

分类号 X703.1

学校代码 10495

U D C 620

学 号 0915163010

武汉纺织大学
硕 士 学 位 论 文

**植物浮床技术在汤逊湖的应用及对污水去除效
果的研究**

作者姓名: 张璟

指导教师: 张大捷

学科门类: 工学

专 业: 环境工程专业

研究方向: 水污染处理方向

完成日期: 二零一二年五月

Wuhan Textile University

M. S. Dissertation

**The research of plants floating bed in Tang-xun
Lake and sewage removal efficiency**

By

Directed by

March 2012

独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 武汉纺织大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 武汉纺织大学 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，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：	导师签名：
签字日期： 年 月 日	签字日期： 年 月 日

论文题目:植物浮床技术在汤逊湖的应用及对污水去除效果的研究

专业:环境工程

硕士生:张璟

指导教师:张大捷

摘要

利用植物浮床处理污水在目前的研究中占有很大的比例,在水体净化和环境美化方面发挥了重要的作用。本文调查分析了适合生长在华中地区的水生植物的种类,选择了美人蕉、菖蒲、滴水莲、水葱、马蹄莲、水葫芦、再力花、春芋、粉掌九种具有较高经济价值和观赏价值的水生植物作为试验的植物,结合植物浮床技术,研究了九种植物对污染水体的去污能力。本试验主要研究三个方面的内容:首先观察了所选的植物在污水中的生长情况如何和对试验污染物的去除效果如何;其次研究了筛选出来的植物在酸性环境下的生长能力如何和对试验污染物的去除效果如何;然后研究复合植物的生长能力如何和对试验污染物的去除效果如何。试验结论可概括如下:

1.美人蕉、菖蒲、滴水莲、水葱和粉掌不适合在试验污水中生长,其他四种植物在实验污水中均能正常生长。到试验结束时再力花、春芋、马蹄莲和水葫芦生长茂盛,其中春芋和水葫芦的生长能力最强,不但生长旺盛,它们的根系也有较大的增长,植物从实验开始的 22cm 和 15cm 增加到 49cm 和 40cm,生长速度较快。

2.从试验结果可以看到,再力花、春芋、马蹄莲和水葫芦试验组都有一定的去污能力。试验水体中 pH 下降,根系分泌出大量溶解性氧,使得水中溶解氧含量增加, TN、NH₃-N、TP 和 COD 浓度下降。它们对 TN 和 TP 的平均去除率分别 66.0%-74.5%、71.4%-81.8%,水中的氮磷营养物质得以去除;由于污染物质的沉淀、植物根部的吸附和微生物的降解等作用,水中 COD 去除率也达到了 59.7%-80.1%;但 NH₃-N 去除效果不明显,仅为 40.4%-60.1%。结合植物的生长发育情况和对污水的去除能力,综合性能较好的植物为水葫芦>春芋>马蹄莲>再力花。

3.通过复合植物去污性能的试验,可以看出复合植物在对污水处理环境下,相比较于单一种类植物的处理情况,不管是植物生长状况还是去污能力都有较大的提高,水中污染物的去除效率高。

4.设计了一种新型的浮床载体,克服了传统浮床易脆易倒不易搬运等缺点,也是本文的一个创新点。

5.利用数学模型建立系统内进出水浓度的衰减方程,用数学的方法验证了试验值和理论值的差异,便于对试验进行总结和归纳。

关键词:植物浮床;水体净化;复合植物;去污性能

研究类型:应用研究

Subject: The research of plants floating bed in Tang-xun Lake and sewage removal efficiency

Specialty: Environmental Engineering

Name: Zhang jing

Instructor: Zhang Dajie

ABSTRACT

The use of plants floating bed processing sewage in the present study holds a large proportion, played an important role in water purification and landscaping. This article researched and analyzed the grows well in central China area of the types of aquatic plants, chose cannas, calamus, dripping water lotus, water onion, calla lily, water hyacinth, flower, spring force again, powder palm nine brand with high economic value and ornamental value as a test of aquatic plants, combination of plant floating bed technology, research the plant in the polluted water's decontamination ability. This experiment mainly studies the contents of the three aspects: first studied selected plants in sewage the growth ability and to test contamination removal in effect; The selection of the plant in the acidic environment for the growth of the ability and test contamination removal in effect; And then research compound the growth of plants ability and to test contamination removal in effect. Test conclusions can be summed up as follows:

1. Cannas, calamus, dripping water lotus, water onion, calla lily doesn't fit in the test in sewage growth, the other four kinds of plants in the sewage all can normal growth. By the end of the flower, spring force again, taro and water hyacinth, luxuriant growth aspect, the spring and the growth of the ability water hyacinth taro, the strongest, not only the vigorous growth, their root there is also a greater growth, the plants from the experiment began to 22 cm and 15 cm increase to 49 cm and 40 cm, growing fast.

2. From the test results we can see, again flower, spring force, taro and water hyacinth patients have aspect of certain decontamination ability. Test water in pH is dropped, the root give a lot of soluble oxygen, making the water dissolved oxygen content increased, TN, NH₃-N, TP and COD concentration decline. The TN and TP average respectively 66.0%-74.5%, the removal rate 71.4%-81.8%, the water of nitrogen and phosphorus nutrients to purify; Because of pollutants in the precipitation, the root of microbial degradation of adsorption and effects, COD removal rate 59.7% -80.1%; But NH₃-N remove the effect is not obvious, only a 60.1% to 40.4%. Combination of plant growth and development of the situation and the ability of sewage removal, the comprehensive performance is good plant for water hyacinth > spring taro > taro > again force flowers.

3. Through the composite plants decontamination properties test, we can see that the composite plants in of the sewage treatment environment, in comparison to a single variety

plant handling, whether plant growth is in decontamination ability greatly improve, the water contamination removal in a high efficiency.

4. Design a kind of new carrier of the bed, overcome traditional floating bed brittle easy to fall hard to carry shortcomings, is also one of the paper's innovations.

5. Using mathematical model set up in and out of the water in the system of the concentration of the regression equation, using mathematical methods validation tests and theoretical values value the difference, and are convenient for test carry on the summary and classified.

Keywords: Plant floating bed; Water purification; Composite plants; Decontamination performance

Thesis: Application Research

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 湖泊污染现状.....	1
1.1.2 湖泊水体的生态修复技术.....	2
1.2 植物浮床的简述	3
1.2.1 植物浮床的定义.....	3
1.2.2 植物浮床国内外研究概述.....	4
1.2.3 植物浮床的去污机理.....	7
1.3 本课题的意义和主要研究内容及技术路线	8
1.3.1 本课题的意义.....	8
1.3.2 本课题的研究内容.....	8
1.3.3 本课题的技术路线.....	9
2 研究对象及方法.....	10
2.1 研究对象	10
2.1.1 汤逊湖污水来源分析.....	10
2.1.2 汤逊湖气候状况.....	10
2.1.3 植物浮床在汤逊湖中应用的可行性研究.....	11
2.2 试验植物的选择	11
2.3 试验试剂及仪器	13
2.4 测试指标及检测方法	13
2.4.1 试验植物生物量的测定方法.....	13
2.4.2 试验水质指标测试方法.....	13
2.4.3 试验数据处理.....	14
3 植物筛选试验.....	15
3.1 筛选试验方法	15
3.2 试验水样的水质分析	15
3.3 植物的生长状况	16
3.3.1 植株高度的变化.....	16
3.3.2 植物根长的变化.....	17
3.4 水处理能力效果	18

3.4.1 对 COD 的处理效果	18
3.4.2 对 TN 的处理效果	18
3.4.3 对 TP 的处理效果	20
3.4.4 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理效果	20
3.5 试验结果与分析	21
3.5.1 影响水体中氮元素的去除因素	21
3.5.2 影响水体中磷元素的去除因素	22
3.6 本章小结	22
4 有效植物去污性能试验	24
4.1 酸性条件下植物去污性能试验	24
4.1.1 试验目的	24
4.1.2 试验材料和方法	24
4.1.3 植物的生长状况	25
4.1.4 水质净化效果	25
4.2 特优复合试验的研究	28
4.2.1 试验目的	28
4.2.2 试验材料和方法	28
4.2.3 水质净化效果	29
4.3 试验结果与分析	31
4.4 本章小结	32
5 浮床构建系统及其实用效果的研究	33
5.1 浮床构建的依据	33
5.2 浮床构建的分类	33
5.3 本试验的浮床设计选择	34
5.3.1 设计浮床的部件解析	34
5.3.2 设计浮床的优势性	35
5.4 本试验浮床实用效果测试	36
5.4.1 浮床的耐用强度	36
5.4.2 浮床的固定类型	36
5.4.3 浮床的施工费用	37
5.5 本章小结	38
6 污染物浓度变化的数学模型研究	39
6.1 浮床内污染物的物料平衡计算	39
6.2 构建系统内污染物的衰减方程	40

6.3 试验值与理论值的比较	42
6.4 本章小结	45
7 结论与建议	47
7.1 结论	47
7.2 建议	47
致 谢	49
参考文献	50
附 录	54

1 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 湖泊污染现状

改革开放以来，随着社会的快速进步和人口数量的急剧膨胀，国内的湖泊和河流受到了各种污染排放物的污染，河流中的污染物的含量远远超过水体的负荷能力，生态功能遭到了退化。而农药和化学药品超量使用，地表污染物受到降雨的作用流向湖泊河流、工厂污染的污水肆意排放、军事装备产生的污染物等都对水域产生了大规模的污染。排入水体的污染物受到环境的影响，部分沉入水底底泥中，但会随着水体的温度、水中微生物的吸附作用、水体 pH 值的变化等变化而转变成不易去除的污染。^[1-3]而且受到严重污染的水体中几乎没有溶解氧，这样使水体发生恶臭，动植物会灭绝，严重影响到水域的生态环境系统。

从2010年中国环境状况公报中可知^[4]，全国地表水污染严重。26个国家控制重点湖泊（水库）中，满足Ⅱ类水质的有1个，占3.8%；Ⅲ类的有5个，占19.2%；Ⅳ类的有4个，占15.4%；Ⅴ类的有6个，占23.1%；劣Ⅴ类的有10个，占38.5%。测定的主要污染指标是TN和TP。大型水库水质反而好于大型淡水湖泊和城市内湖，如表1.1所示。

表 1.1 2010 年重点湖库水质类别

Table 1.1 Focus on lake and reservoir water quality categories in 2010

湖泊类型	个数	I 类	II 类	III类	IV类	V 类	劣V 类	主要污 染指标
三湖	3	0	0	0	0	1	2	TN TP
淡水湖	9	0	0	3	0	3	3	
城市内湖	5	0	0	0	2	1	2	
大型水库	9	0	1	2	2	1	3	
总计	26	0	1	5	4	6	10	
比例（%）		0	3.8	19.2	15.4	23.1	38.5	

26个国家控制重点湖泊（水库）中，营养状态为重度富营养的有1个，占3.8%；中度富营养的有2个，占7.7%；轻度富营养的有11个，占42.3%；其他均为中营养状况，占46.2%。如图1.1所示。

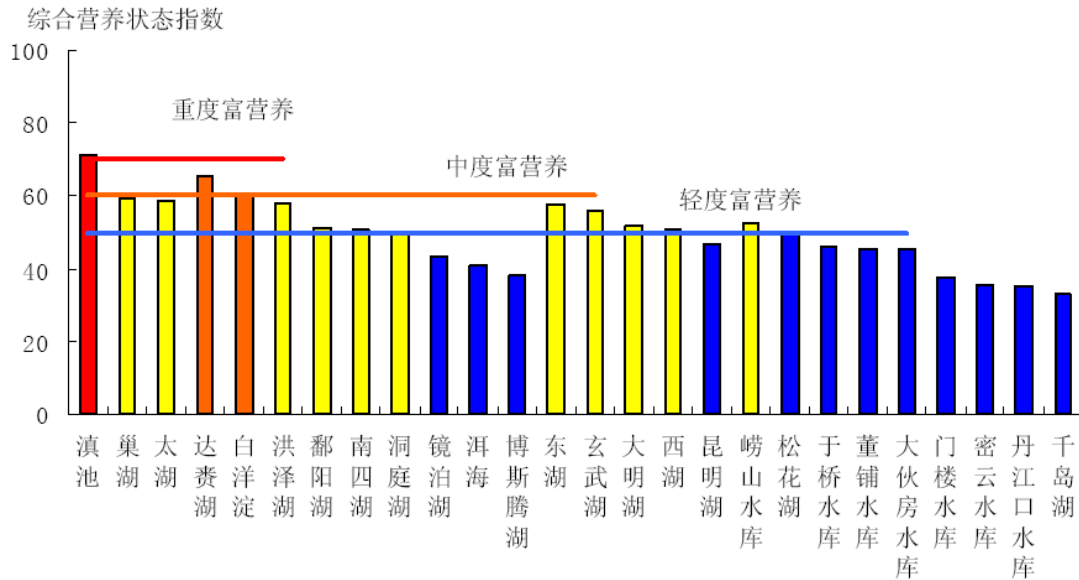


图1.1 2010年重点湖库综合营养状态指数

Fig.1.1 2010 key lakes and reservoirs trophic state index

1.1.2 污染水体的生态修复技术

早在 20 世纪中期的时候，美国、日本、法国、德国、俄国等许多发达国家就致力寻找解决去除湖泊污染的方法。中国的环境保护者也对此类问题进行了反复的实验和探索，由于湖泊的生态修复技术具有投资少、美观兼治理、实用性较强等特点，所以成为了处理污染湖泊首选的方法。应用修复技术治理污染湖泊在我国的起步较晚，但我国的水体污染对比与国外来讲，不管是从水体的污染现状，或是从水体污染的类型和程度上来看，有很大的不同。

目前国内外研究的生态修复技术主要有：人工湿地系统、复氧处理技术、生物膜法、植物和微生物修复技术等。

(1) 微生物修复技术^[5]：河床底质微生物分解有机碳源和其它营养物质，并使其转化为菌体，促进河床底泥硝化（减少泥沙的淤积量，物理化学性能稳定，屏障降低内源污染对水体的影响）。脱氮微生物通过硝化和反硝化作用可以使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分解，分解后的硝态氮被植物吸收，部分氮退出系统循环，达到净化水质的目的。

(2) 生物膜净化技术^[6]：生物膜法处理机制是使工程细菌和原生动物、后生动物的微型动物附着在填料或载体上生长繁殖，形成膜状生物污泥。污水与生物膜接触的时候，污水中的有机污染物、氮磷、藻类和其他营养物质，被生物膜上的微生物吸收，使污染水体净化，微生物自身也得到了繁殖。这种方法能有效地去除污水中有机污染物的含量，减少了污染物总量，达到了进化水体的目的。

(3) 人工湿地技术^[7]: 人工湿地处理技术已经有大规模的研究, 主要包括自由水域内的人工湿地处理系统和潜流式人工湿地处理系统。人工湿地净化水质有以下五个要素:

- ① 植物根茎上面的表面生物膜对有机物, 尤其是对藻类的吸附作用显著;
- ② 植物根系对水体中营养物质的吸收; 可以作为昆虫的摄饵、鱼类的捕食等;
- ③ 防止沉淀水底的悬浮物质再次上浮与水体表面;
- ④ 可以在污泥的表面去除氮磷物质;
- ⑤ 有巩固河岸的作用。^[8]

(4) 复氧技术^[9]: 复氧技术是将空气或者氧气用人工的方法充入污染严重的河流中, 增加河流的溶解氧含量, 促进河流底部的动植物的生长, 恢复它们的生态环境, 达到净化河水水质的目的^[10]。复氧技术结合了曝气的原理, 人工的将曝气充氧的方式应用到复氧技术中去, 使空体和液体充分混合, 克服了河流水量较少的缺点, 并完善了河流的缓冲能力, 利于水体中的氧气和液体混合, 利于河流污泥的絮凝^[11]。

主要使用机械通气、微孔曝气机、水下喷射机、水景喷泉等设备, 对水体进行曝气加氧和水体造流。而曝气的目的是为了提高水中溶解氧的含量, 给微生物创造一个良好的生长环境, 提高了去污的效率。

由于人工复氧需要较高技术作为指导, 花费也较大。所以, 应充分利用河流高坝高度的落差、水上娱乐设施、水闸的泄流、水坝的跌水和活水喷池等自然优势来富集氧气。

(5) 植物修复技术^[12]: 该技术的原理是利用植物根部附近的微生物代谢活动来吸收和降解水中的污染物^[13]。将水生植物修复应用在污染水体的治理中, 既能有效去除水中的各种污染物, 又对水中的有毒有害物质有很强的吸附、分离和吸收能力^[14]。因为用植物来修复污染地区, 不会产生像使用工业试剂造成的再次污染, 因此它更适应环保的要求, 引发了大家的高度重视。

1.2 植物浮床技术的简述

1.2.1 植物浮床的定义

植物浮床 (Floating Treatment Wetlands, 也叫人工浮岛) 是一种正在发展中的人工湿地污水处理系统^[15,16], 采用有机或合成材料作为浮床载体漂浮在水面上, 人为地在载体上种植植物, 形成了生物群落来改善水体的环境^[17]。由于受到浮床植物根系的吸收和吸附作用以及微生物的一系列反应, 可以降低氮磷和有机物质的含量, 处理效率高, 使水质得到了净化。

植物浮床对水体的净化作用主要表现在以下三个方面:

- (1) 对浮游植物的竞争、抑制或促进作用；
- (2) 对水体中营养物质的吸附、富集或转移作用；
- (3) 对重金属的吸附或富集等作用。

植物浮床技术可以使一些陆生植物在水面上生长，给植物与水面之间提供载体，使得植物根部在水中生长。它包括了“人工浮岛”、“浮床水域栽培技术”和“人工浮床”等。但由于发展历史不长，目前对水污染的控制机理还没有一个科学的结论，有关浮床的基础研究仍需加强。^[18]

近年来，我国的人工浮床技术的发展和应用于快速发展时期。研究与应用结果表明，在严重的富营养化水体的修复过程中，人工浮床技术可以使部分水生动植物自然恢复或者是在人工协助下恢复。

