含水量,微波遥感监测土壤水分是目前研究最多的监测土壤水分方法。

微波遥感监测水分的理论基础是基于液态水(约80)和干土(2~5)之间介电常数的强烈反差,随着土壤水分增加,土壤介电常数将相应增大。微波遥感按传感器工作性质可以分为主动微波遥感和被动微波遥感。

国外:与主动微波遥感相比,被动微波遥感土壤水分研究开展的较早,其算法也更成熟,是当前土壤水分遥感的主要方式。被动微波土壤水分反演基于利用微波辐射计测得的亮度温度,主要采用统计分析方法分析土壤水分与辐射亮温的关系。20世纪70年代,美国国家航空航天局(NASA)在亚历山大农田进行了航空微波辐射计飞行试验,发现亮温与土壤湿度(质量百分比)具有较好的线性相关^[67]。Njoku^[68]等基于辐射传输方程,建立了亮温与土壤水分等参数的非线性方程,求出土壤温度,该理论算法成为微波遥感土壤水分算法发展的基础。此外,利用正向模型和神经网络等算法也是当前土壤水分遥感反演算法的主要发展方向^[69]。

土壤水分主动微波反演是利用散射计进行能量的发射和接收,由于不同含水量的土壤介电特性不同,其雷达回波信号也不同,据此可建立后向散射系数和土壤水分的反射率建立联系。后向散射系数是土壤水分、植被、地表粗糙度、地形等因素共同作用的结果。在主动微波遥感领域,合成孔径雷达(SAR)已成为国际对地观测领域最重要的前沿技术之一。目前利用多频、多极化/全极化雷达数据反演裸露地表土壤水分的经验和半经验模型主要有 Oh 模型, Doboson 模型和 Shi 模型,这些模型是针对裸露地表条件建立的,但同时这些模型也适用于稀疏到中等密度的地表植被覆盖条件。目前被普遍接受和使用的为基于辐射传输方程的 MIMICS 模型^[70]。

为了更好地研究和探索土壤水分分布非均质性对于陆地-大气能量流通的影响,以及微波遥感在观测和反演土壤水分中的作用,美国开展了土壤水分实验(SMEX02)^[71],该项实验就是为了解决对地观测卫星高级微波扫描辐射计的亮度温度与土壤水分之间的相关关系,并在有植被覆盖条件下检验现有的主动与被动雷达土壤水分反演模型。2003年和2004年又分别开展了相似的实验 SMEX03、SMEX04^[72]。

国内:国内使用微波监测土壤水分仍处于探索阶段。李杏朝等^[73]根据微波后向散射系数法,用X波段散射计测量土壤后向散射系数,进行了微波遥感监测土壤水分的试验,监测相对误差率仅12%。高峰^[74]等简要分析了主动微波遥感土壤相对含水量的研究进展。李震等^[75]研究建立了一个半径公式模型,用来计算体散射项,综合时间序列的主动和被动微波数据,消除植被覆盖的影响,估算地表土壤水分变化状况。杨虎等^[76]利用多时相Radarsat ScanSAR雷达后散射系数图像繁衍得到了地表土壤水分变化模式信息。周凌云等^[77]使用了时域反射仪(TDR)方法利用电磁波的传播速度来测量土壤水分。

微波遥感不受光照限制,对植被、云层、土壤都具有一定的穿透力,精确度较高,主动和被动微波遥感的综合利用可提高微波遥感监测土壤水分的精度,被认为是当前土壤水分反演中最有效的方法之一。但是目前微波反演土壤水分模式还不成熟,也需考虑土壤、植被特性和表面糙度的问题,主动微波遥感虽然数据分辨率高,但所需的发射功率较大,处理数据

复杂，会受到土壤粗糙度的影响，因此适合小尺度土壤水分反演，由于缺少关于地形、植被的回波信息而在大尺度反演上面临一定的问题；被动微波遥感影响因素多且空间分辨率低。加上微波遥感成本较高，目前还未进入真正的实用阶段。

第2章 绪论

2.1 论文选题的背景和意义

遥感获取干旱信息主要是通过测量土壤表面反射或发射的电磁能量,探讨遥感获取信息与土壤含水量之间的关系,从而反演出地表土壤含水量。遥感技术在旱情监测中的应用改变了过去局地、有限点的观测模式,应用遥感的方法监测土壤含水量可以得到土壤含水量在空间上的分布状况和时间上的变化情况,再加上遥感数据时间重复周期短、空间覆盖范围广和成本低等特点,使遥感技术在干旱监测中的应用更加广泛,特别是对于我国地块分散的家庭管理方式,遥感技术更能够充分反映地表信息的空间变异性。随着航天技术和干旱监测研究方法不断提高,利用遥感手段进行大范围旱情监测的研究已经取得了很大进展,利用中低分辨率遥感卫星数据计算的如植被状态变化、温度状态变化、土壤热惯量、植被供/缺水以及地表蒸散等特征来对旱情进行监测已取得较好的成果。利用遥感技术监测干旱是目前干旱研究的重点。

干旱是一种非常复杂的自然现象,它的发生具有随机性、地域性、隐蔽性和不易觉察等特点,这给遥感监测干旱带来许多不确定性的问题。精确地反演土壤含水量来监测干旱仍是公认的世界性研究难题^[78]。国内外学者为了提高旱情监测的精度,在旱情遥感监测方面已经做了大量的研究和实验,但是关于土壤水分及其影响因子之间的关系以及如何提高土壤含水量反演精度仍在进一步研究。

现有的旱情遥感监测系统中一般只用一个或有限个指数组合对大区域进行监测,这种方式在很大的时空尺度上虽然能够监测旱情,但是部分地区的监测结果与实际情况大相径庭。这主要是由于不同地区不同时间,下垫面物理特性不一致,如降水分配不平衡,光热不均,植被状态与结构不尽相同,作物品种与物候存在差异,导致地表成旱的因素往往不同,因而不同指数在不同地区的适应性受到限制。不考虑干旱分布的差异以及不同下垫面对干旱反映的差异,用同一指数进行农业旱情监测,其精确度和适应性的可信度必然会降低。因此为了提高农业旱情遥感监测的精度,对监测区所选旱情遥感指数适应性进行验证是必不可少的,利用不确定性因素少,适应性好的评价指标进行旱情监测是获取准确干旱信息的基础。而且干旱是一个累积的过程,在一定连续时间内,可认为气候、土壤和生产水平处于相对不变的状态,只有天气变化对作物生长有短期的效应,监测一段时期内旱情发生变化趋势,是能够更为精确利用遥感监测干旱的关键。

重庆市三峡库区地貌类型复杂,气候受季风环流控制,大气环流的季节变化使降雨在时空上分布不均,一年四季都有干旱发生,其中尤以伏旱(伏秋旱)最为突出。重庆伏旱具有出现频率高,持续时间长,影响地区广,灾害程度重的特点。据现有气象记录分析,伏旱发生的频率大约 70~80%,重伏旱频率大约 20~30%;长江、嘉陵江、涪江流域沿江地区是干旱高发区,具有十年九旱,三年一重旱、五年一严重旱的规律^[79]。重庆市的干旱往往不是以单一形式出现,而常常是冬旱连春旱、春旱连夏旱、伏旱连秋旱、秋旱连冬旱。严重影响了研究区工农业生产和人民生活。因此在重庆三峡库区针对夏旱、伏旱期间,结合研究区域的实际情况,对比研究常用的干旱监测方法监测结果,开展旱情遥感监测指数验证适应性验证分

析, 探讨适合重庆地区伏旱期大面积监测的技术, 对研究区域抗灾、减灾具有重要的意义。

2.2 研究区概况

重庆市三峡库区位于东经 $105^{\circ}17'-110^{\circ}11'$ 、北纬 $28^{\circ}10'-32^{\circ}13'$ 之间的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带, 是三峡库区的腹心地区。辖区东西长 470 km, 南北宽 450 km。地界东临湖北、湖南, 南接贵州, 西靠四川, 北连陕西。重庆幅员辽阔, 幅员面积达 $82,430 \text{ km}^2$ 。

地形地貌: 重庆市地处四川盆地东南缘, 地貌组合差异大, 东部和南部靠大巴山、武陵山两座大型山脉, 西北部和中部以丘陵、低山为主。地域内河流纵横交错, 长江干流自西向东横贯全境, 在重庆境内流程 665km。以长江干流为轴线, 上百条大小支流入江, 地势沿河流、山脉起伏, 形成南北高、中间低, 从南北向长江河谷倾斜的地貌, 构成以山地、丘陵为主的地形形态。主要有以下特点: 一是地势起伏大, 层状地貌分明。最高海拔为 2796.8 米, 最低海拔为 73.1 米, 相对高低差达 2723.7 米。总体而言东部、东南部和南部地势高, 大多为海拔 1500m 以上的山地; 西部地势低, 大多为海拔 300-400m 的丘陵。长江横穿巫山三个背斜, 形成著名的瞿塘峡、巫峡、西陵峡。由此构成 300-400m 七级层状地貌, 逐级分别由南北向长江河谷降低。二是地貌类型多样, 以山地、丘陵为主。全市地貌形态类型有中山、低山、高丘陵、中丘陵、低丘陵、缓丘陵、台地和平坝等八大类, 其中山地 (中山和低山) 面积 $62,400 \text{ km}^2$, 占幅员面积的 75.8%; 丘陵面积近 $15,000 \text{ km}^2$, 占幅员面积的 18.2%; 台地面积 2900 km^2 , 占幅员面积的 3.6%; 平坝面积近 2000 km^2 , 占幅员面积的 2.4%。三是地貌形态组合的地区差异明显。华蓥山——巴岳山以西为丘陵地貌; 华蓥山至方斗山之间则为平行岭谷区; 北部为大巴山区中山山地, 东部、东南部和南部则属巫山大娄山山区。四是喀斯特地貌分布广泛。在东部和东南部地区, 喀斯特地貌大量集中分布, 地下和地表喀斯特形态发育均佳。

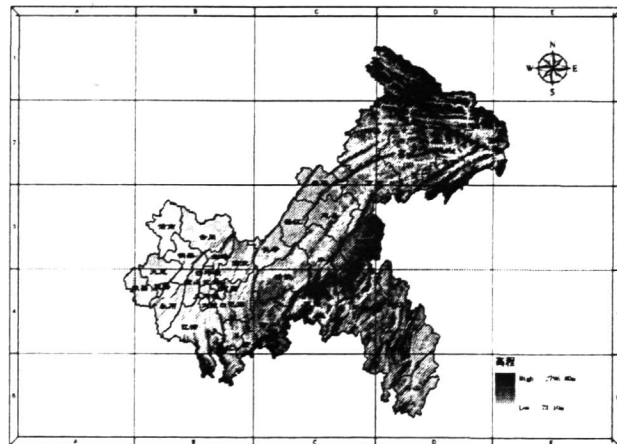


图 2-1 重庆市数字高程模型

Fig2-1 Digital elevation model of Chongqing

气候条件: 重庆位于北半球副热带内陆地区, 属中亚热湿润季风气候类型, 其气候特征为: 冬暖、春早、夏长、秋凉。云雾多, 日照少, 风力小, 无霜期长, 雨量充沛, 但时空分配不均, 主要降水集中在 4-9 月, 占全年雨量的 70-90%。气候温和, 气候资源丰富且光热水同步。年平均气候在 18°C 左右, 冬季最低气温平均在 $6-8^{\circ}\text{C}$, 夏季平均气温在 $27-29^{\circ}\text{C}$, 日照总时数 1000-1200h, 冬暖夏热, 无霜期长、雨量充沛、温润多阴、雨热同季, 常年降雨量

1000-1400mm, 春夏之交夜雨尤甚。根据重庆市气象站提供的方位号可将重庆分为5区, 如图2-2所示。

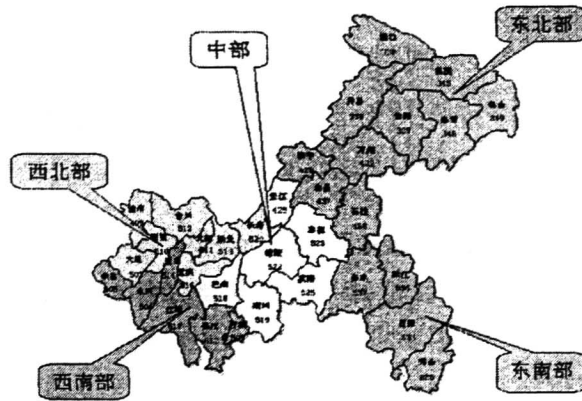


图 2-2 重庆市分区图

Fig2-2 Regionalization map of Chongqing

西北部有重庆(包括渝中区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、大渡口区、双桥区)、北碚、渝北、合川、铜梁、潼南、巴南、长寿和大足;西南部有荣昌、永川、璧山、江津、綦江和万盛;中部有垫江、丰都、涪陵、南川和武隆;东南部有石柱、彭水、黔江、酉阳和秀山;东北部有城口、巫溪、巫山、奉节、云阳、开县、万州、梁平和忠县。

2.3 研究目标

以重庆市三峡库区为研究区域, 在分析总结常见的干旱遥感监测模型的基础上, 以遥感为获取信息手段, 以土壤相对含水量为干旱评价指标, 结合研究区域在夏伏早期下垫面特性, 选择多种干旱监测模型对研究区域进行干旱监测研究; 结合土壤相对含水量实测数据, 反演时间序列的土壤相对含水量空间分布图, 并进一步探讨不同时期干旱遥感监测模型的适应性; 定量分析研究区域干旱时空分布情况, 为研究区域提高干旱预警能力提供理论依据。

2.4 研究内容

本文运用新一代中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据和土壤水分实测资料, 拟进行以下研究:

(1) 提取反演土壤水分的关键因子: 获取 MODIS 产品数据(8 天合成的地表温度数据 MOD11A2 和 16 天合成的植被指数数据 MOD13A2), 并进行地理坐标纠正和合成, 掩膜获取研究区域的影像。得到 16 天合成的归一化植被指数(NDVI)和地表温度(T_s)数据。

(2) 利用干旱监测模型反演研究区域 2005、2006 年 6-8 月的土壤水分分布图: 使用 MODIS 产品数据, 结合研究区域在 6-8 月下垫面的情况, 选择植被状态指数(VCI)、温度植被旱情指数法(TVDI)和植被供水指数法(VSWI)为干旱监测方法, 计算该时期干旱指数, 并结合通过野外采样获得的土壤相对含水量实测数据反演得到研究区域土壤相对含水量空间分布图。

(3) 利用土壤水分实测数据, 对比分析三种干旱指数的适应性, 从而得到最适合研究区

域 6-8 月的干旱监测模型。

(4) 定量分析研究区域土壤相对含水量的时空分布规律：根据 (3) 中选出的最优土壤水分反演模型，得到重庆市三峡库区 2006 年特大干旱期间的土壤水分时空分布图。结合重庆市行政区域和重庆市土地利用现状图，统计分析重庆三峡库区干旱的空间变化规律以及时间演化规律。

2.5 技术路线

本研究在完成基础资料收集后，首先进行数据整理。采用遥感软件 ENVI 和地理信息系统软件将 2000-2007 年的植被指数产品和 2005、2006 年的地表温度产品进行投影转换和区域切割，得到研究区域 (5 月 25 日-9 月 13 日) 每 16 天合成的共七个时间段的植被指数影像和地表温度影像；基于植被指数和地表温度影像，根据干旱指数的原理计算出各时期的干旱指数，结合 2005、2006 年的土壤水分数据对比分析各干旱指数对研究区域干旱监测的适应性；最后根据最优干旱指数对 2006 年研究区域特大干旱情况进行时空分析，定量分析和评价各区县的受旱情况和农业用地的受旱情况。其技术路线如图 2-3 所示。

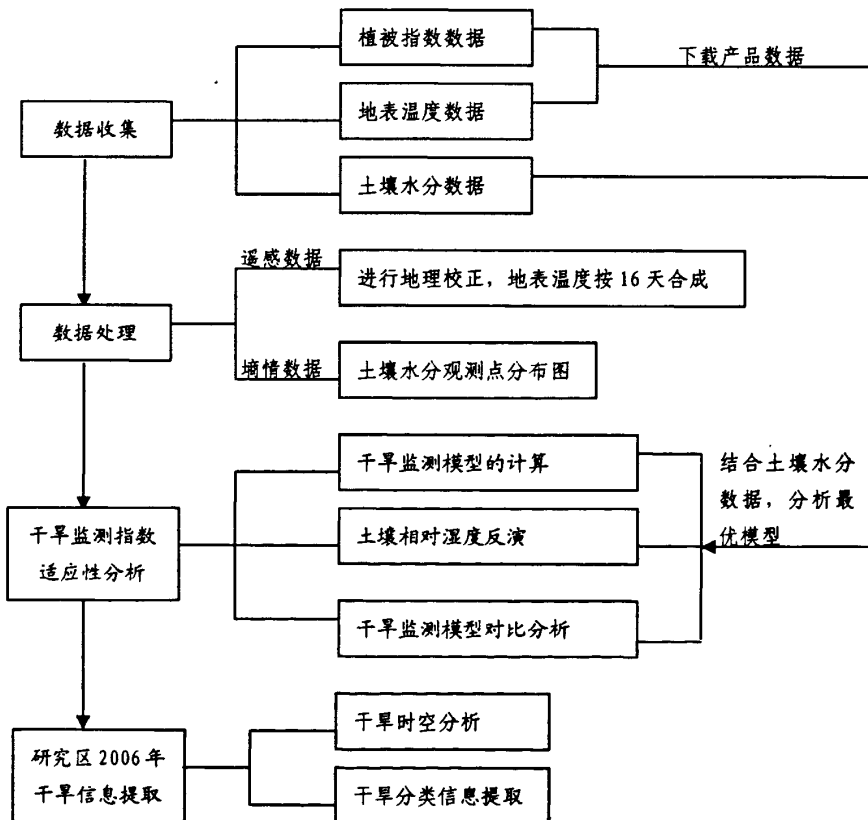


图 2-3 技术路线图

Fig2-3 Flow diagram of the study

第 3 章 数据收集与处理

本文所采用的数据包括实测土壤水分数据和遥感影像数据。

3.1 实测土壤水分数据

遥感监测是获取地表信息，在众多干旱指标中，土壤水分指标是遥感监测农业旱情中应用比较广泛的指标^[80]。这是因为作物干旱是气象干旱和土壤干旱共同作用的结果，而土壤干旱一般是气象干旱较长时间的累积状况的表现，用土壤相对含水量指标评估作物干旱比其它指标更切合实际，具有相对稳定性。因此本文采用土壤含水量作为旱情判定指标。

