

中国林业科学研究院

学位论文

北京园博湖人工湿地系统水质净化功能研究

学位论文作者	席婧
指导教师姓名	黄志霖副研究员
指导小组成员	田耀武副教授
申请学位级别	硕士
专业名称	农业推广
研究方向	农业区域与发展
论文答辩日期	2015年6月



中国·北京



Dissertation for the Degree

Research on Water Purification of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

Candidate:	Xi Jing
Supervisor:	Huang Zhilin Associate Research Fellow
Associate Supervisor:	Tian Yaowu Associate Professor
Academic Degree Applied for:	Master of Professional Degree
Speciality:	Agricultural Extension
Date of Defence :	In 2015 June
Degree-Conferring-Institution:	Chinese Academy of Forestry

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得本研究生培养单位或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：席靖 日期：2015年6月30日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解中国林业科学研究院有关保留、使用学位论文的规定，中国林业科学研究院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。本人授权中国林业科学研究院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)

学位论文作者签名：席靖
2015年6月30日

导师签名：黄志霖
2015年6月30日

学位论文作者毕业联系方式：15810700028

工作单位：卢沟桥乡人民政府

联系电话：63817571

电子邮件：1047663121@qq.com

通讯地址、邮编：北京市丰台区丰北路77号卢沟桥乡人民政府，100071

摘 要

人工湿地是处理受污染的公园景观水体的一种新型的、行之有效的方法，能够在去除水中的污染物的同时，兼具观赏性能和经济效益。北京园博湖人工湿地系统作为目前亚洲最大的潜流型人工湿地，是我国的湿地系统研究的重要研究对象，也是承载永定河丰台段再生水水源净化的重要工程项目。本研究以北京园博湖人工湿地系统作为研究对象，根据北京园博湖人工湿地系统在不同季节的情况，按照夏、冬两季选择合适的检测时间做好水质检测工作。在潜流湿地的四个分区中，每个区分别选取三个单元湿地进水阀井及与其相对应的出水阀井作为监测点，并取其平均值作为监测数据。对监测指标进行处理后进行数据分析、对比，结果表明，北京园博湖人工湿地系统对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、COD、SS 等指标能起到一定的净化效果，特别是对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率最高可达到 98.63%，平均总去除率达到 73.17%。北京园博湖人工湿地系统的净化出水对指标的去除效率基本能够满足设计标准，但各区的净化效果存在差距、冬季和夏季的净化效果相差较大。因此需建立健全北京园博湖人工湿地系统的管理机制、加强对水生植物的管理和维护、加大对游人的宣讲力度以减小游人对北京园博湖人工湿地系统的影响。

关键词：人工湿地系统，北京园博园，净化功能

Abstract

Constructed wetland is a new-style and effective method to deal with the contaminated water in the park, which can not only remove pollutants in the water, but also enjoy the ornamental performance and economic benefits. Artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo Park, as currently the Asia's largest subsurface constructed wetland, is our country's important research object, and it is also an important project that plays the role of purifying the recycled water of Fengtai section of Yongding River. This study takes the artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo Park as the object of study, according to the different seasons of the artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo Park, choose suitable for detection of time in winter and summer to deal with the water quality detection. In the four sections of subsurface flow constructed wetland, three wetland unit inlet valve shaft and its corresponding water outlet valve well are selected as monitoring points in each district, and take the mean value as the monitoring data. Taking data analysis and comparison after the treatment of monitoring indicators, the results show that, the artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo Park can play a certain purifying effect on the indexes such as $\text{NH}_4\text{-N}$, TP, COD, SS, especially the removal rate of $\text{NH}_4\text{-N}$ is the highest up to 98.63%, and the average total removal rate reaches 73.1%. The removal efficiency of the effluent in the lake of Beijing Garden Expo Park can basically meet the design criteria. And there are gaps in the purification effect of each district, and the purification effect is different in winter and summer. But it is still a necessary to establish and improve the management mechanism for the artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo Park, to strengthen the management and maintenance of aquatic plants, and to increase efforts to preach the visitors to reduce the impact of visitors on the artificial wetland system in the lake of Beijing Garden Expo park.

Keyword: Artificial wetland system, Beijing Garden Expo, Water purification

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状及发展趋势.....	2
1.3 人工湿地系统净水技术.....	4
1.3.1 人工湿地的概念.....	4
1.3.2 人工湿地的分类.....	4
1.3.3 人工湿地的组成.....	5
1.3.4 人工湿地系统处理污水的技术特点.....	6
1.4 研究意义.....	7
1.5 研究目标.....	8
1.6 研究方法.....	8
1.7 研究内容.....	9
第二章 北京园博湖人工湿地系统工程概况.....	10
2.1 综合说明.....	10
2.2 水文及水资源情况.....	12
2.2.1 水文气象条件.....	12
2.2.2 水源情况.....	12
2.3 工程任务.....	13
2.3.1 湿地净化处理任务.....	13
2.3.2 其他任务.....	16
2.4 小结.....	17
第三章 水质净化工艺研究.....	18
3.1 研究目标.....	18

3.2 主要建筑物及功能划分.....	18
3.2.1 主体建筑.....	18
3.2.2 分区布置及原因分析.....	19
3.3 湿地水力工艺及相关分析.....	21
3.3.1 水力工艺.....	21
3.3.2 进出水时间分配.....	22
3.4 湿地净水单元格相关分析.....	23
3.4.1 净化机理.....	23
3.4.2 湿地填料.....	26
3.4.3 湿地植物.....	28
3.5 小结.....	29
第四章 水质净化效果研究.....	31
4.1 研究方法.....	31
4.1.1 基础资料收集与处理.....	31
4.1.2 水质监测点布设及监测方案.....	31
4.1.3 分析数据并得出相应结论.....	33
4.2 数据分析.....	33
4.3 净化效果分析.....	37
第五章 结论.....	40
参考文献.....	42
致 谢.....	45

图目录

图 2-1 北京园博湖人工湿地系统位置图	11
图 3-1 北京园博湖人工湿地系统分区图	20
图 3-2 北京园博湖人工湿地系统水力工艺流程图	21
图 3-3 复合垂直流湿地工艺图	23
图 3-4 北京园博湖人工湿地系统填料图	27
图 3-5 园博湖人工湿地系统植物分布图	29
图 4-1 园博湖人工湿地系统监测点分布图	32
图 4-2 北京园博湖人工湿地系统冬季情况	38
图 4-3 游人对北京园博湖人工湿地系统的影响	39

表目录

表 2-1 地表水环境质量标准基本项目标准限值表	14
表 3-1 北京园博湖人工湿地湿地分区面积表	19
表 3-2 复合垂直流湿地净化机理	25
表 4-1 设计水质监测指标说明表	32
表 4-2 一区净化效果统计表	33
表 4-3 二区净化效果统计表	34
表 4-4 三区净化效果统计表	35
表 4-5 四区净化效果统计表	36
表 4-6 北京园博湖人工湿地系统净化效果统计表	37

第一章 绪论

1.1 研究背景

“地球之肾”^[1]——湿地中具有丰富的动植物资源、水资源等自然资源，其可利用的能源含量也极为丰富。湿地作为重要的自然生态系统，不但本身具备了自我净化、自我完善的强大能力，而且能够维护生物的多样性，调蓄洪水保持水土，降解污染美化环境，调节气候，在教育与科研等方面也有着重要的作用，使自然界得以持续而有序地运行^[2]。

1971年2月2日，《国际重要湿地特别是作为水禽栖息地的重要湿地公约》缔结于在伊朗南部海滨小城拉姆萨尔，旨在保护和合理利用全球湿地，简称《湿地公约》。湿地在其中定义为：天然或人工、长期或暂时之沼泽地、泥炭地，带有静止或流动的淡水、半咸水或咸水的水域地带，包括低潮位不超过6m的滨岸海域^[3]。

人工湿地系统是一种特殊的湿地系统，它的建造、运行、监督控制、后期维护均由人工完成^[4]。人工湿地系统中有大面积的填料床，以此为基础能够种植相关的湿地植物，它能够模拟自然湿地，组成类似于自然湿地的新型污水净化系统^[5]。在该生态系统中，化学、物理、生物等各种作用共同存在，多方作用从而实现对污水的高效净化。人工湿地系统能够通过沉降、过滤等物理作用，沉淀、吸附、离子交换等化学作用，微生物分解、植物吸收代谢等生物作用对污水中的营养物质和有害污染物进行去除^[6]。常见的人工湿地系统的分类方式是根据污水在填料床中的流动方式不同进行分类的，可以将人工湿地系统分为三类，污水进入填料床后从基质表面直接流向湿地的出水口的人工湿地系统叫做表面流湿地、污水进入湿地填料床后从进水口水平流向出水口的人工湿地系统叫做水平潜流湿地、污水在湿地的填料床中垂直通过的人工湿地叫做垂直流湿地^[7-8]。

人工湿地是一种行之有效的处理受污染的公园景观水体的方法，它具有污泥减量化、处理效率高、运行和维护成本低廉、能源损耗低、无化学污染和无臭等特点。由于本身具有观赏性，不但可以很大程度上去除水中的污染物而且不影响公园景观，甚至可以以湿地良好生态环境和湿地景观资源为基础，提供给人们旅游观光、休闲度假的公园，以拉动旅游消费，在创造经济效益的同时形成一种生态保护的价值观^[9]。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

世界上第一处运用人工湿地进行污水处理的是建于英国约克郡 Earby 的人工湿地，并且它从 1903 年起一直连续运行，运行长达 89 年^[10]。到了 1953 年，德国科学家 Seidel 博士研究发现发现芦苇及一些其他的高大植物对污水中的无机和有机污染物能够起到良好的净化效果，甚至还能在一定程度上去除重金属污染物^[11]。

现称为 Lelystad Process 的大规模处理系统是荷兰在 1967 年开发的，这种湿地系统随即荷兰大范围使用^[12]。根区法理论是德国学者 Kichuth 在 20 世纪 70 年代提出的，他指出高等植物能够为其根围的异养微生物供应氧气创造富氧的微环境，水生植物的根系上这样的微环境能够促使微生物获得更好的生存条件，进而加快水体中污染物降解速度，而远离根区的地方能够产生兼氧和厌氧的环境利于兼氧和厌氧净化作用。这一理论的提出，得到了世界各地的重视，德国的 Othfresen 就基于根区理论在 1974 年开始进行的一个完整的人工湿地的试验的研究^[13]，由此掀起对人工湿地系统研究的热潮，并在世界范围内开始应用^[14]。当时人工湿地组成、湿地植物的选择和对各中污染成分的去除机理是科学家们的的主要研究内容。

之后，经过不断完善，二十世纪八九十年代时开始，日益完善的人工湿地系统处理污水的技术在美国等一些先进发达国家被广泛应，而人工湿地技术发展到现在，已经不再局限于污水处理的单一功能，而是将污水处理与旅游景点相结合形成新的景观模式^[15]。1996 年 9 月，人工湿地技术国际研讨会在奥地利维也纳召开，这一国际盛会的胜利召开标志着人工湿地系统已经凭借其独特的工艺和良好的效果在水污染控制领域占有了一席之地。