植物浮床实际应用示意图如图 1.2 所示。



图1.2 植物浮床

Fig.1.2 photo of plant floating-bed

1.2.2 植物浮床国内外研究概述

(1) 植物浮床的国外研究概述

最开始研究植物浮床技术的是美国生态学家Gurney，之后Trivedy（1978）、Sasser（1995）、Hailer（1996）等专家也开展了相关的研究。而德国植物学家Sven hoeger在1988年发表的论文上也概括了生态浮岛的六大功能。

国际上将生物浮床技术应用于水处理系统的研究中，主要应用在城市暴雨污水、暴雨下水道混合污水^[19]、生活污水^[20,21]、酸性采矿尾水^[21]、养猪场废水^[22]、禽类加工废水及水库^[23]等方面。Nahlik 和 Mitsch^[24]在哥斯达黎加研究了生物浮床对多种污水的有效去污性。

研究认为，浮床的自身浮力和净化能力随季节变化而变化，主要是由于温度的高低造成动植物新陈代谢和产生气体能力的变化，及植物根系生长的有效表面积和同化能力的变化。很多研究发现^[25]，植物浮床会降低附近水中溶解氧的含量，尤其是水流缓慢的

湖泊，但相反的是，在河道里，由于河水本身的复氧作用强，再加上适当的开阔水面，可以缓解由浮床植物遮盖等所造成的溶解氧含量下降的影响。因此，植物浮床技术更适合应用与河道的污水治理。

在水污染处理方面，可以将例如绿色蔬菜、粮食农作物、牧草和花卉等陆生植物培育在受污水体中，并对污染水体有着良好的去除效果的前景^[26,27]。1979年由德国建造的 schism kampong (floating campus)^[28]是当时最早的人工浮床。自从1982年以来，日本将人工浮岛基地建造在慈贺县琵琶湖内，为鲤鱼、鲫鱼等鱼类孵卵提供地方，取得了良好的效果，人工浮岛这一技术得到了日本环境和湖泊专家的广泛好评。^[29]从1980年起，美国的一些科学家将西红柿、草莓、黄瓜等一些蔬菜瓜果和风信子等一些的鲜花草木培育在养殖鱼类的废水中^[30]，取得了良好的效果；Nathalie等^[31]用深液流（NTF）水培系统培育一些曼陀罗，并用来净化生活污水，达到了很好的去除目标。

1995年日本的科研人员在霞浦进行浮床隔离水域的试验，结果显示了，当浮床在水体中的占有率达到了25%时，浮游植物的细胞数目会减少94%，也会影响大约50%的COD含量降低，由于冬天受到低温的影响，隔离的各个水域中污染物去除效果的差别并不显著^[32]；1996年日本对在土浦港地区中应用人工植物浮床情况的调查中发现，植物浮床对水体中污染物的去除有着明显的效果。

国际上对生物浮床研究最广泛的就是它吸收过剩营养物质的能力。Kansiime^[33]等在乌干达用纸莎草作为浮床植物，在生活污水中培育，四个月浮床对TN和NH₃-N（入水浓度分别为90g/m³和73g/m³）的去除率高达80%-90%；对TP和正磷酸盐的去除率在五个月后达到了70%-80%，可见植物浮床的净化能力要高于传统的人工湿地系统。Sekiranda和Kiwanuka^[34]用芦苇作为浮床植物，经过对生活污水的处理研究发现，NH₃-N的去除率达到了97%，但传统的湿地处理系统的NH₃-N也降低了92.5%，而传统湿地处理系统对磷的去除能力比植物浮床系统要高，分析可能受到传统湿地系统中基质砂石对磷的吸附作用的影响。

植物浮床对COD的去除能力一般，Van Acker等在比利时研究发现，植物浮床系统对COD的去除率为33%-68%。Headley和Tanner对浮床系统在模拟暴雨污水中重金属的去除能力的试验中发现，Zn和Cu的去除率分别为3.8 mg/m².d-6.4 mg/m².d和24.8 mg/m².d-77.0 mg/m².d，比传统的人工湿地处理系统效果要好。

国外的研究都是基于实验室控制试验的，而野外湖泊、河流大面积浮床系统的运行效果尚无报道。

(2) 植物浮床的国内研究概述

我国的污染水域主要是有机物质的污染，80%以上是水中N、P含量过高。因此应用植物浮床的思路是：将植物浮床种植在水域表面，通过植物根系对水中N、P等营养物质的吸收，减少污染水体中所含的多余的营养物质，来改善和提高污染水体的水质。

宋祥甫等^[35]利用植物浮床水域种植的方法,在人工模拟池内种植水稻,通过水稻的吸收和吸附作用除去水中的N、P元素,达到净化水质的目的。他们的研究表明,在水深约14m左右,浮床的覆盖率分别为20%、40%、60%的条件下,通过约三个月的处理,水稻系统对水中TN的去除率分别达到了29%、49.8%和58.7%,TP的去除率分别达到了32.1%、42%和49.1%。这一系列的试验结果支持了将陆生食用性植物应用到水体去污的试验研究中这一观点。

李欲如等^[36]在低温条件下,利用浮床水培技术,研究了水芹菜、多花黑麦草和大蒜3种耐寒植物对污染水体的净化效果。研究发现3种植物在水温4.0~10.1℃的条件下生长良好,对水体中的TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}的去除率分别达到了59.3%~29.2%、55.6%~33.9%、65.2%~39.3%和55.7%~49.5%,对藻类的抑制率达到了88.4%~92.3%。试验发现,净化能力强弱依次为:水芹菜>多花黑麦草>大蒜。研究结论为冬季低温条件下浮床植物的选择提供了依据。

周小平等^[37]用空心菜(Water spinach)、水芹菜(Water celery)和空白对照试验为对象,研究了植物在污染水体中对N、P的去除及其N₂O的排放情况。研究表明:浮床植物系统对水体中N、P有良好的去除效果,植物自身所积累的N、P含量分别占总去除量的40.32%~63.87%,表明了植物的同化吸收作用是N、P去除的主要途径之一,浮床植物系统中硝化反应高于反硝化反应,因此系统具有较强的NH₃-N去除率,进而产生NO₃-N含量的累积。植物的生长降低了系统中N₂O的排放通量,空心菜浮床系统在进水前后N₂O排放量最低,仅为17.14μg N·m⁻²·h⁻¹。

卢进登等^[38]利用植物浮床在污染水体中培育了7种植物,成活率都高达70%,2个月过后,植物的生物生长量都超过了20 kg/m²。水培芦苇的净化能力最高,芦苇浮床将117.93 m³的V类水质的水体净化到III类水质(计TP),处理能力依次为荻>水稻>蕹菜>牛筋草>香蒲>美人蕉。其中对水蕹菜和水稻的研究表明,蔬菜和饲料的高等植物符合国家有关的卫生标准,处理效果较好。

聂智凌等^[39]利用三种植物浮床净化西太湖地区富营养化的河水,研究表明:三种浮床池对河水均具有较好的净化能力,其中设置有填料的两种浮床池对河水中SS、NH₃-N、TP的平均净化率分别为64.1%~65.6%、62.2%~69.8%、50.4%~60.1%,可见设置的填料对河水净化起到了一定的促进作用。相比较球形填料,组合填料的表面积增大,更多的微生物被组合填料固定,因此所对应的浮床处理池净化效果会更好。浮床里植物的光合作用影响了池水中溶解氧含量的变化,也为微生物脱氮创造了良好的环境条件。

张彦海等^[40]将长江次级河流的临江河作为研究对象,利用四级串联美人蕉浮床来处理受到重金属污染的河流的动态试验。试验表明,当进水的TN, TP, NH₃-N和COD分别为7.8mg/L~12.1mg/L、1.06mg/L~1.89mg/L、4.8mg/L~8.7mg/L、29mg/L~46mg/L时,美人蕉生长情况均较好。当水力负荷为0.8 m³/(m²·d)时,美人蕉四级串联浮床系统内DO

逐级下降,在植物收割前对 TN、NH₃-N、TP 的平均去除率达到 56.82%、66.08%、49.36%,相比较与单级串联系统,污染物的去除率提高了 27.33%、35.69%、16.15%,其中 TN 和 NH₃-N 的去除率达到了 80.39%和 94.45%之高,研究还发现,TN 和 NH₃-N 的去污性能和温度成正比,为美人蕉串联浮床技术处理污染水体提供了一定的依据。

杨彦军等^[41]丰富了低温条件下处理富营养化水体的方法,他采用了浮床无土栽培技术,研究了美人蕉、睡莲、水葫芦、金钱草四种水生植物对富营养化水体的去污性能。研究表明:四种植物对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Cr} 都有良好的去除效果,去除率分别为 22.69%~52.72%、48.83%~77.82%、92.26%~99.56%、28.54%~42.72%。通过比较,美人蕉和金钱草净化能力较强,水葫芦次之,睡莲最弱。

目前,我国对植物浮床的研究技术已日趋成熟。在治理太湖内湖的项目中,植物浮床在污水处理中体现了其高效的污水处理能力,也为水底动植物的生长创造了良好透明度的环境^[42]。在 2002 年的时候,北京在什刹海富营养化水体的修复研究中,选择了美人蕉和旱伞草作为浮床的植物,将浮床技术应用在水处理中,消除了湖水中蓝藻水华的状态,清除湖水的异味并改善了湖水的透明度^[43]。植物浮床技术在净化水质、美化景区景观方面起到了较好的作用,对有水生植物带的受污水域有着良好的处理前景。

1.2.3 植物浮床的去污机理

植物浮床技术是在浮床载体上培育植物,通过植物的根系吸收或转化水中的营养物质,或者由于植物叶面和浮床载体的覆盖遮光,或者是根系分泌物可以杀伤水中的藻类等途径,来去除水中氮磷元素、悬浮物质和重金属元素。因此植物是植物浮床系统中吸收污染水体中污染物的“吸尘器”,其净化机理如图 1.3 所示。

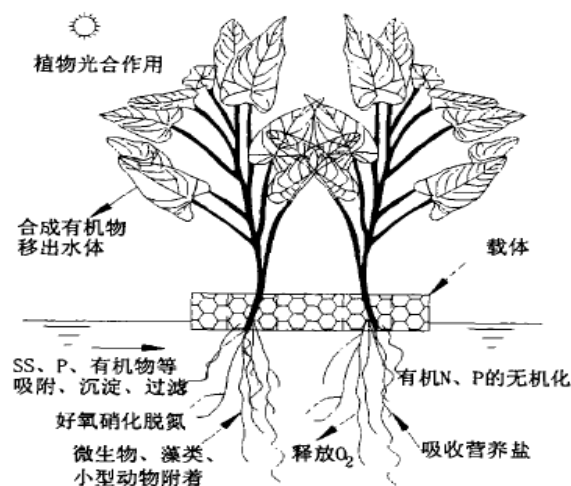


图1.3 浮床植物的净化机理

Fig.1.3 Floating bed purification mechanism of the plant

植物浮床技术的去除机理可以概括为以下几部分:

(1) 根系的吸附作用：由于植物的根部在水中存在着较大的表面积，当被污染的水流过植物根部的时候，不跟水相溶的胶体会吸附在植物的根系上面。附着在根部的细菌会发生内源呼吸，凝集生成的菌胶可以沉淀水中的悬浮物。这样可以很快的提高水体的透明度。

(2) 隔膜作用：在夏季，大面积的植物浮床可以阻挡阳光对水体的直射，降低了湖水的温度。在冬季，尤其是遇到植物被雪覆盖的情况后，它们会起到一个很好的保护作用，延缓了水温的降低和避免了水表面的结冰。

(3) 吸收作用：植物在生长的过程需要养分和养料而被污染的水中含有过量的 N、P 元素促进了植物的生长。

(4) 复氧作用^[44]：气体经过由浮床植物的叶面和根系的运输及释放，将一部分空气中的氧气和一部分光合作用释放的氧气运送到植物的根部，其中一部分气体参与植物的呼吸作用，另一部分气体由根系释放至外部缺氧的环境中，在根际范围内形成了充氧状态的微环境，促进了周围微生物和硝化菌的生长和繁殖，进而有利于有机物和营养盐的分解和消化。

(5) 藻类的抑制作用：植物和藻类都需要阳光来进行光合作用，都需要养料，植物无论是的个体，吸收能力，还是生命周期都比藻类要强，所以植物与藻类竞争藻类是处于劣势的，能够很好抑制藻类的恶性繁殖。

1.3 本课题的意义和主要研究内容及技术路线

1.3.1 本课题的意义

本论文依据前人所做的研究及存在的不足，选取了武汉市重要湖泊一汤逊湖作为研究水体，针对汤逊湖的有机物污染严重、水体的溶解氧含量低、固体悬浮物含量高的实际情况，将植物浮床技术应用在武汉汤逊湖内污染湖水的净化试验研究中。对植物浮床的实际工程的应用研究存在的若干问题进行探索并加以总结，为植物浮床技术应用到生产实际中提供了技术支持，为处理武汉汤逊湖区的污染水体提供了技术上的支持。

1.3.2 本课题的研究内容

本课题的研究内容如下：

(1) 在夏季高温条件下对浮床植物进行筛选。在实验室通过静态试验比较了马蹄莲、春芋、水葫芦、再力花、美人蕉、滴水莲、水葱、菖蒲、粉掌 9 种耐高温植物在高温条件下对污染湖水的净化效应以及生长状况。

(2) 植物浮床去污性能的试验。试验时间为两个月，根据污水中污染物的去除规

律及水生植物的生长处理能力，观测记录植物的生长情况和生长特性，对试验用水的 TN、NH₃-N、COD、TP 的去除率进行分析和总结。

(3) 不同 pH 值的净化效果与规律。研究了春芋、马蹄莲、水葫芦、再力花 4 种植物在不同生长阶段、不同水温条件下对酸性环境湖水的净化效果及规律。

(4) 结合汤逊湖的实际情况，打破传统浮床模式，设计出适合在汤逊湖使用的浮床载体，这是一个创新点。

(5) 记录前部分的试验数据，用数学的方法建立系统内污染物浓度的衰减方程，用数学模型进一步验证了浮床的去污性能。

1.3.3 本课题的技术路线

本论文的技术路线如图 1.4 所示。

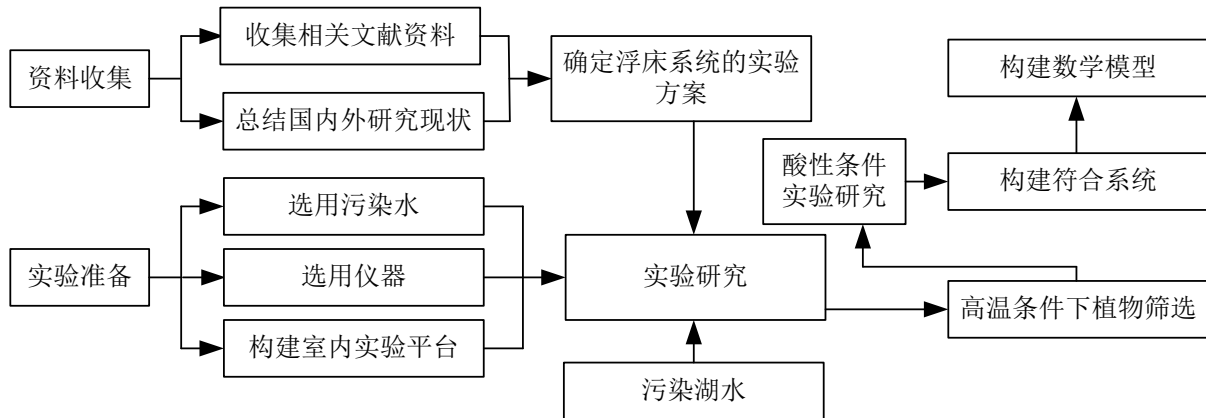


图1.4 本文的技术路线图

Fig.1.4 The technical line of this article

2 研究对象及方法

2.1 研究对象

本实验选取汤逊湖湖水作为研究水质的来源,运用生态学实验方法,通过综合性的实验和验证性的实验,研究分析了汤逊湖的自然、人文环境的特点,湖水水质的状况以及湖内水生动植物的组成和生长情况。将植物浮床技术应用到实验中,通过筛选实验,最优化组合实验和动静态实验模拟,来筛选出适合在此地方生长并发挥其最大净化作用的植物,并总结了最优化组合植物种类,为植物浮床技术实际运用在人工湿地提供了新的技术支持。

2.1.1 汤逊湖污水来源分析

汤逊湖位于湖北省武汉市境内,横跨了洪山区、江夏区和东湖技术开发区。汤逊湖流域汇水面积36.6平方公里,湖水水深达1.85m。在汤逊湖流域内的河道通过青菱河、巡司河与长江相连,形成了纵横交错的平原河湖水网体系。但由于近年来湖水流域周围生活垃圾和工业污染物质排放量的急剧增长,汤逊湖湖水不断恶化,早已超过了水体的环境容量。2001年TN和TP的含量超过Ⅲ类水质的标准^[45]。2006年水质评价结果为Ⅳ类,处于中营养状态,已不能满足水功能的要求。1998-2006年的监测数据表明:TN、TP 超标率高达52.5%和35%^[46],汤逊湖周边污染物的排放类型及规模将深刻的影响着湖水的水质。

2.1.2 汤逊湖气候状况

汤逊湖属于北亚热带季风性湿润气候,有着雨量充沛、日照充足、夏季酷热、冬季寒冷的特点。一般年均气温为 15.8℃-17.5℃,其中一年中,1 月份的平均气温最低,温度低至 0.4℃,7、8 月份的平均气温最高,高温可达 28.7℃。夏季时间长达 135 天,因为武汉市地处北纬 30°,夏季正午太阳的高度可达到 38°,又因为地处内陆、距海洋较远,地形象盆地,所以热量聚集容易散发就难。武汉河湖比较多,所以夜晚水汽多,再加上城市的热岛效应和伏旱时副高难以控制,气候十分闷热,是中国三大火炉之一,夏季普遍高温达 37℃,极端最高气温达到 44.5℃。初夏时梅雨季节雨量集中,年降水量为 1100mm,一年无霜期有 240 天,年日照总时数达 2000 小时。