土壤含水量的实测数据是由气象部门提供的 2005、2006 年 6 月 3 日至 9 月 13 日每 5 天一次的 170 个监测点的土壤墒情数据。包括 10cm、20cm、30cm、40cm 深度的土壤水分数据，取值范围在 0-1 之间。这些站点测量的是土壤含水量占田间持水量的比值，即土壤的相对含水量。这样可以在一定程度上抵消土壤质地的影响，同时也能起到简化旱情评价指标的作用。根据土壤水分监测点的经纬度坐标，生成土壤监测点分布图（图 3-1）。

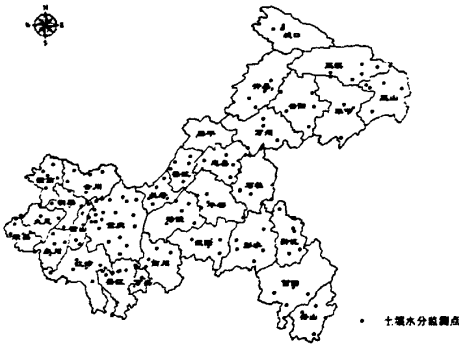


图 3-1 土壤水分监测点分布图

Fig3-1 Distribution of soil moisture monitors station

本文采用土壤相对含水量为干旱的评价标准。土壤相对含水量与旱情等级之间有一个统一的标准，这里采用的是中国气象局农业气候中心使用的标准。0-20cm 深土壤相对含水量与旱情等级对应关系如表 3-1 所示，共分为五级^[81]。

表 3-1 土壤相对含水量旱情等级表

Tab3-1 Soil relative moisture drought classification

旱情等级	重旱	中旱	轻旱	正常	湿润
土壤相对含水量	<0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.8	>0.8

3.2 遥感数据收集

3.2.1 遥感数据的选择

传统的遥感干旱监测多用 NOAA-AVHRR, LandSat 和 SPOT 等传感器监测。NOAA 卫星具有周期短、时间分辨率高、覆盖范围广等优点，但空间分辨率太低；LandSat 和 SPOT 卫星

虽然空间分辨率都很高,但轨道运行周期长,时间分辨率很低。近年来,由于 MODIS 传感器的高时间分辨率、高光谱分辨率、适中的空间分辨等特点使得其在干旱监测中具有突出的优势。

MODIS 是当今世界上最先进的传感器之一,是 EOS 计划中用于观测全球生物和物理过程的仪器。MODIS 传感器搭载于美国航空航天局 (NASA) 1999 年 12 月发射的地球观测系统 (EOS) 的 TERRA-1 和 AQUA-1 卫星上, TERRA 于每日地方时 10:30 左右过境,因此被称为上午星,其轨道高度 705km,扫描轨道宽 2330km,一颗卫星 24 小时扫描全球两遍。2000 年 12 月发射的第二颗 EOS 卫星——AQUA (又称为 EOS-PM1) 于每日地方下午 13:30 左右过境,夜间 2:30 左右过境。MODIS 传感器提供 0.4-14.5 μm 之间的 36 个离散波段的图像,星下点空间分辨率可为 250m、500m 或 1000m,视场宽度为 2330km。MODIS 每两天可连续提供地球上任何地方白天反射图像和昼夜的发射图像数据,包括对地球陆地、海洋和大气观测的可见光和红外波谱数据,并且 TERRA 卫星是唯一实行全球免费接收的遥感影像。正是因为 MODIS 数据具有巨大的优越性,自它公布以来,便吸引了从事环境、生态学研究的科学家的目光,他们纷纷开始尝试将 MODIS 数据应用于各个领域^[82]。本文根据实际需要,从数据的空间分辨率、时间分辨率、价格等方面考虑,选用 MODIS 数据作为干旱监测的主要数据源。

3.2.2 遥感数据获取

本文采用的遥感数据是美国国家航空航天局 (NASA) 官方网站上免费提供的 MODIS 全球数据产品^[83]。该产品数据共有 44 种标准产品,具有不同的时间和空间分辨率,均由 DAAC (Distributed Active Archive Center) 存储和发布。EDG (Earth Observing System Data Gateway) 为用户提供 MODIS 数据的搜索和预订。该网站提供的数据包括 MODIS 一级、海洋、大气和陆地数据产品。本文根据需要选择的遥感数据为地表温度数据和归一化植被指数数据。

地表温度 (LST) 包含植被冠层温度和裸地表面温度,对于裸土称为土壤温度,对于植被称为冠层温度。土壤温度升高是土壤干旱的表现,因土壤中含水量减少时,土壤热容量相应变小,接收太阳辐射后容易增温升温,从而导致表面温度升高。而冠层温度的升高说明植物受到水分胁迫,这是因为植物叶片气孔的关闭可以降低由于蒸腾所造成的水分损失,从而造成地表潜热通量的降低,进而将会导致冠层温度的升高。因此地表温度越来越广泛应用于干旱监测。NASA 网站上提供的地表温度产品数据 (MOD11A2) 是 MODIS 陆地系列产品中 8 天合成空间分辨率为 1km 的陆地地表温度产品。该产品包含白天地表温度、夜间地表温度、31 和 32 波段通道发射率等资料。该产品中的地表温度是通过建立 31、32 通道亮温线性组合的劈窗算法计算获取的,其中通道亮温值是根据辐射度与 0.1K 步长亮温的查找表来确定,在计算地表温度过程中需要的发射率是根据 MODIS 土地覆盖产品确定的^[84]对已知发射率的像素点陆地表面温度的精度为 1K。

归一化植被指数 (NDVI) 是反映干旱的一个常用指标。MODIS 第 1 通道所含的可见光可反映植被的吸收特性,第 2 通道近红外可反映植被的反射特性。用这两个波段的数学组合,可提取作物长势信息。当植被叶绿素含量增高时,其在可见光波段的反射值减小,而在近红外波段的反射值增大,因而植被指数值也增大;当植被受旱导致水分减少时,叶绿素含量相应减小,其在可见光波段的反射值增大,而在近红外波段的反射值减小,NDVI 的值也相应减

小。根据这种光谱特性,许多学者提出了基于植被指数判别农作物生长状况和旱情等级的指标^[85],其中以归一化植被指数(NDVI)应用最为广泛。NASA网站上提供的植被指数产品(MOD13A2)是16天合成空间分辨率为1km的植被指数产品。该产品包含NDVI、EVI、红光、近红外、中红外、蓝光等波段反射率以及其他辅助信息。MOD13A2采用最大值合成方法(CV-MVC),减小随观测角度的变化和太阳—目标—传感器几何学因素引起的变化。在生成植被指数格点资料时将应用分子散射、臭氧吸收、气溶胶订正算法,用BRDF模式将观测量订正到天顶角。

3.2.3 遥感数据处理

文中对遥感影像的处理过程主要由ENVI图像处理软件完成,处理过程如下:

(1)利用软件支持下,NASA网站上提供的MRT软件,对MODIS产品数据(MOD11A2、MOD13A2)进行图像投影转换。采用Geographic Lat/Lon投影,像元大小0.01°。

(2)应用ENVI对遥感影像作图幅拼接,利用重庆三峡库区边界矢量图形剪切出重庆三峡库区的地表温度图和植被指数图像。

(3)用ENVI将2个时相8天合成的地表温度用最大值合成法合成为1个时相16天的地表温度数据。即是合成时,两个时相对应的像元的最大值。

第4章 干旱监测模型的适应性分析

本文研究干旱时期是夏早伏旱期（5月25日-9月13日），此时研究区域下垫面植被覆盖度高，因此在选择干旱监测模型时，应选择适合高植被覆盖的干旱监测方法。但由于单纯使用植被指数如距平植被指数等会造成监测的滞后性；作物缺水指数法精度虽高，但其计算复杂，冠层上空的气象参数仍依赖于地面气象站点，实时性不能保证。所以本文选择以下三种干旱监测指数：植被叶面生态状态指数构建需要辅助参数较少、对旱情反映较为敏感的植被状态指数（VCI），综合考虑植被指数、地表温度的遥感指数温度植被旱情指数法（TVDI）和植被供水指数法（VSWI），通过建立干旱指数与土壤相对含水量的关系模型，反演获得研究区域的土壤相对含水量数据。将不同干旱模型反演的土壤相对含水量数据与实测土壤水分进行对比，探讨最适合研究区域的干旱监测方法，为获取更为精确的土壤相对含水量分布提供科学依据。下面以2006年7月12日-7月27日数据为例，介绍各种干旱监测指数的计算。

4.1 干旱监测指数的计算

4.1.1 温度植被旱情指数法（TVDI: Temperature-Vegetation Dryness Index）

温度植被旱情指数法是由Sandholt等^[86]提出来的。根据研究区植被状况与土壤水分变化范围较大，即研究区植被覆盖包含从裸土到全覆盖，土壤湿度从极干旱到极湿润各种情况，以遥感资料获得下垫面温度与植被指数的平面散点图呈三角形关系^[87]，即存在所谓的下垫面温度——植被指数特征空间（见图4-1）。在特征空间中，将不同植被指数条件下的最高下垫面温度（ $T_{\max}$ ）相连，构成了三角形的旱边，代表了该区域内的干旱上限，将其干旱指数定义为1。相应地将不同植被指数下的最低下垫面温度（ $T_{\min}$ ）相连构成了三角形的湿边，代表了该区域内的最湿润区，将其干旱指数定义为0。Sandholt等通过对简化的 t_s -NDVI三角形空间进行研究，发现 t_s -NDVI的特征空间中有很多等值线，因此提出了温度植被干旱指数（TVDI）的概念，定义为：

$$TVDI = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (4.1)$$

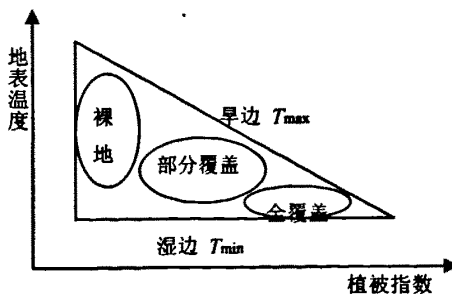


图4-1 简化的 T_s -NDVI特征空间

Fig.4-1 Simplified surface temperature-vegetation index space

其中： $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别由植被指数与旱边、湿边线形拟合获得。

$$T_{\max} = NDVI \cdot a + b \quad (4.2)$$

$$T_{\min} = NDVI \cdot c + d \quad (4.3)$$

式中：a、b和c、d分别是旱边和湿边的线形拟合方程系数。NDVI为归一化植被指数。TVDI值越大，对应的土壤相对含水量越低，TVDI值越小，对应的土壤相对含水量越高。

根据植被温度干旱指数原理计算TVDI干旱指数。由其原理可知，计算TVDI分为三步：首先是获取特征空间。本文利用Matlab软件，以植被指数0.001为步长，提取每个NDVI对应的所有地表温度中的最大值和最小值；根据获得的数据在EXCEL中作出散点图，得到Ts-NDVI特征空间，如图4-2所示。从图中可以看出：旱湿边都不是在一条直线上，而是有分段的特征。从图所示的2006年7月12日-7月27日的旱湿边上点的分布状况不难看出，最大温度形成的点大致可分为4部分：NDVI<0.1，0.1<NDVI<0.3，0.3<NDVI<0.85和NDVI>0.85。由于在分辨率为0.01°的像元中，可以认为NDVI<0.1近似于水体、云或雪，可认为地表的湿度为100%，因此在分析时，不考虑NDVI<0.1的像元。其中第二段0.1<NDVI<0.3的斜率为正，而0.3<NDVI<0.85和NDVI>0.85时旱边的斜率为负值，但二者的斜率大小不一样。

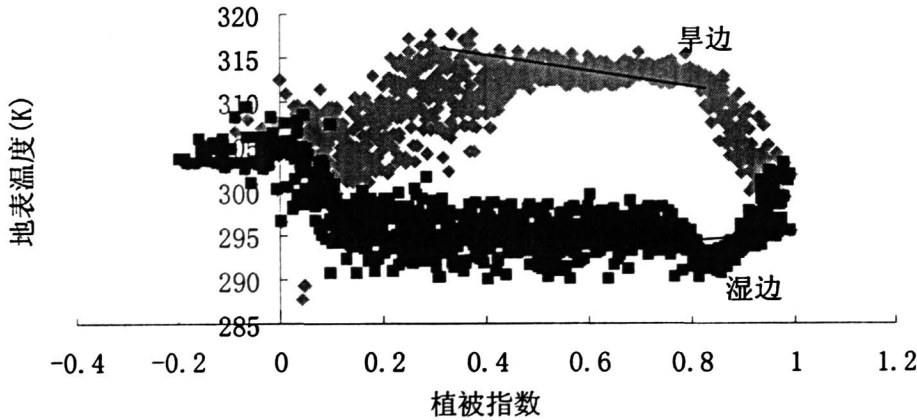


图4-2 2006年7月12日-7月27日的Ts-NDVI特征空间图

Fig.4-2 Ts-NDVI characteristic space composed from July 12 to July 27 in 2006

按照TVDI的原理，随着植被指数的增加，陆地表面温度最大值逐渐降低，且与植被指数呈线性关系。这里实际上是假定NDVI与植被覆盖度呈线性关系，但实际情况并非如此。实验证明，当植被覆盖度小于15%时，植被的NDVI值高于裸土的NDVI值，植被可以被检测出来，但因植被覆盖度很低，其NDVI很难指示区域的植物生物量；当植被覆盖度由25%~80%增加时，其NDVI值随植物量的增加呈线性迅速增加；当植被覆盖度大于80%时，其NDVI值增加延缓而呈现饱和状态，对植被检测灵敏度下降。实验表明，作物生长初期NDVI将过高估计植被覆盖度，而作物生长的后期NDVI值偏低。因此，NDVI更适用于植被发育中期或中等覆盖度的植被检测^[88]。

鉴于上述的理论研究，在拟合旱湿边方程时，选择处于中间范围的NDVI，如图4-2所示，拟合旱边时，选取0.3<NDVI<0.85的像素，拟合湿边时，选取0.2<NDVI<0.80的像素。图中NDVI小于0.1的点对应的一般可认为湿度为100%，在拟合的时候不用考虑。为考虑这种拟合方式对低值和高值植被指数区域的影响，应进一步分析不同NDVI值对应的像元数，结果如图4-3所示。

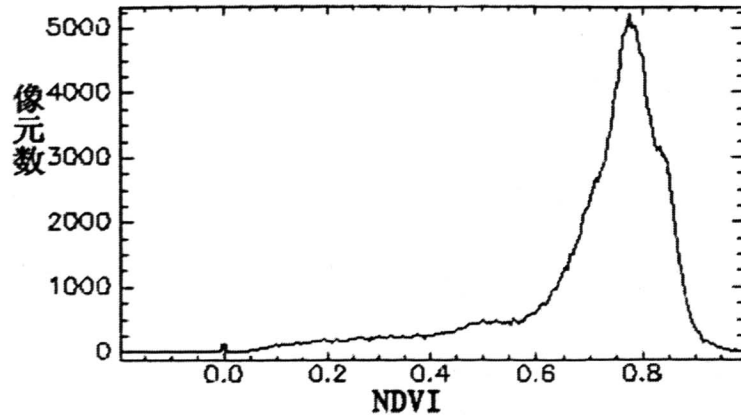


图4-3 NDVI对应像元分布图

Fig.4-3 Distribution of NDVI corresponding cell numbers

从图中不难看出，NDVI在0.2~0.9附近的像元数最多，而NDVI小于0.2的像元很少，主要是由于该时期植物生长旺盛，植被覆盖度大，因此NDVI值偏高。另一方面，由于NDVI小于0.2的像元数很少，因此应用NDVI中间部分值进行旱湿边拟合，对区域土壤水分反演的影响不大。

第二步是获得旱边和湿边。根据所得的特征空间，在SPSS中对每个NDVI值最大和最小地表温度进行线性拟合，获得旱边和湿边方程，如方程4.4、4.5所示。

$$\text{旱边方程: } y = -3.4492x + 315.44 \quad r = -0.54 \quad (4.4)$$

$$\text{湿边方程: } y = 3.2193x + 293.34 \quad r = 0.32 \quad (4.5)$$

第三步是获得TVDI分布图。根据获取的旱边、湿边方程，在软件ENVI中计算植被干旱指数(TVDI)分布图，如图4-4所示。TVDI的范围是0-1，等级分为4级。植被温度干旱指数值越小，旱情越严重。从图中可以看出，相对而言，该时期重庆市三峡库区中部、西北部和西南部已出现了干旱的现象，而在东北部和东南部海拔比较高的地区干旱情况不明显。

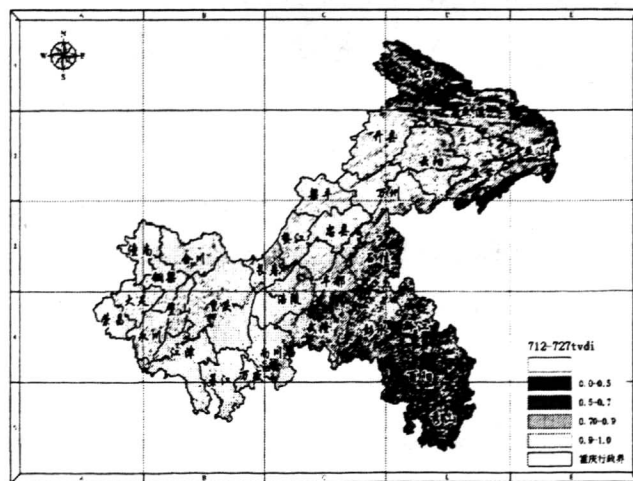


图4-4 2006年7月12日-7月27日TVDI干旱指数分布图

Fig.4-4 TVDI drought index distributing map composed from July 12 to July 27 in 2006