日趋完善的人工湿地系统处理污水的技术在发达国家得到更多的重视和推广。北美自由表面流湿地能够占到湿地总面积的 2/3，其中的人工自由表面流湿地就占到一半，现今北美用于污水处理的湿地达到 650 座以上^[16]。在一些欧洲国家，特别是东欧国家地下潜流系统得到了更为广泛的应用^[17]。

在国际上，人工湿地系统的相关研究已经涉及到各个领域，但许多基础理论问题仍有较大的研究空间，综合性很强的成果、系统的城市湿地专著也处于空缺状态^[18]。

我国对于人工湿地系统的建造、利用、研究相对较晚，1987年我国第一座芦苇湿地工程于由天津市环境保护研究所建成^[19]。起初我国学者主要的研究重点在于人工湿地系统的工艺流程和如何选择搭配湿地植物，其处理效果如何等方面^[20]，主要用以解决我国的水体富营养化等问题。水体富营养化是随着我国经济快速发展而产生的环境问题，由于当时人们科技水平相对较低，又欠缺环保意识，忽视了生态影响，因此在人们生活和工农业生产中产生的大量污水未经处理或处理不完全就直接进入湖泊、河流、水库等水体中，其中过量的氮、磷等营养物质超过了水体的自我净化能力，因此出现了水体富营养化现象。

有研究证实湿地植物能够明显影响水体中的氮、磷含量，但是不同的湿地植物的富集、转移作用有所差异，因此对富营养化水体的处理效果不同^[21-22]。因此在人工湿地系统中起到重要去污作用的湿地植物，在近10年来的人工湿地系统的污水处理机理和技术体系研发中占有十分重要的地位。

近年来，人们生活水平在逐渐提高，随之增强的人们对环境质量的要求和重视环境保护的意识，对于污水处理技术也不仅只要求其净化功能，因此集合了污水处理功能和生态景观资源于一体的人工湿地系统逐渐成为了城市景观的重要组成部分^[21]，对于湿地景观设计方面的研究逐渐增多，污水处理技术的日趋完善。

“九五”期间，中国与德国、奥地利等多个国家共同承担了欧盟重大国际科技合作项目“热带与亚热带区域水质改善、回用与水生态系重建的生物工艺学对策研究”并取得了重要科研成果——复合垂直流人工湿地^[22]，该人工湿地技术兼具景观效果优良，管理技术简单，运行费用相对较少等优点^[23]，是一项较为成熟的生态污水处理技术，目前该技术在在国内外的示范工程已有200余处^[24]。

潜流型人工湿地、表流湿地处理静态水体和单向处理动态水体是目前人工湿地研究的主要方面，目前国内在动态循环条件下对富营养化水禽污水处理的研究还比较缺乏。通过建立污水循环模式下的人工湿地处理系统可以对配置了不同植物的表流湿地的净化富营养化水体的效果进行量化，从而为表流人工湿地污水处理系统中湿地植被的定向配置提供科学依据。湿地填料床中装填着各类填料，当污水流经填料床时，水中的氮、磷、悬浮物等污染物能够被填料的孔隙结构吸附、过滤，从而使得污水得到初步净化。再经湿地植物的富集、吸收，填料、土壤、植物根系等所含的微生物的生物化学反应进一

步去除水体中的污染物。如果利用人工湿地对城市的中水进行深度处理净化，其出水中的 COD, TN, TP, PH, SS 等指标能够基本满足渔业、灌溉、候鸟栖息等多方面需求。

1.3 人工湿地系统净水技术

1.3.1 人工湿地的概念

在 1971 年在伊朗南部海滨小城拉姆萨尔，来自 18 个国家的代表共同签署了重要的《湿地公约》，其中人工湿地泛指人工建造的各类功能型水域，是一种广义概念。

在科学研究中关于人工湿地的定义有所不同，科学家们从人工湿地系统的组成出发，从人工湿地的净化原理出发分别对人工湿地系统进行了定义^[30-31]。一般认为人工湿地是一种人工生态系统，由人工进行设计建造并对其运行进行监督控制的，能够对自然湿地进行模拟。

1.3.2 人工湿地的分类

根据湿地中种植的主要湿地植物的种类不同，可以将人工湿地系统分为三类。以浮水植物为主要种植植物的系统是浮水植物系统，它能够有效地去除硝酸盐中的氮，但是处理植物类型有限，人工管理要求较高，需要定期收割处理；沉水植物系统主要种植的湿地植物是沉水植物，这种湿地系统多在初级处理和二级处理后的精处理中使用，它对水位的控制要求较高，既要求水生植物能够完全淹没于水中，为避免会影响植物光合作用因此其水位也不能太高；而以挺水植物为湿地的主要种植植物的人工湿地系统即为挺水植物系统。

根据污水在湿地床中的流动方式，人工湿地可被分为：表面流、水平潜流、垂直流三种湿地。其中与自然湿地在各个方面最为接近的是类似于沼泽的表面流湿地。污水以较慢的速度从湿地表面流过，与湿地中的植物水下茎、杆上形成的生物膜接触，从而去除水体中的有机物，其所需投资的资金较少、操作相对简单，但存在占地面积过大，水利负荷小等问题，因此其净化能力有限，且系统运行时易受气候影响。潜流湿地由于污水从填料床的一端水平流过填料床中的基质，所以它的水力负荷和污染负荷相对较大，对水体中的 N、P 的去除效果逊于垂直流湿地，但是对水体中 BOD、COD、悬浮污染物

及重金属有较强的处理能力。垂直流湿地的污水从进水口进入后，水流纵向垂直流向湿地填料床基质的地部，这种湿地系统的硝化能力强，控制相对复杂。

人工湿地按照设计功能类型划分为：以弥补自然为功能的人工湿地、以水质处理为目的的人工湿、以滞洪缓流为目的的人工湿地、以养殖为目的的人工湿地。

1.3.3 人工湿地的组成

水体、人工填料（基质）、湿地植物和微生物这 4 个要素共同组成了人工湿地污水处理系统。

(1)水体。人工湿地系统中的水主要来自需要处理的污染水源，根据湿地的种类的不同，污水在系统中的流动方式也不同。同时，湿地系统中的水体也会受降雨、蒸发、基质的性质及植物的影响。

(2)人工填料（基质）。人工填料（基质）能够选择的种类较多，如石块、砂粒、沸石、石灰石、矿渣、煤渣和活性炭等^[32]。它的多孔隙结构能够蓄纳需要净化的污水；支撑湿地植物，为其提供固根所需要的载体，并能够在一定程度上提供植物生长所需的营养物质；同时它也是转化水体中的污染物时发生物理、化学和生物转化的场所。目前常用的人工湿地基质这些基质可以为微生物的生长提供稳定的依附表面。基质通过吸附、吸收、过滤、络合反应和离子交换等物理、化学作用能够吸收、净化污水中的氮、磷及其他污染物，因此人工填料（基质）在人工湿地污水处理系统中起到极为重要的作用，也是填料床中最主要的部分。

(3)湿地植物。湿地植物是人工湿地系统的重要组成部分，其净化功能显著，但是自然环境和地域条件都会对它产生较大的影响^[33]。湿地植物进行光合作用后，能够向人工基质和水体输送氧气。在湿地系统中通过吸附和代谢发挥着重要处理作用的微生物是多种多样的，它们喜好的氧气环境不同，而湿地植物的根系周围无论是好氧、缺氧还是厌氧的环境都能够形成，从而能够满足多种微生物的生存需要。在湿地植物的生长中，可以吸收污水及填料表面吸附的氮、磷、有机物等营养物质，达到削减污染物的作用。某些植物本身对特定重金属有较强的吸收能力，因此可以对特定的工业污水起到良好的净化效果。如何选择合适的湿地植物，不仅要选择适应当地的土壤和气候条件的植物，同时应当注意其观赏性，在游人流量大的活动空间，植被配置应以花为主^[34]。不同的湿地

植物对不同污染物的去除效果也并不相同，因此选择湿地植物应当根据人工湿地的净水需要和环境条件的不同，进行合理的设计、选择，如果挑选多种能够相互取长补短的植物进行搭配使用，更有利于提高湿地系统的污水净化效率^[35]。

(4)微生物。人工湿地系统中含有多种微生物，其中以细菌的数量最多，可达到基质微生物总数的 70-90%，放线菌和真菌也是人工湿地系统中的主要微生物。处理污水时，有机物的降解和转化主要在植物的根区由微生物来完成的。这些微生物的代谢作用能够对人工湿地系统的众多功能起调节作用，而且自然界中只有在微生物的帮助下的 C、N、P 等元素才能完成其循环。

1.3.4 人工湿地系统处理污水的技术特点

人工湿地系统污水处理技术的优势在于：

(1)经济效益好，所需的投资资金少，建设、运营成本低廉，并且易于维护。

(2)污水处理系统组能够根据实际需要有针对性的进行多种组合。人工基质的选择单一基质使用和组合使用，并且某些基质的组合要优于单一基质的处理能力。例如选取石灰石作为基质能够有效的除去污水中的磷，但是如果同时需要去除氮、磷则最好选用沸石-石灰石组合作为基质。而湿地中的可以选择的水生植物的类型也十分丰富，挺水植物、浮水植物、沉水植物、观叶植物、赏花植物；根据不同的湿地性能需要可以选取不同的植物进行组合，而不同的植物对不同的污染物质去除效果也有一定的差异。例如茭白 (*Zizania latifolia*)、芦苇(*Phragmites australis*)能够较好地去除水体中的 N、P 污染物。

(3)污水处理效果优于传统工艺。如果人工污水处理系统的进水浓度较低，其 BOD_5 的去除率十分高，一般能够达到 85-95%之间^[36]，而 COD 的去除率也可达 80%以上，去 N 除 P 的能力也能达到 50%左右^[37]，而对于细菌、悬浮物和重金属也能起到不错的去除效果。

(4)绿化效果显著且能带来一定的经济效益。人工湿地中于栽种有大量的水生植物，不但能够增加绿化面积，而且通过对湿地植物的选择，可以如同自然湿地一样，形成美观雅致的环境。成规模的人工湿地还能够消除城市热岛效应，为人们游玩娱乐城市生态景观进而带来一定的经济效益。

人工湿地系统污水处理技术的缺点在于：

(1)系统运行受气候影响大。人工湿地中种有大量湿地植物，湿地植物的生存状况直接影响湿地的处理效果。受季节、气候变化影响，植物夏季繁茂，冬季多枯萎，因此人工湿地系统受气候影响大。此外，冬季地表水容易结冰，湿地水流收到抑制，也会对湿地的处理效果产生影响。