2.1.3 植物浮床在汤逊湖中应用的可行性研究

通过对汤逊湖近几年的水污染成因及污染变化趋势的分析,发现内湖水是目前影响汤逊湖湖水环境质量的重要原因。其中湖周围的工厂排污为汤逊湖主要重金属污染来源之,湖水TN、TP两项指标均超标,而周围居民大面积的网箱养鱼是湖水富营养化污染物的重要来源。

因此,实施生态工程处理汤逊湖污水具有以下可行性作用:

(1) 在湖水周边设置大面积的水生植物屏障,可以促进对水体悬浮物的拦截和营养物质的吸收。

(2) 由于浮床系统具有固定性,可以防止植物随着湖水的流动而摇摆不定甚至被湖水冲走的可能。

(3) 多种植物构建的复合浮床能较好的处理不同污染程度的湖水,并不会造成对湖水的多重污染。

(4) 构建浮床中的植物和载体材料购买价格低,组合方式多样,并简单方便执行。

(5) 浮床系统中多种水生植物由于其自身结构的特点,植物生长周期短,水生根系发达,在湖水中适应性强,在不同季节时分都能生长运行。

2.2 试验植物的选择

在以适应能力为前提的基础上,经过阅读一系列的文献、实地的调查和比较植物类型,结合到浮床中植物种植的选择,出于因地制宜的理念,为了达到植物在水体去污的同时又能取得较好的经济效益的目的,在试验中选择了滴水莲,水葱,美人蕉,粉掌,菖蒲,马蹄莲,再力花,水葫芦,春芋作为实验植物。

本实验选择的植物种类及生物学特征如表2.1所示。

表 2.1 植物种类及生物学特征

Table 2.1 Preparation methods and shape of wool powder

植物	科属	形态外观	生长条件	用途
美人蕉	美人蕉科	植株高达 100-150cm, 根茎肥大, 没有分枝。叶面宽大, 花色有乳白、鲜黄、桔红等 50 多种	不耐寒, 怕强风和霜冻。对土壤要求不严, 能耐瘠薄, 在肥沃、湿润、排水良好的土壤中生长良好。	吸收空气中二氧化硫、氯化氢, 及二氧化碳等气体, 具有净化空气、保护环境作用。

表 2.1 (续)

植物	科属	形态外观	生长条件	用途
滴水莲	天南星科	植株可高达 2m, 茎粗壮, 叶子宽大, 叶柄较长。	生长温度为 20-30℃, 最低能耐 8℃ 低温, 高温时只需保持土壤潮湿就可。	生长快, 喜湿, 叶面宽大, 根茎吸水能力较强, 有清除空气灰尘, 保护环境的作用。
水葱	莎草科	根状茎粗壮, 有许多须根。秆高大可达 1-2m, 叶片为长线形, 长可至 11cm。	生长在湖边、水边、浅水塘、沼泽地或湿地草丛中, 最佳生长温度 15-30℃, 能耐低温。	可用于水边池美观, 也对污水中有机物、NH ₃ -N、磷酸盐及重金属有较高的除去率。
菖蒲	天南星科	茎较粗大, 直径 1-1.5cm, 表面为类白棕红色, 根茎为扁圆柱形, 长约 10-24cm。	生长在池塘、湖泊的岸边或者是生长在沼泽地里。最适宜植物生长的温度为 20-25℃。	适宜水景岸边及水体绿化, 也可盆栽观赏。也可栽于浅水中, 作为湿地植物。茎、叶可入药。
粉掌	天南星科	株高可达 1m, 节间短, 叶子是深鲜绿色, 很有光泽。	性喜温热多湿而又排水良好的环境, 怕干旱和强光暴晒, 能忍受的最高温为 35℃, 低温为 14℃	花朵独特, 色彩丰富, 且花期长, 是一种有较大发展前景的名优花卉
春芋	天南星科	茎很短, 叶子排列紧密、整齐, 叶柄细长, 可达 1m, 叶片巨大, 浓绿有光泽。	较耐荫蔽, 生长适温 18-25℃, 冬季能耐 2℃ 低温, 喜砂质土壤。	植株生长迅速, 叶态奇特, 十分耐阴, 适合室内厅堂摆设, 特别适宜装饰音乐茶座、宾馆休息室。
再力花	竹芋科	叶子长 50cm, 宽 25cm, 花很小, 为紫堇色, 花柄可高达 2 米以上。	喜欢湿润、阳光充足的环境, 不耐寒, 在冬季时主要是根茎在泥中过冬。喜欢微碱性的环境。	植株高大美观, 可供观赏, 还有净化水质的作用, 是重要的水景花卉。
马蹄莲	天南星科	叶片翠绿, 具有肥大肉质的块茎, 株高约 1-2.50 米。叶柄很长一般为叶长的 2 倍	常生于河流旁或沼泽地中。性喜温暖, 不耐寒, 不耐高温, 生长适温为 20℃ 左右。	马蹄莲可药用, 具有清热解毒的功效。可治烫伤, 预防破伤风, 马蹄莲有毒, 禁忌内服。
水葫芦	雨久花科	每叶有泡囊承担叶花的重量, 须根发达, 靠根毛吸收养分, 叶片为荷叶状, 花为浅蓝色, 叶色翠绿偏深	喜欢在向阳、平静的水面, 或潮湿肥沃的边坡生长, 多浮于水面生长。	几乎在任何污水中都生长良好、繁殖旺盛, 还可以富集各种污染物质。

2.3 试验试剂及仪器

本实验所用的试剂及仪器如表 2.2 所示。

表 2.2 实验试剂和仪器
Table 2.2 Reagents and apparatus

实验试剂	实验仪器
氢氧化钠、过硫酸钾、硝酸钾、浓硫酸、氢氧化钾、碘化钾、盐酸、二氯化汞、酒石酸钾钠	UV-1201 紫外可见分光光度计、温度计、SGZ-1AP 微机浊度仪、电子天平、便携式 PH 计、哈希 DRB200、DR2010 消解器

2.4 测试指标及检测方法

2.4.1 试验植物生物量的测定方法

植物生理特征测定的项目及方法：

干重：用清水洗净植物后，在105℃高温下烘干直至恒重，进行称重；

鲜重：用清水洗净植物的根部，常温自然晾干，进行称重；

植物株长及根系长度：将植物清洗干净，自然晾干，用卷尺进行测量。

2.4.2 试验水质指标测试方法

本试验测定的水质指标分析方法按照国家环保总局编制的《水和废水监测分析方法》（第四版）中的方法执行^[47]。

具体测定的水质指标及分析方法见表2.3。

表 2.3 水质分析方法
Table 2.3 Water Quality Analysis

测定项目名称	分析方法
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
TP	钼酸铵分光光度法
PH	便携式PH计测定
COD	重铬酸钾比色法
NH ₃ -N	纳氏试剂比色法
浊度	微机浊度仪检测
污染物的去除率	污染物去除率=（原水浓度—试验的水质浓度）/原水浓度*100%

2.4.3 试验数据处理

本实验数据运用统计软件Excel 2003和SPSS 13.0进行统计和分析,用Excel 2003统计计算并绘图。

3 植物筛选试验

3.1 筛选试验方法

实验地点为纺织大环境院，实验时间为2011年6月20日到2011年8月19日。

将试验要用的不同种类植物放在装有受污水样的塑料桶中，放置在室外，在自然条件下驯化（要防止被雨淋到）一周。

试验开始时，放置10个试验圆桶，并清洗自然晾干、对10个塑料桶进行编号，防止混乱，然后向所有桶中加入100L当天取的湖水，实验采用浮床载体栽培方式，将植株种植于孔中，使植物根部完全浸没于水中，每个载体种植4株植物，整个系统漂浮于水面上，设置一个空白的塑料桶作为对照。所有试验桶都放置在实验室外有自然光照的地方，避免雨水的污染。

试验周期为两个月，从2011年6月20日开始至2011年8月19日结束，此段时间为当地的夏季，水温在23.7℃-33.1℃之间。

每10d测定一次植物的高度以及植物的根系长度，每10d测定一次实验用水的理化指标（TN、NH₃-N、COD、TP），每次测定试验取样200mL，试验过程中要用蒸馏水来补充叶面蒸腾蒸发掉的水分，保持试验环境的水样体积恒定，并且要时常搅动使试验的水样均匀混合。

3.2 试验水样的水质分析

本实验用水来自汤逊湖湖水，经过水箱采集送至实验室，其水质分析如表 3.1。

表 3.1 实验用水水质分析

Table 3.1 Experimental water quality analysis

水质项目	浓度（mg/l）
TN	20
TP	1.5
PH	8.41
COD	75
NH ₃ -N	5.34
浊度	23.7

3.3 植物的生长状况

在植物生长过程中，并不是所有的植物都能在污染水样中正常生长，部分植物在生长过程中植株长高、叶片增大，根系生长良好，有较多的侧根生成，例如马蹄莲、春芋；而有的植物已经出现叶面枯萎，根茎腐烂的情况，例如粉掌、滴水莲等。

由于在试验中后期，即7月底至8月初，美人蕉、粉掌、水葱、菖蒲和滴水莲叶片变黄萎缩，有的茎叶开始脱落，植物的根系已经枯萎，水中出现了较多的浑浊固体，结果表明这五种植物难以适应试验的环境，因此在后面的试验中弃用这五种植物，主要测定马蹄莲、再力花、春芋和水葫芦这四种植物处理下的水质状况。

3.3.1 植株高度的变化

试验开始后，测出每种植物的株高并记录下来，每隔10天测一次，一直记录到试验结束为止，各种植物的株高变化见表3.2。

表 3.2 植物株高变化
Table 3.2 Plants height change

日期	水葱 株高 (cm)	美人蕉 株高 (cm)	滴水莲 株高 (cm)	粉掌 株高 (cm)	菖蒲 株高 (cm)	春芋 株高 (cm)	马蹄莲 株高 (cm)	再力花 株高 (cm)	水葫芦 株高 (cm)
6.30	16	16	15	15	17	22	18	17	15
7.10	17	18	16	18	19	25	21	21	20
7.20	17.9	20	18	20	22	37	35	31	36
7.30	死亡	21	20	死亡	23	41	39	35	41
8.9	死亡	死亡	死亡	死亡	死亡	59	51	48	51
8.19	死亡	死亡	死亡	死亡	死亡	62	59	51	57

从表 3.2 可以看出，美人蕉，滴水莲，水葱，粉掌，菖蒲在刚开始驯养时能较好的生存，但从 7 月 30 日之后，这些植物叶面开始枯萎甚至脱落，根茎开始腐烂，7 月中旬室外温度最高达到 38 摄氏度，可见这些植物并不适高温生长，进而相继出现死亡现象。

春芋，马蹄莲，再力花，水葫芦生长良好，从 7 月 10 下旬到 8 月上旬植物均处于快速生长的阶段，表现为植株有新叶生成，株高明显增加，其中以马蹄莲生长最为迅速，有 3-4 棵分茎长成，叶面宽大并呈现墨绿色。

通过种植试验植物可以看出，各种植物都有它们的生长规律，并不是所有的植物都能适应所有的环境而生长，因此在后续的试验探索中，要根据不同的试验条件而选择不同的植物来试验，不能一味的根据主观意识来选择植物种植。

3.3.2 植株根长的变化

表 3.3 植物根长变化

Table 3.3 Changes in the plant root length

	水葱	美人蕉	滴水莲	粉掌	菖蒲	春芋	马蹄莲	再力花	水葫芦
初始值 (cm)	9	7.5	8.3	6.2	8.6	22	13	8.9	15
最终值 (cm)	死亡	死亡	死亡	死亡	死亡	49	40	39	40

从表 3.3 可以看出, 春芋, 马蹄莲, 再力花, 水葫芦根系长度都比实验前有明显的增加, 平均生长速率达到 45%, 其中马蹄莲、水葫芦和春芋的根系较为茂盛, 出现了很多新根, 表面的根毛也较多, 这也体现了水生植物的优势性。植物根系对污染物质的吸收及吸附作用是植物浮床技术去污能力的重要途径, 植物的根系表面与根茎形成了根孔, 而根孔为污染物的吸附提供了一个良好转化界面, 这个界面称为“多介质界面”, 界面上的微生物活性可以加速污染物的去除与转化^[48]。庞大的根系表面也为微生物提供了良好的栖息场地, 只有植物根系增多, 微生物的种类和数量也会相应的增多, 因此可以提高对污染水质的去除能力。四种植物根系如图 3.1 所示。



图3.1 植物根长示意图

- (a) water hyacinth roots (b) calla lily roots
(c) Re-power of flowers roots (d) spring taro root

Fig.3.1 Plant root length schematic

3.4 水处理能力效果

3.4.1 对COD的处理效果

四种植物对污染湖水中COD的去除效果如图3.2所示。

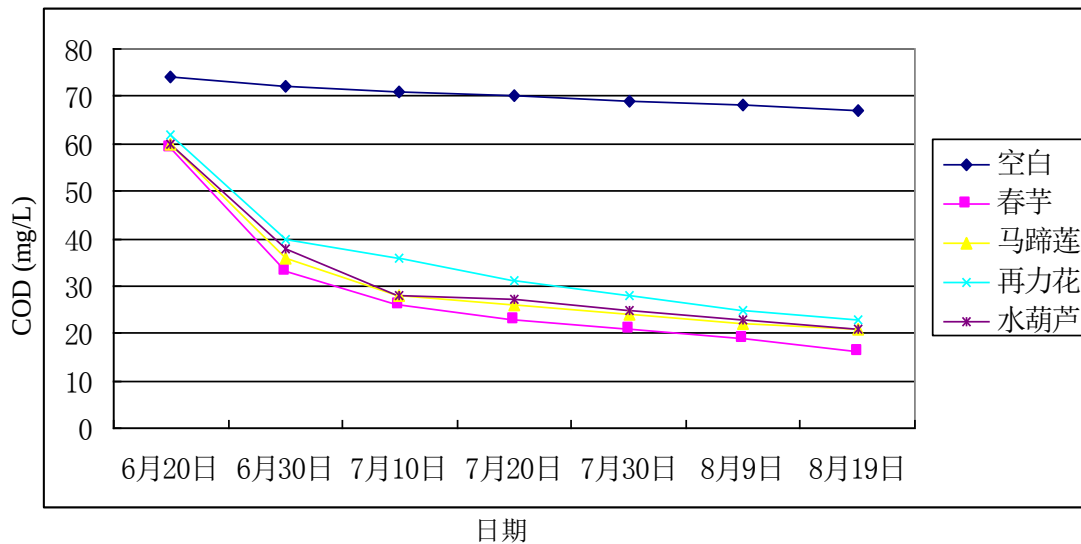


图3.2 各植物处理水中COD效果

Fig.3.2 Plant processing of COD effect

从图3.2可知，植物在6月20日至7月10日这20d内，各植物处理的水中COD浓度急剧下降，去除率最高达到了58.3%，分析原因可能是由于本试验是在静态条件下进行的，水中的一些固体物质由自身重力作用产生沉淀，测试水体中一部分的悬浮有机污染物质由于受到沉降作用而沉落到底部，这样的作用导致了水中的COD含量在试验初期就呈现下降的趋势。而污染水中COD的去除，是微生物和植物共同的作用结果：一方面有微生物对水中有机营养物质的分解、矿化作用；另外植物也可以借助根部的吸附和吸收作用达到去除水体中COD含量的目的。由此可见，植物的生长情况影响着水体中COD的去除效率。试验水体经过20d的植物培育吸收后，水中的透明度显著增加，水底清晰可见。

3.4.2 对TN的处理效果

四种植物对污染湖水中TN的去除效果如图3.3所示。

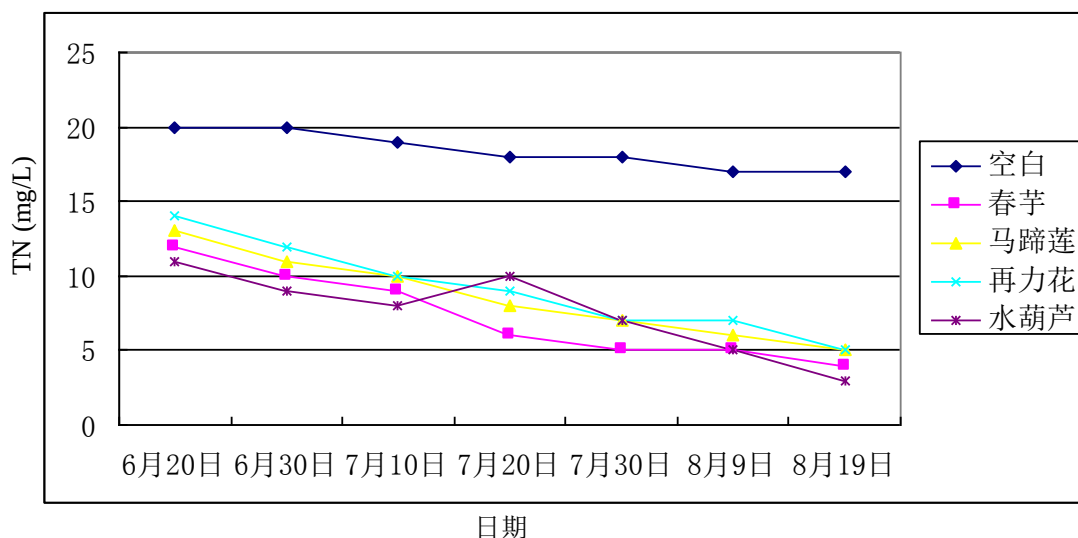


图3.3 各植物处理水中TN效果

Fig.3.3 Plant processing of TN effect

从图3.3可以看出，四种植物对水体中TN的去除效果都要高于空白处理，去除率总体上呈现下降的趋势。从六月下旬起，水中TN的浓度大幅度下降，去除效果良好。可能是由于试验中水质的更换，试验植物对生长环境里的水质从刚开始的低浓度到试验时的高浓度有一个适应的阶段，在6月20日至7月10日，水葫芦、春芋和马蹄莲的TN去除率分别达到了42%、41.8%和40.9%，具有较高的氮去除能力，由于它们生长能力强和生物需求量大，因此这三种植物在生长过程中对氮的需求量高，氮含量得以去除。

再力花在六月下旬开始长叶和开花，随着花朵慢慢的凋谢，再力花对氮元素的需求开始降低。试验过程中，在7月10日至7月20日监测数据中，水葫芦生长的系统中，氮浓度急剧上升。