4.1.2 植被供水指数法 (VSWI: Vegetation Supply Water Index)

植被供水指数法反映的是当作物受旱时，冠层通过关闭部分气孔而减少蒸腾量，避免过多失去水分而枯死，蒸腾减少后，卫星遥感的作物冠层温度（由于遥感反演冠层温度的困难性，暂时以反演的地表温度近似为植被的冠层温度）升高、归一化植被指数减小。作物在一定的生育期，冠层温度的高低，是度量作物受旱程度的一种标准。国家卫星气象中心提出的植被供水指数综合考虑了 NDVI 和植被冠层温度，其定义式为：

$$VSWI = \frac{NDVI}{Ts} \quad (4.6)$$

式中：Ts 为地表温度，NDVI 为归一化植被指数，当植被供水正常时，卫星遥感的植被指数在一定的生长期保持一定的范围，如果遇到干旱，植被供水不足，一方面植被的生长受到影响，卫星遥感的植被指数降低；另一方面当植被受旱胁迫时，为减少水分损失，叶面气孔会部分关闭，导致叶面温度的增高，植被冠层温度升高。因此 VSWI 值越小，表明区域受旱越严重，反之则表明没有受到干旱的影响。

根据方程 4.6，由植被指数影像和地表温度影像得到研究区域 2006 年 7 月 12 日-7 月 27 日的植被供水指数分布图，如图 4-5 所示。从图中可以看出，VSWI 值范围为 0-0.0033，等级分为 4 级。该时期研究区域干旱情况不严重，仅在主城区和长江流域沿岸部分地区有干旱的现象。由于 VSWI 法适用于植被覆盖较高的地方，对于河流区域该方法不适用。

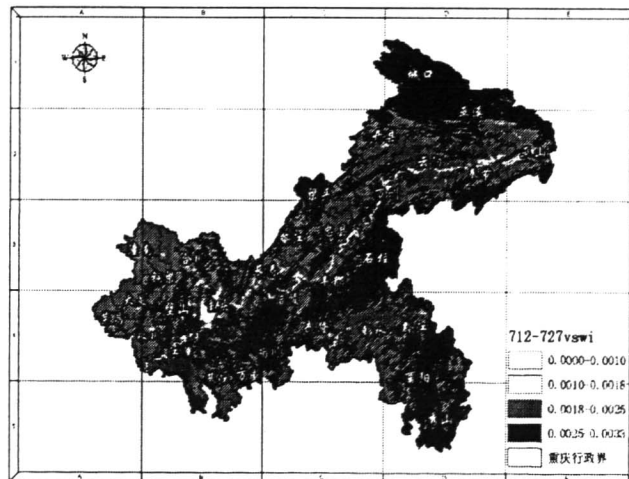


图4-5 2006年7月12日-7月27日植被供水指数分布图

Fig.4-5 VSWI drought index distributing map composed form July 12 to July 27 in 2006

4.1.3 植被状态指数法 (VCI: Vegetation Condition Index)

NDVI 是对地表植被覆盖以及生长状况的度量，通过一个地区 NDVI 与其它地区的差异不仅可以从空间上反映这些地区生态系统间生产力的不同，而且可以通过一个地区 NDVI 年与年间的变化能够反映由于气象条件的差异而造成的每个生态系统生产力的年际间波动，其中 NDVI 多年的最大和最小值能够反映这些年份最佳和最差的气象条件。基于这一原理 Kogan 等^[89]提出了 VCI 的概念，将 VCI 定义为：

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (4.7)$$

式中: $NDVI$ 、 $NDVI_{\max}$ 、 $NDVI_{\min}$ 分别为按 16 天合成的归一化植被指数、16 天合成植被数的多年最大值和最小值。

VCI 是通过对地表植被生长状况的监测来达到监测干旱的目的。VCI 的取值范围是 0-1, VCI 值越小, 反映植被生长状况越差, 从而反映出干旱情况; 值越大植被生长状况越好, 从而反映出没有干旱发生。

根据 VCI 的原理可知, 植被指数多年的最大值和最小值是计算 VCI 的关键。本文的植被指数数据为 2000-2007 年 16 天合成的植被指数数据, 通过比较同一时段中 8 年序列的植被指数值, 即每个像元都有 8 个值, 利用 IDL 软件比较获得每个像元的最大值和最小值。这样就生成了 16 天合成的植被指数最大值和最小值图像。如图 4-6 所示。植被生长越茂盛的区域, 植被指数值越大, 从图中植被指数分布可知, 该时期是植物生长旺季, 整个研究区域植被覆盖度高。比较而言, 在东部、东南部海拔较高的地区比西部海拔较低的地区植被指数高。

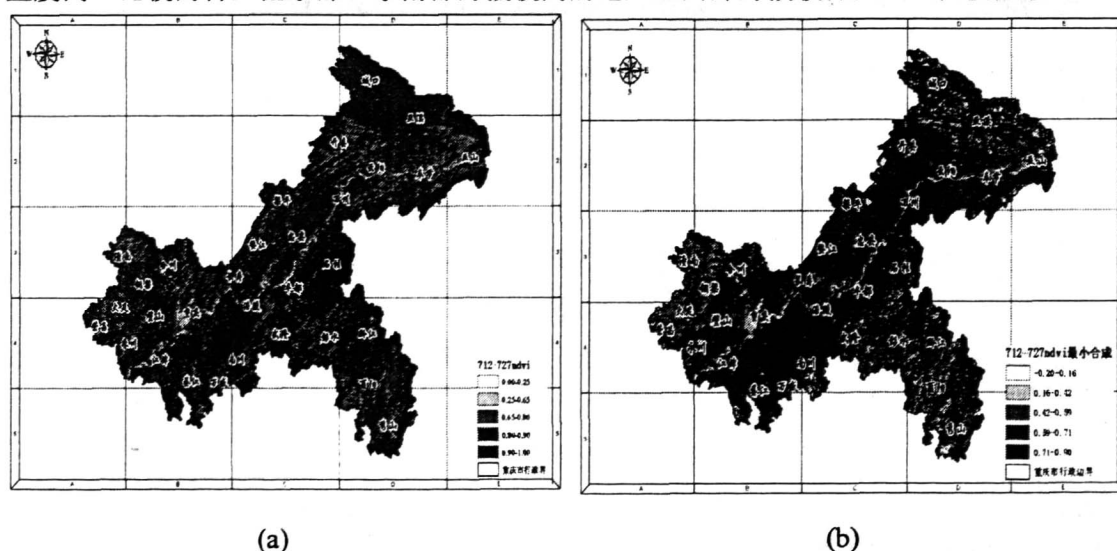


图 4-6 2000-2007 年 7 月 12 日-7 月 27 日 16 天合成 NDVI 最大值(a)和最小值(b)

Fig.4-6 The max and min NDVI distributing map composed from July 12 to July 27 of 2000-2007

利用公式 (4.7) 算得该时期植被状态指数分布图, 如图 4-7 所示。图中 VCI 值的范围是 0-1, 分为 5 级。VCI 值越小, 表明旱情越严重。从图中可以看出, 该时期研究区域大部分地区已经出现了干旱现象, 其中重庆西北部、西南部和东北部 (除去城口、巫溪、巫山) 等旱情较严重, 中部旱情较轻, 而东南部 (除黔江) 几乎没有出现干旱现象。

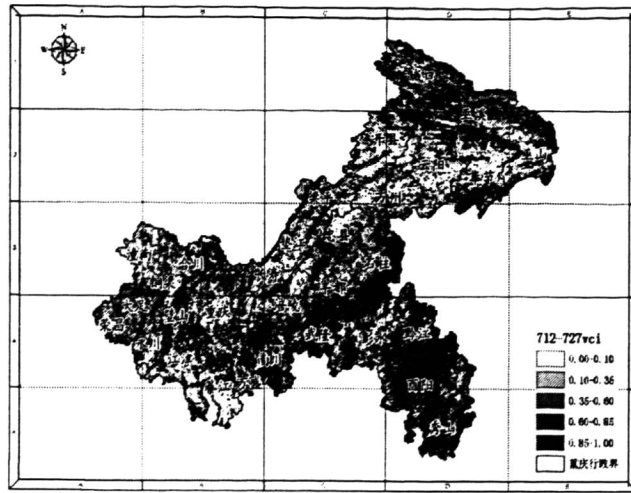


图4-7 2006年7月12日-7月27日植被状态指数分布图

Fig.4-7 VCI drought index distributing map composed from July 12 to July 27 in 2006

通过以上干旱监测模型的计算分析可知,三种方法获得的该时期重庆市三峡库区干旱分布情况基本吻合,均是在长江流域附近海拔较低的地区出现了干旱现象,在海拔较高的地区,没有出现明显的干旱。其中 TVDI 干旱指数显示的旱情现象最明显,受旱范围最大,而 VSWI 干旱指数显示的旱情现象最不明显,仅在主城区出现了明显的干旱现象,在长江流域沿岸出现了较弱的旱情。VCI 干旱指数表示的旱情范围在上述两种指数之间。但由于上述分析过程中,将 TVDI、VSWI 和 VCI 三个遥感指数进行了简单的划分,这里划分只是为了能明显看出旱情发生的空间变化,并没有任何实际的意义。例如植被状态指数 0.10-0.35 这个级别,只能定性的说明在该时期内,这里发生旱情相对于整个研究区域是否比较严重,不能说明旱情严重的程度,属于轻旱或是重旱,因此指数级别的对比意义不大,不具有时间的可比性。为了进一步定量地分析整个研究区域干旱的程度和各种干旱指数的适应程度,还需要结合地表土壤水分实测值进行研究。

4.2 干旱监测指数与土壤相对含水量模型的建立

地表土壤的相对含水量能反映出作物受水分胁迫的程度,是常用来评价旱情的一个标准。邓辉等^[90]回顾了利用遥感指数进行土壤水分监测的进展,说明土壤水分与遥感指数之间存在着密切的关系,而且这方面的研究一直在进行,因此建立遥感指数与土壤水分的模型,就可以反演得到土壤相对含水量。通常采用统计关系回归模型计算遥感指数与土壤水分之间的相关系数^[91]。

干旱指数与土壤水分的回归模型建立方法如下:根据土壤水分监测点的经纬度位置提取各点对应的干旱指数值,应用实测土壤水分值与对应的干旱指数值建立回归方程模型。为了消除土壤水分监测点空间定位误差的影响,使用 Matlab 编程实现以这些土壤水分观测站为中心,选取 3*3 像元的窗口大小,分别计算出这 9 个 TVDI、VSWI 和 VCI 像元的平均值作为土壤水分观测点对应的指数。土壤水分数据是 2005、2006 年重庆市 170 个墒情监测站点的土壤水分实测数据,墒情资料包括 10cm、20cm 和 50cm 的土壤相对含水量。由于一般来说 10cm

处土壤相对含水量最能反映出干旱状况^[92],因此本文仅考虑用土壤表层水分数据,即10cm土壤水分与干旱指数进行回归拟合。虽然研究中所用的是1km分辨率数据与气象站点数据在空间上难以对应,但考虑到气象观测点实际代表所在区域的整体气候特点,可以反映气象要素分布的区域性趋势,认为利用气象站点实测数据进行土壤相对湿度模型的建立,是目前条件下可行的方法。将监测点提取出的3*3像元的干旱指数平均值与监测点的土壤水分拟合,得到了干旱指数与土壤相对含水量模型方程,如表4-1所示。其中 x 表示遥感干旱指数, Y 表示土壤相对含水量值。

表4-1 干旱指数与土壤相对含水量的回归模型

Tab.4-1 Regression models of drought indexes and soil relative moisture

方程 时间	模型	温度植被旱情指数 法 (TVDI)	植被供水指数法 (VSWI)	植被状态指数法 (VCI)
2005	5月25日-6月9日	$Y=-0.24x+0.88$	$Y=26.95x+0.79$	$Y=0.08x+0.79$
	6月10日-6月25日	$Y=-0.35x+0.96$	$Y=73.41x+0.64$	$Y=0.30x+0.59$
	6月26日-7月11日	$Y=-0.15x+0.72$	$Y=197.08x+0.28$	$Y=0.25x+0.57$
	7月12日-7月27日	$Y=-0.43x+1.06$	$Y=173.83x+0.41$	$Y=0.18x+0.69$
	7月28日-8月12日	$Y=-0.25x+0.85$	$Y=109.57x+0.52$	$Y=0.19x+0.61$
	8月13日-8月28日	$Y=-0.16x+0.89$	$Y=72.81x+0.68$	$Y=0.11x+0.75$
	8月29日-9月13日	$Y=-0.12x+0.79$	$Y=214.35x+0.25$	$Y=0.14x+0.65$
2006	5月25日-6月9日	$Y=-0.09x+0.85$	$Y=134.86x+0.54$	$Y=0.48x+0.46$
	6月10日-6月25日	$Y=-0.41x+0.92$	$Y=130.21x+0.47$	$Y=0.42x+0.49$
	6月26日-7月11日	$Y=-0.23x+0.86$	$Y=129.10x+0.45$	$Y=0.18x+0.62$
	7月12日-7月27日	$Y=-0.31x+0.80$	$Y=235.72x+0.11$	$Y=0.29x+0.48$
	7月28日-8月12日	$Y=-0.55x+0.84$	$Y=207.66x+0.04$	$Y=0.21x+0.42$
	8月13日-8月28日	$Y=-0.18x+0.58$	$Y=166.26x+0.16$	$Y=0.22x+0.32$
	8月29日-9月13日	$Y=-0.33x+0.77$	$Y=147.35x+0.37$	$Y=0.10x+0.57$

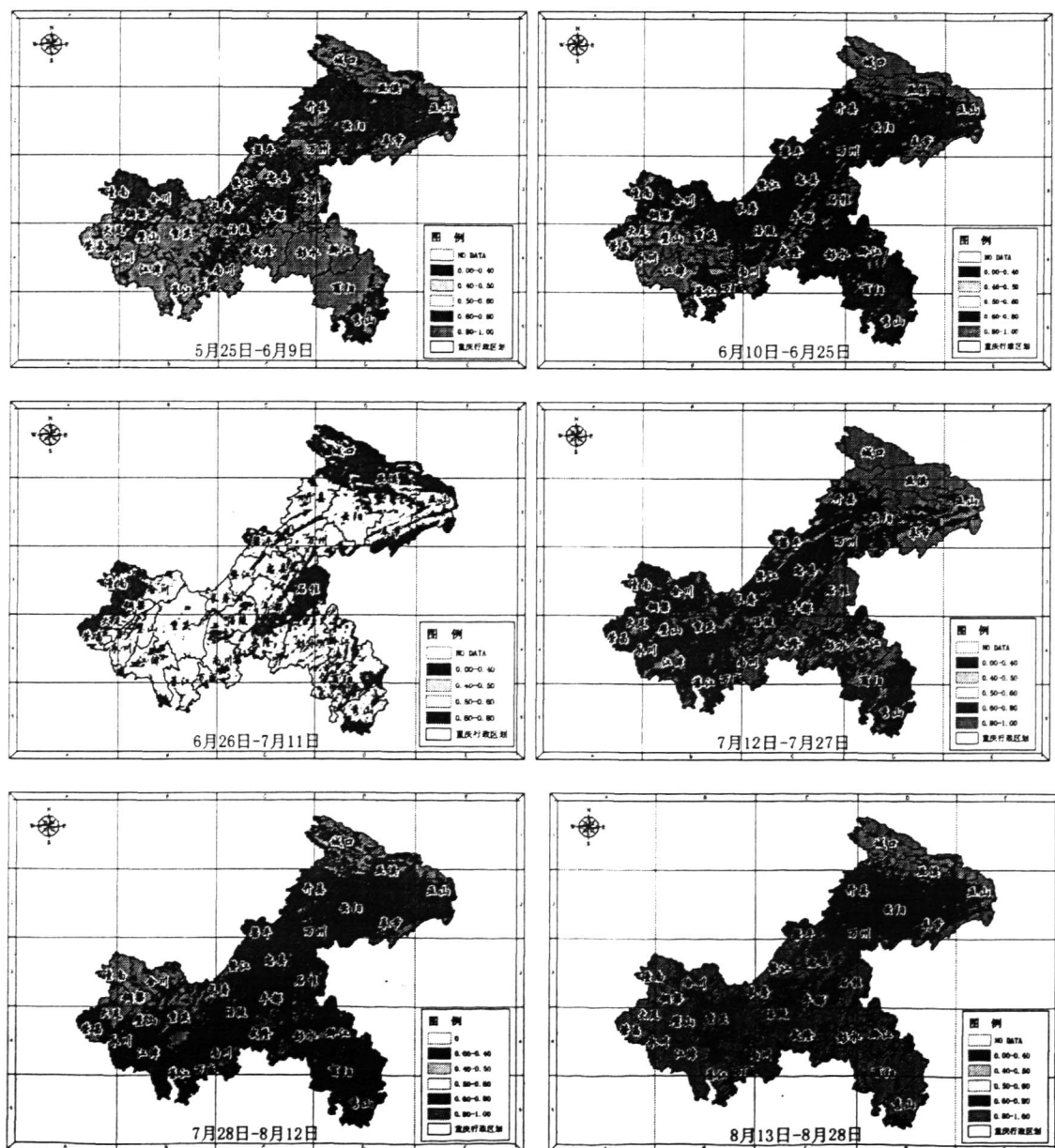
从表4-1拟合的回归方程可以看出,温度植被旱情指数TVDI的回归方程系数为负值,表明干旱指数(TVDI)与土壤相对含水量值成负相关,即TVDI值越大,土壤水分越低;植被供水指数法(VSWI)和植被状态指数法(VCI)的回归方程 x 的系数均为正值,表明VSWI和VCI与土壤水分值成正相关,即干旱指数值越大,土壤水分值越大;对于每一个干旱指数 x 的系数也均不相同,由此可知即使是同一干旱指数在不同时期的干旱指数值对应的土壤水分的值是不同的,因此不同时期的干旱指数是一个相对值,不能进行将不同时期的干旱指数进行比较。为了使得各期的土壤水分值具有可比性,有必要应用每个时期土壤相对含水量与干旱指数的线性关系,以土壤相对含水量分级标准,得到每16天合成的土壤水分分级图。