(2)占地面积较大，无法在市区大面积推广。污水同过湿地时，需要与湿地植物和湿地中的人工基质充分反应，污水在湿地中流动的时间和空间是否充足直接关系到净化效果。而湿地的入水需要经过一定的预处理，也需要有备用池在填料、植物等达到纳污能力的饱和时来交替运行，因此人工湿地污水处理系统的占地面积有时可以达到传统污水处理厂的2、3倍以上，这在寸土寸金的市区无法大面积推广，一般只能选择建在市郊区域。

(3)管理相对复杂，易出现吸收能力饱和或系统阻塞淤积现象。人工湿地系统在有效地去除污水中污染物质的同时，其中一部分污染物，如重金属等，会在植物内部积累，因此人工基质和湿地植物都有最佳的使用时间，随着时间的推移，污染物质逐渐在人工基质和湿地植物中积累，甚至达到吸收饱和现象。而湿地微生物随着时间的推移也会大量繁殖，可能会因此产生系统淤积阻塞现象，导致水力传导性降低，湿地处理效果减弱，更会影响人工湿地系统的运行寿命降低。因此需要定期更换基质或者对基质进行去龄，对植物也要有定期的收割、补种。

1.4 研究意义

重度缺水的北京市对于湿地的依赖性极强^[27]。不管是保护生物的多样性、维护生态平衡、稳定环境减少水土流失、发展北京的区域经济，湿地都起到了极为重要的作用，因此在水资源日益短缺的今天湿地系统越发得到社会各界的重视。因此保护湿地资源 and 对其合理开发利用具有着重要的意义^[28]。

北京市湿地资源的现状并不乐观，水资源情况是十分严峻的，北京市湿地保护建设实施方案》的提出就是在政府和湿地开发管理部门在逐渐认识到湿地资源、水资源的严峻形势，了解湿地保护的重要性后推出的，北京市政府更是将如何对湿地保护与修复入

了北京市整体规划之中^[29]。但是由于国内对湿地特别是人工湿地的研究尚处于起步阶段，亟需相关研究分析。

坐落在第九届中国国际园林博览会园东南角的北京园博湖人工湿地系统是一项承载着永定河丰台段的再生水水源净化功能的重要工程项目。它选址永定河园博湖右岸的砂石垃圾回填坑，以复合垂直流为湿地的主要工艺，以净化清河再生水厂的再生水、供给园博湖用水、恢复永定河河道的生态功能为主要功能。

多年的干旱少雨造成永定水源极度紧缺，河床干涸，沙化严重。为解决这一问题，根据《永定河绿色生态走廊建设规划》建设“五湖一线”和沿河两岸建设生态绿色发展带，北京市建设了人工湿地对清河再生水厂的再生水进行深度净化，净化后的再生水能够满足河道用水标准，作为河道水源入河。北京园博湖人工湿地系统是目前亚洲最大的潜流型人工湿地，研究价值极高。它就是根据《永定河绿色生态走廊建设规划》选址建造的，是基于“以水带绿，以绿养水”的新理念，利用生态修复新技术，承载永定河丰台段再生水水源净化作用的重要工程项目。

1.5 研究目标

我们选取北京园博湖人工湿地系统作为研究对象，通过查阅文献资料，收集气象水文数据，分析北京园博湖人工湿地系统的实施方案，探求研究其水源净化工艺确定的原因，并通过实际对北京园博湖人工湿地系统的监测、取样测量、数据分析，将该湿地系统按照单个净水单元，串联的净水单元组（区域）和湿地系统整体划分，分析单个净水单元的安排布设，净水原理，比较单元组之间的净水能力，湿地系统整体的净水效果，湿地系统在不同季节的净水能力，初步评估人工湿地系统的水质净化潜力及效率，并对北京园博湖人工湿地系统现存问题提出建议、意见。

1.6 研究方法

(1)文献分析法

通过对大量的国内外文献进行查阅、学习，对文献内容进行归纳总结，了解人工湿地污水处理技术的理论知识、最新的研究成果和研究方向，对现有案例进行综合分析，比较各类人工湿地系统处理技术，全面了解人工湿地。

(2) 资料收集法

通过对气象、水文信息的资料收集，了解北京园博湖人工湿地系统所在区域的气象、水文情况，为后期的研究、实验和总结分析提供支持依据。

(3) 实地调查法

对北京园博湖人工湿地系统进行实地调查，了解其建筑规模、设计参数、功能要求、工艺选择，并进行总结归纳，分析其工艺确定的原因。

(4) 实验法

以北京园博湖人工湿地系统为实验对象，选取合适的检测点和检测时间，做好相关的检测准备工作。在实验期间，做好取样分析和数据监测工作；实验后期，对已有的数据进行分析，研究，并得出相应结论。

1.7 研究内容

通过实地考察确定北京园博湖人工湿地系统的湿地平面布置、主要建筑物分布情况，确定北京园博湖人工湿地系统的湿地水力工艺流程。在系统的了解其建筑布置和工艺流程后，选取合适的监测点，做好检测准备。在潜流湿地的四个分区中，每个区分别选取三个单元湿地进水阀井及与其相对应的出水阀井作为监测点，并取其平均值作为监测数据。根据北京园博湖人工湿地系统在不同季节的情况，按照夏、冬两季选择合适的检测时间做好水质检测工作。以 PH、NH₄-N、TP、COD、SS 为主要的检测指标。

第二章 北京园博湖人工湿地系统工程概况

2.1 综合说明

北京园博湖人工湿地系统是承载着永定河河道生态恢复功能的重要工程项目，肩负着永定河丰台段再生水水源净化功能。它坐落在第九届中国国际园林博览会园东南角，位于莲石湖西南岸，永定河园博湖右岸。

永定河是海河流域七大水系之一，也是北京地区最大河流，流域面积 47016km²，全长 747km，其中北京段长约 170km。永定河北京段按河道不同特征和防汛特点分为三段，自门头沟区流入石景山区后，经五里坨、麻峪、庞村、水屯等地，由衙门口村南流入丰台区，最后经房山区转入河北省，共经过 5 个区。20 世纪 80 年代以来，为发展北京西部工业建设，北京市不得不将永定河有限的水资源用于此，随着永定河水资源的使用和北京市水资源缺乏的事实，三家店以下河道逐步出现干涸、断流等情况，由于过度的挖沙取土，河道上大大小小的沙坑到处都是，包括原北京园博湖人工湿地系统所在地在内的河道在治理前是逐渐沙化的到处坑壁陡峭深坑的荒滩，风沙弥漫。随着沿河岸地区的经济发展，垃圾和入河污水排放量逐步增加污染河道，部分沙坑填埋形成垃圾坑，植物无法生长河床沙化严重，永定河生态环境日趋恶劣。为改变这一局面，北京市水务局、市发改委按照总体规划的要求，积极开展永定河的综合治理工作，致力于将永定河建成“有水的河、生态的河、安全的河”，努力恢复北京“母亲河”的形象，并沿河发展社会经济和生态文明建设。在防洪安全基本得到保障的前提下，永定河生态环境改善工程正在有计划地逐步实施。永定河卢沟桥-三家店段的综合整治工程在 2008 年开始实施，该段河道自此初步具备生态修复的前提和基础条件。建设京西生态屏障，服务水岸经济，建设宜居城市的目标是市委、市政府在 2009 年针对永定河多年断流干涸、生态退化的局面提出的，《永定河绿色生态走廊建设规划方案》相应产生。目前平原段门城湖、莲石湖、晓月湖、宛平湖已初具规模、沿河两岸建设生态绿色发展带逐步建立。

北京永定河园博园位于莲石路下游右岸，东临永定河新右堤，西至鹰山公园，南起梅市口路，北至莲石西路，依托永定河道在长约 4.6km，宽 0.24-0.96km 的永定河狭长滩

地上与卢沟桥遥相呼应，作为城市段沿河生态绿色发展带主要规划公园的北京永定河园博园也是 2013 年第九届北京国际园林博览会的举办场所。

总面积约 40 万 m^2 的北京园博湖人工湿地系统位于永定河莲石路下游右岸老滩地上，北起北京永定河园博园国际展园，南接北京永定河园博园南端梅市口路，西有高架铁路——京石高铁专线横空而过，东临永定河莲石路下游。北京园博湖人工湿地系统作为北京永定河园博园的主要建设内容不但发挥体现园博园生态公园的重要景观功能，更需要承载永定河丰台段再生水水源净化的重要任务，保障永定河“四湖一线”及园博湖水质达到永定河水质功能区划目标Ⅲ类（河道）水标准，发挥永定河水源净化的功能，同时承载永定河河道生态恢复功能，北京园博湖人工湿地系统位置见图 3-1。

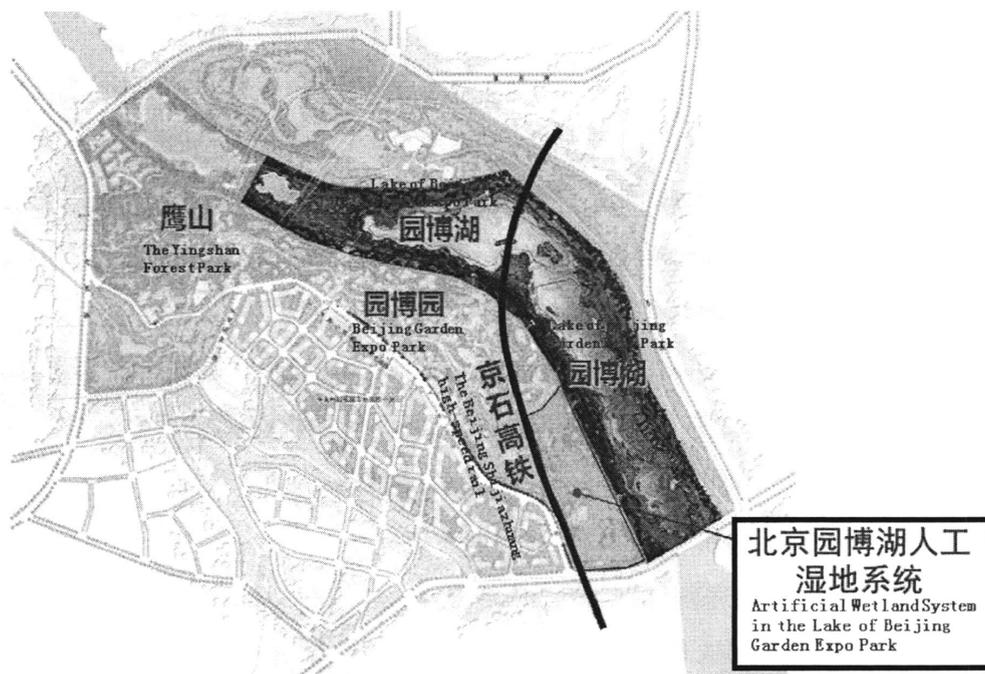


图 2-1 北京园博湖人工湿地系统位置图

Fig.2-1 Location Map of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

2.2 水文及水资源情况

2.2.1 水文气象条件

北京园博湖人工湿地系统位于石景山、门头沟区交界处，属温带大陆性季风气候，全年四季分明，天气多变，多年平均气温为 11.7℃。冬季寒冷干燥，盛行极地大陆气团，在高纬内陆偏北风的影响下年极端最低气温可达-22.9℃；夏季暖热多雨，雨热同季，在极地海洋气团等气团的影响下，盛行东和东南风，年极端最高气温可达 40.2℃，冬夏两季气温变化较大，秋季多风少雨。