分析其中的原因可知，在7月中旬出现夏季高温，而高温导致水葫芦的叶片发焉、发黄，最后脱落到试验的水中，由于掉落的叶片在水中腐烂释放营养物质，引发了试验用水的二次污染，从而造成水中氮浓度的升高。这种情况提醒了我们，要及时清理桶中掉落的枯叶，经过对落叶的打捞，水葫芦系统处内的TN含量又呈现了逐渐降低的变化。由此可见，在实际生产应用中，要观察浮床内植物的生长情况，对成熟植物要及时从浮床中移除，在试验过程中要及时打捞落叶，避免发生水体的二次污染，这也体现了植物浮床系统的简单性和便易性。

在这次的试验记录中，要特别小心记录试验数据，因为TN含量是高低起伏变化的，所以要特别仔细记录。

3.4.3 对TP的处理效果

四种植物对污染湖水中TP的去除效果如图3.4所示。

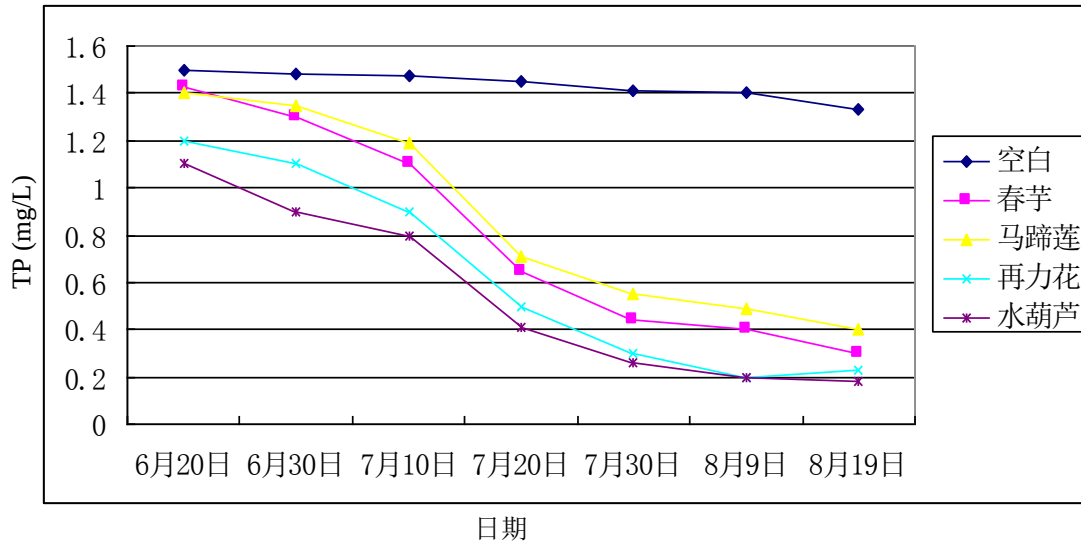


图3.4 各植物处理水中TP效果

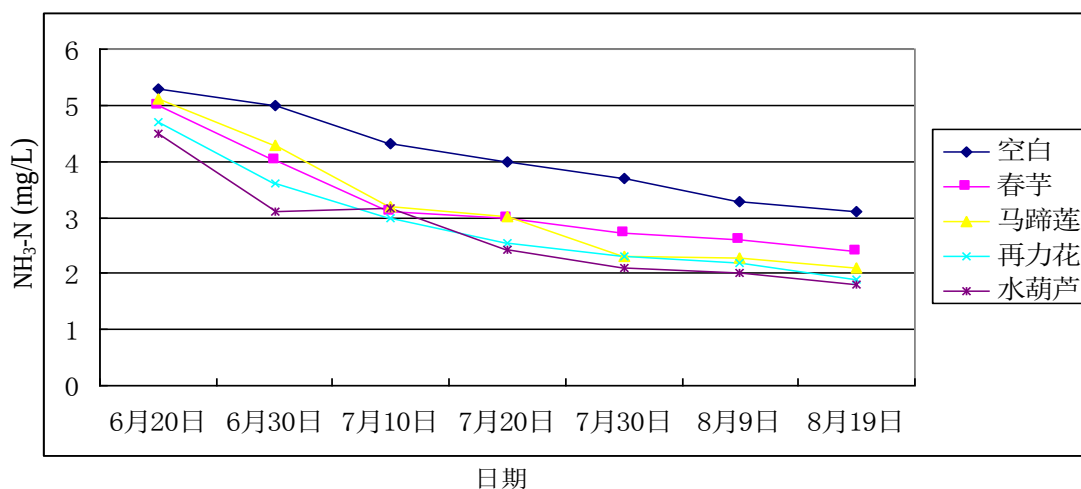
Fig.3.4 Plant processing of TP effect

由图3.4可知，各植物处理水中的TP总体呈下降趋势，除了马蹄莲以外，其他植物水中TP的去除率高，但是，空白对照组的处理效果不好。水葫芦对TP去除率达到了80.8%，去除率最高；春芋处理次之，去除率为80.0%，马蹄莲也有一定的去除效果，去除率达到了70%。

但在试验中，由于枯叶掉落等原因造成水体的二次污染中氮磷的含量、释放的规律及造成的影响，在后续试验有待进一步的研究。

3.4.4 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理效果

四种植物对污染湖水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果如图3.5所示。

图3.5 各植物处理水中NH₃-N效果Fig.3.5 Plant processing of NH₃-N effect

从图3.5中可知,除水葫芦外,各植物处理水中NH₃-N的含量变化规律,是在开始20d内飞快减少,然后降低的速率减慢,最终各植物处理的NH₃-N浓度差异不是很大。水葫芦实验组处理的NH₃-N浓度,在6月30日时降低到3.09mg/L,去除率达到了41.4%,在四种植物实验组中处理效果最好。

与TN的去除规律相同,在7月20日记录的数据中显示,除了再力花和春芋试验组外,另外2组植物试验组处理的NH₃-N浓度要略高于之前测得的数据,总结之前TN的去除规律,可能是由于高温植物的落叶引发了水中NH₃-N含量的升高,而马蹄莲的落叶对水中NH₃-N含量影响不太大,相反的水葫芦的落叶引起了水中NH₃-N浓度较波动的变化,使试验测得的水中NH₃-N含量增加。高温引发了水中NH₃-N以NH₃的形态挥发,继而NH₃-N含量降低,造成了空白对照组在7月下旬NH₃-N含量降低,与植物无关。

3.5 试验结果与分析

外界温度的高低、CO₂含量的多少、营养物质浓度的大小、水中pH值的高低,这些因素都有可能引起水中NH₃-N含量的变化。其中外界温度的高低影响了植物的生长,也影响了水中微生物的生长活性,当温度适合植物生长发育时,植物的生长速度与温度成正比,对水体中氮磷元素的去除效果也相应的提高。

3.5.1 影响水体中氮元素的去除因素

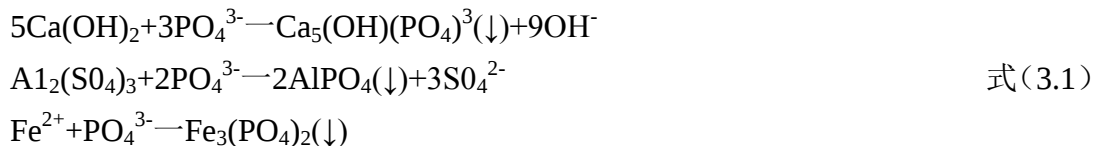
氮是构成植物生长发育的必须元素。植物根系从水中吸收的主要是NO₃⁻-N和NH₄⁺-N以及NO₂-N。植物也能少量的吸收氨基酸和尿素等。植物的根部和叶部将吸收的NO₃⁻还原为NH₄⁺,氮元素参与到植物的氢代谢过程来。植物生长所需要的酰胺和氨基酸,一般

是由植物吸收的部分 NH_4^+ 和部分被还原的 NH_4^+ 合成而来，酰胺经过氨基的转移作用，形成了多种氨基酸，供给植物生长发育所用，其中氨基酸也可以合成蛋白质、生物催化酶和核酸等。氮还是叶绿体的重要组成部分，供给植物进行光合作用。

水中的氮磷污染物质并不是靠植物消除掉，它们只是换了种形式存在于植物的体内，因此只有当植物从浮床系统中去除时，水中的氮磷元素才是真正意义上的去除。植物生长量大，根系发达，吸收的氮磷含量也就越多。但是植物的吸收作用只能去除氮总量的小部分，剩余的大部分氮元素是通过微生物的硝化和反硝化的作用去除的^[49]。硝化作用只是改变了水中氮元素的存在类型，微生物的反硝化作用才能去除氮元素。反硝化作用的强弱与外界温度有正比的关系^[50]。

3.5.2 影响水中磷元素去除的因素

研究表明，TP的去除是微生物、植物和周围环境的综合作用的结果^[51]：一方面，不管在有没有氧气的情况下，微生物都能将靠转化有机磷化合物为无机磷化合物这一过程，来吸收足够多的磷元素从而满足自身的生长和繁殖的需要，这样也就降低了水中的磷的含量；另一方面， PO_4^{3-} 可以和水中的铁、铝、铅等离子形成不溶性的盐最后沉淀下来，这是自然界去除磷的主要原因^[52, 53]，但是反应十分缓慢。另外，植物的根系也能直接吸收和利用一部分的磷元素，当水体环境的PH在5-7时，植物的根系可以吸收正磷酸盐的两种形态(H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-})存在的物质，以这2种形态参与植物体内的代谢循环过程。最后也是经过植物成熟后收割将富集在植物体内的磷带出系统，完成水体中TP的去除。



3.6 本章小结

(1) 春芋、再力花、马蹄莲和水葫芦在污水中生长良好，表明这四种植物均适合在富营养化水中生长；美人蕉、水葱、粉掌、滴水莲和菖蒲在试验水中生长不济，根系腐烂，叶面枯萎，因而弃用这五种植物。

(2) 在春芋、再力花、马蹄莲和水葫芦这四种植物试验组中，水中的DO上升，pH下降，悬浮物减少，透明度增加。

从水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量的去除变化可知：四种植物试验组对水中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 有一定的去除能力，其去除能力依次为水葫芦>再力花>马蹄莲>春芋，四种植物处理都较好。

从水体中TP含量的去除变化可知：四种植物试验组对水中的TP有较好的去除能力，其去除能力依次为水葫芦>再力花>春芋>马蹄莲，四种植物间处理差距不大。

从水体中TN含量的去除变化可知：四种植物的处理对水体TN有显著的净化效果，其净化效果水葫芦和春芋较为显著，两者差异不明显。

从水体中COD含量的去除变化可知：所有植物处理对水体COD的去除率都很高，其中春芋和马蹄莲处理能力最强，其他两种植物试验组间处理差距不大。

总结上述处理水能力可知：水葫芦试验组净化能力最强，再力花试验组和春芋试验组具有较好的净化能力，而马蹄莲试验组处理能力比其他三组略低。

(3) 根据四种植物试验组的净化能力差异，及实验开始至试验结束时植物生物量的变化情况可知：植物对水的净化能力高低与植物量多少、植物的生长速度有关。因而应尽量选择生长较快的、根系发达的植物作为试验的植物品种。

(4) 根据60d的试验周期记录的数据，通过水中污染物去除的效果比较可知：浮床植物的生长状况与其处理氮磷的能力有密切的关系，植物在最初生长的阶段对营养物质需求较多，故水中TN、TP的去除效果较强，当植物成熟时，对水中的TN和TP的去除效果开始减弱，水葫芦试验组、再力花试验组和春芋试验组表现比较明显。由试验结果可知，四种浮床植物对水中TP去除率大于TN的去除率，可能由于吸收的磷元素的含量要高于氮元素。

(5) 结合植物净化水质各方面的综合评价，可以发现：水葫芦>再力花>春芋>马蹄莲，为浮床应用在生产实践的植物筛选提供了参考。水葫芦的最优势在于首先它能吸收水中氮磷等营养物质，去污能力强，易栽种，适合生长在各种污水中；春芋和马蹄莲的花期长，又能作为美化环境的观赏性植物，且生长迅速，根系发达，处理污水能力也较强。

但是要注意的是，水葫芦植物在处理污水时，它生长十分迅速，且喜欢大面积的繁殖，容易挡住阳光，使一些沉水植物得不到足够的光照导致死亡，这也破坏了环境的食物链系统，结果会导致部分水生动物植物的死亡。因此在实际生产运用过程中，要注意控制水葫芦的生长，时刻注意生长发展状况，必要时要进行打捞阻止。

4 有效植物去污性能试验

总的来说,植物浮床的去污能力与污水的组成和浓度、植物的生长状况以及试验因素有关。即便采用的是同一种植物,也会因为试验时所取的用水量不同,或者用水量相同而试验植物种类不同,或者试验植物种类相同而污水成份不同,都会有不同的结果。因此,本章在试验时间长短相同、浮床植物量相同的条件下,通过静态试验研究了以下内容:酸性条件下有效浮床植物的净化效果;特优复合植物的净化效果。

4.1 酸性条件下植物去污性能试验

4.1.1 试验目的

之前在植物浮床技术方面的研究大部分是在酸碱值不固定的条件下进行的,如何在特定的碱性、酸性环境下筛选出优良的植物品种、如何提高植物的去污效率,如何丰富酸性环境下植物的去污能力的研究,这些都是本章的试验目的。

经过第三章植物筛选实验,可以得知植物在碱性条件下处理污水能力,故利用人工静态模拟自然条件的方法,由植物筛选出来的四种有效植物,在低温季节,调节 PH 值,使植物处在酸性环境下生长,通过对污染湖水的水体进行去污试验的记录,比较分析酸性条件下四种浮床植物对 N、P 的吸收率、对 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率,为植物浮床在酸性环境下对污染水体的去除效果提供了理论支持。

4.1.2 试验材料和方法

(1) 试验选取的植物

试验选取的植物是由植物筛选实验筛选出来的四种植物,分别为:水葫芦、春芋、再力花、马蹄莲。经过植物筛选实验可以得知,春芋、再力花、马蹄莲和水葫芦在污水中生长迅速,能有效的处理水中的 N、P 和富营养物质,可以在很大程度上净化水质。

(2) 试验的方法

试验周期为两个月,从2011年10月3日开始至2011年12月2日结束,这段时间为当地的秋冬季,水温在 17.5°C - 21.1°C 。

试验开始时,放置5个试验圆桶,并清洗自然晾干,为了防止混乱,对5个塑料桶进行编号,然后向所有桶中加入100L当天取的湖水,每个载体种植4株植物,设置一个空白的塑料桶作为对照。所有试验桶都放置在实验室外有自然光照的地方,避免雨水的污染。

每10d测定一次试验用水的理化指标(TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、TP),每次测定试验取样

200mL，试验过程中要用蒸馏水来补充叶面蒸腾蒸发掉的水分，保持试验环境的水样体积恒定，并且要时常搅动使试验的水样均匀混合。

调节试验用水的pH为6.33，每10d测定并记录。

4.1.3 植物的生长状况

试验初期四种植物在酸性水样中生长良好，叶片呈现墨绿色，然而 10d 后再力花和水葫芦生长变缓慢，有部分叶片开始变黄甚至枯萎，而春芋和马蹄莲的叶片一直保持着绿色且新叶片数量增多，分枝也增多，叶片宽阔、肥厚。说明酸性条件对再力花和水葫芦的生长具有抑制作用，反而对春芋和马蹄莲的生长有促进作用。

4.1.4 水质净化效果

(1) 四种植物对 TN 处理效果如图 4.1。

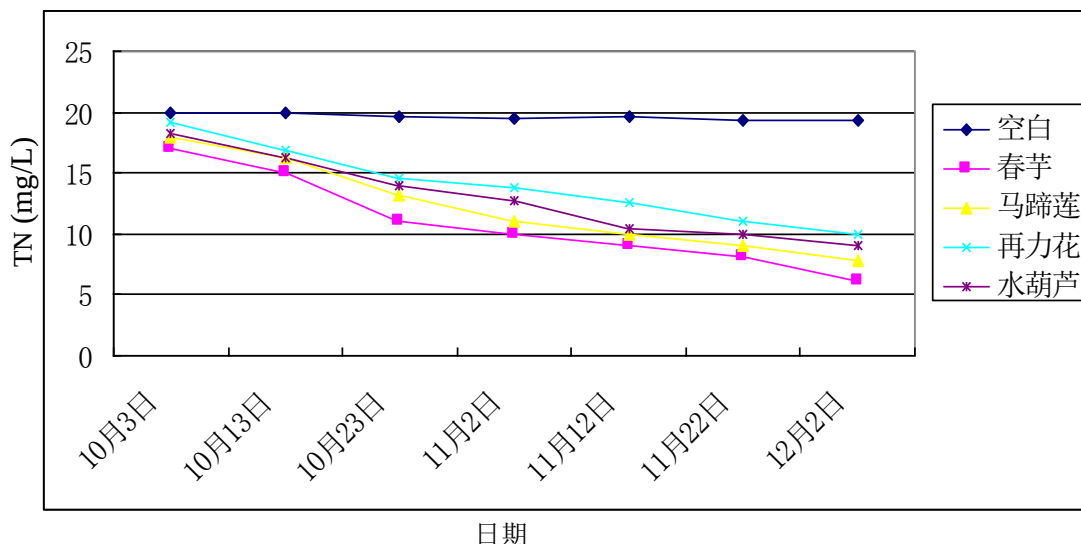


图4.1 各植物处理水中TN效果

Fig.4.1 Plant processing of TN effect

由图 4.1 可知，春芋去除效果在四种植物中最好，马蹄莲的 TN 去除效果其次，再力花和水葫芦处理效果差别不大，分析原因主要有以下几点：

① 春芋和马蹄莲植株在酸性环境中生长良好，植物生长越好，对水体中氮的需求量就要高，就会吸收越多的氮元素，因此水中 TN 的去除率就越高；

② 经过观测可以看出，春芋在酸性环境下生长最好，因此它的根系也最发达，根长超过了 40cm，侧根增多，植物的根系既能向水中泌氧，又能为微生物提供栖息环境。更多的硝化和反硝化细菌在植物根部所形成的好氧及厌氧的环境中进行硝化和反硝化作用，达到了去除氮元素的目的。