4.3 土壤相对含水量反演

根据干旱指数与土壤水分的回归方程,利用 4.1 节中计算出的各时期的干旱指数,求得每个像元的每个指数值对应的土壤水分值,从而得到整个研究区域的土壤相对含水量分布图。如图 4-8、4-9、4-10、4-11、4-12、4-13 所示,分别为 2005 年 5 月 25 日-9 月 13 日、2006 年 5 月 25 日-9 月 13 日每 16 天合成的 TVDI 反演的旱情等级图、VCI 反演的旱情等级图和 VSWI 反演的旱情等级图。

获取的土壤相对含水量分布图中用的统一的色阶表示,与 5 级旱情相对应,由红色向绿色过渡。值越小,表明旱情加重,向红色调方向靠近,值越大,表明旱情减弱,向绿色调方向靠近,没有值的空白部分是由于影像数据质量造成的。

4.3.1 2005 年土壤相对含水量反演



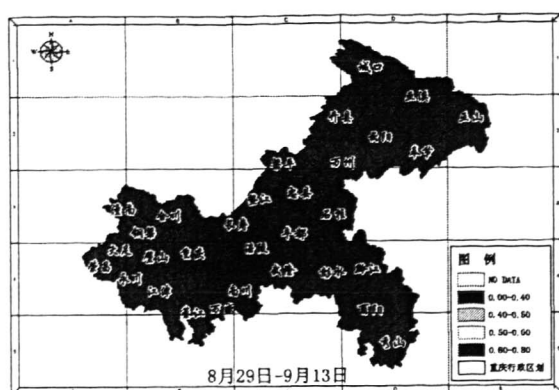
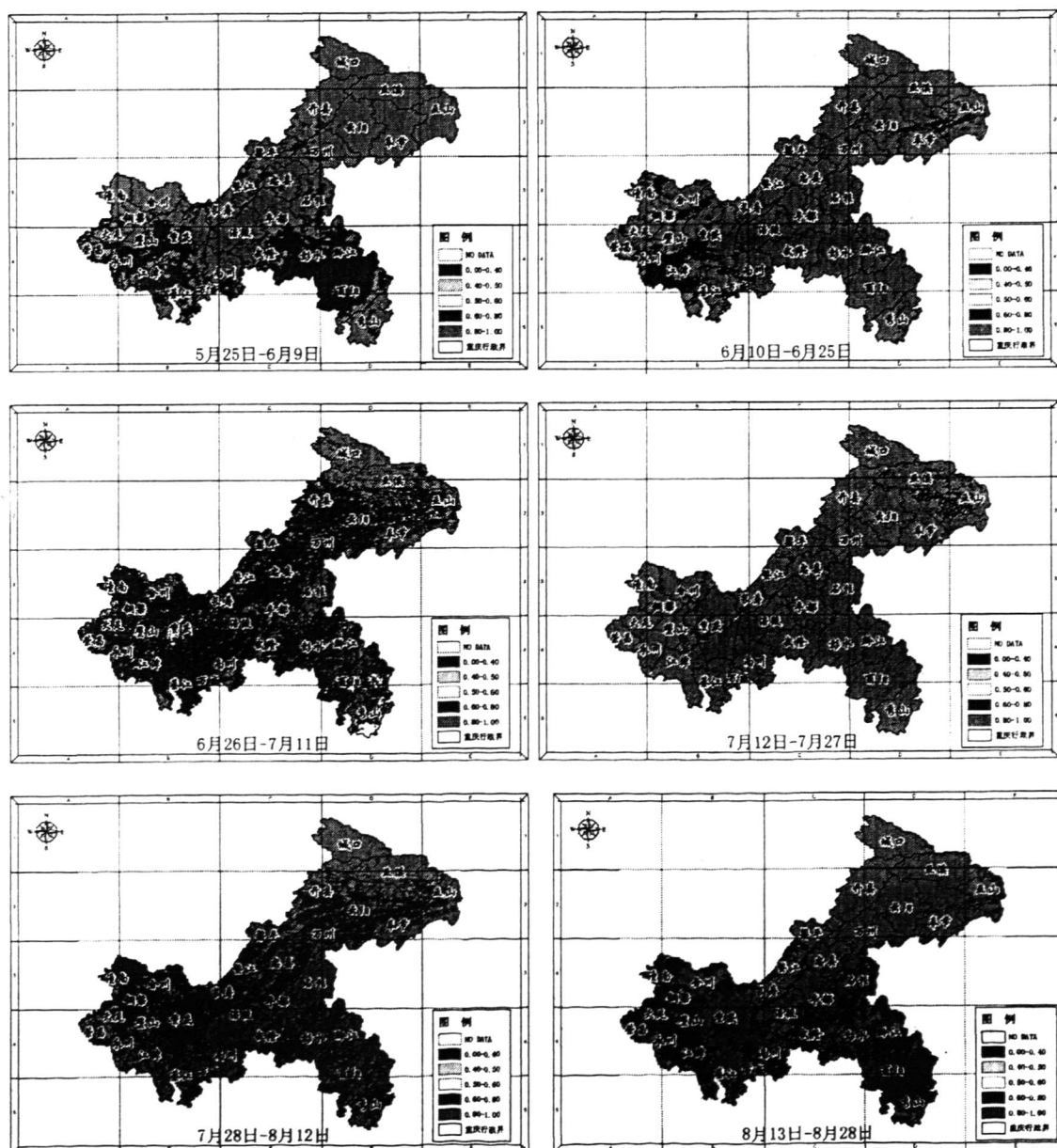


图 4-8 重庆市 2005 年 5 月 25 日-9 月 13 日 TVDI 反演的旱情等级图

Fig.4-8 Every 16 days compositive drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2005 based on TVDI



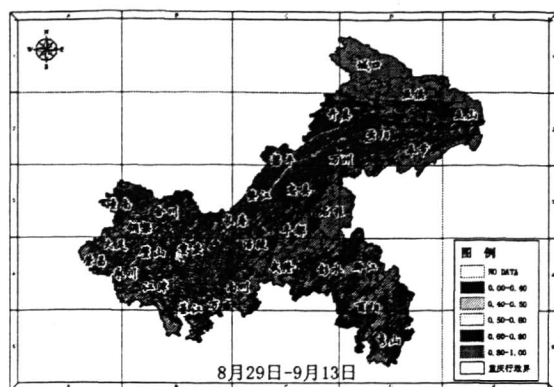
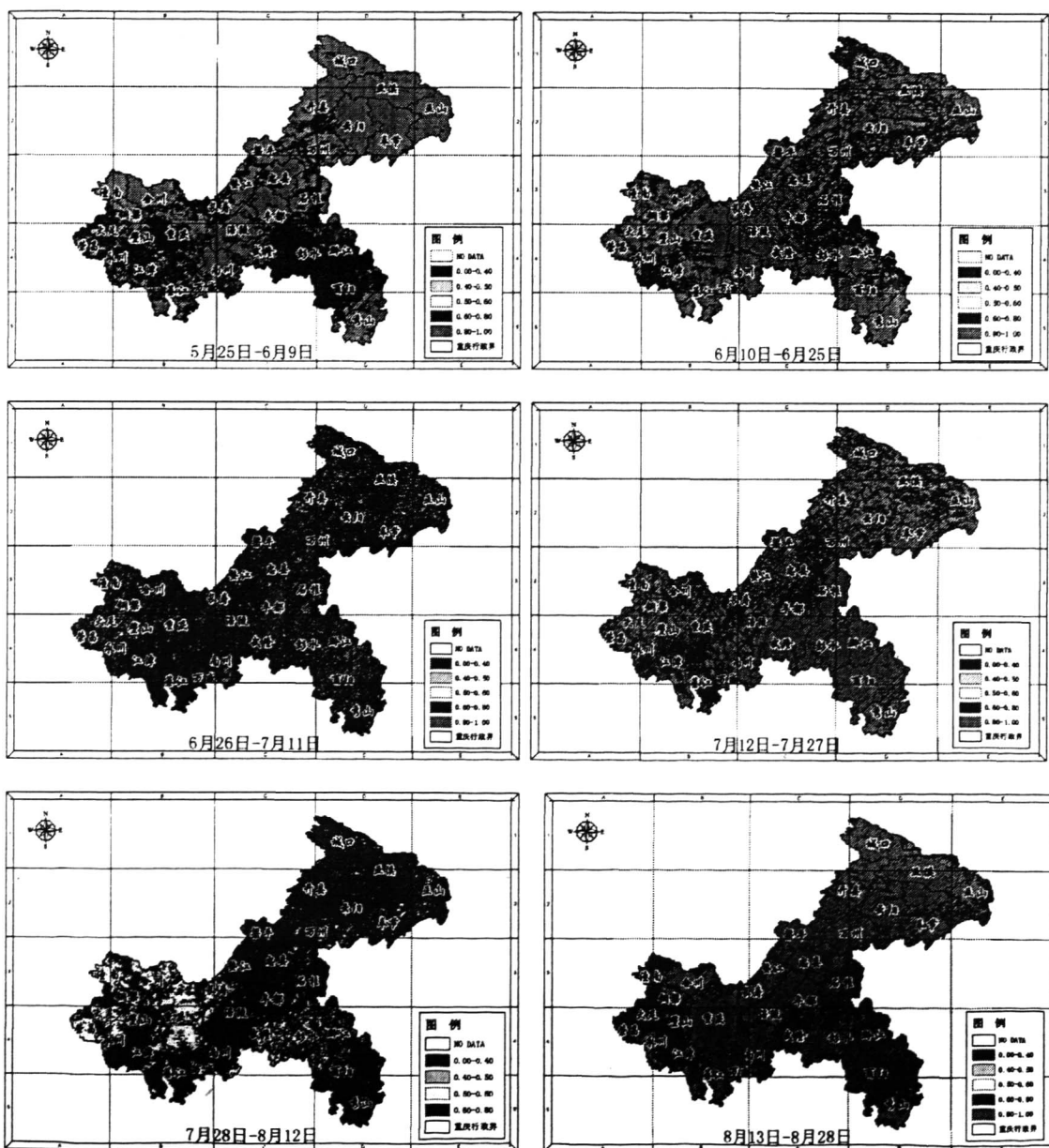


图 4-9 重庆市 2005 年 5 月 25 日-9 月 13 日 VSWI 反演的旱情等级图

Fig.4-9 Every 16 days compositive drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2005 based on VSWI



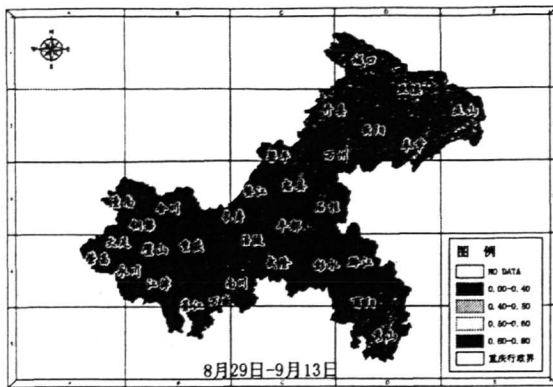


图 4-10 重庆市 2005 年 5 月 25 日-9 月 13 日 VCI 反演的旱情等级图

Fig.4-10 Every 16 days composite drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2005 based on VCI

从 2005 年三种干旱模型监测结果来看, 三种指数反映的情况基本一致。2005 年夏伏旱期重庆市没有出现严重的干旱现象, 干旱期和湿润期成交替性出现。第一个干旱发生到干旱解除期是 5 月 25 日-7 月 27 日, 6 月上、中旬全市大部分地区处于正常状况, 到 6 月 26 日-7 月 11 日在全市出现了大面积的轻旱现象, 直到 7 月底旱情得到解除, 恢复正常; 第二个时期是 7 月 28 日-8 月 28 日, 全市没有旱情发生, 仅是湿润的面积在 7 月 28 日-8 月 12 日相较于上期有所减少, 到了 8 月 13 日-8 月 28 日又恢复了大面积的湿润状况; 第三个时期是 8 月 29 日-9 月 13 日, 此时全市的土壤水分降低, 大部分区域仅处于正常状况。

对比三种指数反演的旱情等级分级图来看, 在第一个干旱发生到解除期, 三种指数均显示湿润和正常的区域相差较大, 其中在 5 月 25 日-6 月 25 日两期中, TVDI 显示了东北部和中部湿润面积较少, 其他部分均为正常, 西北部和东南部土壤湿润比例较大, 而 VSWI 和 VCI 显示的湿润区域比较一致, 整体湿润比例比 TVDI 指数大, 仅在东南部和西南部的土壤处于正常状况, 在旱情发生到解除的 6 月 26 日-7 月 27 日, 三种指数反映的空间分布大体一致, 但 TVDI 反映的土壤相对含水量较低, 如 VSWI 和 VCI 反映正常的情形, TVDI 反映出轻旱的状况; 在第二个时期, 全市没有旱情发生, 从土壤相对含水量变化情况来看, TVDI 指数显示在东北部巫山、巫溪和云阳有轻旱现象, 而 VSWI 和 VCI 显示则相反, 在西北部和东南部旱情比较严重; 而在第三时期, 三个指数反映情况一致, 整个研究区域大部分区域处于正常状态, TVDI 和 VCI 显示整个区域均处于正常状况, 而 VSWI 指数反映出东北部的城口、奉节和东南部的石柱、黔江、酉阳处于湿润状态。

4.3.2 2006 年土壤相对含水量反演

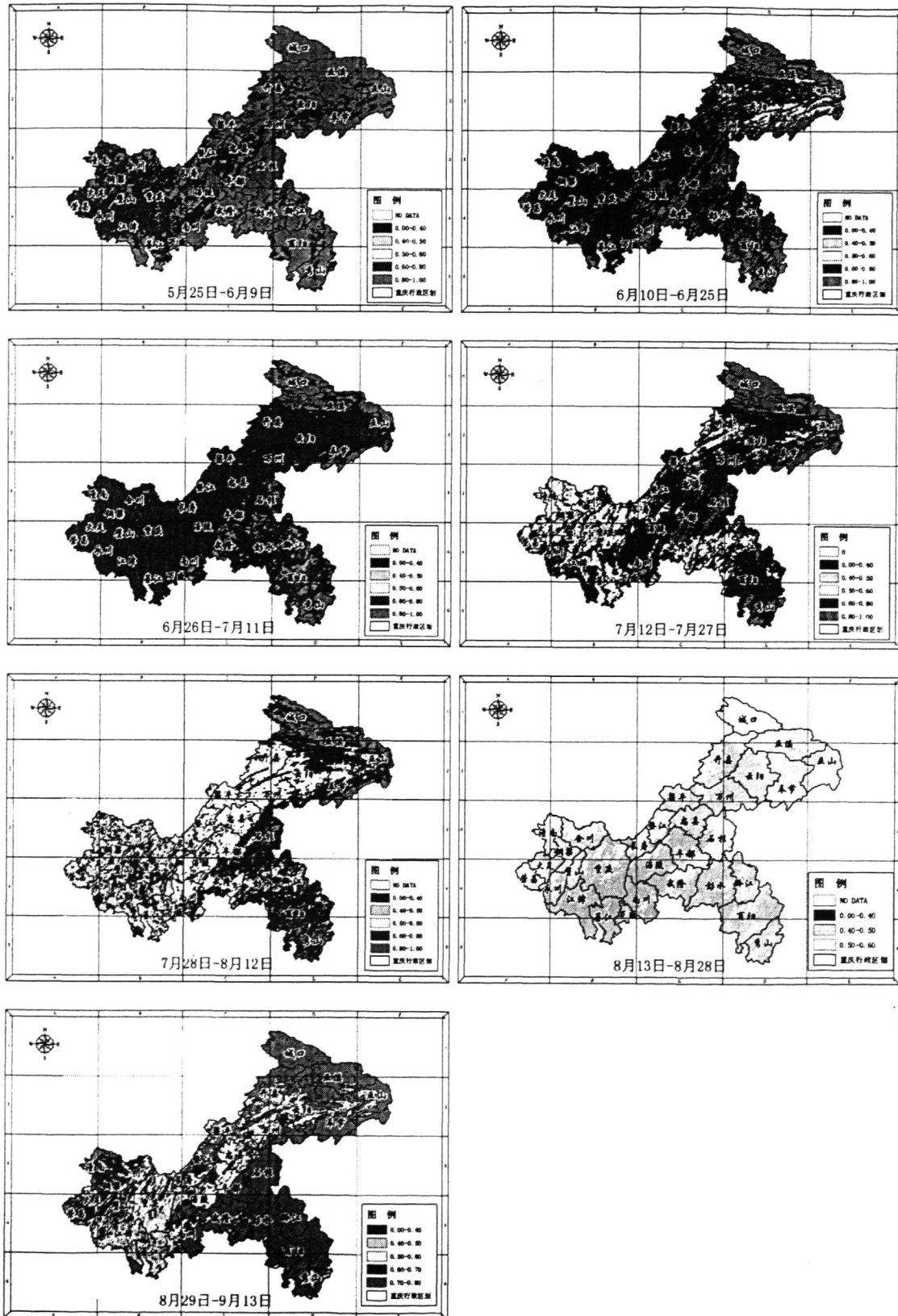


图 4-11 重庆市 2006 年 5 月 25 日-9 月 13 日 TVDI 反演的旱情等级图

Fig.4-11 Every 16 days composite drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2006 based on TVDI