2.2.2 水源情况

永定河流域位于海河流域西北部，发源于内蒙古高原的南缘和山西高原的北部，上游有桑干河、洋河两大支流，两河在河北省怀来县朱官屯汇合后称永定河，注入官厅水库。在库区纳妫水河，经官厅山峡，于三家店进入平原，至梁各庄出北京市界，经天津市北部入渤海。永定河总流域面积 47016km²，其中官厅以上流域面积 43480km²。流域地势西北高、东南低，山区面积占全流域面积的 95.8%。

永定河官厅水库至三家店拦河闸称官厅山峡段，区间流域面积 1600km²，主要支沟为沿河城沟、湫河、清水河、下马岭沟、清水涧、苇甸沟、樱桃沟等；永定河三家店以下至卢沟桥拦河闸段，属平原河道，区间流域面积约 200km²，除门头沟、中门寺沟、冯村沟、高井沟、小哑叭河等支沟汇入外没有大的支流汇入。

北京园博湖人工湿地系统所处的永定河流域由于多年干旱少雨，永定河卢三段 6 条支流河道入永定河的雨水量十分有限，而永定河卢三段周边门头沟再生水厂、河西再生水厂等再生水配置以地区消纳利用为主，难以对永定河卢三段的水源形成补充作用。因此北京园博湖引用清河再生水作为主要水源。

2.3 工程任务

2.3.1 湿地净化处理任务

北京永定河园博园总面积 513 万 m^2 。其中，园博湖占地 246 万 m^2 ，占北京永定河园博园总面积的 48%。而总面积约 40 万 m^2 的北京园博湖人工湿地系统需要承载园博湖水质净化功能，同时肩负着永定河水源净化功能。由于自然条件限制，北京园博湖引用清河再生水作为主要水源。清河再生水水质主要指标为国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) IV类(河道)，不符合永定河水质功能区划目标 III类(河道)水(总氮除外)的水质标准，见表 2-1。因此北京园博湖人工湿地系统需要在清河再生水厂提供给永定河“四湖一线”的再生水入河前完成对再生水的进一步净化处理任务，以解决清河再生水厂供给永定河各湖水源不达标问题，并在一定程度上完成相关湖泊、溪流水质日常维护任务。因此建设湿地主要功能为净化再生水水源，同时在特殊工况下兼顾河道各湖循环水的净化处理。

表 2-1 地表水环境质量标准基本项目标准限值表

Tab.2-1 Basic items of environmental quality standards for surface water standard limit value table

序号 No.	标准值 Standard values 分类 Classifications 项目 Items	I类 Classification I	II类 Classification II	III类 Classification III	IV类 Classification IV	V类 Classification V	
1	水温(°C) Water temperature (°C)	人为造成的环境水温变化应限制在: 周平均最大温升≤1 周平均最大温降≤2 Range of water temperature change caused by artificial reasons: Average maximum temperature rise each week ≤1 Average maximum temperature drop each week ≤2					
2	PH值(无量纲) PH values (without dimensions)	6-9					
3	溶解氧 ≥ Dissolved oxygen ≥	饱和率 90% (或 7.5) Saturation factor 90% (or 7.5)	6	5	3	2	
4	高锰酸盐指数 ≤ Hypermanganate index ≤	2	4	6	10	15	
5	化学需氧量 ≤ COD ≤	15	15	20	30	40	
6	五日生化需氧量 ≤ BOD ₅ ≤	3	3	4	6	10	
7	氨氮 ≤ NH ₃ -N ≤	0.15	0.5	1	1.5	2	
8	总磷(以 P 计) ≤ Total phosphorus (as measured by P) ≤	0.02(湖、库 0.01) (Lakes natural or man-made 0.01)	0.1(湖、库 0.025) (Lakes natural or man-made 0.025)	0.2(湖、库 0.05) (Lakes natural or man-made 0.05)	0.3(湖、库 0.1) (Lakes natural or man-made 0.1)	0.4(湖、库 0.2) (Lakes natural or man-made 0.2)	

第二章 北京园博湖人工湿地系统工程概况

(续上)

序号 No.	标准值 Standard values 分类 Classifications 项目 Items	I类 Classification I	II类 Classification II	III类 Classification III	IV类 Classification IV	V类 Classification V
9	总氮(湖、库,以N计) ≤ Total nitrogen (as measured by N) ≤	0.2	0.5	1	1.5	2
10	铜 ≤ Cu ≤	0.01	1	1	1	1
11	锌 ≤ Zn ≤	0.05	1	1	2	2
12	氟化物(以F ⁻ 计) ≤ Fluoride (as measured by F ⁻) ≤	1	1	1	1.5	1.5
13	硒 ≤ Se ≤	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
14	砷 ≤ As ≤	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1
15	汞 ≤ Hg ≤	5E-05	5E-05	0.0001	0.001	0.001
16	镉 ≤ Cd ≤	0.001	0.005	0.005	0.005	0.01
17	铬(六价) ≤ Hexavalent chrome ≤	0.01	0.05	0.05	0.05	0.1
18	铅 ≤ Pb ≤	0.01	0.01	0.05	0.05	0.1
19	氰化物 ≤ Cyanide ≤	0.005	0.05	0.2	0.2	0.2
20	挥发酚 ≤ Volatile hydroxybenzen ≤	0.002	0.002	0.005	0.01	0.1
21	石油类 ≤ Petroleum ≤	0.05	0.05	0.05	0.5	1
22	阴离子表面活性剂 ≤ Anionic surface-active agent ≤	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

(续上)

序号 No.	标准值 Standard values 分类 Classifications 项目 Items	I类	II类	III类	IV类	V类
		Classification I	Classification II	Classification III	Classification IV	Classification V
23	硫化物 ≤ Sulfide ≤	0.05	0.1	0.2	0.5	1
24	粪大肠菌群 (个/L) ≤ Coliform group (pieces/L) ≤	200	2000	10000	20000	40000

2.3.2 其他任务

北京永定河园博园工程定位为：河湖净化之肾——永定河再生水源深度净化厂，水生动植物家园——再现完善的湿地生态系统，野外科普基地——传播生态文明知识，华北最美的人工湿地——人工湿地生态展园。其建设思路为：废坑高效利用、地基复式处理、环保材料应用、水体自然净化、雨水调蓄利用、生态景观再现，以达到取自然之材，还自然之色的设计主题，因此北京园博湖人工湿地系统还肩负着丰富北京永定河园博园景观内容、改善和提高区域水环境和水景观、传播生态文明知识的工程任务。

丰富北京永定河园博园景观内容的任务。园博湖人工湿地系统围绕水源净化工艺流程打造了方池听水、花堰分水、栈桥闻水等七大景观，整个湿地俯瞰如船帆，远观似梯田，近看是花海，清水在水草中流淌，路桥在百花中盘桓，动静结合、曲直相融。

传播生态文明知识的任务。北京园博湖人工湿地系统设有以环境保护为主要科普教育内容的科普教育展示区，同时在湿地的道边、休息凉亭等处设有大量介绍湿地知识的宣传牌。图文结合，用较为简单清晰的方式对现有湿地的类型、北京园博湖人工湿地系统的设计理念、湿地意义等做了介绍。不但简单易懂，而且富有趣味性，在游人参观、休息的同时，能够容易地获取相关信息，加大游人对湿地功能的了解，进而加深保护自然的意识。

固坡、水土保持、景观绿化功能。园博湖人工湿地系统采用乡土物种为主的乔灌木相结合的方式，大面积、色彩丰富的野花组合，形成开阔大气的景观特色，局部堤坡、滩

地等处布置了细致、造型独特的地景艺术区，植物的生存繁衍可以固坡、保持水土，加大景观绿化面积。

洪水控制功能。园博湖人工湿地系统利用低洼地势可滞蓄洪水 1400 万 m^3 ，一旦发生洪灾，湿地可以将部分洪水储蓄起来，并通过下渗补充地下水，直接减小下游的洪水量，减轻下游防洪压力，进而能够保护下游人民群众的生命财产安全。

生物繁衍功能。园博湖人工湿地系统内的特色乔灌木、地被、水生植物达 30 余种、放养底栖动物 2 种，放养鱼类 10 余种，而湿地的形成本身也可以吸引迁徙的鸟类停留，对生物的繁衍、生物多样性的保持都有良好的作用。

提升城市形象、改善居住环境任务。湿地的建设能够改善城市的整体形象，影响周围的人居环境和环境质量，加强是现代城市建设的一个重要指标。

2.4 小结

北京园博湖人工湿地系统作为目前亚洲最大的潜流型人工湿地，是我国的湿地系统研究的重要研究对象，也是承载永定河丰台段再生水水源净化的重要工程项目。它在去除水中的污染物的同时，兼具观赏性能、科普宣传功能和经济效益。因此，北京园博湖人工湿地系统备受瞩目，其工艺结构和净水能力的研究对于我国湿地资源的保护和合理利用提供很好的范例和经验，具有尤为重要的意义。

第三章 水质净化工艺研究

3.1 研究目标

以北京园博湖人工湿地系统作为研究对象，通过查阅文献资料、资料收集、实地调查等方法，了解其建筑情况、植被情况、水质净化工艺流程等，并对使用该工艺的原因进行分析。

3.2 主要建筑物及功能划分

3.2.1 主体建筑

北京园博湖人工湿地系统通过砖、墙、堰等可分为 6 个区 29 个单元，设置 9 座观景桥、景观木栈道 2.1 公里，科普廊亭 21 座，管理服务、科普教育展区、观景塔等各 1 处。其中水源净化湿地划分为 4 个区，包括调压池 1 座，布水池 1 座，排水管道 2994m，潜流湿地 29.48 万 m²，表流湿地 3.14 万 m²，道路等 3.16 万 m²，绿化隔离区 4.22 万 m²，管理房 301m²，植物垃圾回收站 1 座，部分景观亭设施等。

北京园博湖人工湿地系统的进出水系统由四部分组成：由循环水总管、再生水总管、园博湖循环水管、连接管道、调压调量池和计量控制阀井等组成的水源管道及调蓄池；包括分区给水管、布水渠等的湿地进水管渠；在湿地内部起到布水、集水、排空作用的管道和通气管组成了湿地单元内管；以排空干管、出水干管为主的湿地出水管道。