③ 水体中微生物的硝化、反硝化途径是去除氮元素的重要途径^[50]，植物生长的越好，侧根越多，根系越发达，微生物的生长繁殖也就越好，有利于降低 TN 含量。

(2) 四种植物对 TP 处理效果如图 4.2。

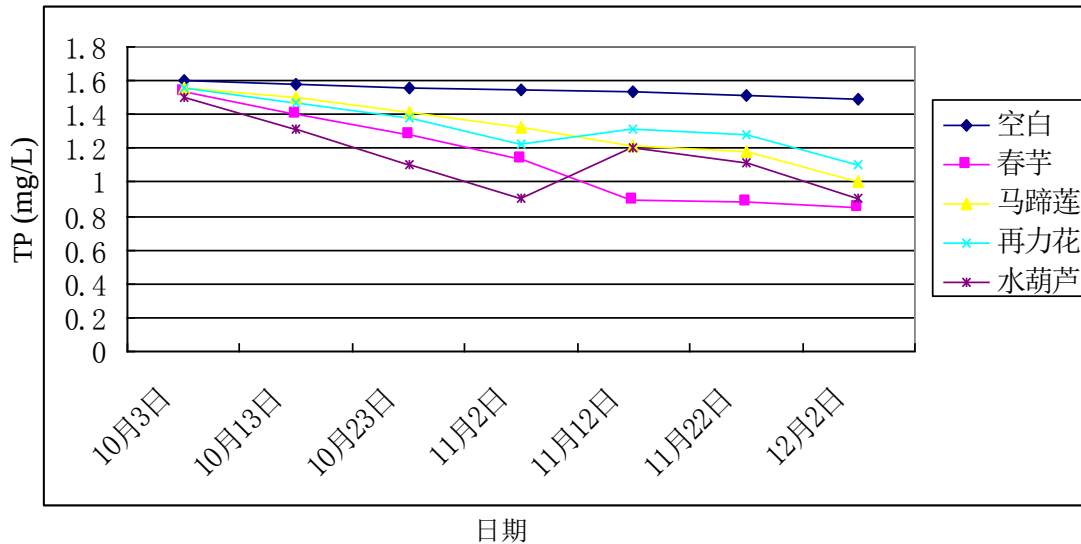


图4.2 各植物处理水中TP效果

Fig.4.2 Plant processing of TP effect

从图 4.2 可以看出，再力花对磷的去除效果较差，去除率仅为 26.7%，马蹄莲对磷的去除效果较再力花好，春芋的磷去除效果最好，去除率达到了 41.2%。分析影响磷去除率的原因如下：

① 植物在其生长发育的过程中会直接吸收水中的磷酸盐物质，用以自身的利用吸收。如果植物生长需求大，体内含磷量高，从水中吸收利用的磷就越多，对污染物的去除最有利，这种含磷植物也就最适合去除水中 TP 的含量。

② 从图中可以看到，11 月 2 日以后监测的数据表明，再力花和水葫芦处理 TP 的浓度都有所降低，原因可能是由于此时进入冬季，温度降低，影响了再力花和水葫芦的生长，进而影响了对水中 TP 的去除；而马蹄莲和春芋并未出现这种情况，也体现了观赏植物的一个抗寒优越性。

在这次的试验中，应注意水体的 TP 的变化，而水葫芦由于什么原因导致在 11 月 2 日后面突然升高，在后续的研究中应该做出深入的了解。

(3) 四种植物对 COD 去除效果如图 4.3。

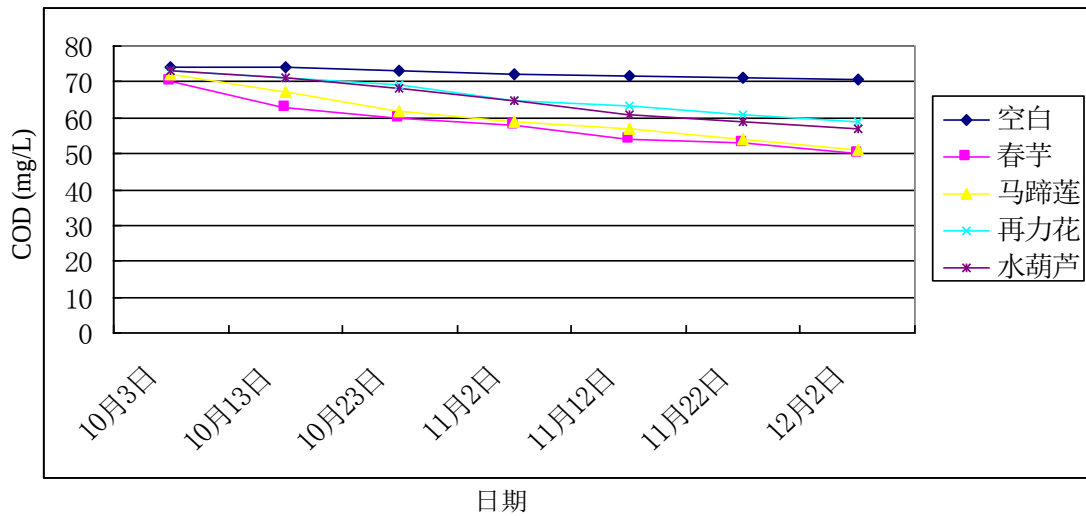


图4.3 各植物处理水中COD效果

Fig.4.3 Plant processing of COD effect

从图 4.3 可以看出，酸性环境下，各植物对 COD 的去除效果较碱性环境略差，再力花和水葫芦对 COD 的去除效果较差，去除率仅为 18.3%和 21.1%，这可能与植物的生长状况有关系；马蹄莲和春芋的去除效果稍强，但去除率也只达到了 28.2%和 28.6%。可能是由于酸性环境不适合微生物的生长，植物根系表面的生物膜遭到了破坏，降低了酶的活性，继而降低了对水中有机物质的去除效率，故去除率比碱性环境的去除率要低。

(4) 四种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理效果如图4.4。

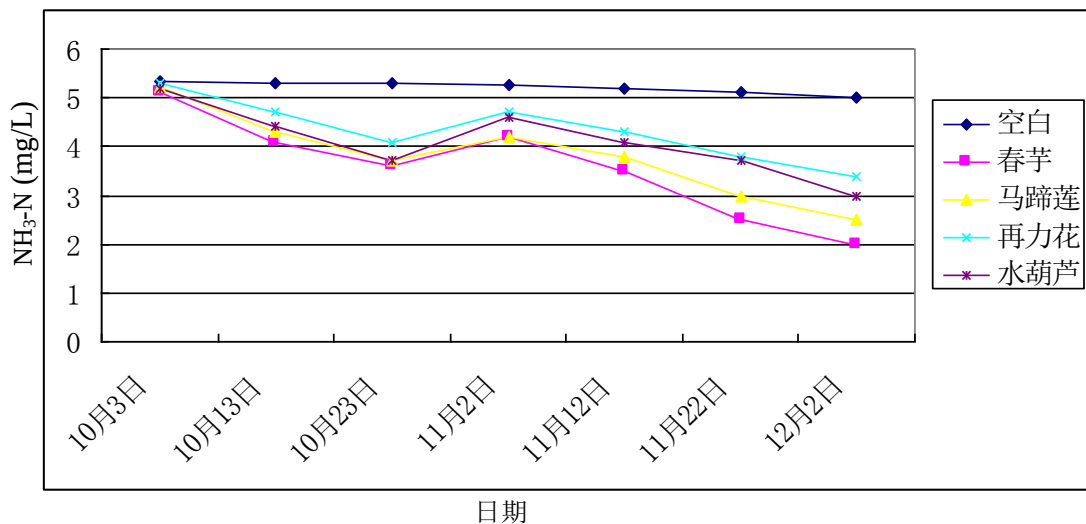


图4.4 各植物处理水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 效果

Fig.4.4 Plant processing of $\text{NH}_3\text{-N}$ effect

从图 4.4 可以看出从十月三日起到十月二十三日这段时间中, 水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量急剧的下降, 春芋试验组处理 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的效果最好, 去除率达到了 62.0%, 但在第二个周期后检测的数据发现, 四种植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理能力都有所下降, $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量反而升高, 分析原因可能如下:

(1) 春芋在酸性环境中生长最好, 因此春芋对水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果也就最好。

(2) 由于植物根部会向周围环境分泌出氧, 分泌出的氧会参与到 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的硝化过程中去, 因此植物在水体中的生长情况直接影响到水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸收和分解, 植物发达的根系会有较好的充氧效果越好, 因此春芋的去除率最高。

(3) 在 11 月份以后温度逐渐降低, 再力花和水葫芦植物大量掉叶落入水中, 引起了较大的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化, 只是春芋和马蹄莲掉落的叶子少并对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响不大, 因而它们有一定的反弹, 但可见影响并不是很大, TN 的浓度反而并没有因此而增加。

4.2 特优复合试验的研究

4.2.1 试验目的

在实际生产应用中, 单个植物的浮床已经不能满足实际生产中污水处理能力的需求, 如何利用不同植物的各自的优势来提升植物浮床整体的作用效果, 如何筛选出高效并且相互促进的植物构建浮床处理系统, 需要进一步的探索和实验。

4.2.2 试验材料和方法

(1) 供试植物

试验所使用的植物是由上述实验筛选出来的两种植物, 分别为: 水葫芦和春芋。经过上述实验可以得知, 春芋和水葫芦分别在酸碱性环境中生长迅速, 水处理能力较强, 其中春芋在酸性环境下处理效果最好, 水葫芦综合处理能力较好, 故选择这两种植物进行复合实验的研究。

(2) 实验方法

试验周期为 60d, 为确保时间上面的统一性, 故试验时间从 2011 年 11 月 14 日开始到 2012 年 1 月 13 日结束, 这段时间为冬季, 水温在 5.5°C - 9.2°C 。

试验开始时, 取 2 个试验桶, 清洗晾干、编号; 向桶中分别加入 100L 新鲜 (当天取) 湖水, 每个载体种植两种植物各 2 株, 设一个不栽种任何植物的桶作为对照。

每 10d 测定一次实验用水的理化指标 (TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD、TP), 每次测定试验取样 200mL, 试验过程中要用试验蒸馏水补充试验桶内因叶面蒸腾作用而蒸发出的水分, 确保试验桶中总体积的恒定, 减少试验的误差。

供测水样为汤逊湖湖水, 水质指标为 COD=84mg/L、浊度=11.8、PH=7.81、

$\text{NH}_3\text{-N}=6.89\text{ mg/L}$ 、水温为 15°C 。

4.2.3 水质净化效果

(1) 复合植物对 TN 去除效果如图 4.5。

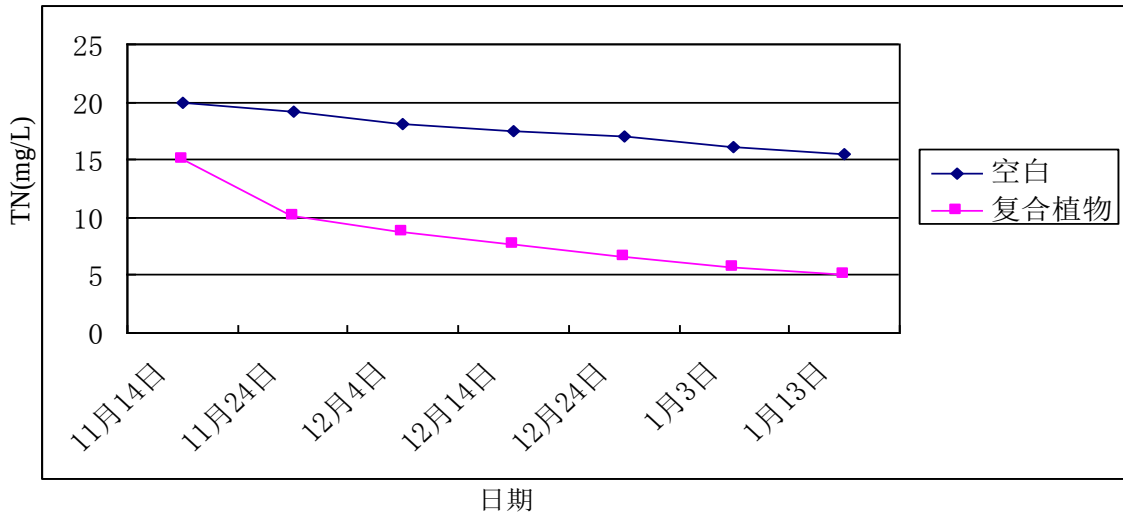


图4.5 复合植物处理水中TN效果

Fig.4.5 Plant processing of TN effect

由图 4.5 可知，试验进水 TN 浓度为 20mg/L 。复合植物处理 TN 较单一种类植物有明显的提高。在实验开始后的一个周期内，TN 的含量急剧减少，春芋和水葫芦一起培育时，两种植物生长均良好，对水体中 TN 的吸收量比单一植物处理时要多，对 TN 的去除率达到了 66.1%，随着试验的进行，TN 的含量也在不断的减少。

(2) 复合植物对 TP 去除效果如图 4.6。

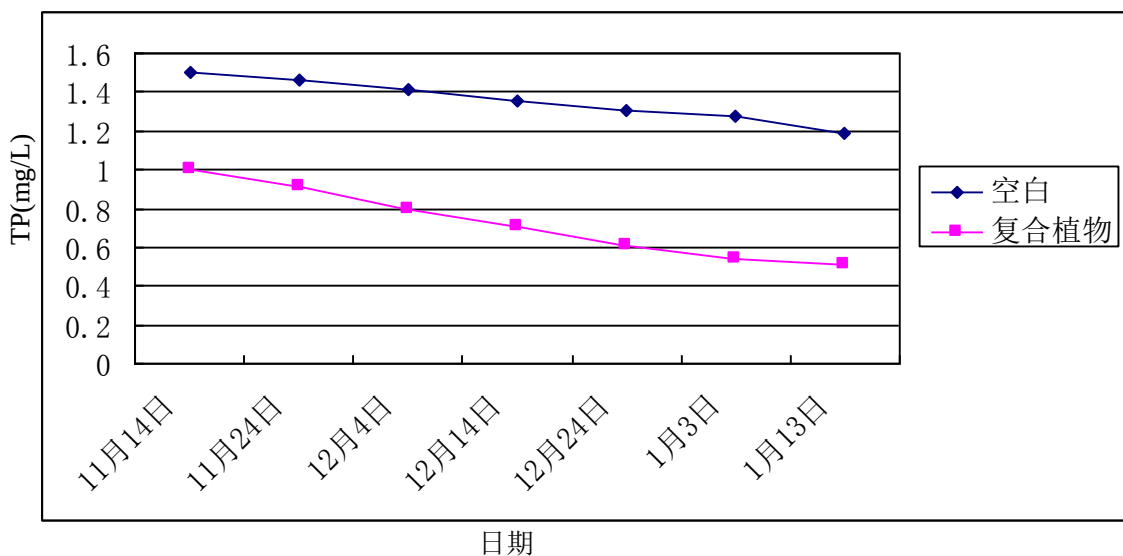


图4.6 复合植物处理水中TP效果

Fig.4.6 Plant processing of TP effect

试验进水 TP 的浓度为 1.5mg/L。从图 4.6 可以看出，复合植物对磷的去除效果比单一植物处理效果要好，TP 的去除率达到了 50.5%，实验测定水中 TP 的含量也在逐渐的降低。

(3) 复合植物对 COD 去除效果如图 4.7。

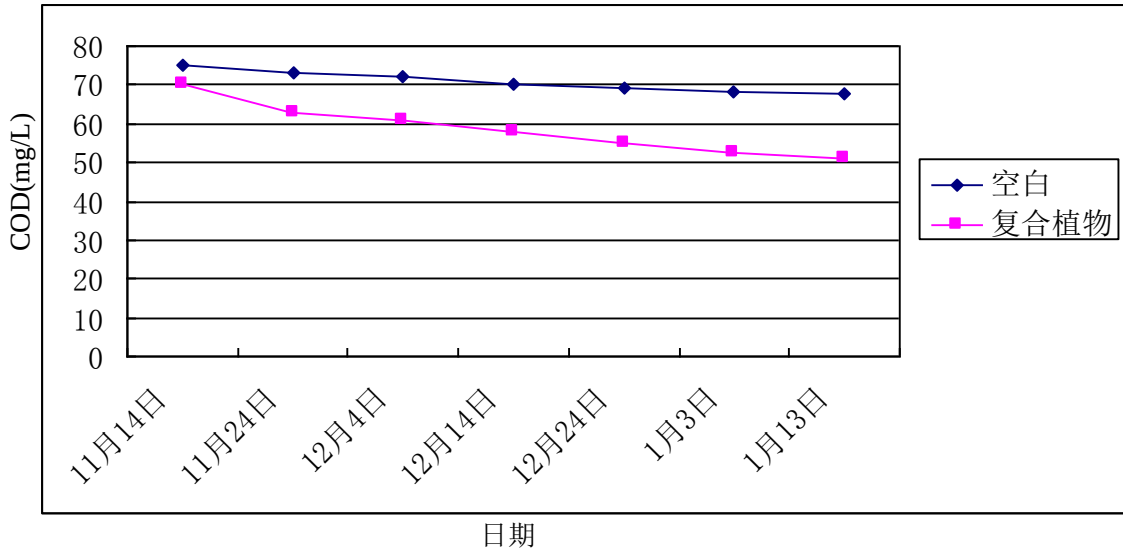


图4.7 复合植物处理水中COD效果

Fig.4.7 Plant processing of COD effect

试验进水 COD 的浓度为 75mg/L。从图 4.7 可以看出，复合植物对 COD 的去除效果较单一植物好，去除率达到了 28.8%，这与复合植物的根系生长情况有关，两种植物的根系表面都附着的有生物膜，不同生物膜上含有不同种类的细菌，增强了酶的活性，加速了水体中有机污染物的去除速率，得到了更好的处理效果。