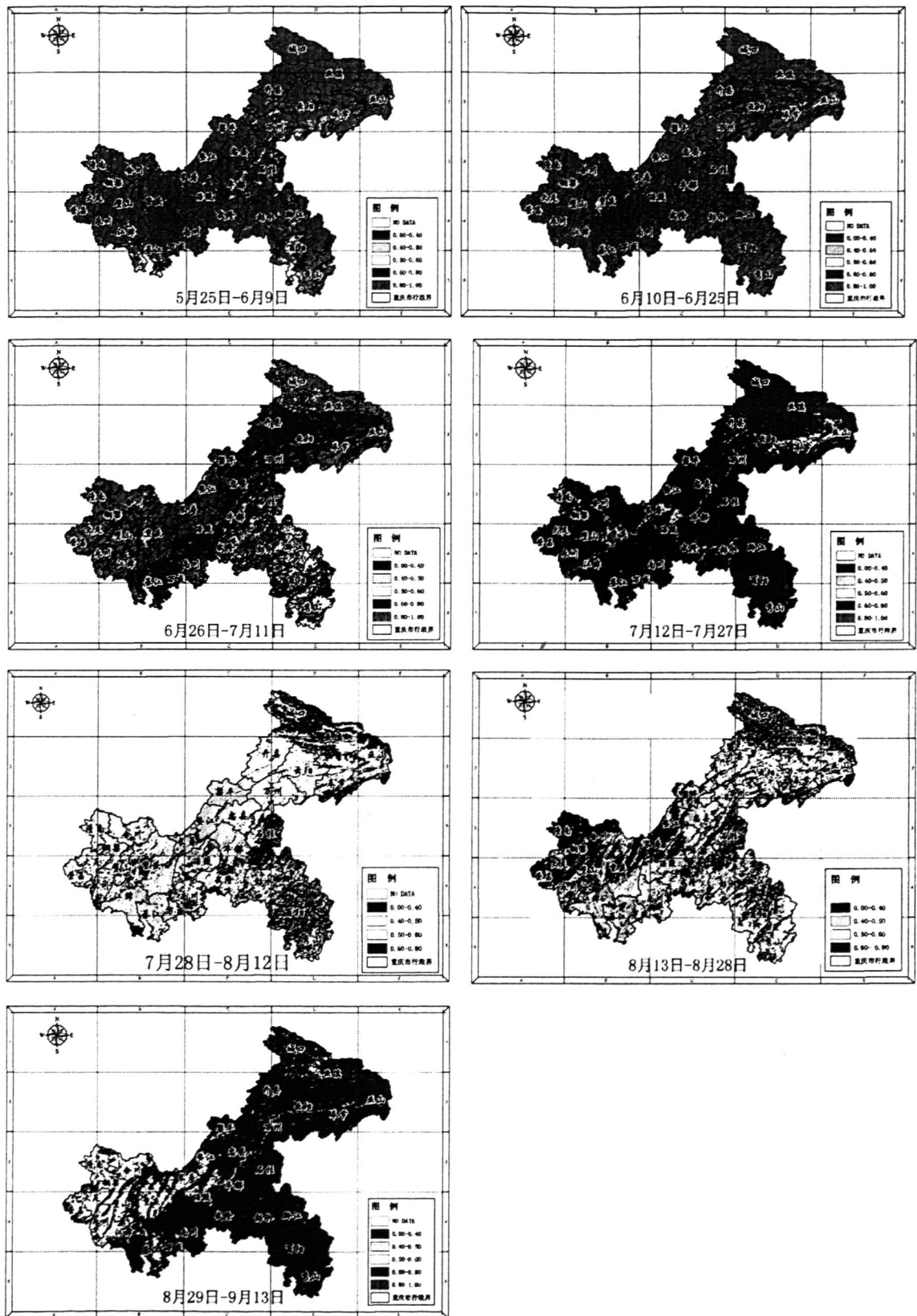


图 4-12 重庆市 2006 年 5 月 25 日-9 月 13 日 VSWI 反演的旱情等级图

Fig.4-12 Every 16 days compositive drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2006 based on VSWI

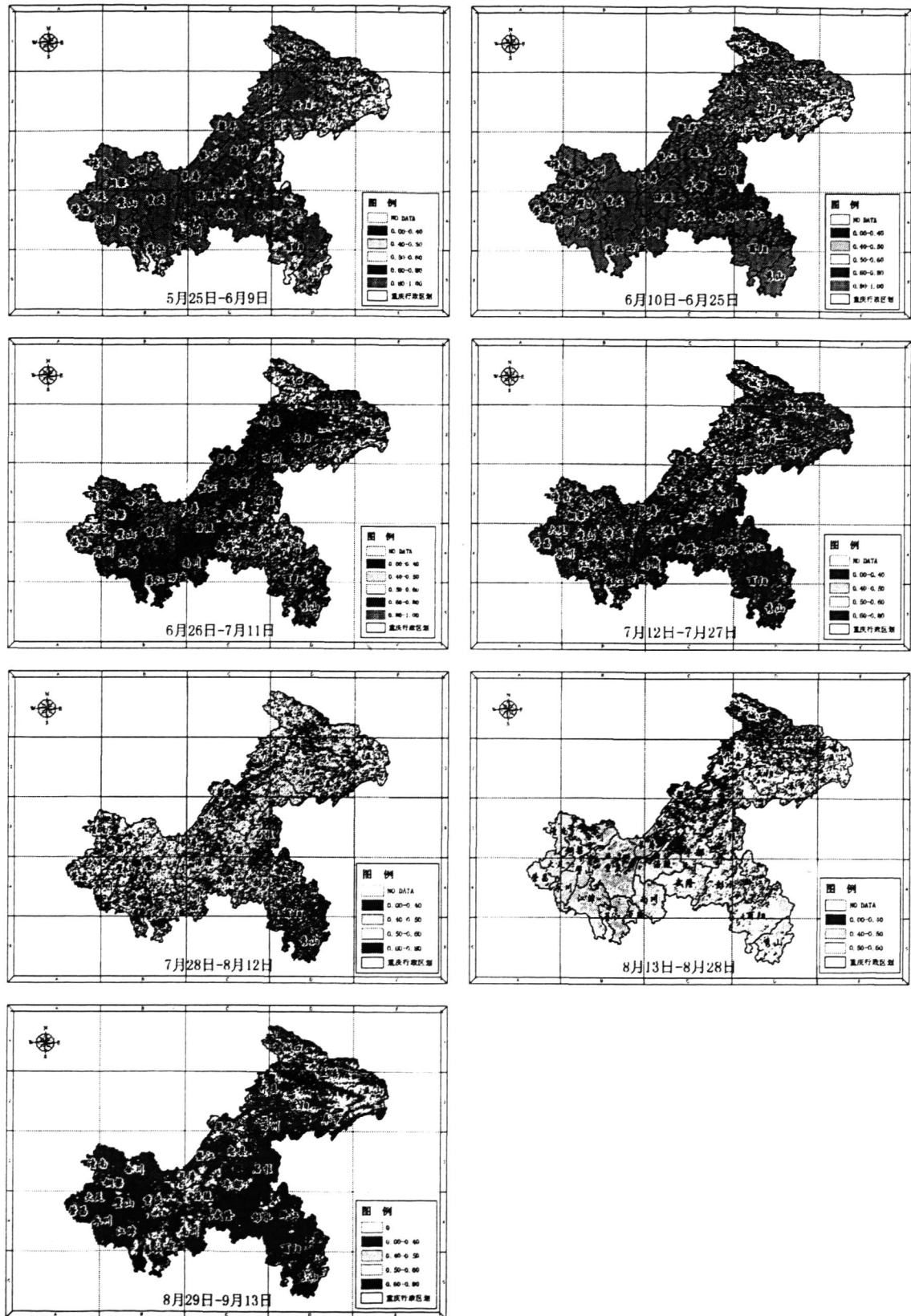


图 4-13 重庆市 2006 年 5 月 25 日-9 月 13 日 VCI 反演的旱情等级图

Fig.4-13 Every 16 days compositive drought level map of Chongqing from May 25 to September 13 in 2006 based on VCI

2006年三种干旱模型监测结果从整体来看,反映的旱情发展情况基本一致。重庆市在2006年8月中下旬发生了特大的干旱现象,重庆市反演的土壤相对含水量值东南部值大于中部值,东北部值大于西北部值。从时间发展来看,主要分为四个阶段:湿润期、干旱发生初期、干旱严重期和旱情解除时期。湿润期为5月25日-6月9日和6月10日-6月25日两期,仅在东北部有干旱迹象,其余各地基本没有干旱情况的发生;干旱发生的初期为6月26日-7月11日和7月12日-7月27日两期各干旱指数得到的土壤相对湿度均显现了初旱的迹象;而到7月28日-8月12日和8月13日-8月28日是研究区域旱情最严重的时期,各地均出现了重大旱情,直到8月29日-9月13日这段时期大部分地区旱情得以解除。

对比三种指数反演的旱情等级分级图来看,在湿润期,三种指数均显示湿润和正常的区域相差较大,其中TVDI显示了东北部和中部比较湿润,西北部和东南部土壤湿润比例较小,而VSWI和VCI显示的湿润区域比较一致,东北部巫山、巫溪和云阳有轻旱现象,其他大部分地区处于湿润状态;在干旱发生的初期,三种指数显示的干旱情况较一致,除东南部的酉阳、秀山和东北部的城口有湿润的现象,其他区域均出现了轻旱状况,但在7月12日-7月27日这一时期,VCI反映出在东北部的开县、云阳、奉节和中部的万州、忠县以及西南部的江津、綦江发生了严重的旱情,这与TVDI和VSWI反映的情况相差较大,TVDI和VSWI均在东北部和西北部反映出轻旱现象;在旱情的严重时期,三种指数均显示了在西北部受到了严重的干旱灾害,而VSWI和VCI反映的旱情程度较TVDI反映的程度更为严重;在旱情解除期,TVDI和VSWI指数显示了除西北部还存在着轻旱外,其他地区均恢复了正常情况,与VCI显示的整个区域全部恢复正常存在一定差别。

从以上分析中可知,在湿润和重旱时期TVDI法反映出来的土壤相对湿度分布情况与其他两种指数反映的情况有较大的差异,主要是由于TVDI指数在拟合旱边和湿边的方程时,需要整个研究区域有湿润和重旱的区域,因此在湿润和重旱期这种指数反演的土壤相对湿度适应性较差;而VCI法在初旱发生期间突然反映出重旱的现象,这主要是因为VCI是仅考虑了植被指数这一单一因子的干旱监测方法,而整个研究区域下垫面情况较为复杂,在不完全植被覆盖条件下,遥感获取的温度必然受植被覆盖度的影响;VSWI适用范围较广,但对于水域或裸地的适应性也较差。为了进一步定量地分析三种干旱指数在研究区域的适应性,有必要将遥感反演的土壤相对含水量与实测土壤水分值进行对比,并以这些土壤水分观测站为中心,选取3*3像元的窗口大小,分别计算出这9个TVDI、VSWI和VCI像元的平均值作为土壤水分观测点对应的指数,计算实测值和计算值的相关系数来对比三种干旱模型监测的精度。

4.4 干旱监测模型的对比分析

4.4.1 实测土壤相对含水量空间分析

对重庆市三峡库区2005、2006年共两年170个站点的每5天土壤水分进行空间分析。根据重庆市分区图,将每个区域内各观测点的平均值生成土壤含水量折线图,如图4-14、4-15所示。

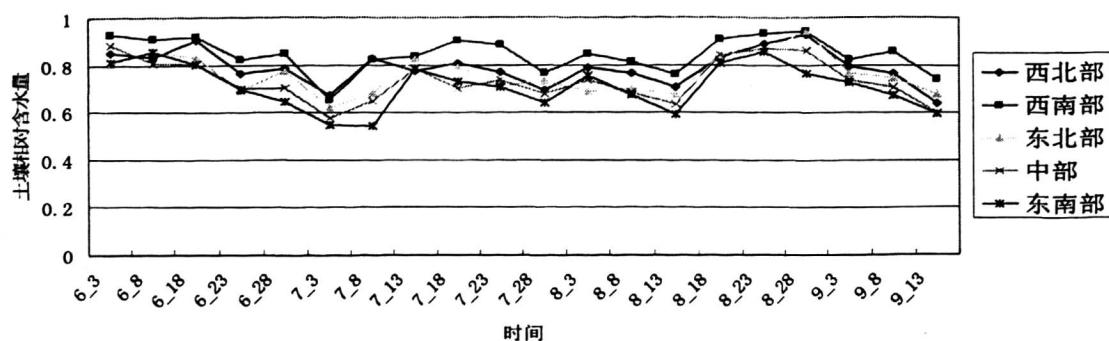


图 4-14 2005 年 6-9 月每五日平均表层土壤相对含水量变化分布图

Fig.4-14 The top soil relative moisture distribution map of every 5 days from June to September, 2005

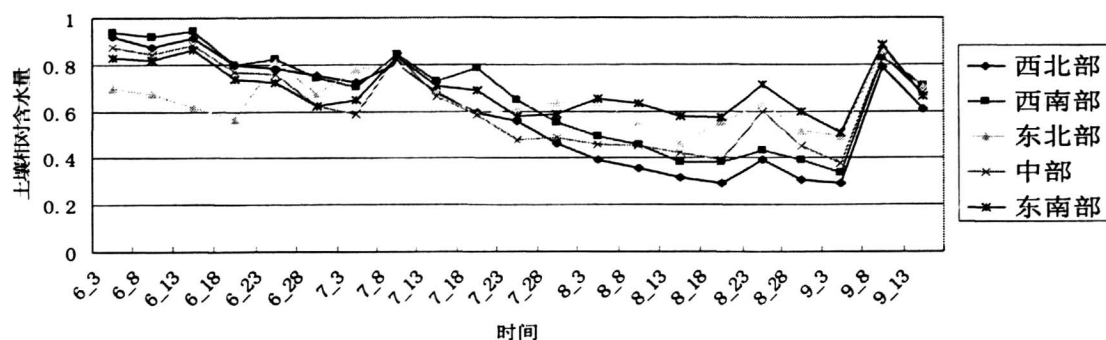


图 4-15 2006 年 6-9 月每五日平均表层土壤相对含水量变化分布图

Fig.4-15 The top soil relative moisture distribution map of every 5 days from June to September, 2006

从图 4-14 和 4-15 可以看出,土壤水分实测值随时间变化与干旱监测方法反演的情况一致,三种干旱监测方法均能反映研究区域干旱变化情况。2005 年整个研究时间段土壤相对含水量偏高,大多均在 0.6 以上属土壤相对含水量正常现象,2005 年重庆市没有出现严重的干旱现象,干旱期和湿润期成交替性的出现;空间变化上在研究区域西南部地区土壤相对湿度较高,在东南部地区土壤相对湿度偏低,但东南部也仅在 7 月 5 日左右地区出现了轻旱,其他时间均比较正常。2006 年干旱情况比较严重,在 2006 年 6 月 3 日-7 月 28 日土壤相对湿度偏高,而在东北部地区有夏旱的露头现象,其余大部分地区都在 0.6 以上没有发生干旱现象,而在 7 月 28 日以后,由于受到高温天气的影响,整个研究区域出现了严重的干旱现象,土壤平均湿度仅在 0.4 左右,其中以西北部地区干旱情况最为严重,从 7 月 28 日到 9 月 8 日持续了一个多月的重旱情况。相对而言在东南部地区干旱情况没有那么严重,而东北部、中部和西南部均有中旱的现象。这种严重的干旱情况直至 9 月 8 日以后干旱现象得缓解,土壤平均湿度回到了 0.6-0.8 之间。说明在 2006 年夏季期间,重庆市三峡库区有较长的一段时间处于中旱和重旱状态。

4.4.2 干旱监测模型精度比较

结合土壤表层相对含水量,根据其经纬度坐标生成土壤水分分布点。为了消除空间定位

误差的影响，使用 Matlab 编程实现以土壤水分观测站为中心，选取 3*3 像元的窗口大小，分别计算出这 9 个 TVDI、VSWI 和 VCI 像元的平均值作为土壤水分观测点对应的指数，并计算表层土壤相对含水量与干旱指数的相关系数。表层土壤水分与各干旱指数的相关系数见表 4-2。

表 4-2 表层土壤相对含水量和干旱指数相关系数
Tab.4-2 Relation between soil relative moisture and drought indexes

相关系数	模型	温度植被旱情指数	植被供水指数法	植被状态指数法
		法 (TVDI)	(VSWI)	(VCI)
2005 年	5 月 25 日-6 月 9 日	-0.58*	0.30*	0.29*
	6 月 10 日-6 月 25 日	-0.55*	0.36*	0.53*
	6 月 26 日-7 月 11 日	-0.34*	0.46*	0.33*
	7 月 12 日-7 月 27 日	-0.52*	0.53*	0.27*
	7 月 28 日-8 月 12 日	-0.51*	0.56*	0.37*
	8 月 13 日-8 月 28 日	-0.50*	0.55*	0.32*
	8 月 29 日-9 月 13 日	-0.29*	0.53*	0.39*
2006 年	5 月 25 日-6 月 9 日	-0.12*	0.49*	0.70*
	6 月 10 日-6 月 25 日	-0.50*	0.62*	0.74*
	6 月 26 日-7 月 11 日	-0.33*	0.45*	0.39*
	7 月 12 日-7 月 27 日	-0.51*	0.58*	0.56*
	7 月 28 日-8 月 12 日	-0.66*	0.49*	0.40*
	8 月 13 日-8 月 28 日	-0.29*	0.68*	0.36*
	8 月 29 日-9 月 13 日	-0.59*	0.55*	0.20*

*表示达到显著性水平 $p<0.05$ 样本数 $N=170$

一般来讲，TVDI 与土壤相对含水量负相关，VSWI、VCI 与土壤相对含水量正相关。从表 4-2 可以看出，各种指数与土壤相对含水量的一致性明显的，即 TVDI 值越大，土壤含水量越低，VSWI、VCI 值越大，土壤含水量越高，说明各干旱监测指数能反映出干旱的变化情况。从整体上看土壤相对含水量与各干旱监测指数的相关系数均达到显著水平，这说明选取的三种干旱指数均能够反映出土壤水分状况的变化趋势，作为旱情评价指标是有一定的合理性。但相关系数绝对值不高，大都在 0.3-0.6 之间，并且对于不同的时期，不同指数与土壤相对含水量的相关性不尽相同。

土壤水分与遥感干旱指数的相关系数低主要是从两方面考虑，首先是由于遥感数据的精度不高。虽然进行了最大值合成法可以比较有效的去除云的影响，但由于重庆市三峡库区地形特殊且复杂，而且该地区云雾多，日照少，使得要获取高质量的遥感数据比较困难；其次是因为土壤水分监测的是点上的数据，而遥感数据是分辨率为 1km 的数据，虽然利用了 3*3