表 3-1 北京园博湖人工湿地湿地分区面积表

Tab.3-1 Partition Area of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

序号 No.	位置 Location	面积(m ²) Area	占总面积比例 Proportion of total area
1	一区 Area 1	71630.7	20.02%
2	二区 Area 2	71656.54	20.02%
3	三区 Area 3	75723.77	21.16%
4	四区 Area 4	75845.25	21.19%
5	潜流湿地总净占地面积 Total net area of subsurface flow constructed wetlands	294856.26	82.40%
6	表流湿地 Surface flow wetland	31420.97	8.78%
7	道路等 Road,etc.	31568.52	8.82%

3.2.2 分区布置及原因分析

北京园博湖人工湿地系统设有四个潜流湿地分区，将潜流湿地由北向南依次分割为四个区；两个表流湿地分区，分别位于潜流湿地的南北两侧，各区之间通过道路分割，见图 3-1。其原因是：潜流湿地作为工程水处理的主要场所，其构型狭长、面积较大，如果不分区则无法满足湿地的水力要求，而将湿地分区建设可以强化净水效果，且便于维修、管理。南、北两个表流湿地作为潜流湿地出水调蓄塘、园博园景观水面、公园绿化用水塘可以为湿地出水滞蓄和水净化效果展示，同时对湿地出水进行进一步净化，通过管道将净化后的再生水输入永定河联动溪流，统一调度进入河道各湖。

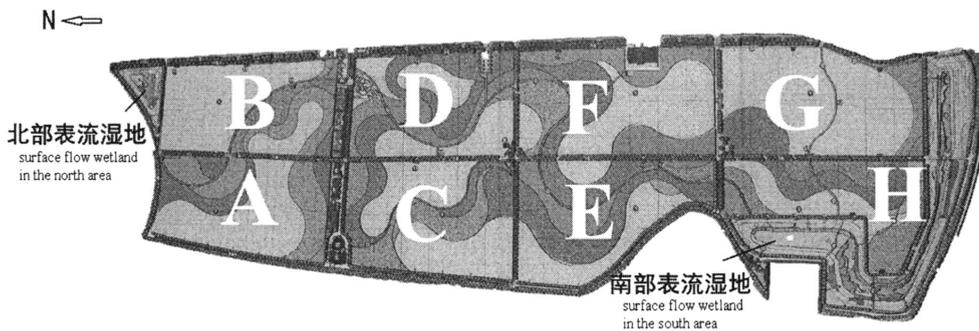


图 3-1 北京园博湖人工湿地系统分区图

Fig.3-1 Partition Map of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

北京园博湖人工湿地系统，每个分区根据地块形状，由两级串连单元和单一单元组成。南、北两个表流湿地面积较小，由单一单元组成；四个潜流湿地作为北京园博湖人工湿地系统净化的主体工程，每个分区均包含上下游两个二级湿地串联，每级湿地又由 6-8 个湿地单元并联组成，每个湿地单元由上行池和下行池组合而成，两池之间设置布水花墙。潜流湿地分区和分级湿地之间通过道路进行分割，湿地各个单元之间设置隔墙相互分割。潜流湿地的四个分区中，总体水力流向为自西向东流，但是其南部第四区的总体水力流向与之相反，为自东向西流向，一区潜流湿地出水进入北部表流湿地，二、三、四区潜流湿地出水进入南部表流湿地。表流湿地通过管道将净化后的再生水输入永定河联动溪流，统一调度进入河道各湖。

这样布置的原因是：北京园博湖人工湿地系统高程总体上由北向南高程逐步降低，北部西高东低，南部东高西低，不同的进水位置、不同的总体水力流向、不同的出水表流湿地，可以使各区之间和各串联单元之间按地势和水力要求依次产生一定高度的落差，同理潜流湿地与表流湿地产生一定落差，主要满足湿地布水水力损失要求以及现状地形地势走向的需求。每个湿地单元由上行池和下行池组合而成，两池之间设置布水花墙，联通了两个池体下层水流，保障湿地下行池与上行池水流通畅，完成湿地单元水体复合流态的转变，而分区净化和二级湿地串联可以更好地提升湿地净水效果。潜流湿地分区、二级湿地串联、每级湿地又再次分为 6-8 个湿地单元并联的结构，对湿地水力控制、维护管理、防止短路有重要作用。潜流湿地四个分区之间、各级湿地之间以道路、边墙为分隔，可以节省的土地面积，最大限度利用土地资源。

3.3 湿地水力工艺及相关分析

3.3.1 水力工艺

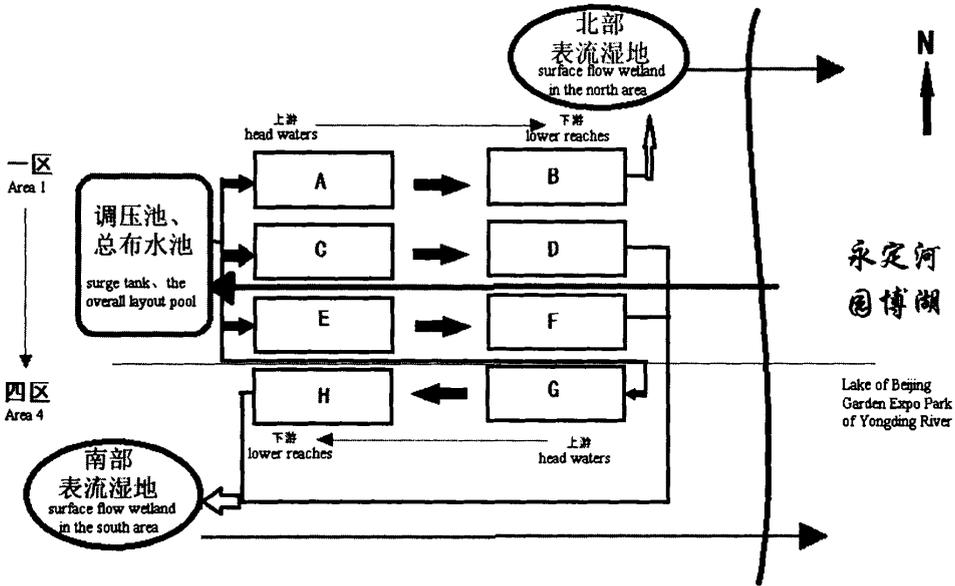


图 3-2 北京园博湖人工湿地系统水力工艺流程图

Fig.3-2 Hydraulic Flow Chart of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

水力流程见图 3-2。北京园博湖人工湿地系统以净化处理再生水为主，同时净化循环河水，因此湿地来水为一股再生水和两股循环湖水，进水的三个水源总管位于湿地临河侧永定河右堤道路中，采用压力钢管，管径 DN1200，分别为再生水干管、宛平湖循环水干管设置分水口铺设输水支管，以及园博园段河道循环干管三条管线，进水分别通过这三个水源总管输入到湿地水源调压池中。

水源调压池设置在湿地一区和二区西侧中部最高处，三个水源总管自永定河右堤进入湿地调压池后，经水源总管进入湿地总布水池，湿地总布水池池体采用圆形布置，钢筋混凝土结构，调蓄池四周均匀设置布水槽，通过水源总管和输水管道均匀分配水量进入潜流湿地处理区。

水源总管主要为连接湿地水源调蓄池和湿地总布水池之间的管道，沿一区和二区之间道路铺设，输水管道将再生水或循环水输入湿地布水池；水源经各分区布水渠调流后，

进入湿地布水干管，然后输送到各支管，湿地分区进水管自总布水池输出，主要沿湿地边堤及湿地内道路布设；湿地分区进水管均为钢管，根据水量大小，一区湿地、二区湿地采用 DN500 钢管，三区 and 四区湿地采用 DN600 钢管。

湿地给水进入湿地分区后，采用明渠进行单元配水，在湿地分区单元首端，设置布水渠，湿地布水渠底部不设置坡度，同时设有分区布水渠配置检修排空设施；湿地单元内部设有用于布水、集水的湿地内管，湿地内管使用低压给水 PVC-U 管，是湿地单元内部的布水、集水管道，使用的管径有 dn110、dn200 和 dn300mm 三种，属重力流管道，主要铺设在湿地填料中，分上层布水和集水管，下层排空管。管道末端配套设置检修阀井，采用钢制蝶阀和钢筋混凝土地面操作式蝶阀井。

湿地出水管主要为单元出水管、分区一级湿地排空干管、分区出水干管等，湿地排水管根据水力流程布置，分为一级排空管和湿地出水排水管。北一区单独排水，一级排空管和湿地出水排水管均采用 DN700 排水管；二区、三区和四区联合排空，自二区段-四区段分别采用 DN700、DN800 和 DN1000 排水管，三区段采用 DN800 排水管；二区和三区联合排水，二区段采用 DN700 排水管，三区段采用 DN800 排水管。一级湿地排空管与各一级湿地单元排空阀井连接，湿地出水排水管与各二级湿地出水阀井、排空阀井连接。根据湿地工艺，一级湿地排空管布设于一级和二级湿地之间道路，湿地出水排水管布设在二级湿地外围道路。

这样设置的原因在于：湿地布水和集水面积较大，通过水源调压池可以调蓄水源、调节水力负荷，释放过大的管道压力；经过调蓄后的水源，通过水源总管将可以较为平稳地输送到湿地总布水池，以满足湿地均匀布水要求。湿地布水渠底部不设置坡度，可以基本保证渠道内首尾两端水面高程基本相当，实现各单元的均匀布水。不同型号的进水管，能够在满足布水需要的同时，减小水力损失。闸门的设置，能够有效的保障人工控制进、出水，便于渠道的检修和维护。

3.3.2 进出水时间分配

在进水时间分配上，主要分为连续进水和间歇进水两种方式。其中，再生水采用连续进水方式，循环水进水将采用间歇与连续相结合方式，即在一天当中分为运行和间歇两个阶段，在每一次进水中连续运行，每天连续配送 16 小时，间歇 8 小时。这样设计的

原因是：间歇流时的排水过程中，在大气压的作用下，床体介质中的微小孔隙发生大气复氧变化，湿地的含氧量的显著提高能够缓解水生植物根系放氧不足等问题，在这一过程中的大气复氧对污水中的有机物的氧化作用明显高于湿地植物根系放氧的作用，因此湿地系统处理能力能够加强。间歇流对 COD、NH₄-N、TP 等指标的平均去除率明显高于连续流人工湿地。研究表明间歇流进水能够提高床体内的含氧量，缓解植物根系放氧不足，提高了污染物去除率。

3.4 湿地净水单元格相关分析

3.4.1 净化机理

北京园博湖人工湿地系统中，潜流湿地主要采用复合垂直流湿地为该湿地系统的水质改善核心工艺流程，工艺结构见图 3-3。该工艺中，上层的填料床中种植有多种水生植物；需要净化的水源通过进水管进入湿地的净化单元格后，在填料下进行垂直流动，与填料床中的填料直接接触净化。收水管、排空管在填料底部，需要净化的水源流过填料床后通过收水管、排空管流出^[37]。