(4) 复合植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的处理效果如图4.8。

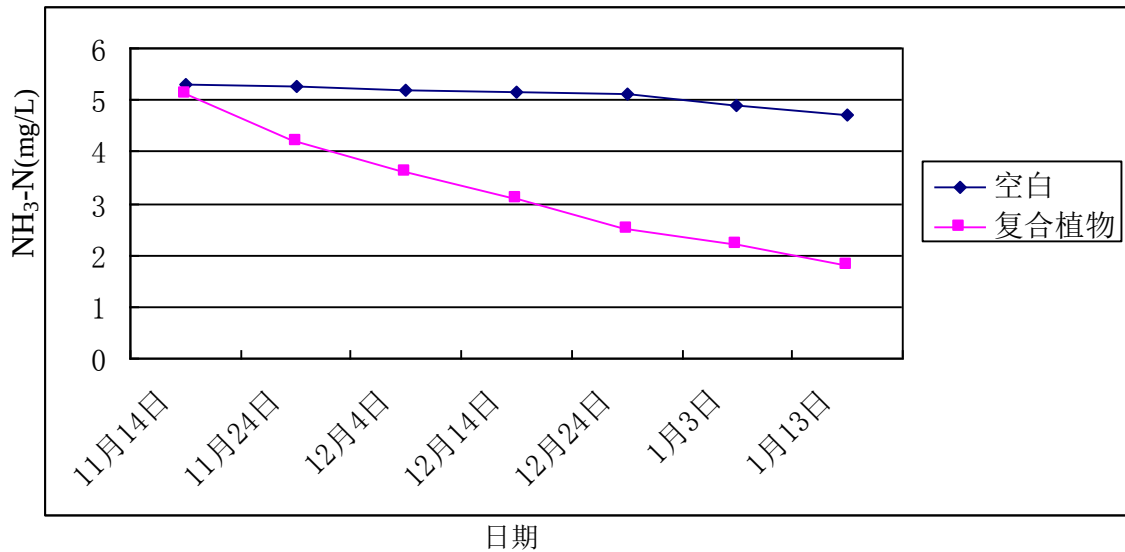


图4.8 复合植物处理水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 效果

Fig.4.8 Plant processing of $\text{NH}_3\text{-N}$ effect

试验进水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度为 5.4mg/L 。从图 4.8 可以看出，复合植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果较好， $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率达到了 64.7%，分析原因可能如下：复合植物生长情况较好，硝化细菌和反硝化细菌数量较单一一种类植物生长多，对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸收也较单一植物多，故植物对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸收作用较单一一种类植物作用强。

4.3 试验结果与分析

从相关研究报告得知，水体中 pH 的变化主要受浮床植物和微生物共同的影响。最主要是受到硝化和反硝化细菌作用的影响，微生物代谢过程的影响和氮磷被植物吸收过程的影响。

在酸性环境下，四种植物试验组处理下水体的 pH 呈现升高的趋势，表明了浮床植物的处理过程中，也促进了水的 pH 值的升高，最终水体中的 pH 值达到了 8.16。

而观测复合植物生长状况时则发现，水体中的 pH 反而随着时间增长而慢慢降低，总结原因如下：

- (1) 微生物的代谢活动分泌一些酸性物质，使水体 pH 值降低。
- (2) 植物的呼吸作用产生二氧化碳，而二氧化碳的积累促使 pH 下降。

由于植物细胞对吸收离子的需求不同，会选择性的吸收水中各种盐水解的阴离子和阳离子，吸收剩余的离子会直接影响水中 pH 的变化。若是植物吸收的阳离子的量高于这种盐的其他成分，水中的 pH 值会降低，这些盐比如是 KCl 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 K_2SO_4 、 NH_4Cl 等。同理，若是植物吸收的阴离子的量高于其他，水中的 pH 值会升高，这些盐比如是 NaNO_3 和 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 等。

植物的根系分泌出的 H^+ 和 OH^- 的含量也直接影响到阴阳离子被选择性的吸收。当阴离子被大量的吸收时,植物的根系也会分泌出大量的 OH^- 来补偿电位的损失;而同样的,当阳离子被大量的吸收时,植物的根系会分泌出大量的 H^+ 来补偿电位的损失^[54]。

由此可见,植物与其生活的微生物的协同作用使得水体 pH 处于相对平衡的状态。

植物的形态、生物量及其生理变化等均受外界气温的影响。由于第二部分的试验是在冬季完成的,可以发现,低温抑制了植物的生长,植物生长没有夏季生长迅速,进而影响了水体中氮的去除,即便是复合植物去污试验中, TN 的去除率也仅达到 66.1%,可见,温度直接影响了植物的去污能力,如何寻找适合的低温耐酸的植物并充分发挥其最大去污能力,在后续的研究中,做更深入的调查和试验。

4.4 本章小结

经过对 TN、TP、COD 和 NH_3-N 变化记录分析可以得出,尽管在酸性环境中,选取的四种植物对污水都有一定的去污能力,但相比较与夏季试验处理的结果,还是有一定的不尽人意。分析其中的原因一方面可能由于植物生长的酸性环境不适合植物对污染物质的去除,另一方面也可能由于试验是在冬季低温的条件下进行的,温度的降低也直接抑制了植物对污染物的吸收作用,因此在以后的试验研究中,如何控制污水的酸碱度,如何在低温条件下筛选出最具有优势的植物种类,都将作为没有解决的问题,而做进一步的探索。

本试验对水葫芦和春芋两种植物构建的复合浮床对水体的治理进行了试验分析,试验结果表明复合植物一起培养时,生长旺盛,茎叶粗壮,生长速率比单一培养时要高的多,说明了混合种植水葫芦和春芋对双方都有促进的作用,培育刚开始时水葫芦的生长较快,由于水葫芦最先达到了成熟期故在生长一段时间后,春芋生长速率加快,而且并没有表现出两种植物的抑制现象。

研究水葫芦和春芋复合植物生长有着重要的研究意义,水葫芦作为高效的去污植物,对水体中的各种污染物都具有一定的效果,而春芋一般被大家作为观赏性的植物,对水体去污性能有较少的研究,但通过试验可以发现,春芋适合生长在酸性环境中,也有一定的去污能力。集合水葫芦和春芋各自的优势,将这两种植物复合生长,形成了优势显著的植物浮床系统,对两种植物复合甚至更多种植物复合浮床系统的研究提供了理论依据。

复合植物的根系也更为发达,这对水体中污染物的去除创造更好的条件,试验结束后,对植物的根长进行测量,水葫芦和春芋的根平均长度分别达到了 39cm 和 48cm,混合植物根系发达、舒展,且侧根较多,这也体现了混种植物浮床的优势性。

5 浮床构建系统及其实用效果的研究

5.1 浮床构建的依据

由于生态浮床可以作为处理水污染的试验场所,又能作为鸟类及浮游动物的栖息产卵的场所,还能作为自然景观美化环境,因此浮床作为何种用途,在设计刚开始时就应明确使用的目的,依据此浮床的用途,来制定出合适的类型、材质和大小。

浮床设计的原则可以概括为以下四点^[55]:

- (1) 选取的材质要轻,能防老化,耐住水蚀,对水体不造成污染;
- (2) 设计的载体要结合耐用耐击打,抵抗住风浪的袭击;
- (3) 载体上预留的孔,直径不能过大和过小,要满足植物的种植密度;
- (4) 载体彼此间要用柔性物质连接,使浮床能随着波浪的摆动而摆动。

5.2 浮床构建的分类

浮床可以分为干式浮床、湿式浮床和其他类型的浮床。

(1) 干式浮床:植物与水面不接触,在浮床上面栽培大型的景观植物,既美化了环境景观,又为鸟类等动植物提供栖息地,构成了一个物质循环的生态保护地;但干式浮床由于植物不与水面接触,不具备处理污水的作用。干式浮床的载体一般是用混凝土浇灌而成。

(2) 湿式浮床:植物与水面接触,植物根系在水中生长,利用植物与微生物的协同作用,吸收水中的污染物质,达到去除水中污染物的目的,这也是一般试验研究选择的浮床载体的方式^[56]。

湿式浮床又分为有框架式浮床和无框架式浮床。

① 有框架的湿式浮床:一般用纤维强化塑料、不锈钢发泡聚苯乙烯、特殊发泡聚苯乙烯加上特殊合成树脂、盐化乙烯合成树脂、混凝土等材料制作成浮床的框架。据有关数字统计,目前试验研究会首选框架型的湿式人工浮床,它的数量约占湿式浮床总数的7成^[57]。

② 无框架的湿式浮床:载体材料一般会选择椰子纤维。它材质柔和,具有较好的柔软性,抗击抗腐蚀,耐久性较好。

(3) 其它类型的生态浮床:有用竹子或者塑料管组合成简易的浮床,也有的浮床是用废轮胎固定浮床,加以椰子纤维供在上面植物生长。

浮床的边长一般设计为2-3m,这样有利于浮床的搬运和施工。形状大多设计为四边形、三角形或者多边形。在我国由于植物浮床系统大多是在实验室进行的,更多的学者

都选用泡沫板作为浮床载体。首先,泡沫板有利于植物种植时打孔,可以根据植株的种植密度来调节孔的直径大小。其次,泡沫由于其材质柔软,易于用各种材料连接固定,方便简单,在上面种植植物后,漂浮在水体上,实验室简易的浮床系统即为构成。

5.3 本试验的浮床设计选择

结合汤逊湖周围的生态环境以及本研究要达到的预期目标,利用汤逊湖的形态结构、人文及气候的特征,要制定出既能取得良好的植物去除效果又能将人文与自然景观相结合的治理方案,设计出的浮床系统既能满足动植物的生长需要,又能兼具美观、抗洪抗击打的实用效果,建造出具有地方特色的植物浮床处理系统。

首先是对浮床材质的选择。由于现在国内的浮床研究大多局限在实验室或者小范围的池塘的场所,人们多数选择泡沫板作为浮床床体,但在实地的工程中,泡沫板并不能满足湖水及河流的需求。由于存在着浮床床体制作成本高,消费较大的条件限制,并没有一套“一劳永逸”的材料选择方案。

5.3.1 设计浮床的部件解析

本课题通过查阅各种文献,研究了浮床床体的一系列优缺点,并结合汤逊湖工程的生态环境的特点,对有效的浮床床体的研制做出了试验和探索,设计出了一种新型的浮床载体,并应用到了实际的生产中。

设计的浮床载体是由种植篮和浮体两部分组成,如图 5.1 所示。

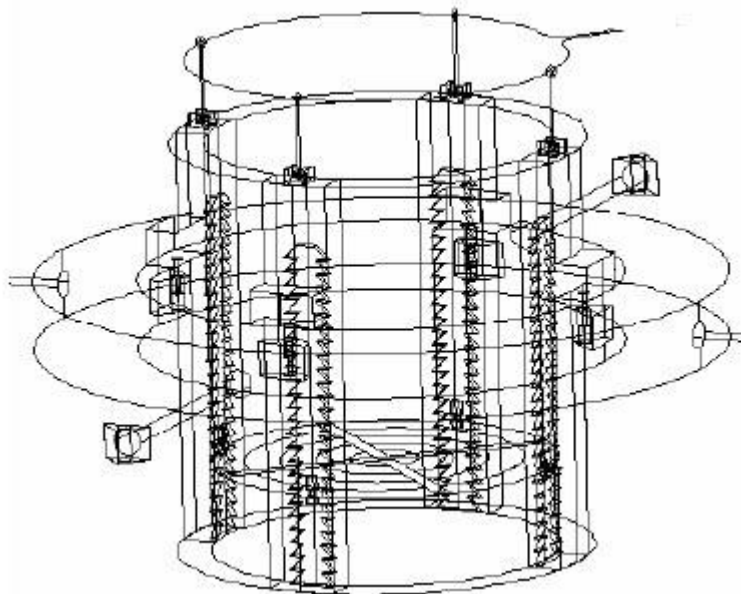


图5.1 浮床单元示意图

Fig.5.1 Floating Bed system Schematic diagram

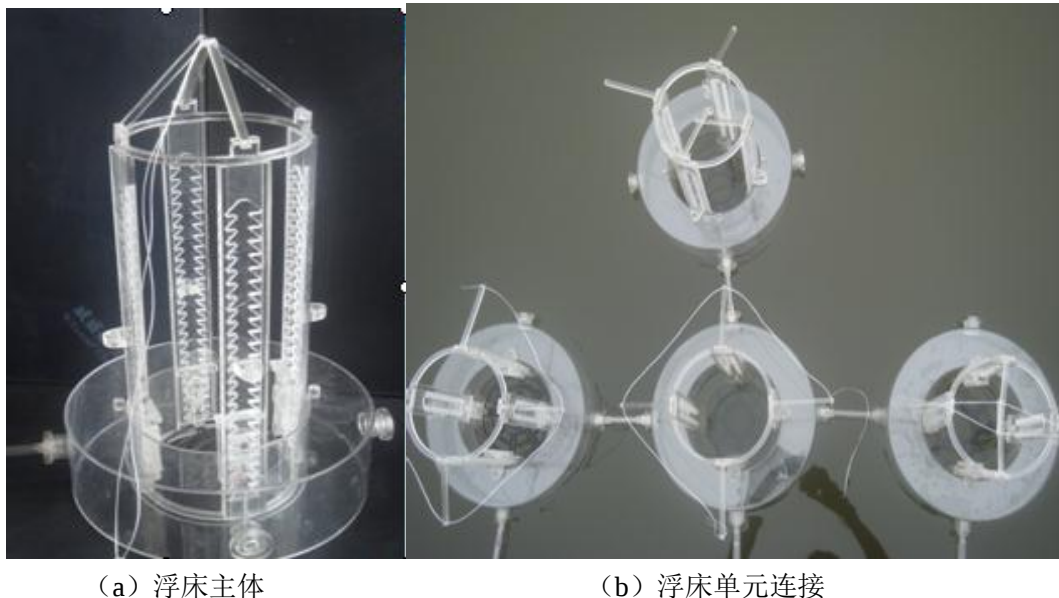
浮体是浮床能否漂浮在水面上的保障,所以在设计浮体时要尽可能的选择较轻的材

质来制作浮体。在这个浮床载体中，设计浮床为空心的圆环状，这样的设计使得浮体与水面有较大的接触面积，内部为空心，能为浮床提供更多的浮力，且对浮床的固定性也起到了一定的帮助，能有效的防止浮床的左右摇摆。

种植篮区别与传统浮床的基垫，它是承载植物的“摇篮”。种植篮由托盘和可调节的齿柱构成，中间呈空心圆柱体。种植植物时将植株穿过圆柱体，保留根部与水面接触，然后通过齿柱上下调节托盘的高度，调节完毕后，通过齿柱上面的连接开关，将托盘固定在适合的高度。而且这个设计最大的优点就是开关根据植物的生长情况随时调节，适合植物的生长发育，也满足了后期植物高密度生长的特点。

在种植篮上方设有四个支架，支架上面开有小孔，可以通过小孔用绳子或者细铁丝固定住浮床，增加了浮床的牢靠性，也降低了风浪对植物的冲击作用，起到了保护植物生长的作用。

载体主体及单元的相互连接如图 5.2 所示。



(a) Floating bed main (b) Floating sheets connection diagram

Fig.5.2 The main schematic diagram of the floating bed

5.3.2 设计浮床的优势性

从设计示意图不难发现，该浮床载体整体呈现圆形，首先它的与水接触面积大，给植物提供了良好的生长环境，不会限制植物的生长繁殖；其次，圆形的底座对水面的压强大，也增强了浮床的牢固性。

可调节的种植篮也是本浮床的一个创新点，解决了浮床植物后期生长密度大，不易收割的问题。同时也满足了植物在不同生长发育阶段的生长情况，使用过程有更大的灵

活性和便捷性。

各个浮床载体之间易连接，在现场施工过程中易搬运易固定，可以根据工程施工量决定增多或减少浮床的数量，维护管理也十分简单，可以重复使用，使用寿命时间长。因此无论从载体的结构形式、植物多样性选择、载体的抗风浪能力还是达到的景观效果，本试验的载体都有明显的优势。

浮床载体应用在水中的示意图如图 5.3。



图5.3 浮床在水体中示意图

Fig.5.3 Schematic diagram of the floating bed in the water

5.4 本试验浮床实用效果测试

5.4.1 浮床的耐用强度

浮床载体选用的材质的耐用强度受到水浪强度、日照强度、温度、人为破坏及水中物质侵蚀等因素的影响。通过对武汉汤逊湖及周边地区的生态和人文环境的调查，测定得到浮床材质受到高温强度和水中污染物的侵蚀的影响比较大，其它因素比如水浪强度或者是人为破坏的影响比较低。

5.4.2 浮床的固定类型

因为水中的湖水都在不断的流动，因此怎么解决浮床在水中的摆动的问题，就需要考虑到浮床在水中的固定。在实际生产中，浮床的固定类型一般可分为重力式、锚定式及杆式等三种，如图 5.4 所示。

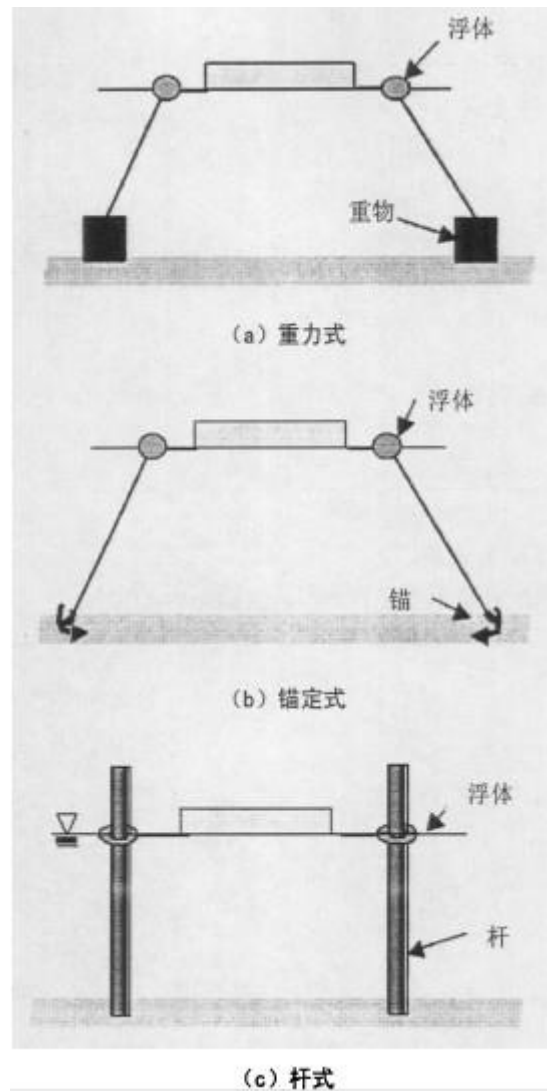


图5.4 浮床在水体固定示意图

Fig.5.4 Schematic diagram of the floating bed fixed in the water

根据汤逊湖实地考察，结合汤逊湖自身的地形及气候等条件，在浮床固定类型上可以采用重力式固定浮床的方法，在浮床底部用重物牵引固定，一方面浮床可以随着水面升降而升降，另一方面也节省了工程的开销，增加了美观，远远望去就像是一个小型的生态公园漂浮在湖中，也达到了吸引鸟群的作用。