窗口计算某点对应的干旱指数,但这个数据也不能完全反映出监测点的土壤水分。尽管单点实测值与遥感估测的土壤湿度很难相等,但各相关系数均达到了显著水平,并且也能够反映出土壤水分的变化情况,因此能够通过各种模型的相关性,来判断各种遥感监测模型对本研究区域的适应性。

对比分析三种干旱监测指数与实测值的相关系数结果表明,在2005年,5月25日-6月25日两期中,TVDI与表层土壤相对含水量相关性最好,VSWI次之,VCI最差;6月26日-9月13日五个时期内,VSWI与表层土壤相对含水量相关性最好,TVDI次之,VCI最差。在2006年,5月25日-6月25日两期中,VCI与表层土壤相对含水量相关性最好,VSWI次之,TVDI最差;6月26日-9月13日干旱发生的五期中,VSWI与表层土壤相对含水量相关性最好,VCI次之,TVDI最差。

从结果可以看出,虽然不同的时期,不同指数与土壤水分的相关性不尽相同。但整体上看,在干旱发生时期,VSWI与表层土壤相对含水量相关性最好,最适应于研究区域干旱发生时进行干旱监测,TVDI和VCI在不同的年际,对研究区域干旱监测的适应性不尽相同。造成这种结果主要的原因是,VCI是仅考虑植被指数这一单一因子的干旱监测方法,而整个研究区域下垫面情况较为复杂,在不完全植被覆盖条件下,遥感获取的植被信息必然受地表背景温度的影响。因此在随后由于气温的升高,地表温度的影响,VCI应用的效果变差。再加之由于MODIS影像从2000年开始,在获取植被指数最大值和最小值时时间序列较短,从而使得VCI指数在重庆市三峡库区干旱研究的实际应用存在一定的缺陷。TVDI指数和VSWI指数综合考虑了NDVI和LST的变化,干旱监测结果相对VCI较好,但由于应用TVDI对研究区域的要求较高,必须满足土壤表层含水量应从萎蔫含水量到田间持水量的条件,因此在干旱发生的时期,研究区域的下垫面状况不能满足TVDI的条件,从而影响了TVDI对研究区域干旱监测的适应性。而VSWI在应用时需要下垫面差异不大,在干旱发生时期,恰能满足VSWI所需条件,因此VSWI指数最适应于研究区域的遥感监测模型。

因此在夏伏旱发生期,VSWI可以作为本研究区域日常的农业旱情监测合适指标,而VCI对土壤水分不太敏感,TVDI对研究区域要求较高,对本地区的农业旱情监测精度相对较差。

第 5 章 2006 年重庆市三峡库区干旱评价

2006 年夏,重庆市三峡库区出现了百年不遇的特大高温干旱天气。伏旱高温天数长、降雨量少是造成这次重大干旱的主要原因。夏旱从 5 月中旬开始露头,持续 30-40 天;7 月初全市伏旱露头早,比历史同期提前 10-15 天;截至 8 月 31 日,全市伏旱日数普遍在 53 天以上,12 个区县超过了 58 天,渝东北地区超过了 90 天,巫溪县长达 99 天。同时,重庆市各地雨水非常少,大部分地区不及常年的三分之一。在连晴高温无雨的同时,各地蒸发总量剧增,除梁平、酉阳外均超过 300 mm,21 个区县(市)超过 500mm,9 个区县(市)超过 600 mm,其中 23 个区县(自治县、市)居历史同期之最。连续高温和高蒸发量带来的干旱给人们的生活带来了严重的影响,造成了重大的经济损失。因此本章根据第 4 章针对研究区域的遥感干旱监测模型适应性的分析结果,选择植被供水指数对研究区域 2006 年重大干旱进行监测,并结合时间序列,定量地分析干旱的发展过程以及干旱的空间分布特点。

5.1 2006 年重庆市三峡库区干旱时空分析

由第 4 章分析可知, VSWI 干旱指数是夏伏旱时期最适合研究区域的干旱监测模型,应用 VSWI 干旱监测模型,结合表层土壤水分数据,建立遥感指数与土壤相对含水量间的模型,利用模型获得研究时期内研究区域的土壤相对含水量分布图,结果见图 4-12。为了更好、更定量的分析 2006 年重庆市三峡库区干旱灾害的发展时间和空间变化特征,对监测结果进行统计分析。

5.1.1 2006 年重庆市三峡区干旱的时间变化特征分析

根据 VSWI 反演的 2006 年 5 月 25 日-9 月 13 日重庆市土壤相对含水量分布图(图 4-12)统计重庆市各个时间段的受旱面积比例。统计的方法是,根据土壤相对含水量旱情等级划分,分别获得土壤相对含水量在各等级的像元个数,并与总像元个数相比,得到各种状况下受旱面积占总面积的百分比。具体统计结果见表 5-1。

表 5-1 2006 年重庆市夏伏旱遥感监测统计数据

Tab.5-1 The statistics data of drought monitor by remote sensing in Chongqing summer, in2006

干旱等级	湿润(%)	正常(%)	轻旱(%)	中旱(%)	重旱(%)
5 月 25 日-6 月 9 日	80.47	15.50	4.03	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	72.23	26.18	0.92	0.42	0.25
6 月 26 日-7 月 11 日	23.81	68.71	6.27	1.21	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.09	94.47	3.91	0.80	0.73
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	20.46	52.11	17.01	10.42
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	14.76	44.80	13.65	26.79
8 月 29 日-9 月 13 日	0.61	83.07	15.34	0.88	0.10

从图 4-12 和表 5-1 可以得到研究区域干旱的时间变化情况。从表中反映出来的情况可知,

2006 年夏季重庆市大部分地区处于干旱状况，干旱情况比较严重。

从干旱发生到解除的这段时间来看，6 月中上旬研究区域土壤较湿润。在 5 月 25 日-6 月 9 日期间内，全市面积的 80.47%处于湿润状况，15.50%处于正常状况，在东南部的酉阳和东北部三峡库区土壤相对含水量偏低；在 6 月 10 日-6 月 25 日时期内，湿润面积比例下降至 72.23%，全市土壤相对含水量降低，在主城区和东北部的三峡库区出现了轻旱现象。

到 7 月上、中旬是干旱发生的初期。土壤湿度降低，没有湿润的现象，部分地区出现了干旱的迹象。其中 6 月 26 日-7 月 11 日，土壤湿润面积比例下降到 23.81%，正常比例增加，研究区域 6.27%的面积处于轻旱状况，1.21%的面积出现了中旱，主要集中在东南部；到 7 月 12 日-7 月 27 日研究区域仅 0.09%面积湿润，0.73%的面积出现了重旱，94.47%的面积处于正常状况，其中出现干旱的区域主要集中在主城区和长江沿岸的忠县、万州、云阳和奉节。

而进行 8 月份以来，大部分地区持续干旱少雨，整个研究区域发生了重大的干旱情况。在 7 月 28 日-8 月 12 日和 8 月 13 日-8 月 28 日这两个时期的土壤湿度统计受旱面积比例显示，8 月是重庆市三峡库区干旱最严重的时期。7 月 28 日-8 月 12 日全市各区县除东北部的城口、巫山和中部的武隆和石柱处于正常状况，其余各地均出现了中旱，仅有 20.46%的土壤处于正常状况，超过 70%的土壤面积处于干旱情况，其中 10.42%的土壤面积受到了重旱；8 月 13 日-8 月 28 日，干旱进一步升级，正常的土壤面积比例仅占 14.76%，受旱区域面积占全市总面积的 85.24%，其中轻旱 44.80%，中旱 13.65%，重旱 26.79%，重旱区主要分布在西北部。

重庆市三峡库区这一大范围的干旱现象直至 8 月 29 日-9 月 13 日这一时期，研究区域大部分地区有降水，旱情有所缓解。恢复正常的区域达到了总面积的 83.07%，但是仍有 16.32%的区域受干旱影响，其中受旱区域主要分布在西北部。

5.1.2 2006 年重庆市三峡区干旱的空间变化特征分析

根据土壤含水量分布的时间序列变化，将干旱分为旱情发生的初期、中期和干旱解除三个时间段，分别以 6 月 26 日-7 月 11 日、8 月 13 日-8 月 28 日、8 月 29 日-9 月 13 日三个时期的土壤相对含水量分布为代表。根据重庆市行政区划图，分区县进行干旱受旱面积比例的统计分析，统计结果见附表 1、2、3。根据重庆市区域划分，统计获得各区域轻旱、中旱和重旱面积比例的总和，如图 5-1 所示。

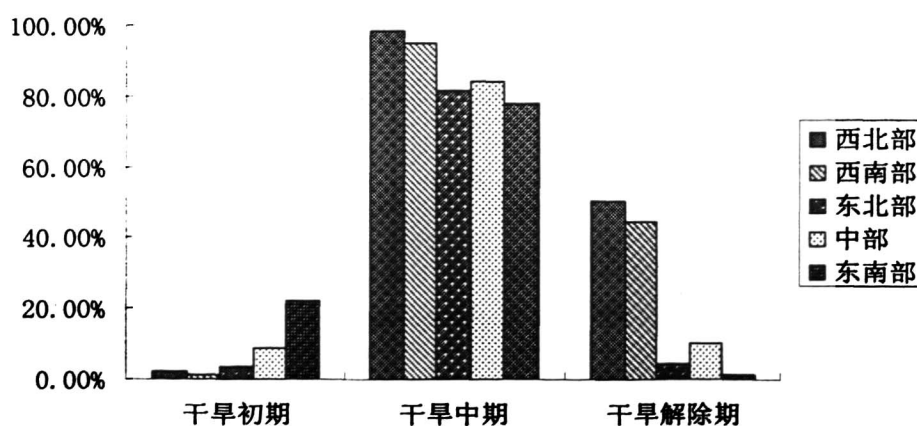


图 5-1 重庆市各区域总受旱面积百分比图

Fig.5-1 Drought-hit area of the total regional percentage in Chongqing

从附表1和图5-1可知,从总体上看,重庆在干旱发生的初期(6月26日-7月11日)受旱最严重的是东南部,有近20%的面积受到干旱影响,其次为中部和东北部,西南部受旱影响最小。单从区县来看,受旱最轻的为秀山,只有轻旱的区域,其面积比例达5.22%,其余均正常。东南部的黔江是该时期整个研究区域受旱最严重的地区,轻旱面积比例达35.92%,中旱面积比例达10.68%;在中部受旱最严重的是武隆和丰都,武隆的轻旱面积比例达15.72%,中旱面积比例达2.66%,丰都的轻旱面积比例达10.32%,中旱面积比例达2.95%;在东北部地区城口、开县受旱较重,城口的轻旱面积比例达0.45%,中旱面积比例达5.53%,开县的轻旱面积比例达0.40%,中旱面积达5.26%,其他区县受旱面积比例在2%-3%。在西北部地区和西南部受旱区县较少,仅西北部的重庆主城区和大足比较严重,其中重庆主城区轻旱面积比例达到8.23%,中旱面积比例达0.26%,大足轻旱面积比例达5.68%。因此在干旱初期应对东南部、中部和东北部地区各区县加大预防干旱进一步发展的措施。

从附表2和图5-1可知,干旱发生的最严重时期(8月13日-8月28日)各区县的受旱面积比例。从空间分布上,受旱的面积进一步扩大,并且向西部转移,各区域受旱面积均在80%以上,干旱其中受旱最严重的为西北部,其次为西南部,相对较轻的为东北部和东南部。其中受旱最严重的是潼南,重旱面积比例达到了95.10%,中旱面积比例达2.88%,轻旱面积比例达2.01%;受旱最轻的为南川,重旱面积比例仅2.07%,中旱面积比例达7.46%,轻旱面积比例达72.08%。从区县来看,西北部除巴南和北碚受重旱比例为15.49%、46.02%,其他各区县的重旱受旱面积比例均超过了50%,最严重的潼南达到了95.10%,中旱面积比例达2.88%,轻旱面积比例达2.01%;西南部受旱最严重的是荣昌,重旱面积比例达85.30%,中旱面积比例为9.04%,轻旱面积比例为5.36%;中部受旱最严重的是垫江,受重旱面积达70.36%,中旱面积比例达12.45%,轻旱面积比例达14.53%;东北部和东南部受旱较重的地方分别是忠县和黔江,其中忠县重旱面积13.71%,中旱面积比例达20.88%,轻旱面积比例达59.22%,黔江受重旱面积为19.94%,中旱为11.09%,轻旱为51.68%。

从附表3和图5-1可知,旱情解除时期(8月29日-9月13日)各区县的受旱面积比例。总体上看,虽然全市恢复正常的面积比例多达到了50%以上,旱情恢复最快的为东南部和东北部,恢复较慢的为受旱较重的西北部和西南部,恢复正常的面积比例最大的区县是武隆,有99.47%达到了正常,0.42%达到了湿润状态。从各区县来看,西北部和西南部恢复的较慢,西北部没有湿润的区县,西南部仅永川有6.77%的面积恢复了湿润;东北部和东南部恢复得最快,东北部的巫溪有1.45%的面积恢复了湿润,东南部的石柱有1.06%恢复了湿润。

从图5-1可以看出,在干旱发生的初期,除东南部外,各区域受旱面积比例均小于20%,东南部受旱面积比例最大,西南部最低;从空间分布上来看2006年干旱最初发生在重庆市三峡库区的东北部和西北部的市中心地域,随着干旱的进一步加重,旱情从东北部向西北部转移,在干旱发生最严重的时期,西北部的旱情最为严重,而且在干旱得到缓和后,西北部仍有部分地区有轻旱的现象,该地区的旱情最后才得以缓解。整体上该研究区域旱情最严重的主要分布在西北部地区,其次为西南部地区和中部地区,东北部和东南部旱情相对其他地区而言没有那么严重;在干旱解除后,东北部、中部和东南部恢复得较快,受旱面积比例均小于20%,而西北部和西南部重灾区旱情缓解较慢,仍有40%以上的面积处于干旱状况。

通过利用遥感影像获取重庆市三峡库区土壤相对含水量分布图,定量地从时间和空间上

获得干旱发生的现状和发展的趋势，这为当地政府和农业管理部门及时了解旱情程度和分布，采取积极有效的防、抗措施，科学指挥农业生产，减少干旱带来的损失具有重要的意义。干旱对农业生产带来的灾害最大，对农业造成的危害是政府最为关心的一个问题。所以有必要根据土地利用现状图提取各种土地利用类型受旱情况。

5.2 不同土地利用类型干旱的评价

根据重庆市 1: 10 万土地利用现状图，将整个研究区划分为五大类：草地、旱地、林地、水田和其他用地，其中其他用地包括了居民点及工矿用地、未利用地和园地。以不同的地类为掩膜，分类提取各种土地利用类型不同时期的土壤相对湿度分布，在每一类中统计各种状况下的像元数，并与该类土地利用类型的总像元数相比，获取这种土地利用类型受旱面积占该类用地总面积的百分比。具体的统计结果见表 5-2—5-6。从整体上来看，各种类型的土地利用干旱情况大体一致，在 6 月份期间，各类土地利用状况均有 80% 以上的面积处于正常状况，仅少量地区出现了轻旱或中旱，没有重旱发生；到了 7 月中上旬时干旱面积增加，均是在 7 月中旬到 8 月下旬发生了严重的干旱，到 9 月份干旱得到缓解。

5.2.1 水田干旱遥感监测统计结果

根据土地利用现状图提取水田，并做掩膜剪切出 2006 年水田相对含水量分布图。统计其受旱像元数和水田总像元数，将受旱像元数与总数相比，得到不同旱情状况的百分比值，如表 5-2 所示。

表 5-2 2006 年重庆市夏伏旱期水田干旱遥感监测分类统计

Tab.5-2 Statistic data of remote monitor paddy field summer drought in Chongqing,2006

干旱等级	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
5 月 25 日-6 月 9 日	87.33	10.72	1.95	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	82.97	15.66	0.82	0.39	0.16
6 月 26 日-7 月 11 日	32.12	65.34	2.30	0.24	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.13	94.36	3.75	1.10	0.66
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	5.68	60.56	24.52	9.24
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	5.07	35.56	16.89	42.48
8 月 29 日-9 月 13 日	0.03	66.01	32.97	0.81	0.18

表 5-2 反映了水田的受旱情况。水田在 6 月份处于湿润状况的面积比例分别为 87.33%和 82.97%；到 7 月份虽然湿润面积百分比有所下降，但仍有 97.46%和 94.49%左右的区域处于正常状况，而到 8 月份出现了重大旱情，水田的正常百分比不到 6%，超过 90%的水田均受到不同程度的干旱。到 9 月上旬水田旱情得到缓解，66.04%面积百分比恢复正常，仍有 0.18%面积的水田处于重旱。

5.2.2 旱地干旱遥感监测统计结果

同上获得旱地干旱遥感监测统计表,如表 5-3 所示。从表中可以看出林地与旱地和水田受旱情况相似,在干旱发生初期,有 22.41%处于湿润状况,70.84%处于正常状况;在重旱期间,旱地受旱的面积比例较大,有 10%左右的旱地处于相对正常状况。旱地的 80%以上的面积恢复了正常,但仅 0.23%的面积处于湿润状况;旱情解除时有 81.64%恢复了正常,仍有 0.08%面积的旱地处于重旱。

表 5-3 2006 年重庆市夏伏旱期旱地干旱遥感监测分类统计

Tab.5-3 Statistic data of remote monitor dry land summer drought in Chongqing,2006

干旱等级	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
5 月 25 日-6 月 9 日	80.75	15.83	3.42	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	69.21	29.09	1.10	0.38	0.22
6 月 26 日-7 月 11 日	22.41	70.84	5.73	1.02	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.11	93.76	4.46	0.76	0.71
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	12.61	56.90	19.84	10.65
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	11.41	46.15	13.69	28.75
8 月 29 日-9 月 13 日	0.23	81.41	17.62	0.66	0.08

5.2.3 林地干旱遥感监测统计结果

林地干旱遥感监测统计表如表 5-4 所示。在干旱发生初期,林地面积的 9.27%处于轻旱,1.97%处于中旱,没有重旱;在干旱发生中期,22.22%的面积处于正常状况,其他面积均受旱;;到 9 月上旬旱情得到了缓解,林地的 94.27%的面积恢复了正常,湿润的面积比例为 1.13%。