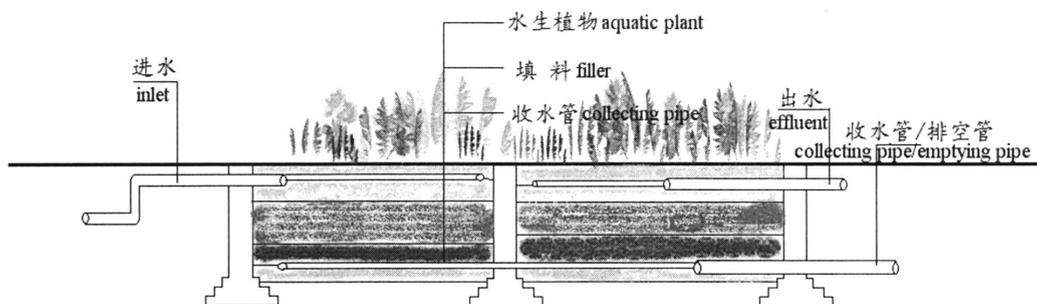


图 3-3 复合垂直流湿地工艺图

Fig.3-3 Technological Process of Integrated Vertical Flow Constructed Wetland

人工湿地系统能够通过下面的方式将污水中的有机污染物去除：截留不溶性有机物到湿地的填料床和植物根系中，并为微生物所降解利用；植物根系及填料表面的生物膜

能够将可溶解性有机物通过吸附、吸收及生物代谢降解等方式去除；吸附和沉淀下来的有机物通过更换填料、收割植物而去除^[39]，即主要工艺采用物理、化学、生物、植物相结合的方式，通过基质沉淀吸附、过滤、植物吸收、离子交换和微生物降解来达到对水体中的污染物进行高效净化的目的，其具体净化机理见表 3-2。

表 3-2 复合垂直流湿地净化机理

Tab.3-2 The Purification Mechanism of Integrated Vertical Flow Constructed Wetland

净化机理 The purification mechanism		对污染物的去除与影响 The removal of pollutants and the influence
物理的 Physics	沉降 Settlement	通过沉降去除湿地植物根脉及湿地介质中的可沉降固体; 利用絮凝剂去除可絮凝固体; 随之也能够去除 BOD、氮、磷、难降解的有机物、细菌和病毒。 Settleable solids can be removed in roots and medium of wetland plant; flocculating solid can also be removed through flocculation; then, leading to the removal of part of BOD, N, P, refractory organics, bacteria and viruses;
	过滤 Filter	由于颗粒间的相互引力作用力, 可沉降、可絮凝固体在植物根脉的阻截作用下去除; Sedimentation and flocculation solid can be interdicted and removed through the interaction of grain plant roots and the the interaction forces between particles;
化学的 Chemistry	沉淀 Precipitation	磷在特定的根脉介质中, 通过化学反应形成难溶解的化合物, 通过沉淀去除; In the special medium of roots, Phosphorus can be transferred to insoluble compounds precipitate by the chemical reaction, which is difficult to be removed;
	吸附 Adsorbent	基质和植物根脉表面的吸附作用能够通过吸附作用将磷和一些其他的难降解有机物去除; Phosphorus is adsorbed on the surface of medium and roots of plants, some refractory organic compounds can be removed through adsorption;
	分解 Decomposition	通过阳光照射或氧化还原等过程, 能够将部分难降解有机物分解, 形成稳定性较差的、较容易去除的化合物; Because the reaction process such as solar ultraviolet radiation, oxidation and so on, the refractory organic compounds can be decomposed or transferred into compounds with lower stability;
生物的 Biological	微生物代谢 Microbial metabolism	寄生于根脉中的微生物进行耗氧、厌氧反应、生物硝化-反硝化作用, 能够将凝聚性固体、可溶性固体等污染物降解成无机物, 并能够地有效去除氮。 By the microbial metabolism parasiticed on the roots of plant, cohesive solid and soluble solid can be conducted the oxygen and anaerobic rection, and pollutants degraded into inorganic materials, and Nitrogen can be removed by biological nitrification – denitrification rection;

(续上)

净化机理 The purification mechanism		对污染物的去除与影响 The removal of pollutants and the influence
植物的 Plant	植物代谢 Plant metabolism	植物能够吸收去除有机污染物,其根系的分泌物还能灭活大肠杆菌及其他病原体; The pollutants can be removed by the absorption to the organic matter of plants, and the plantroot exudates can inactive to the escherichia coli and pathogens;
	植物吸收 Plants absorb	氮、磷及难降解有机物能在很大程度上能够植物吸收,进而从水体中去除; Numbers of Nitrogen and phosphorus and refractory organic compounds can be absorbed by plants and removed by the plants;
	自然死亡 A natural death	植物能够形成的一些不利于细菌和病毒生存的自然环境,进而他们的引起自然衰败及死亡; Bacteria and viruses in the un-adapted environment can cause the natural decay and death;

3.4.2 湿地填料

北京园博湖人工湿地系统填料基质分为四层,自上至下厚度依次配置为 30cm, 30/40cm, 30cm, 30-50cm, 最底层填料厚度根据湿地单元底坡沿下游湿地方向由 30cm 增加至 50cm。湿地填料材质主要为 $\phi 4-64\text{mm}$ 碎石、 $\phi 8-16\text{mm}$ 陶粒和 $\phi 16-32\text{mm}$ 火山岩等,从上至下填料粒径确定为 4-8mm, 8-16mm, 16-32mm 和 32-64mm。其填料情况见图 3-4。

现在能够选择使用的人工湿地处理系统的基质种类相对比较单一,有时基质床容易出现堵塞问题^[40-41]。

北京园博湖人工湿地系统填料基质各层厚度设置是根据湿地工艺实际情况决定,将第一层设置为 0.3m,以保证第一层填料层厚度大于布水管管径,满足布水要求。根据湿地功能需要,底部设置一定的水力坡度,北京园博湖人工湿地系统采用坡度为 0.0025,湿地单元长度约 80m,则单元末端与前端高差为 0.2m,即第 4 层厚度为 0.3-0.5m,平均厚度 0.4m。根据人工湿地的相关研究表明,潜流湿地的理论水深宜为 0.4-1.6m,即填料深度宜为 0.4-1.6m,因此主处理层第 2 层和第 3 层理论厚度为 0.6m。北京园博湖人工湿地系统中,湿地单元下行池填料第 2 层和第 3 层均设置为 0.3m,湿地上行池第 2 层设置为 0.4m,第 3 层设置为 0.3m,第 2 和第 3 层总厚度 0.6-0.7m。

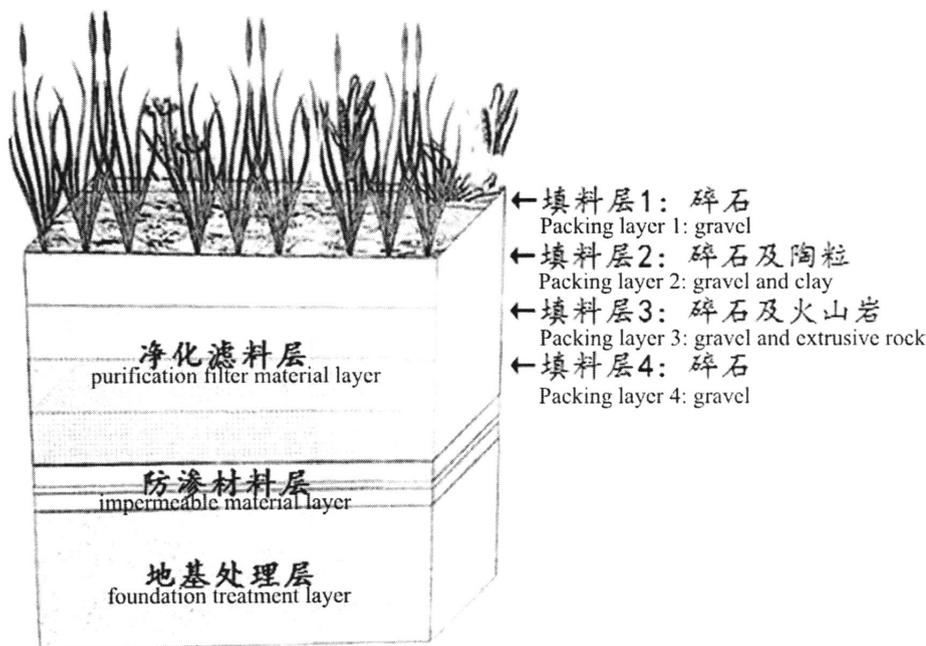


图 3-4 北京园博湖人工湿地系统填料图

Fig.3-4 Substrate of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

北京园博湖人工湿地系统从上至下填料粒径选取为 4-8mm, 8-16mm, 16-32mm 和 32-64mm 的原因在于为防止和减轻湿地堵塞和利于植物种植。湿地填料粒径的选择与湿地孔隙率有关, 为防止堵塞, 一般潜流湿地初始总孔隙率需要达到 35%-40%, 同时填料粒径还要考虑植物种植、湿地工艺结构(水平或垂直流)等要求。北京园博湖人工湿地系统的主体结构采用了复合垂直流湿地, 在该湿地类型中, 需要净化的水源通过进水管进入湿地的净化单元格后, 在填料中水流以垂直流动为主, 因此湿地填料粒径由上至下应该依次增大。

北京园博湖人工湿地系统湿地填料介质选择以碎石为主、辅以陶粒和火山岩的原因在于适用性、实用性、经济性及易得性等几个方面综合考虑。填料作为组成人工湿地的重要部分, 所选取的填料应结合各类因素全面考虑, 不能对水体使用者产生不良的影响。

北京园博湖人工湿地系统的填料选择采用的湿地填料通过不同的基质材质，不同的粒径大小，不同的配比组合的方式进行选择。这种组合方式能够结合湿地的实际情况，较为充分的考虑湿地基质的净化作用，且经济、实用。湿地工程基质选用以石灰石碎石为主材料，从适用性、经济性、易得性方面，石灰石碎石填料与其它类型填料相比具有较大的优势，且具备去磷效果好等优点。选择陶粒作为补充材料是因为它对氮、磷等营养元素有较强的吸附力，吸附容量大，价格低廉来源丰富容易再生，无毒无害不会破坏环境，有效地保水保肥能力利于植物生长与发育。火山岩滤料经过了选矿、破碎、筛分、研磨等一系列工艺，它是由含有几十种矿物质和微量元素的火山岩矿石加工成表面粗糙多微孔的粒状滤料，这样的结构为微生物在其表面生长、繁殖，形成生物膜打下了良好的基础。

3.4.3 湿地植物

园博湖人工湿地系统内生物多样性良好。有丰富的特色乔灌木、地被、水生植物，同时放养了多种鱼类和底栖动物。其中，水生植物是湿地的重要组成部分，利用这些湿地植物能够有效吸收、去除水体中的有机污染物，而植物根系的分泌物能够起到灭活大肠杆菌和病原体的作用；植物的根系周围能够形成好氧、缺氧和厌氧的环境，利于各类微生物的生存，并对污染物进行吸附、代谢。