5.4.3 浮床的施工费用

因为植物浮床主要花费在植物的选购和浮床载体的制造，是生态工程的施工方式，不需要混凝土等生产工程的费用及人工费用产生，生产中需要支付固定木桩及浮床载体的材料费即可，花费较少，适合实际生产中应用。

5.5 本章小结

本课题通过前面的植物去污性能的试验测定，春芋和马蹄莲作为观赏性植物但也具有对污水的去除能力，一些高等的陆生花卉经过一段时间的水培后，能适应于水体环境的生长发育，结合设计的浮床系统，既达到了去除的目的，又起到了美化的作用。

植物浮床也能创造出经济效益，也能作为美化污染水体的水面景观。选择不同花期的植物组合，可以保持较长时期的美化景观与处理效果，收割的植物也能出售也能作为动物鱼类的食物。

本试验所用的浮床装置，虽然结构坚固，方便使用，但在实际的生产生活中也需要定期的巡视与维护。比如大风、暴雨过后需要检查浮床外观的完整性、固定浮床的组件功能以及植物生长情况等，如果发现磨损、故障、破裂及流失等，必须在短时间内进行修复或更新，在剧烈的天气灾害过后，都需要进行详细的检查，以确保浮床的结构安全与固定功能的正常。

6 污染物浓度变化的数学模型研究

目前对植物浮床还处于实验室研究阶段,对污染物去除方程方面的涉及很少,没有构建一套理论的数学解释,主要是因为浮床系统内部去除污染物的途径很多,有气态污染物的挥发、固态污染物的沉淀和植物根系微生物的一系列的作用等,其中发生的反应较多,没有单一的量和单一的反应,使得构建数学模型研究来分析浮床系统处理物质浓度的变化非常困难。

理论上,随着植物的生长发育,污染物质浓度的减少将遵循一定的规律变化。但是,由于浮床内植物品种太多,记录每种植物的植株变化、单根吸附情况和微生物的处理作用是不符合实际的。在当下数学模型在浮床系统内的应用相对缺乏的情况下,为了避免重复,本研究选取生长良好、处理效果较好的水葫芦作为研究对象,在植物筛选实验时,另设一个实验桶种植水葫芦,记录了水葫芦从 2011 年 6 月 24 日到 8 月 26 日处理的水指标,将植物浮床系统近似看作完全混合式的“动植物反应器”,结合相关的动力学知识,根据衰减方程理论对植物浮床污染物去除的数学模式进行了探索。

选择线性方程对数据进行拟合,假定进出水浓度与水力负荷量不相关,根据记录的进水浓度和出水浓度建立衰减方程,衰减方程建立后,计算出理论处理浓度,分析理论值与试验值的误差,继而分析出试验的相对误差,提供数据上的支持。具体建模过程在下面介绍。

6.1 浮床内污染物的物料平衡计算

污染水体中的 N、P 污染物被植物吸收进入浮床系统后,从物料平衡的角度可以分为三部分:植物吸收的一部分、浮床系统内根系和微生物降解的一部分和植物收割蒸发分解的一部分。

为简化计算,根据实际情况,做出如下三点假设:

- (1) 将浮床系统作为一个整体的研究对象,假定系统进水浓度相对稳定,取试验测定的数据的平均值;
- (2) 假定浮床系统进水流量和出水流量相对稳定且数值相等,取试验测定的数据的平均值,忽略加入蒸馏水稀释的量;
- (3) 假定浮床系统出水浓度相对稳定,数值与系统内的水体浓度相等。系统的物料平衡示意图见图 6.1。

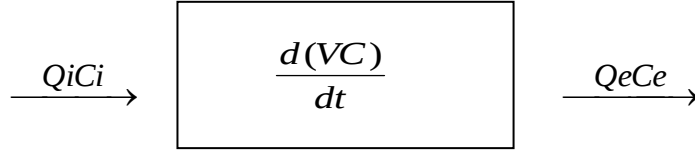


图6.1 浮床系统的物料平衡图

Fig.6.1 Material balance diagram of the floating bed system

根据物料平衡方程，得出浮床内污染物的物料平衡方程：

$$W_z = W_x + W_j \quad \text{式 (6.1)}$$

$$W_z = \sum_i^n (C_{\text{进}} - C_{\text{出}}) Q_i \quad \text{式 (6.2)}$$

$$W_x = \sum_i^j W_i \quad \text{式 (6.3)}$$

其中， W_z 为系统污染物的总去除量。

W_i 为植物体内氮磷的含量

W_x 为植物对污染物的吸收量。

W_j 为浮床系统内微生物对污染物的去除量。

6.2 构建系统内污染物的衰减方程

对污染物的物料平衡方程进行分析，为方便计算，做出以下几点假设：

- (1) 假定进出水的流量恒定。
- (2) 假定污染物质分布均匀，混合完全。
- (3) 假定污染物浓度的减少复合一级 $k \cdot C^*$ 反应的动力学模型^[58]。

由于反应是十分复杂的，所以用建立数学模型的时候要忽略很多因素，也要做出一系列的假设，这也是数学模型的特点。

由此物料平衡方程可以简化为积累量=流入量-流出量+生成量，也就是建立如下的式子：

$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC_i + rV \quad \text{式 (6.4)}$$

式中， $\frac{dC}{dt}$ 为污染物浓度的变化速率，单位是 $\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$

V 为浮床系统的体积，单位是 m^3

Q 为系统进出水的流量，单位是 m^3/d

C_0 、 C 为进出水中污染物的浓度，单位是 g/m^3

r 为一级反应的速率，

假定系统在相对稳定的环境中，简化式 (6.4) 为：

$$0 = QC_0 - QC + rV \quad \text{式 (6.5)}$$

解 r 得

$$r = -\frac{Q}{V} (C_0 - C_i) \quad \text{式 (6.6)}$$

在浮床系统内，用一级 k - C^* 方程表示污染物的降解过程：

$$\frac{dC}{dt} = -k_v C \quad \text{式 (6.7)}$$

其中， $\frac{dC}{dt}$ 为污染物的去除速率，单位是 mg/l.d ，

C 为污染物的浓度，单位是 mg/l ，

k_v 为去除体积速率常数，单位是 d^{-1} ，

$$\text{即} \quad r = -kVC \quad \text{式 (6.8)}$$

带入式 (6.6)，得到进出水浓度的线性关系：

$$C_i = \frac{C_0}{(1 + \text{HRT} * k_v)} \quad \text{式 (6.9)}$$

其中， HRT 为浮床系统的水力停留时间，在计算中取值 2；

k_v 为反应速率常数， d^{-1} ，校正 20°C 下的常数。

θ 为温度校正常数，根据经验参数，计算中 θ 取值 1.1：

$$kV = k_{20}\theta^{(T-20)} \quad \text{式 (6.10)}$$

$$\text{则} \quad C_i = \frac{C_0}{(1 + \text{HRT} * k_{20}1.1^{(T-20)})} \quad \text{式 (6.11)}$$

根据上面的公式可以得出 C_i 适合本试验的计算公式，将试验中记录的各种数据代入式 6.11 中。

建立表 6.1。

表 6.1 当 $\text{HRT}=2\text{d}$ ，速率常数 k 的取值

Table 6.1 When the $\text{HRT} = 2\text{d}$, the values of the rate constant k

水温	C_0 (TN) (mg/l)	C_i (TN) (mg/l)	K_{20} (TN)	C_0 (TP) (mg/l)	C_i (TP) (mg/l)	K_{20} (TP)	C_0 (COD) (mg/l)	C_i (COD) (mg/l)	K_{20} (COD)
26.6	16.1	9.1	0.2083	1.31	0.70	0.2323	63	38	0.1753
26.8	16.0	9.0	0.2034	1.43	0.73	0.2509	52	36	0.1162
28.6	14.3	7.7	0.1906	1.24	0.69	0.1756	42	26	0.1356
27.1	15.9	8.5	0.2212	1.17	0.64	0.2102	40	27	0.1224
28.8	14.5	7.6	0.1962	1.38	0.73	0.1925	55	29	0.1938

表 6.1 (续)

水 温	C_0 (TN) (mg/l)	C_i (TN) (mg/l)	K_{20} (TN)	C_0 (TP) (mg/l)	C_i (TP) (mg/l)	K_{20} (TP)	C_0 (COD) (mg/l)	C_i (COD) (mg/l)	K_{20} (COD)
30	12.1	6.1	0.1896	1.28	0.65	0.1867	42	30	0.0771
30.9	11.5	5.7	0.1800	1.12	0.58	0.1647	34	23	0.0846
28.7	11.6	6.7	0.1596	1.44	0.72	0.2182	46	26	0.1678
29.6	10.9	6.2	0.1518	1.36	0.72	0.1780	41	28	0.0930
33.5	9.7	4.8	0.1410	1.28	0.70	0.1144	39	22	0.1067
均 值			0.1842			0.1924			0.1273

经过计算得出试验中污染物出水的浓度的计算公式:

$$C_{i(TN)} = \frac{C_{0(TN)}}{(1 + HRT * 0.1842 * 1.1^{(T-20)})} \quad \text{式 (6.12)}$$

$$C_{i(TP)} = \frac{C_{0(TP)}}{(1 + HRT * 0.1924 * 1.1^{(T-20)})} \quad \text{式 (6.13)}$$

$$C_{i(COD)} = \frac{C_{0(COD)}}{(1 + HRT * 0.1273 * 1.1^{(T-20)})} \quad \text{式 (6.14)}$$

6.3 试验值与理论值的比较

由计算出的污染物浓度方程可知, 将相关参数代入方程中, 计算出系统出水的 TP、COD 和 TN 的理论值, 比较试验测得的数据, 如表 6.2 所示。

表 6.2 TN 计算值和试验值对比表

Table 6.2 TN calculated values and experimental values of comparison table

进水浓 度(mg/l)	16.1	16.0	14.3	15.9	14.5	12.1	11.5	11.6	10.9	9.7
实验值 (mg/l)	9.1	9.0	7.7	8.5	7.6	6.1	5.7	6.7	6.2	4.8
计算值 (mg/l)	9.5	9.4	7.8	9.2	7.8	6.2	5.6	6.3	5.7	4.2
绝对误 差(mg/l)	0.4	0.4	0.1	0.7	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.6
相对误 差(%)	4.40	4.44	1.30	8.24	2.63	1.64	1.75	5.97	8.06	12.5

则可知: 相对误差的平均值为 5.09 %, TN 计算值与试验值相对误差的对比图如图 6.2 所示。

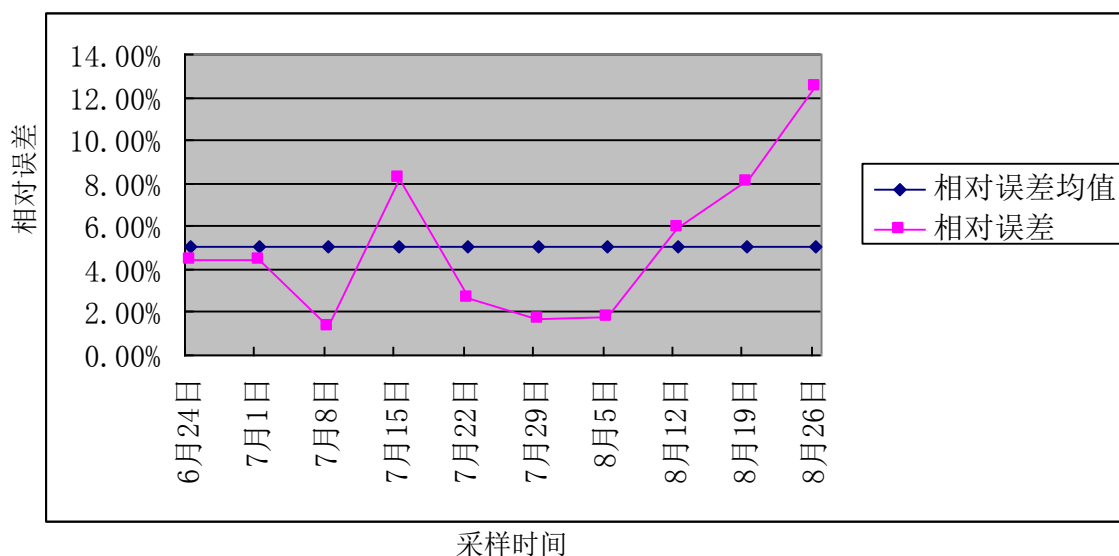


图6.2 TN计算值与试验值相对误差对比图

Fig.6.2 TN calculated values and experimental values of relative error comparison chart

表 6.3 TP 计算值和试验值对比表

Table 6.3 TP calculated values and experimental values of comparison table

进水浓度(mg/l)	1.31	1.43	1.24	1.17	1.38	1.28	1.12	1.44	1.36	1.28
实验值(mg/l)	0.70	0.73	0.69	0.64	0.73	0.65	0.58	0.72	0.72	0.70
计算值(mg/l)	0.76	0.82	0.66	0.66	0.73	0.64	0.54	0.77	0.69	0.54
绝对误差(mg/l)	0.06	0.09	0.03	0.02	0.00	0.01	0.04	0.05	0.03	0.16
相对误差	8.57 %	12.3 %	4.35 %	3.13%	0 %	1.54 %	6.90 %	6.94 %	4.17 %	22.8 %

则可知：相对误差的平均值为 7.07 %，TP 计算值与试验值相对误差的对比图如图 6.3 所示。

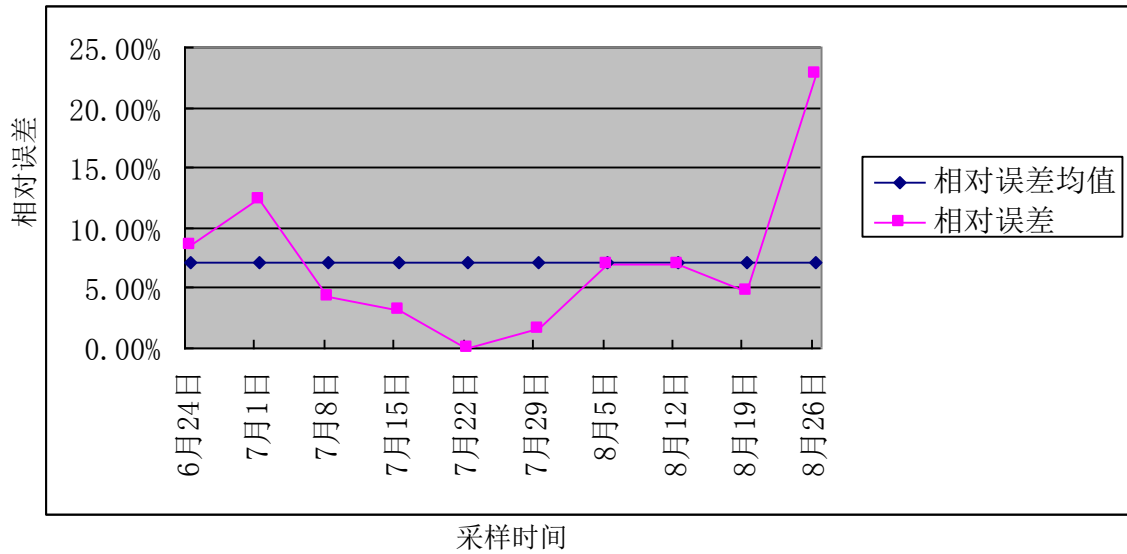


图6.3 TP计算值与试验值相对误差对比图

Fig.6.3 TP calculated values and experimental values of relative error comparison chart

表 6.4 COD 计算值和试验值对比表

Table 6.4 COD calculated values and experimental values of comparison table

进水浓度(mg/l)	63	52	42	40	55	42	34	46	41	39
实验值(mg/l)	38	36	26	27	29	30	23	26	28	22
计算值(mg/l)	42.7	35.0	26.6	26.7	34.6	25.3	19.8	29.1	25.2	20.3
绝对误差(mg/l)	4.7	1	0.6	0.3	5.6	4.7	3.2	3.1	2.8	1.7
相对误差	12.4 %	2.78 %	2.30 %	1.11%	19.3 %	15.7 %	13.9 %	11.9 %	10.0 %	7.73 %

则可知：相对误差的平均值为9.71%，COD计算值与试验值相对误差的对比图如图6.4所示。

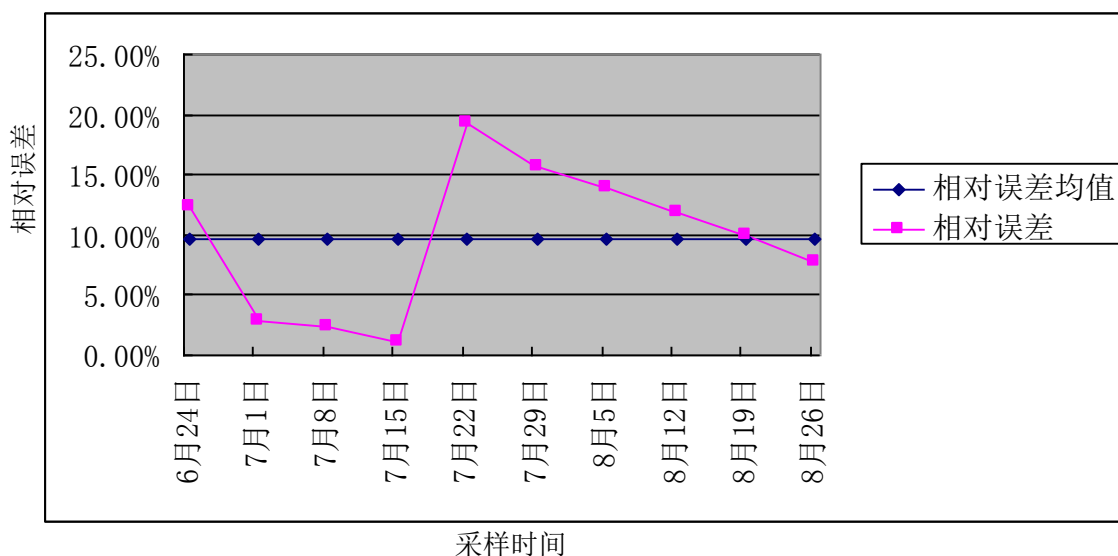


图6.4 COD计算值与试验值相对误差对比图

Fig.6.4 COD calculated values and experimental values of relative error comparison chart