表 5-4 2006 年重庆市夏伏旱期林地干旱遥感监测分类统计

Tab.5-4 Statistic data of remote monitor woolland summer drought in Chongqing,2006

干旱等级	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
5 月 25 日-6 月 9 日	76.78	17.40	5.82	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	72.91	26.41	0.39	0.14	0.15
6 月 26 日-7 月 11 日	20.78	67.98	9.27	1.97	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.07	97.27	2.20	0.28	0.18
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	34.31	45.29	10.26	10.15
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	22.22	45.56	11.44	20.78
8 月 29 日-9 月 13 日	1.13	94.27	3.93	0.63	0.04

5.2.4 草地干旱遥感监测统计结果

草地干旱遥感监测统计表如表 5-5 所示。干旱发生初期，草地轻旱面积比例为 7.29%，中旱比例为 0.93%，没有重旱；干旱发生中期，58.02%处于轻旱，处于中旱和重旱的面积比例分别为 9.09%和 9.44%；到 9 月上旬旱情得到了缓解，草地的 94.62%的面积恢复了正常，并有 1.27%的面积处于湿润状况。

表 5-5 2006 年重庆市夏伏旱期草地干旱遥感监测分类统计

Tab.5-5 Statistic data of remote monitor grassplot summer drought in Chongqing,2006

干旱等级	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
5 月 25 日-6 月 9 日	70.68	24.66	4.66	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	51.12	45.25	2.46	0.62	0.54
6 月 26 日-7 月 11 日	14.39	77.39	7.29	0.93	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.11	87.86	10.22	1.01	0.80
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	27.84	54.26	10.16	7.74
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	23.45	58.02	9.09	9.44
8 月 29 日-9 月 13 日	1.27	94.62	2.95	1.13	0.03

5.2.5 其他用地干旱遥感监测统计结果

其他用地的干旱遥感监测统计表如表 5-5 所示。从表中可以看出，在干旱发生初期，6.19%的其他用地面积处于轻旱，0.88%的面积处于中旱，没有重旱的情况；在干旱发生中期，有 30.10%的面积处于重旱，轻旱和中旱的面积比例分别为 44.27%、16.86%；到 9 月上旬旱情得到了缓解，有 77.40%的其他用地恢复了正常，并有 0.36%的其他用地处于湿润状况。

表 5-6 2006 年重庆市夏伏旱期其他用地干旱遥感监测分类统计

Tab.5-6 Statistic data of remote monitor other used land summer drought in Chongqing,2006

干旱等级	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
5 月 25 日-6 月 9 日	76.33	20.77	2.90	0.00	0.00
6 月 10 日-6 月 25 日	57.73	36.69	2.00	2.89	0.69
6 月 26 日-7 月 11 日	17.22	75.71	6.19	0.88	0.00
7 月 12 日-7 月 27 日	0.00	86.83	7.32	1.94	3.91
7 月 28 日-8 月 12 日	0.00	8.22	50.48	26.41	14.89
8 月 13 日-8 月 28 日	0.00	8.77	44.27	16.86	30.10
8 月 29 日-9 月 13 日	0.36	77.40	19.03	3.12	0.09

5.2.6 各类土地利用类型干旱监测的对比分析

为了对比分析不同土地利用现状受旱比例的变化情况, 本文将不同时期的各类土地受旱面积百分比进行比较, 结果见图 5-2 所示。

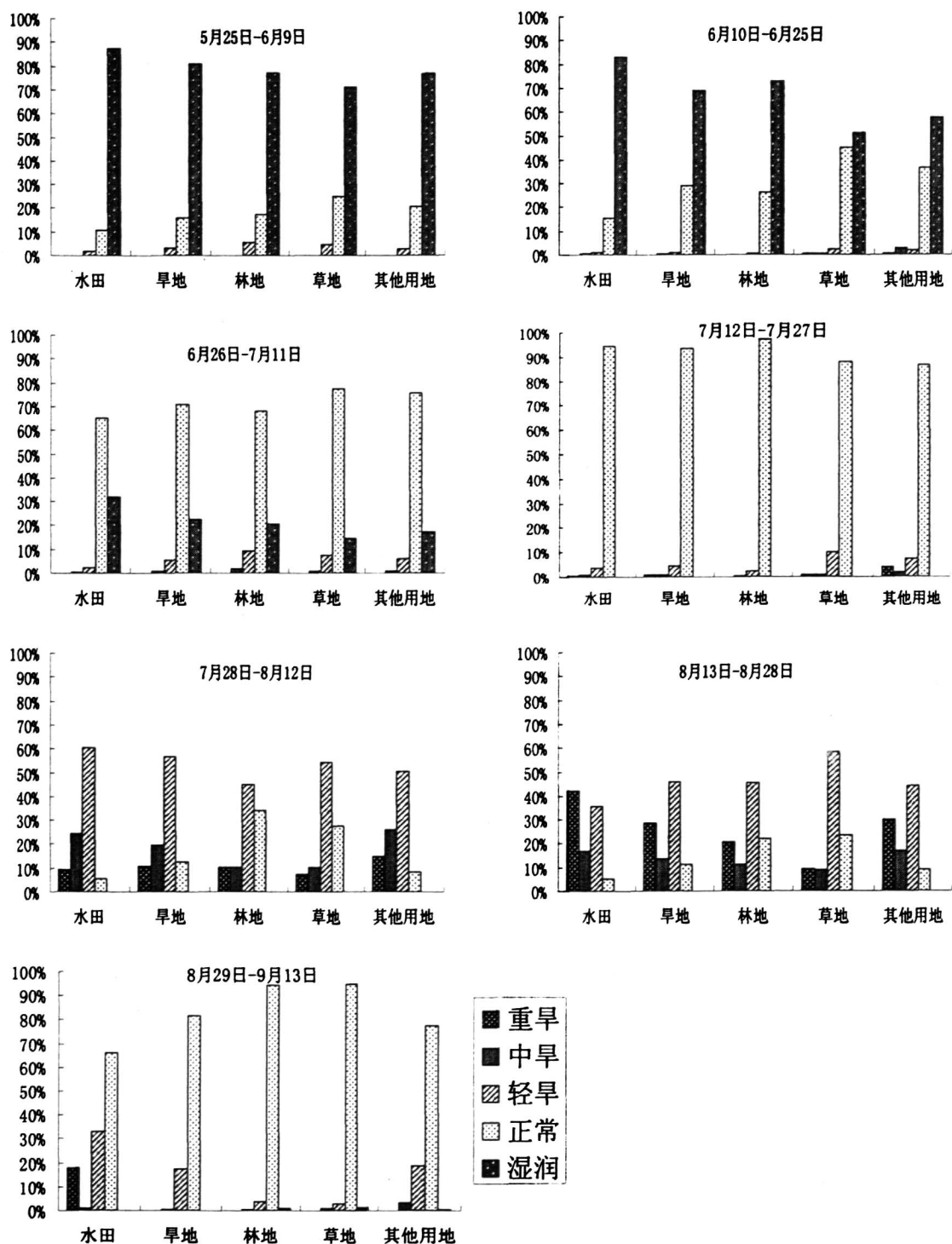


图 5-2 重庆市 2006 年 6-9 月不同土地利用类型受旱百分比

Fig.5-2 Drought-hit area of the different land use percentage in Chongqing

通过图 5-2 可知, 在 5 月 25 日-6 月 9 日和 6 月 10 日-6 月 25 日这两个时期, 各类土地处

于湿润的百分比值中，水田的湿润比例最高，旱地和林地其次，其他用地和草地的湿润比例相对较低。在干旱发生初期的7月份中，6月26日-7月11日湿润的面积百分比大幅度下降，比较各类土地利用的湿润面积比，仍是水田的湿润比例最高，旱地其次，林地、其他用地和草地的湿润比例相对较低，但正常面积比例相当；到7月12日-7月27日各类土地正常的比例相当，其他用地的受旱情况发生最为迅速，此时其他用地已有重旱现象。到干旱最为严重的8月份中，7月28日-8月12日的水田和旱地受旱面积比例迅速扩大，其他用地的重旱比例最大，而林地和草地受旱面积比例扩大虽有增加，但还有30%左右处于正常状态；8月13日-8月28日旱情进一步加重，此水田受重旱面积比例最大，受重旱面积达到42.48%，其次为其他用地和旱地，受重旱的面积比例分别为30.10%、28.75%，草地和林地受旱情况最轻，草地受重旱的比例最低。到9月份旱情基本解除时期，水田仍有近20%的面积比例处于重旱的情况，而旱地旱情解除也较为缓慢，林地和草地的恢复最快，恢复正常的面积比例达到了90%以上。

第6章 结论与讨论

6.1 结论

本文应用 MODIS 产品数据中的植被指数每 16 天合成数据 (2000-2007 年)、地表温度每 8 天合成数据 (2005、2006 年) 与重庆市土壤水分实测数据 (2005、2006 年) 为主要数据源, 提出相应的旱情遥感监测指数, 综合分析了重庆市三峡库区在夏伏旱时期各种干旱监测指数在研究区域干旱监测的适应性, 并应用实测土壤水分数据进行检验, 根据最适合的监测模型对 2006 年特大干旱进行了时空分析, 以及对各种土地利用类型干旱情况进行了定量的分析。主要得出了以下结论。

(1) 本文对应用 MODIS 产品数据进行干旱评价做了有益的探索, 研究表明 MODIS 数据以其空间分辨率、时间分辨率、观测精度及数据格式等方面的特性, 能够为干旱监测提供科学依据。

(2) 根据三种旱情监测模型的原理, 计算了 2005、2006 年两年中 5 月 25 日-9 月 13 日重庆市每 16 天为一期的干旱指数, 并建立了各期干旱指数与土壤相对含水量的关系模型, 获得了土壤相对含水量时空分布图, 分析了三个指数的旱情等级的时空分布。结果表明, 三种干旱指数反映干旱分布与实际情况一致性较高。从三个指数反演的旱情等级分析中表明, 三个指数反映旱情变化一致。其中 VCI 与 VSWI 反映旱情一致性比较好, 而 TVDI 的反演结果存在相对差异。

(3) 对三个指数模型反演的结果进行对比研究, 应用土壤水分实测数据为检验标准, 讨论了各种干旱监测模型在本研究区域的适应性。研究结果表明, 三种监测模型能对干旱进行有效的监测。但由于重庆地区地形复杂, 仅考虑植被指数的 VCI 在干旱监测中的作用是有限的; 结合植被指数和地表温度的干旱监测方法更适应于本研究区域的干旱监测, 但由于应用 TVDI 对研究区域的要求较高, 必须满足土壤表层含水量应从萎蔫含水量到田间持水量的条件, 因此在干旱发生的时期, 研究区域的下垫面状况不能满足 TVDI 的条件, TVDI 对研究区域干旱监测的适应性不好; VSWI 法在应用时需要下垫面差异不大, 在研究区域干旱发生时期, 能满足这一条件, 因此 VSWI 指数是研究区域在夏伏旱期适应性最好的遥感监测模型。

(4) 利用 VSWI 指数计算的 2006 年重庆市特大干旱时期的土壤相对含水量时空分布图, 统计分析了研究区域干旱发生的时间变化特征。结果表明, 综合考虑重庆市 6-8 三个月份的每 16 天一期的土壤含水量等级图, 发现重庆市在这三个月期间发生了大面积的重大干旱。从时间变化上看, 5 月 25 日-6 月 25 日两期中全市没有发生干旱现象; 干旱从发生到缓解分为三个阶段, 其中旱情发生初期 (6 月 26 日-7 月 11 日) 有 6.27% 和 1.21% 面积的区域分别处于轻旱和中旱状况, 没有重旱的情形; 干旱中期 (8 月 13 日-8 月 28 日) 轻旱、中旱和重旱的比例分别为 44.80%、13.65% 和 26.79%; 干旱解除期 (8 月 29 日-9 月 13 日) 83.07% 的土壤含水量恢复了正常, 仅有 15.34% 处于轻旱, 0.88% 处于中旱, 0.10% 处于重旱。

(5) 利用 VSWI 指数计算的 2006 年重庆市特大干旱时期的土壤相对含水量时空分布图, 分区县统计了各地的受旱情况, 定量的分析了研究区域干旱时间空间分布情况。结果表明, 空间分布上, 在干旱发生的初期, 东南部受旱最严重, 有 20% 的区域面积受旱; 到干旱中期,

旱情向西部发展，西北部受旱最严重，受旱面积高达 98%，其次是西南部，其受旱面积达 95%；在旱情解除期，东北部、中部和东南部恢复得较快，受旱面积比例均小于 20%，而西北部和西南部重灾区旱情缓解较慢，仍有 40% 以上的面积处于干旱状况。

(6) 利用土地利用现状图，分别提取各类土地利用类型受旱像元数，并与该类总像元数比较，得到受旱像元面积百分比，分析了各类土地利用的受旱情况。结果表明：不同土地利用现状受干旱影响的变化程度不同。其中水田受干旱影响变化最大，其次是旱地和其他用地，受干旱影响最小的是林地和草地。在干旱发生初期，水田的湿润比例最高，旱地其次，林地、其他用地和草地的湿润比例相对较低，但正常面积比例相当；到干旱发生中期旱情进一步加重，此水田受重旱面积比例最大，受重旱面积达到 42.48%，其次为其他用地和旱地，受重旱的面积比例分别为 30.10%、28.75%，草地和林地受旱情况最轻，草地受重旱的比例最低；到 9 月份旱情基本解除时期，水田旱情解除最为缓慢，水田仍有 0.18% 的面积处于重旱的情况，林地和草地的恢复最快，超过 90% 的面积均恢复了正常状况。

6.2 讨论

(1) 本文使用的地表温度数据是 NASA 提供的 1km 分辨率、8 天合成的地表温度产品 MOD11A2，1km 分辨率的遥感图像存在混合像元问题，影响了干旱监测的精度，使得干旱指数与土壤水分实测数据相关系数不高。

(2) 本文采用植被供水指数法 (VSWI) 对 2006 年干旱进行监测，VSWI 法适用于植被覆盖度较高的地区，而在重庆市区植被覆盖较低，其适用性需要进一步验证。

(3) 由于研究区域地形比较复杂，并且海拔高度相差较大，气温会受海拔高度影响，而地表温度也会受气温影响，从而影响干旱指数。因此结合地形因素对干旱指数模型进行进一步的精度提高是以后应该研究的方向。

附表

附表 1: 重庆市 2006 年干旱发生初期 (6 月 26 日-7 月 11 日) 各区县受旱面积比例统计表

	区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)		区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
西北部	重庆	24.85	66.67	8.23	0.26	0.00	东北部	梁平	16.02	80.26	3.72	0.00	0.00
	渝北	38.47	59.95	1.59	0.00	0.00		忠县	11.72	85.74	1.95	0.60	0.00
	北碚	41.36	56.87	1.62	0.15	0.00		万州	9.06	88.15	2.67	0.12	0.00
	巴南	32.84	66.42	0.74	0.00	0.00		云阳	3.28	95.35	1.32	0.06	0.00
	合川	59.04	39.45	1.46	0.05	0.00		奉节	16.64	79.94	3.26	0.16	0.00
	潼南	47.92	51.81	0.27	0.00	0.00		巫溪	35.41	59.59	4.21	0.79	0.00
	铜梁	45.34	54.58	0.08	0.00	0.00		巫山	19.15	79.16	1.65	0.04	0.00
	大足	50.83	43.48	5.68	0.00	0.00	中部	垫江	59.87	35.95	3.89	0.29	0.00
	长寿	46.46	51.94	1.29	0.30	0.00		丰都	9.46	77.26	10.32	2.95	0.00
西南部	荣昌	63.02	35.19	1.79	0.00	0.00		涪陵	24.98	73.26	1.72	0.04	0.00
	永川	49.59	49.72	0.69	0.00	0.00		武隆	10.90	70.72	15.72	2.66	0.00
	璧山	56.23	43.54	0.23	0.00	0.00		南川	16.56	77.16	5.66	0.62	0.00
	江津	35.39	62.67	1.73	0.21	0.00	东南部	石柱	13.11	68.81	15.49	2.59	0.00
	綦江	7.57	91.93	0.50	0.00	0.00		彭水	13.03	63.96	17.68	5.32	0.00
	万盛	11.89	86.04	2.08	0.00	0.00		黔江	5.62	47.78	35.92	10.68	0.00
	城口	53.71	40.31	5.53	0.45	0.00		酉阳	4.18	76.43	17.44	1.95	0.00
东北部	开县	7.66	86.68	5.26	0.40	0.00		秀山	6.51	88.28	5.22	0.00	0.00

附表 2: 重庆市 2006 年干旱发生严重期 (8 月 13 日-8 月 28 日) 各区县受旱面积比例统计表

	区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)		区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
西北部	重庆	0.00	1.44	15.16	27.13	56.26	东北部	梁平	0.00	9.08	39.01	19.39	32.51
	渝北	0.00	3.14	24.22	18.26	54.39		忠县	0.00	6.20	59.22	20.88	13.71
	北碚	0.00	4.92	30.97	18.09	46.02		万州	0.00	18.43	60.07	11.07	10.43
	巴南	0.00	0.31	53.83	30.37	15.49		云阳	0.00	13.80	73.21	3.43	9.56
	合川	0.00	0.64	6.34	10.17	82.85		奉节	0.00	27.01	55.06	7.27	10.65
	潼南	0.00	0.00	2.01	2.88	95.10		巫溪	0.00	20.39	35.59	13.35	30.67
	铜梁	0.00	0.00	11.73	14.84	73.42		巫山	0.00	30.02	51.60	7.31	11.07
	大足	0.00	0.30	8.93	13.50	77.27	中部	垫江	0.00	2.66	14.53	12.45	70.36
	长寿	0.00	2.85	13.00	14.05	70.10		丰都	0.00	22.87	44.17	18.89	14.07
西南部	荣昌	0.00	0.30	5.36	9.04	85.30		涪陵	0.00	7.45	50.44	17.16	24.95
	永川	0.00	2.81	15.29	30.80	51.10		武隆	0.00	26.67	56.27	11.52	5.54
	璧山	0.00	1.40	13.39	18.51	66.71	东南部	南川	0.00	18.39	72.08	7.46	2.07
	江津	0.00	9.83	40.92	33.08	16.18		石柱	0.00	32.48	30.58	15.91	21.03
	綦江	0.00	5.13	55.88	31.13	7.87		彭水	0.00	16.69	60.49	11.98	10.85
	万盛	0.00	9.43	64.15	21.89	4.53		黔江	0.00	17.30	51.68	11.09	19.94
东北部	城口	0.00	26.92	18.17	14.34	40.56		酉阳	0.00	25.25	63.49	4.80	6.47
	开县	0.00	12.53	58.08	7.81	21.57		秀山	0.00	17.84	70.42	6.27	5.47