园博湖人工湿地系统中水生植物以芦苇和香蒲（*Typha orientalis* Presl）为主，搭配栽种了菖蒲（*Acorus calamus*）、水葱（*Scirpus validus* Vahl）、茭白、梭鱼草（*Pontederia cordata*）、鸢尾（*Iris tectorum* Maxim）、千屈菜（*Lythrum salicaria*）、荷花（*Nelumbo nucifera* Gaertn）、睡莲（*Nymphaea*）、芦荻（*Arundo donax*）、凤眼莲（*Eichhornia crassipes*）等，见图 4-5。

体调压布水，确保单位面积的进水量基本相同，以防止短路等现象发生；潜流湿地作为工程水处理的主要场所，通过串、并联湿地单元格满足水力布水压力需要，分区净化水体；净化后的出水通过表流湿地的调蓄合理流入北京园博湖。通过对湿地类型的多元化应用和灵活组合，建立立体梯田式湿地，在满足工艺要求的同时，减小对原有地貌条件的改变，从而更好的与环境融合。

第四章 水质净化效果研究

对北京园博湖人工湿地系统进行定期监测、取样测量、数据分析，将该湿地系统按照单个净水单元，串联的净水单元组（区域）和湿地系统整体划分，比较单元组之间的净水能力和在不同季节的净水能力，分析人工湿地系统的水质净化效果。

4.1 研究方法

4.1.1 基础资料收集与处理

本研究需要收集的基础资料主要包括文献收集、气象水文数据收集、湿地系统的规模情况了解三个方面。通过文献查阅和资料搜索，了解北京园博湖人工湿地系统所在区域的气象水文数据；通过资料搜索和实地勘察，了解本次研究的北京园博湖人工湿地系统规模。通过基础资料的收集整理，进一步了解研究对象，为后期的研究和实验提供支持依据。

4.1.2 水质监测点布设及监测方案

通过实地考察确定北京园博湖人工湿地系统的湿地平面布置、主要建筑物分布情况，确定北京园博湖人工湿地系统的湿地水力工艺流程。在系统的了解其建筑布置和工艺流程后，选取合适的监测点，做好检测准备。在潜流湿地的四个分区中，每个区分别选取三个单元湿地进水阀井及与其相对应的出水阀井作为监测点，并取其平均值作为监测数据。监测点位置选择见图 4-1。

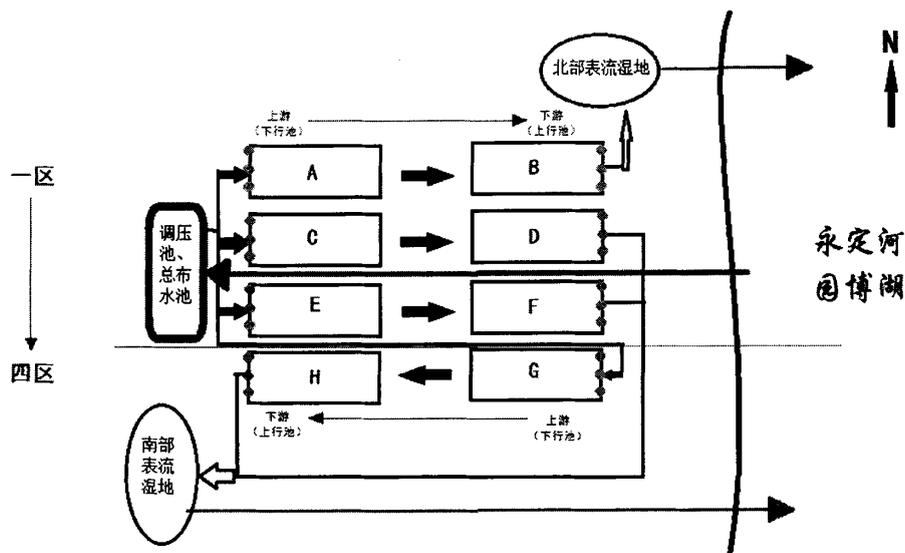


图 4-1 园博湖人工湿地系统监测点分布图

Fig.4-1 Layout of Monitoring Points in the Lake of Beijing Garden Expo Park

根据北京园博湖人工湿地系统在不同季节的情况，按照夏、冬两季选择合适的检测时间做好水质检测工作。四季的划分选择气象划分法，以阳历 3 至 5 月为春季，6 至 8 月为夏季，9 至 11 月为秋季，12 月至来年 2 月为冬季。

本次试验主要的检测指标为 PH、NH₄-N、TP、COD、SS。

北京园博湖人工湿地系统设计水质监测指标说明见表 4-1。

表 4-1 设计水质监测指标说明表

Tab.4-1 Description Table of Water Quality Monitoring Indicators

指标 Index	PH	SS (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	CODCr (mg/L)	TN (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
再生水水质 The quality of reclaimed water	6-9	10	6	30	10	1.5	0.3
人工湿地出水水质 Artificial wetland water quality	6-9	5	4	20	6	1.0	0.2
去除率要求 (%) The requested removal rate (%)	—	50	33.3	33.3	40	33.3	33.3

水中的氮磷含量是判断水体富营养化的重要指标。水中溶解氧的多少是衡量水体自净能力的一个指标。BOD₅、COD 能够反映有机物污染程度。叶绿素含量能够反映水体中藻类的数量等，在一定程度上反映水质状况。SS 是水中的悬浮含量，能够有效反映水体的清浊程度。

4.1.3 分析数据并得出相应结论

在一切准备工作就绪后，对所得数据进行处理和分析，得到每个净水单元组之间的净水能力、对指标的去除效率，比较湿地系统在不同季节的净水能力，进一步得出相应结论。

4.2 数据分析

监测数据见表 4-2 至表 4-5。

表 4-2 一区净化效果统计表

Tab.4-2 Table of Purification Statistics of Area 1

时间 Time	指标 Index	PH (mg/L)	SS (mg/L)	CODCr (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
夏季 Sumer	进水 Inlet	8.27	12.26	34.6	0.201	0.235
	出水 Effluent	8.26	6.12	23.1	0.036	0.103
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	50.08	33.24	82.09	56.17
冬季 Winter	进水 Inlet	8.40	13.45	40.3	0.384	0.141
	出水 Effluent	8.70	6.72	29.1	0.098	0.087
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	50.04	27.79	74.48	38.30
夏季去除效率与冬季去除效率之 差 (%) The difference of removal efficiency between summer and winter (%)		—	0.04	5.45	7.61	17.87

表 4-3 二区净化效果统计表

Tab.4-3 Table of Purification Statistics of Area 2

时间 Time	指标 Index	PH (mg/L)	SS (mg/L)	CODCr (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
夏季 Sumer	进水 Inlet	8.44	11.95	33.4	0.316	0.198
	出水 Effluent	8.44	5.39	22.6	0.046	0.081
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	54.90	32.34	85.44	59.09
冬季 Winter	进水 Inlet	8.26	13.74	41.5	0.495	0.153
	出水 Effluent	8.40	6.19	29.8	0.317	0.087
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	54.95	28.19	35.96	43.14
夏季去除效率与冬季去除效率之差 (%) The difference of removal efficiency between summer and winter (%)		—	-0.05	4.14	49.48	15.95

第四章 水质净化效果研究

表 4-4 三区净化效果统计表

Tab.4-4 Table of Purification Statistics of Area 3

时间 Time	指标 Index	PH (mg/L)	SS (mg/L)	CODCr (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
夏季 Sumer	进水 Inlet	8.27	11.88	31.6	0.219	0.212
	出水 Effluent	8.35	5.12	21.3	0.003	0.097
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	56.90	32.59	98.63	54.25
冬季 Winter	进水 Inlet	8.59	13.29	41.6	0.328	0.149
	出水 Effluent	8.58	6.34	30.8	0.088	0.074
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	52.29	25.96	73.17	50.34
夏季去除效率与冬季去除效率之差 (%) The difference of removal efficiency between summer and winter (%)		—	4.61	6.63	25.46	3.91

第四章 水质净化效果研究

表 4-5 四区净化效果统计表

Tab.4-5 Table of Purification Statistics of Area 4

时间 Time	指标 Index	PH (mg/L)	SS (mg/L)	CODCr (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
夏季 Sumer	进水 Inlet	9.21	12.35	34.7	0.301	0.176
	出水 Effluent	9.35	6.13	23.8	0.045	0.093
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	50.36	31.41	85.05	47.16
冬季 Winter	进水 Inlet	9.62	14.47	42.5	0.276	0.142
	出水 Effluent	9.57	7.27	29.5	0.043	0.088
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	49.76	30.59	84.42	38.03
夏季去除效率与冬季去除效率之差 (%) The difference of removal efficiency between summer and winter (%)		—	0.61	0.82	0.63	9.13

表 4-6 北京园博湖人工湿地系统净化效果统计表

Tab.4-6 Table of Purification Statistics of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

时间 Time	指标 Index	PH (mg/L)	SS (mg/L)	CODCr (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
夏季 Summer	进水 Inlet	8.55	12.11	33.6	0.259	0.205
	出水 Effluent	8.60	5.69	22.7	0.033	0.094
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	53.01	32.39	87.46	54.45
冬季 Winter	进水 Inlet	8.72	13.74	41.5	0.371	0.146
	出水 Effluent	8.81	6.63	29.8	0.137	0.084
	去除效率 (%) Removal efficiency(%)	—	51.74	28.15	63.18	42.56
夏季去除效率与冬季去除效率之差 (%) The difference of removal efficiency between summer and winter (%)		—	1.28	4.24	24.28	11.88
平均进水 Average inlet		8.63	12.92	37.5	0.315	0.176
平均出水 Average effluent		8.71	6.16	26.3	0.085	0.089
总去除效率 (%) Total removal efficiency(%)		—	52.34	30.05	73.17	49.50

4.3 净化效果分析

针对指标检测的数据及指标的去除效率来看,北京园博湖人工湿地系统能够起到对NH₄-N、TP、COD、SS等指标的净化效果。

北京园博湖人工湿地系统的净化出水对指标的去除效率基本能够满足设计标准,但是由于实际进水水质较设计进水水质略差,所以对净化出水的效果有所影响。

各区的净化效果有一定差异，二区的净化效果相对较好，四区的净化效果略差。可能存在的原因有：四个分区的入水水质有一定的差异；四个分区的净化面积大小不同；第三、四分区中含有部分表流湿地；各个湿地分区所栽种的植物不同；各个分区接待游客数量不同。