图 6.2、图 6.3、图 6.4 是试验值与理论值相对误差的对比图，从图中可以看出，相对误差在平均值上下的波动比较大，吻合程度不太好。分析其中的原因一方面是由于在方程建立的初期，有很多的假设，排除了外界的一些误差，理论值存在着一些偏差；另一方面是在实际处理中，TN、TP、COD 的去除过程是一个动态的复杂的多种因素影响的过程，方程的建立仅仅是分析了 $k-C^*$ 的一级反应方程，忽略了其他方面的影响因素，这也导致了吻合度的偏差。

但观察 TN、TP、COD 相对误差对比图，可以发现 COD 和 TN 的模型的相对误差都小于 16%，TP 模型尽管有的数据的相对误差高于 20%，但它的相对误差的平均值为 7.07 % 小于 10%。因此可以认为模拟出的方程可以用来简单的表示系统内污染物质降解的动态变化。

本数学模型忽略水力负荷这一个参数，只对系统进出水浓度之间关系进行分析，建立一级线性方程，来分析系统内污染物复杂的降解变化，得出的结果不精细，在以后的试验中，如何考虑全部的因素对污染物去除的影响，并将其应用到数学模型的建立中，需要更深入的探索。

6.4 本章小结

通过本章的数学模型探索，得到以下几个结论：

(1) 随着植物浮床技术的深入研究，人们也逐渐意识到数学分析方法在浮床中的影响，并也已经开展了一系列的研究和探索。植物浮床是个复杂的技术，在整个系统处理中，有许多因素参与到污水的去污过程中系统中，不确定的因素也很多。有时候为了

简单计算，常常假定了许多条件，因此影响到模型的建立。

(2) 现在大多采用一级 $k-C^*$ 动力学模型对系统内污染物浓度变化分析，这个一级动力学方程体现了数学方法对实际生产分析的优势性，得出的结果一目了然，但随着科学技术的不断深入，我们就需要更多的方法来研究探讨污染物浓度变化的规律，因此要不断的寻求探新，找到更多的二级或者多级方程来分析。

(3) 建立的数学模式尽管相对误差比较大，但构建的方程简单明了，在一定的程度上也反应了数学模型在植物浮床中的应用，为后续的探索提供了数学上的支持。

7 结论与建议

7.1 结论

目前,植物浮床技术已经成为水体治理、生态恢复的主要方法之一,利用高等水生植物在生长过程中参与氮磷营养物质的吸收和吸附等一系列作用的特点,来达到去污的目的。本文通过试验研究,得出以下结论:

(1) 通过实地调查武汉汤逊湖的人文和生态环境,针对汤逊湖污染来源和汤逊湖的地形特点,制定了植物浮床技术应用到汤逊湖治理的方案。

(2) 植物筛选试验开始时,选用美人蕉、菖蒲、水葱、滴水莲、春芋、再力花、水葫芦、粉掌和马蹄莲九种水生植物进行试验。结果发现滴水莲、菖蒲、美人蕉、粉掌和水葱不适合在试验污水中生长,故决定弃用这五种植物;春芋、马蹄莲、再力花和水葫芦在试验污水中都能生长且生长良好,对水体中的氮磷污染物质有一定的吸收作用,具有一定的去污能力。四种植物处理对水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 以及 COD 的平均去除率,春芋分别为 40.4%、78.7%、66.7%、80.1%,再力花分别为 59.3%、79.2%、66.2%、59.7%,水葫芦分别为 60.1%、81.8%、74.5%、65.0%,马蹄莲分别为 58.0%、71.4%、66.0%、66.7%。

(3) 在酸性环境处理试验中,四种植物在试验污水中均能正常生长,对水体也有一定的净化作用。四种植物处理对水中 TN、TP、COD 以及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均去除率,春芋分别为 68.1%、41.2%、28.6%、62.0%,再力花分别为 47.4%、26.7%、18.3%、32.1%,水葫芦分别为 55.6%、40.0%、21.1%、42.3%,马蹄莲分别为 58.8%、33.3%、28.2%、50.9%。

(4) 在复合植物处理试验中,复合植物生长较单一植物有旺盛的生长能力,复合植物生长速度加快,出现较多根系,对水中 TN、TP、COD 以及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的静态试验平均去除率,分别为 66.1%、50.5%、28.8%、64.7%。

(5) 建立污染物浓度的一级衰减方程,简单的表示了污染物质去除的效率,也指出了试验值和理论值之间的相对误差的数值。

此外,根据武汉汤逊湖的水文、人文和污染情况,本文也探讨和设计出适合应用于现场的生态浮床系统并做了简单的应用分析。

7.2 建议

本文对植物的筛选、植物的确定、植物的去污性能等方面都做了研究,但局限于试验条件、试验时间、知识的掌握程度等一些因素,本论文还存在着许多的不足,归纳总

结为以下几点，望以后能做深入的探索研究：

（1）对植株没进行生物分析，没有测定植物体内自身含有的氮磷含量，应该归纳出含氮量多的植物和含磷量多的植物，对吸收氮磷的植物做出分类。

（2）没有对植物根系进行测定分析，没有对植物根系上的吸附物所包含的物质的种类、数量和相互关系进行测定，应该深入的研究植物根系在水体净化中所起的作用。

（3）没有对采用的植物进行食品安全性的检测，应当对浮床选用的植物做安全性的检测，避免伤害水中的浮游动植物，对水体造成再次污染。

（4）没有对植物的落叶对水体的污染做进一步的研究，应当对植物落叶是否影响氮磷含量的变化做出总结和探索。

（5）有的水体中富含大量重金属离子，本文没有进行水生植物对水中重金属离子吸收试验的研究，在后续的研究中应加强这方面的研究，以完善利用植物修复技术对污染水体的试验研究。

致 谢

时光匆匆的度过，不知不觉就到了研究生的最后几个月了。时光就像一个贴上邮票寄出去的明信片一样，永远都在路途上。回首刚踏入研究生生涯的日子里，有许多快乐的回忆，也有很多人的帮助，其中最感谢的就是我的导师-张大捷。他在生活上就像一个兄长一样给予我帮助，还记得刚踏入研究生生活的时候，是导师给我指明了以后的目标，让我走出迷茫和彷徨；还有在学术研究方面，是他教导我怎样学好自己的专业，怎么去选择方向，怎么去查阅文献，怎么写出第一篇论文。他就如一个良师益友，不论多忙，也会询问我的论文进度，大到一个研究方向，小到一个标点符号，他都会一一的指出。当我有了进步，他会不加以掩饰的给出夸奖，当我有了骄傲不满的情绪的时候，他也会严厉的指出我的缺点和不足。在这里要真挚的对老师说声：老师，您辛苦了，感谢您的栽培和辅导。

再次还要特别谢谢丁忠浩教授，他传授给我们很多学业的知识并给了我们很多实践的机会，他那渊博的专业知识深深的影响了我们，感谢他对我的指导和培养。

还要谢谢邹先玉老师，她不论在生活还是在学习还是在思想上都给了我很大的帮助，她就像一个大姐姐一样的关怀我，在这里特别想对她说一声：谢谢。

还要感谢这三年来陪着我一起的兄弟姐妹们，感谢你们一直以来的照顾和关怀，谢谢你们，还要感谢我的家人，没有你们的支持和鼓励，也就没有我的今天，谢谢你们的包容和爱护，谢谢。

参考文献

- [1] 梁涛, 陶街, 刘广君等. 伊春河河水水溶性腐植酸内源释放模型[J]. 环境科学学报, 1997, 17 (2): 136-140
- [2] 周启星, 助荫媚. 西湖底泥不同供氧条件下有机物质降解及 CO_2 、 CH_4 释放速率的模拟研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(1): 11-15
- [3] 贺宝根, 周乃晟, 袁宝民等. 底泥对河流的二次污染浅析[J]. 环境污染与防治, 21 (3): 41-43
- [4] <http://wenku.baidu.com/view/0bb6a277a417866fb84a8e9b.html>, 《2010 中国环境状况公报》
- [5] 邱并生. 微生物生态修复技术[J]. 微生物学通报, 2011, 38 (4): 601-602
- [6] 王珏. 生物膜技术在城市废水净化中的应用[J]. 微科学之友, 2008, 7: 16-17
- [7] Greenheart R A. Free water surface wetlands for wastewater treatment: a technology assessment[R]. USEPA, Office of Water Management, US Bureau of Reclamation, City of Phoenix, AZ, 1999
- [8] 董哲仁, 孙东亚等. 生态水利工程原理与技术[M]. 中国水利水电出版社, 2007, 14
- [9] 王诚信, 凌晖, 史可红等. 污染河流的纯氧曝气的复氧[J]. 上海环境科学, 1999, 18 (9): 411-413
- [10] K Breese, M Boll, J Alt-Morbid, et al. Genes coding for the benzoyl-Co A pathway of anaerobic aromatic metabolism in the bacterium Tauter aromatic a[J]. Eur. J. Biochem, 1998, 256 (1): 148-154
- [11] 刘延恺. 河道曝气—适合我国国情的环境污染处理技术[J]. 环境污染与防治, 1994, 16 (1): 22-25
- [12] BURKEN J G, SCHNOOR J L. Peyote mediation: plant uptake of atropine and role of root exudates [J]. J Environ Qual, 1996, 122(11): 958-963.
- [13] 张建梅. 植物修复技术在环境污染治理中的应用[J]. 环境科学与技术, 2003, 26 (6): 55-57
- [14] 张景来, 王剑波, 常冠钦等. 环境生物技术及应用[M]. 北京化学工业出版社, 2002
- [15] HEADLEY T R and TANNER C. Application of Floating Wetlands for Enhanced Storm water Treatment [J]. A Review. ARC Technical Publication No. 324, Auckland Regional Council, Auckland. 2006
- [16] HEADLEY T R and TANNER C. Floating Wetlands for Storm water Treatment[J].

- Removal of Copper, Zinc and Fine Particulates, Auckland Regional Council Technical Publication No, Auckland Regional Council, Auckland, New Zealand. 2007
- [17] 马凤有, 李强, 邓辅商. 人工浮岛载体设计研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, 5: 85-87
- [18] 李英杰, 金相灿, 年跃刚等. 人工浮岛技术及其应用[J]. 水处理技术, 2007, 33 (10): 49-51
- [19] VANACKER J, BUTS L, THOEYE C et al. Floating plant beds: BAT for CSO Treatment[M]. In: Book of Abstracts from International Symposium on Wetland Pollutant Dynamics and Control. Sept. 4-8, Ghent Belgium, pp. 186-187. 2005.
- [20] ASH R and TRUONG P. The use of Votives grass wetlands for sewerage treatment in Australia[J]. In: Proceedings of 3rd International Conference on Votives. Guangzhou, China, 2003.
- [21] TODD J, BROWNE J and WELLS E. Ecological design applied[J]. Ecological Engineering, 20: 421-440. 2003.
- [22] UBBARD R. K, GASCHO G J and Newton G L. Use of floating vegetation to remove nutrients from swine lagoon wastewater[J]. Transactions of the ASAE, 47 (6) : 1963-1972. 2004.
- [23] GARBUTT P. An investigation into the application of floating reed bed and barley straw techniques for the remediation of entropic waters[J]. Water Environment Journal, 2004: 174-180. 2004
- [24] NAHLIK A M and MITSCH W J. Tropical treatment wetlands dominated by free-floating macrophysics for water quality improvement in Costa Rica[J]. Ecological Engineering, 28(3): 246-257. 2006.
- [25] YANG Z, ZHENG S, CHEN J and Sun M. Purification of nitrate-rich agricultural runoff by a hydroponic system [J]. Bioresearches Technology, 99, 8049-8053. 2008
- [26] 刘剑彤, 邱昌强, 陈金珠复合生态系统中高效除磷氮植被植物的筛选研究[J] 水生生物学报, 1998, 22(1): 1-7
- [27] 武清涛. 植物在环境污染治理中的应用[J]. 环境保护, 1998, 17 (2): 24-27
- [28] Herger S.SCHW MMKAMPEN Germany's article floating islands [J].Journal of soil and Water conservation, 1988, 43(4)
- [29] X Song Bio-production and water cleaning by plant grown with floating culture system[C]. 第6回世界湖沼会议, 论文集, 1995, 1, 426-427.
- [30] 谭洪新. 水栽培蔬菜对养鱼废水的水质净化效果[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10

- (4): 293-297
- [31] V Nathalie, M Fabien, S Holgate et al. Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NET system[J]. Chemosphere. 2003, 50: 121-129.
- [32] K Nakamura, and Y Simian. WATER PURIFICATION AND ENVIRONMENTAL ENHANCEMENT BY THE FLOAYING WETLAND [C]. Proc, of 6th IAWQ Asia-Pacific Retinal Conference in Korea, 1997.
- [33] KANSIIME F, ORYEM-ORIGA H and RUKWAGO S. Comparative assessment of the value of papyrus and cocoyam's for the restoration of the nakivubo wetland in Kampala, Uganda[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 30: 698-705. 2005.
- [34] SEKIRANDA S B K and KIWANUKA S. A study of nutrient removal efficiency of Pragmatism Mauritian us in experimental reactors in Uganda[J]. Hydrobiology, 364: 83-91. 1998.
- [35] 程树培, 丁树荣, 胡惠明. 利用人工基质无土栽培水蕹菜净化缙丝废水研究[J]. 环境科学, 1991, 12 (4): 47-51
- [36] 李欲如, 操家顺. 冬季低温条件下浮床植物对富营养化水体的净化效果[J]. 环境污染与防治, 2005, 27 (7): 505-507
- [37] 周小平, 王建国, 薛利红等. 浮床植物系统对富营养化水体中氮、磷精化特征的初步研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16 (11): 2200-2203
- [38] 卢进登, 陈红兵, 赵丽娅等. 人工浮床栽培 7 种植物在富营养化水体中的生长特性研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7 (7): 57-61
- [39] 聂志玲, 王建国, 安达等. 人工浮床池净化富营养河水试验研究[J]. 净水技术, 2006, 16 (5): 1-3
- [40] 张彦海, 罗固源, 许晓毅. 美人蕉浮床去除临江河 N.P 的动态试验研究[J]. 三峡环境与生态, 2009, 7 (2): 21-23
- [41] 杨彦军, 韩会玲, 龚欣欣. 不同植物净化富营养化水体的静态试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009, 7 (4): 28-30
- [42] Y Enamors, M Mizuochi, K Xu. Countermeasures for Lake Eutrophication in Japan-Manual of Lake Eutrophication Control [J]. National Institute for Environmental Studies, Japan, 2002, 374-376.
- [43] 井艳文, 胡秀琳, 许志兰等. 利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范[J]. 水利科学研究, 2003, 17 (6): 18-19
- [44] 谢海文, 沈乐. 河流曝气技术简介[J]. 水文, 2009, 17 (2): 136-140
- [45] GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]

- [46] 中国水利水电科学院, 武汉市水务局, 武汉市水利规划设计研究院. 武汉市汤逊湖纳污能力研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2008.
- [47] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法〔第四版〕[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [48] 王大力, 尹澄清. 植物根孔在土壤生态系统中的功能[J]. 生态学报, 2005, 5 (2): 158-163
- [49] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16 (3): 83-86
- [50] 陈博谦, 尹澄清. 污水净化湿地模拟系统中细菌和藻类的生态分布研究[J]. 生态学报, 1998, 18 (6): 634-639
- [51] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995, 16 (3): 83-86
- [52] P. R. Thomas, P. Glover and T. Kalaroopan. An evaluation of pollutant removal from secondary Treated sewage effluent using a constructed wetland system[J]. Wetland systems for water Pollution control 1994, 87-94.
- [53] O. Decamp, A Warren. Investigation of Escherichia coli removal in various designs of subsurface flow wetlands used for wastewater treatment [J]. Ecological Engineering, 2000, 14: 293-299.
- [54] 连兆煌主编. 无土栽培原理与技术[M]. 中国农业出版社, 1994
- [55] 程丽巍, 许海, 陈铭达等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33(1): 31-36
- [56] [www Pwri.go.jp/tealll/kasenseitai/eng/kenk3/Pd 03/Kas2001.Pdf](http://www.Pwri.go.jp/tealll/kasenseitai/eng/kenk3/Pd 03/Kas2001.Pdf).
- [57] 任照阳, 邓春光. 生态浮床技术应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (增刊): 261-263
- [58] ROU SSEAU D P L, VANROLLEGHEM P A, PAUW N D. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed wetlands: a review [J]. Water Research, 2004, 38(1): 1481-1493

附 录

本人在攻读学位期间所发表的论文及获奖

[1]张璟, 丁忠浩. 废弃电脑及配件中贵金属的回收利用[J]. 武汉科技学院学报. 2010 年第 3 期.

[2]Zhang Dajie, Zhang jing. Behaviors and Microstructure of MSWI fly ash solidified by Cement-activated Fluidized Bed Combustion Coal Fly ash[C]. The 11th International Environmental Specialty Conference. (EI 收录)

[3]张璟, 丁忠浩. 便携式电凝聚饮水机的研制[J]. 绿色科技. 2011, 3

获奖情况:

[1] 2009-2010 年度校一等奖学金

[2] 2010-2011 年度校一等奖学金

[3] 2011-2012 年度校一等奖学金