附表

附表 3: 重庆市 2006 年干旱解除期 (8 月 29 日-9 月 13 日) 各区县受旱面积比例统计表

	区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)		区县	湿润 (%)	正常 (%)	轻旱 (%)	中旱 (%)	重旱 (%)
西北部	重庆	0.00	56.85	35.66	7.49	0.00	东北部	梁平	0.11	91.42	8.35	0.11	0.00
	渝北	0.00	53.54	44.23	2.23	0.00		忠县	0.05	94.56	2.75	1.05	1.60
	北碚	0.00	71.47	27.79	0.59	0.15		万州	0.12	94.60	3.51	1.58	0.19
	巴南	0.00	82.96	15.37	1.60	0.06		云阳	0.38	95.68	2.06	1.70	0.18
	合川	0.00	34.32	64.26	1.19	0.24		奉节	1.39	96.76	1.33	0.44	0.08
	潼南	0.00	30.95	68.27	0.70	0.09		巫溪	1.45	92.93	4.53	1.10	0.00
	铜梁	0.00	26.59	73.17	0.16	0.08		巫山	1.15	96.91	1.26	0.61	0.07
	大足	0.00	28.02	71.82	0.16	0.00	中部	垫江	0.07	75.99	23.94	0.00	0.00
	长寿	0.00	63.02	35.96	0.94	0.08		丰都	0.63	92.52	6.25	0.52	0.07
西南部	荣昌	0.00	35.42	64.18	0.40	0.00		涪陵	0.00	83.20	15.36	1.41	0.04
	永川	6.77	20.51	72.17	0.41	0.14		武隆	0.42	99.47	0.11	0.00	0.00
	璧山	0.00	32.48	67.17	0.35	0.00		南川	0.33	95.94	3.73	0.00	0.00
	江津	0.00	71.47	26.80	1.69	0.03	东南部	石柱	1.06	97.48	0.82	0.50	0.14
	綦江	0.00	77.06	22.94	0.00	0.00		彭水	0.78	98.17	0.80	0.25	0.09
	万盛	0.00	88.47	11.53	0.00	0.00		黔江	0.36	98.43	1.12	0.09	0.00
东北部	城口	0.00	94.86	2.95	2.15	0.03		酉阳	0.29	99.16	0.48	0.06	0.00
	开县	0.78	96.40	1.88	0.86	0.08		秀山	0.93	96.85	2.13	0.09	0.00

参考文献

- [1] 齐述华.干旱监测遥感模型和中国干旱时空分析[D].北京:中国科学院,2004.
- [2] Wilhite, Wilhite D A. Planning for drought: A methodology Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case studies[D] Wilhite, ed, Kluwer Academic, 1993: 87-109.
- [3] 闫峰, 覃志豪等.农业旱灾监测中土壤水分遥感反演研究进展[J].自然灾害学报. 2006, 15(6): 114-121.
- [4] 王鹏新, WAN Zheng-ming 等.基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J].地球科学进展. 2003, 18(4): 527-533.
- [5] Wilhite, D.A., and Glantz, M.H., Understanding the drought phenomenon :the role of definitions. In planning for Drought (D.A. Wilhite and W.E. Easterling, Eds.) [J], Westview Press, Boulder, CO. 1985.
- [6] Palmer W C. Meteorological drought US [J]. Weather Bureau Research Paper, 1965, 45-58.
- [7] 张景书.干旱的定义及其逻辑分析[J].干旱地区农业研究. 1993, 11(3): 97-100.
- [8] 袁文平, 周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展. 2004, 19(6): 982-991.
- [9] 王劲松, 郭江勇等.干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.
- [10] 王密侠, 马成军, 蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展[J].干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 119-124.
- [11] 孙荣强.干旱定义及其指标评述[J].灾害学, 1994, 9(1): 17-22.
- [12] 耿鸿江.干旱定义述评[J].灾害学, 1993, 8(1): 19-22.
- [13] Wilhite, D.A. Planning for drought :a methodology ,drought assessment ,management and planning : theory and case studies. In Drought Assessment Management and Planning: Theory and Case Studies (D.A. Wilhite, Ed.), Kluwer Academic, Boston, 1993, pp. 87-109.
- [14] Richard R, Heim J R. A review of twentieth-century drought index used in the United States [J]. Bulletin American Meteorological society, 2002, 83: 1149-1165.
- [15] 冯平, 李绍飞, 王仲钰.干旱识别与分析指标综述[J].中国农村水利水电, 2002(7): 13-15.
- [16] 李建芳, 李建军, 陈卫东.宝鸡地区的干旱研究[J].陕西农业科技, 2002, (7): 16-19.
- [17] Richard R, Heim J R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc. 2002, 83, 1149-1165
- [18] Garen D C. Revised Surface Water Supply Index for western United States [J]. J Water Resour. Plan. Manage, 1993, 119: 437-454.
- [19] 侯英雨, 何延波等.干旱监测指数研究[J].生态学杂志, 2007, 26(6): 892-897.
- [20] Watson K, Rowen L C, Offield TW. Application of thermal modeling in the geologic interpretation of IR images [J]. Remote Sensing of Environment, 1971(3): 2017-2041.
- [21] Kahle AB. 1977. A simple thermal model of the earth surface for geologic mapping by remote sensing [J]. Journal of Geophysical Research, 82: 1673-1680.
- [22] Rosema A, Bijleveld JH, Reiniger P, et al. A combined surface temperature, soil moisture and evaporation mapping approach [J]. Proceedings 12th International Symposium on Remote Sensing of the Environment. Manila, Philippines, 1978: 2267-2275.
- [23] Price JC. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation [J]. Water Resources Research, 1980, 16(4): 787-795.
- [24] 隋洪智, 田国良.热惯量方法监测土壤水分.见: 田国良主编.黄河流域典型地区遥感动态研究 [M].北京: 科学出版社, 1990: 122-132.
- [25] 朱永豪, 邓仁达等.不同湿度条件下黄棕壤光谱反射率的变化特征及其遥感意义[J].土壤学报, 1984, 21(2): 194.

- [26] 刘兴文,冯勇进.应用热惯量编制土壤水分图及土壤水分探测效果[J].土壤学报,1987,24(3):272-280.
- [27] 肖乾广等.用气象卫星监测土壤水分的试验研究[J].应用气象学报,1994,5(3):312-317.
- [28] 张仁华,孙晓敏等.以微分热惯量为基础的地表蒸发遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证[J].中国科学(D 辑),2002,32(12):1041-1050.
- [29] 李星敏,刘安麟等.热惯量法在干旱遥感监测中的应用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):54-59.
- [30] 刘振华,赵英时.遥感热惯量反演表土层土壤水分的方法研究[J].中国科学 D 辑,地球科学.2006,36(6): 552-558.
- [31] Bartholic J F,Namken L N and Wicgand C L.Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress[J].Agron J,1972,64:603-608.
- [32] Brown K W,Rosenberg H T.A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J].Agron J,1973,65:341-347.
- [33] Soer G J R .Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperature[J].Remote Sens Environ,1980,9:27-45.
- [34] Idso S B,Jackson R D,Printer P J Jr,et al.Normalizing the stress degree day for environmental variability[J].Agricultural Meteorology,1981,24:45-55.
- [35] David L B Jupp.Constrained two layer models for estimating evapotranspiration. 11th Asia ,conference on Remote sensing Zhongshan University ,Guangzhou, China.Now.,1990.22.
- [36] Moran M S,Clarke T R,Inoue Y et al.Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J].Remote Sens Environ , 1994,49: 246-263.
- [37] Zhongbo Su,Abraham Yacob,Jun Wen, et al.Assessing relative soil moisture with remote sensing data: theory,experimental validation and application to drought monitoring over the North China Plain[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2003,(28):89-101.
- [38] 田国良,杨希华等.冬小麦旱情遥感监测模型研究[J].环境遥感,1992,7(2):83-89.
- [39] 武晓波,阎守邑等.在 GIS 支持下用 NOAA/AVHRR 数据进行旱情监测[J].遥感学报,1998,2(4):280-284.
- [40] 赵昕奕,刘继韩.黄淮海平原各小麦生长期旱情分析[J].地理科学,1999,19(20):181-185.
- [41] 齐述华,张源沛等.水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究[J].土壤学报,2005,42(3):367-372.
- [42] 刘安麟,李星敏等.作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J].应用生态学报,2004,15(2): 210-214.
- [43] 宋小宁,赵英时.改进的区域缺水遥感监测方法[J].中国科学 D 辑,地球科学.2006, 36(2):188-194.
- [44] Lozana-Garcia,D.F.,Fernandez,R.N,et. Monitoring the 1988 severe drought in Indiana USA using AVHRR data[J].International Journal of Remote Sensing,1995,27:1-10.
- [45] Kogan FN.1990.Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. International Journal of Remote Sensing.11:1405-1419. Kogan FN.1997.Global drought watch from space[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,78:621-636.
- [46] Kaufman Y J,Tanre D .Atmospherically resistant vegetation index(ARVI)for EOS-MODIS[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing,1992,(30):261-270.
- [47] Bawa,K.J.Rose, K.N.Ganeshaiah, N.Barve, M.C.Kiran, and R. Umashaanker. Assessing biodiversity from space: an example from the Western Ghats, India [J].Conservation Ecology, 2002,6(2):7.
- [48] 陈维英,肖乾广,盛永伟.距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用[J].环境遥感,1994,9(2):106-112.
- [49] 冯强,田国良等.基于植被状态指数的全国干旱遥感监测试验研究[J].干旱区地理,2004,27(4):477-484.
- [50] 郭锐,管晓丹.植被状态指数的改进及在西北干旱监测中的应用[J].地球科学进展, 2007,22(11):1160-1168.
- [51] 陈云浩等.不同地表覆盖条件下区域水分盈亏的遥感分析.以中国北方为例[J].地球科学进展,2002, 17(2):283-288.
- [52] Nemani,R.R.,and Runnig,S.W.Estimation of surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR [J].AVHRR data.Journal of Appl.Meteor.1989,28,274-284.

- [53] Friedl, M.A., & Davis, F.W. Source of variation in radiometric surface temperature over a tallgrass prairie[J]. REMOTE SENS. ENVIRON, 1994, 48: 1-17.
- [54] Price, J.C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990(28): 940-948.
- [55] Carlson, T.N., Gillies, R.R., and Schmugge, N.J., An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content[J]. Agric. For. Meteorol., 1995, 17: 191-205.
- [56] Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., & Vidal, A. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. REMOTE SENS. ENVIRON, 1994(49): 246-263.
- [57] Prihodko, L., Goward, S.N. Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations [J]. REMOTE SENS. ENVIRON, 1997, 60(3): 335-346.
- [58] Boegh E.H., Soegaard, N., Hanan, P., Kabat and L. Lesch. A Remote Sensing Study of the NDVI-Ts Relationship and the Transpiration from Sparse Vegetation in the Sahel Based on High-Resolution Satellite Data[J]. REMOTE SENS. ENVIRON. 1998, 69: 224-240.
- [59] Sandholt, I., Rasmussen K., Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment. 2002, 79: 213-224.
- [60] Kimura, R., Estimation of moisture availability over the Liudaogou river basin of the Loess Plateau using new indices with surface temperature[J]. Journal of Environments, 2007, doi: 10.1016.
- [61] 肖乾广, 陈维英等. 气象卫星监测干旱灾害的研究, 卫星气象中心技术报告, 第 9509 期, 1995 年 9 月 20 日.
- [62] 王鹏新, Wan Zhengming, 龚健雅等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 527-533.
- [63] 辛景峰. 2003 中国科学院遥感应用研究所博士后出站报告.
- [64] 张顺谦, 卿清涛等. 基于温度植被干旱指数的四川伏旱遥感监测与影响评估[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 141-147.
- [65] 许国鹏, 李仁东等. 基于改进型温度植被干旱指数的旱情监测研究[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(6): 51-55.
- [66] 王鹏新, 孙威. 基于植被指数和地表温度的干旱监测方法的对比分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 319-323.
- [67] Schmugge T J, Gloersen P, Wilheit T, et al. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers [J]. JGR, 1974, 79(2): 317-323.
- [68] Njoku E G, Li L. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1999, 37(1): 79-93.
- [69] Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, et al. Retrieving Nearsurface Soil Moisture from Microwave Radiometric Observations current status and future pains[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 489-506.
- [70] Ulaby F T, Charles E. Radar polarimetry for geoscience applications. Boston: Artech House, 1990.
- [71] Ujjwal N, Venkat L E, Njoku G. Retrieval of soil moisture from passive and active L/S band sensor(PALS) observations during the soil moisture experiment in 2002(SMEX02)[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92: 483-496.
- [72] Jackson T J, Bindlish R, Cosh M. Soil moisture experiments 2004(SMEX04) polarimetric scanning radiometer, AMSR-E and heterogeneous landscapes[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2005.
- [73] 李杏朝, 董文献. 利用遥感和 GIS 监测旱情的方法研究. 遥感技术与应用[J]. 1996, 11(3): 7-15.
- [74] 高峰, 王介民等. 微波遥感土壤湿度研究[J]. 遥感技术与应用, 2001, 16(2): 97-102.
- [75] 李震, 郭华东. 综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 481-484.
- [76] 杨虎, 郭华东等. 主动微波遥感土壤水分观测中的最优雷达参数选择[J]. 高科技通讯, 2003, 13(9): 21-24.
- [77] 周凌云, 陈志雄. TDR 法测定土壤含水量的标定研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 59-64.

- [78] 刘志明,张柏,晏明等.土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J].地球科学进展,2003,18(4):576-581.
- [79] 梁凤荣.再谈重庆高温干旱[J].四川气象,2007,27(3):18-20.
- [80] 张英普等.玉米不同生育期水分胁迫指标[J].灌溉排水,2001,20(4):18-20.
- [81] 张树誉,李登科等.MODIS 资料在 2005 年陕西春旱过程监测中的应用[J].中国农业气象,2006,27(3):204-209.
- [82] 刘玉洁,杨忠东.MODIS 遥感信息处理原理与算法[M].北京: 科学出版社,2001.
- [83] <http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod13a2.asp>
- [84] Wan Z M,MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document(LST ATBD)Version 3.3,Contact Number: NAS 5-31370, April 1999.
- [85] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface air temperature and spectral vegetation index[J].Remote Sens Environ,1994,49(1):246-263.
- [86] Sandholt I, Rasmussen K, Anderson J.A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment,2002(79):213-224.
- [87] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A Method to Make use of Thermal Infrared Temperature and NDVI Measurements to Infer Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover [J] Remote Sensing Review, 1994, 52:45-59.
- [88] 姚春生,张增祥等.使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用,2004,19(6):473-478.
- [89] Kogan F N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar orbiting satellite data [J].Bulletin of the American Meteorological Society,1995,76:655-688.
- [90] 邓辉,周清波.土壤水分遥感监测方法进展[J].中国农业资源与区划,2004,25(3):46-49.
- [91] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature/Vegetation Index Measurements: An Exploration with the Simplified Simple Biosphere Model [J].Remote Sensing of Environment.2002,79(23):225-242.
- [92] 李红军,李春强等.大范围旱情遥感监测的分带计算[J].遥感技术与应用,2006,21(2):137-141.

致 谢

时光荏苒，三年的硕士学习已经接近尾声。在这即将结束之际，有无数位老师、同学和亲人的支持和关爱让我留恋。

本文是在导师刘洪斌研究员的悉心指导下完成的。三年来，导师在我的学习和生活中倾注了大量的心血，导师和师母渊博的科学知识、严谨的治学态度、谦和的为人、正直的品行深深地影响着我，使我受益匪浅，终生难忘。尤其是在论文的写作过程中，导师更是反复叮嘱，字斟句酌，正是这种无声的关怀与鞭策，才使学生得以顺利完成论文的写作。在论文脱稿之际，谨向导师和师母致以最衷心的感谢！

在此还要特别感谢谢德体教授、王正银教授、魏朝富研究员、杨剑虹教授、李航教授、屈明副教授、高明副研究员、刘秀华教授、廖铁军教授、李瑞雪副教授、陈玉成教授、蒋先军教授、吕家恪老师等在我三年的学习和生活中给予我的指导和帮助。

感谢重庆市农业技术推广总站孙彭寿研究员（站长）、李伟研究员（副站长）、熊正辉高级农艺师（副站长）、代亨林高级农艺师，江津市农业局蔡国学高级农艺师（站长）对我研究工作中给予的帮助和支持！

真诚感谢张微微、樊燕、凌辉等同窗好友对我学习和研究方面给予的关心和大力帮助！感谢赵伟师兄和杨亚梅、王少青、章明、侍慧宇、詹林庆、郭鹏涛、李维均、戴智慧、李玉华、李惠敏、赵丽容、江滔、范铭丰、成宾宾、成吉龙等师弟师妹在我学习和研究的过程中给予的热情帮助！

感谢西南大学研究生处，资源环境学院的各位领导和老师对我的关心和帮助。

感谢家人在我漫长求学的过程中对我无微不至的关心和无怨无悔的支持，在我成长的每一个足迹中，都印刻着他们的汗水和希望，我为拥有这样的亲人而骄傲。

感谢参与本论文评阅及答辩的各位专家、教授，您的指点迷津，将为我今后的研究奠定一个更高的起点！

感谢所有支持帮助我的老师、同学、朋友们！

最后，再次感谢上述良师益友，并恳请你们在今后的工作和学习中一如既往地给予我指导和帮助！唯有不断进取，奋发图强，才是对所有帮助和关心过我的人的最佳回报！

刘 静

2008年5月