北京园博湖人工湿地系统夏季的净化效果明显优于冬季，特别是对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除效率，夏季的去除效率比冬季的去除效率高 24.28%，TP 夏季的去除效率也比冬季的去除效率高 11.88%。出现这种情况说明了湿地对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 的去除率会受到植被以及空气的影响，还会随着季节、温差受到不同程度影响，在夏季受到季节的影响，人工湿地中的植物生长繁茂，根系强壮，植物光合作用生成的氧气溶于水使水中的含氧量高，容易在根系附近生成良好的、利于微生物生存的条件，因此， $\text{NH}_4\text{-N}$ 和磷的处理率较高；冬季同样受到季节的影响，气温较低，植物枯萎，缺少了植物的光合作用，水中的溶解氧减少，二氧化碳增多，微生物减少，因而处理效率下降。在实验过程中，可以观察到冬天的时候湿地植物出现大面积枯萎，湿地水位下降，甚至出现干涸的现象，见图 5-1。因此季节的变化也会对湿地的净化效率产生影响。



图 4-2 北京园博湖人工湿地系统冬季情况

Fig.4-2 The Situation of Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park in winter

此外，由于参观北京园博园和北京园博湖人工湿地系统的游客较多，在游客中有一些人环保意识差，表现为随手丢弃垃圾、破坏湿地设施和破坏湿地植物的情况时有发生，垃圾的影响和人为对湿地植物和湿地设施的破坏也会对湿地的净化效率产生影响。



图 4-3 游人对北京园博湖人工湿地系统的影响

Fig.4-3 The Influence of Visitors to Artificial Wetland System in the Lake of Beijing Garden Expo Park

第五章 结论

北京园博湖人工湿地系统是承载永定河丰台段再生水水源净化的重要工程项目。它以清河再生水为主要净化水源，通过循环管线，引一股再生水和两股循环湖水进行循环净化，以维持水质；在湿地工艺结构上以复合垂直流湿地为主，辅以水平流湿地和表流湿地，通过对湿地类型的多元化应用和灵活组合，减小对原有地貌条件的改变，在和环境融合的同时满足工艺需要；在植物布置上，品种多样，净化功能好，观赏性强。

监测表明，北京园博湖人工湿地系统对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP、COD、SS 等指标能起到一定的净化效果，特别是对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的去除率最高可达到 98.63%，平均总去除率达到 73.17%。但各区的净化效果存在差距，冬季和夏季的净化效果相差较大。通过对北京园博湖人工湿地系统的水质监测，湿地出水基本满足永定河水质功能区划目标：国家《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类（河道）水标准。

就实地考察和数据分析情况，提出以下建议：

（1）建立健全北京园博湖人工湿地系统的管理机制。如水质检测机制、设备维修制度、游人管理制度、垃圾清理制度、植物管理制度、应急预案等。

（2）及时检测水质，定期检测设备。湿地进出水情况需要及时检测、定期检查维修装备，一旦出现问题能够及时发现，发现问题能够尽快查到源头，及时提供解决方案，以保障北京园博湖人工湿地系统的净化效率。根据湿地的水质情况和净化效率，对人工基质、湿地植物的净化效率及时评估，保证基质的处理效率，及时进行基质去龄和收割富集了污染物的植物，避免产生游积、阻塞现象，保持湿地的水力传导性、湿地处理效果和运行寿命。

（3）加大垃圾清理力度。园内出现的垃圾主要有游人垃圾和植物垃圾。植物越冬前会出现枯萎、死亡，进而产生植物垃圾；游人游玩也会带来一定量的垃圾。这些垃圾应当及时清理，避免垃圾污染水体。

（4）做好水生植物的管理和维护工作。季节、病虫害都有可能影响湿地植物，因此对生长期植物的状况应当定时进行检查，避免病虫害影响；对越冬期植物进行适当保护，

如搭建简易温室、进行塑料膜覆盖等方式对湿地植物进行保护；及时清除杂草和补种死亡植株，确保水生植物正常的生长繁殖。

(5) 应该加强对游人的管理。包括加大对游人的宣讲力度，提高有人素质；对乱认垃圾或破坏湿地设备、景观游人采取惩处措施，以减少游人乱扔垃圾、破坏设备等行为对北京园博湖人工湿地系统的影响。

参考文献

- [1] 赵学敏.湿地:人与自然和谐共存的家园[M].中国林业出版社,2005.
- [2] 刘进化.城市绿地中人工湿地景观的营造[D].华中农业大学,2004.
- [3] 张丽,韩乔,司马卫平.人工湿地污水处理技术综述[J].山西建筑,2007.
- [4] 安树青.湿地生态工程[M].化学工业出版社,2002.
- [5] Zhang L Y,Rao B Q,Xiong Yet al. Integrated vertical-flow constructed wetland[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2010,34(2):256-251.
- [6] 王瑞祥.人工湿地在污水处理中的应用[J].资源与环境科学 2012,22:217-218.
- [7] 李雄勇,张帆,袁英兰,等.对人工湿地污水处理系统工艺设计技术关键的探讨[J].环境保护科学,2009,35(01):42-44.
- [8] 张迎颖,丁为民,钱玮燕,等.人工湿地污水处理技术的工艺与设计[J].工业用水与废水,2009,40(01):5-10.
- [9] 郑燕.人工湿地公园的生态旅游价值及其利用设计[J].安徽农业科学 2011,39(23):14334-14335.
- [10] Anderson T A, Cuthie E A, Walton B T. 1994. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environment Science and Technology, 27:2630-2636.
- [11] Brix H. Use of constructed wetland in water pollution control: Historical development, present status, and future perspectives[J]. Wat Sci Tech,1994,30(8): 209-223.
- [12] 岳春雷,王华胜,高瞻,等.人工湿地循环净化杭州植物园玉泉观鱼池水效果分析[J].浙江林业科技, 2002.22(4):1-4.
- [13] 应俊辉.利用人工湿地处理农村生活污水的研究[J].安徽农业科学.2007,35(4):1104-1105.
- [14] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils[J]. Water Resources Research, 1982,18:1-11.
- [15] 张冰.试析人工湿地处理污水的效率与机理 [J].科技论坛,2013:393.
- [16] Arias C A, Bubba D M, Brix H. 2001. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds[J]. Waters, 25(5):1159-1168.
- [17] Brij G. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: potentials and problems[J]. Water Science and Technology, 1999,40(3):27-35.

- [18] 李丽,王全金.人工湿地在污水处理中的研究进展[J].华东交通大学学报.2007,4(1):11-14.
- [19] 张广智.1999.人工芦苇床污水处理技术[J].污染防治技术,12(1):1-4.
- [20] 诸葛铠.设计艺术学十讲[M].山东画报出版社,2006.
- [21] 杨长明,顾国泉,邓欢欢,等.风车草和香蒲人工湿地对养殖水体磷的去除作用[J].中国环境科学,2008,28(5):471-475..
- [22] 黄亮,吴乃成,唐涛,等.水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J].中国环境科学.2010,30(z1):1-6.
- [23] 庞琚,王秀峰.人工湿地生态环境景观发展研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2013,44(2):307-312.
- [24] 徐栋,成水平,付贵萍,等.受污染城市湖泊景观化人工湿地处理系统的设计[J].中国给水排水,2006,22(12):40-44.
- [25] 复合垂直流构建湿地的设计方法及净化效果[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(1):12-16.
- [26] 吴振斌,谢小龙,徐栋,等.复合垂直流人工湿地在奥林匹克森林公园龙型水系的应用[J].中国给水排水,2009,24(25):28-35.
- [27] 韩爱果,孙颖,韩坤立.浅谈北京地区湿地修复与地下水资源的关系[J].水土保持研究,2006.13(4):61-63.
- [28] 张志锋,赵文吉,贾萍,等.北京湿地分析与监测[J].地球信息科学,2004,6(1):53-57.
- [29] 《北京市湿地保护行动计划》编制办公室.北京市湿地保护行动计划[z].2001.
- [30] 于少鹏,王海霞,万忠娟,等.人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J].地理科学进展,2004,23(1):22-29.
- [31] 俞孔坚,李迪华,孟亚凡.湿地及其在高科技园区中的营造[J].中国园林,2001.
- [32] 章芳,章北平,陈哲,等.四种填料对生活污水的吸附性能分析[J].水处理技术2006,32(11):37-40.
- [33] House C H. Combining constructed wetlands and aquatic and soil filter for reclamation and reuse of water[J]. Ecol Eng,1999,12:27-38.
- [34] 杨姿新,吴刘萍.湛江绿塘河湿地公园植物配置研究[J].广东园林,2007,6:67-71.
- [35] 陈章和,陈芳,刘诚,等.测定潜流人工湿地根系生物量的新方法[J].生态学报,2007,27(2):668-673.
- [36] 潘科,杨顺生,陈钰.人工湿地污水处理技术在我国的发展研究[J].四川环境,2005,24(2):71-75.
- [37] Jos T A Verhoeven, Arthur FM Meuleman. Wetlands for wastewater treatment:opportunities and

- limitations[J]. *Ecological Engineering*, 1999, 12:5-12.
- [38] 梁骥,周云新,洗萍,等.垂直流人工湿地净化生活污水的试验研究[J].*工业用水与废水*,2010,41(4):47-49.
- [39] Platzer C, Mauch K. Soil clogging in vertical flow reed beds mechanisms, parameters, consequence and solutions[J]. *Water Science Technology*, 1997, 35(5):175-181.
- [40] Sun G, Zhan Y Q, Allen S J. An alternative arrangement of gravel media in tidal flow reed beds treating pig farm wastewater[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2007, 182(1-4):3-19.
- [41] 赵昕悦,杨基春,邱珊,等.人工湿地系统研究技术展望[J].*东北师大学报(自然科学版)*,2013,45(2):128-132.

致 谢

首先我衷心感谢我的导师黄志霖副研究员！在接近一年的论文的撰写中，黄老师一直悉心指导，从论文的取材选题到设计实验方案，从实验的时间安排到实验结果分析，从论文的初步撰写到最后终稿成文，每个环节都有导师的悉心指导和细致关怀。黄老师学识渊博，对问题的见解独到；治学态度严谨，对学生学业要求严格；胸襟豁达开阔、对学生和蔼可亲的；在跟随导师学习，接受导师指导的过程中，导师的言传身教将使我终生受益，导师孜孜不倦的敬业精神将使我铭记终身，在此，向导师表示衷心的感谢！

本论文得到了我的院外导师河南科技大学田耀武副教授的指点，并对我论文的设计和实验的实施提出了建设性的意见。在此向田老师表达深深的谢意。

此外，在实验过程中，我的师兄韩黎阳、师弟吴东给予了我重要的帮助和支持；北京园博园以及卢沟桥乡政府也给予了我大力支持与协助，在此一并深表谢意与祝福！

在我日常学习中，得到了中国林科院研究生院史文石老师和陈红老师，以及朝夕相处的研究生同学的关照，在此深表谢意！

感谢我的妈妈给我的无微不至的关心，不断的鼓励和毫无保留的支持，您的支持是中是我完成学业的精神支柱谢谢您！

感谢所有参考文献的作者！感谢所有帮助过我的人们！

致谢人：席婧

2015-5-15