

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.06.017

南水北调东线工程沿线城市尾水处理方案比选

郝达平

(江苏省水文水资源勘测局淮安分局,江苏 淮安 223005)

摘要:以洪泽县为例,综合运用水文学和生态学等理论和方法,研究南水北调东线工程沿线城市尾水处理方案的选择,最终确定蓄水塘-廊道-兼性塘-表面流湿地组合的尾水处理方案,并建议将处理工艺与景观建设相结合,建成集生态、景观、休闲、科教等功能于一体的综合性示范工程。
关键词:生物-生态技术;尾水处理;人工湿地;稳定塘;生物曝气;南水北调东线工程;洪泽县
中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)06-0085-06

Comparison and selection of tail water treatment programs for cities along Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project

HAO Daping

(Huai'an Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Huai'an 223005, China)

Abstract: Hydrological and ecological integrated theories and methods were used to select tail water treatment programs for cities along the Eastern Route of the South-to-North Water Diversion Project. A case study was conducted in Hongze County. A scheme combining a storage pond, corridor, facultative pond, and surface flow wetland was determined. The treatment process and the landscape construction were combined to build a comprehensive demonstration project with integration of ecology, landscape, recreation, education, and other functions. The collection, treatment, and utilization of tail water were also conducted.

Key words: biological and ecological technology; tail water treatment; artificial wetland; stabilization pond; bio-aeration; Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project; Hongze County

南水北调东线工程是南水北调工程 3 条线路中施工条件最好的,但水污染问题是南水北调东线工程的首要制约因素,治污是东线工程发挥效益的首要保障。国务院明确表示,南水北调工程要先治污后通水,确保输水水质达到Ⅲ类水标准。

几年来,南水北调东线工程沿线各级政府做了大量坚实的工作,整个东线治污体系的雏形已经建立,考核断面的水质达标率有了大幅度提高,但与“输水水质达到Ⅲ类水标准”的要求还有差距。南水北调东线工程的规划通水时间已经由 2007 年推迟到 2013 年,拟在 2013 年实现“清水送北方”。随着人口的增长和社会经济的快速发展,污水处理厂尾水排放引起的环境问题日趋严重,通过生物-生态处理技术对污水处理厂达标排放的尾水进行收

集、处理,并采取多种途径加以回用,可以减轻水环境压力,是实现水资源可持续利用的重要举措。

洪泽县地处南水北调东线工程沿线,目前全县生产、生活废污水主要排入浚河后汇入白马湖,而白马湖是南水北调东线工程输水干线,又是淮安市区第二水源地。为保证东线工程调水和淮安市饮用水水质安全,洪泽县积极寻找新的污水处理厂尾水通道,开展了洪泽尾水收集处理及利用工程可行性研究,拟加大洪泽县废污水收集力度,扩大现有污水处理厂规模,新建清涧污水处理厂,并充分利用宁连高速公路东侧的绿化地带对污水处理厂达标排放的尾水进行生物-生态处理,处理后的尾水回用于周边农业灌溉、河道生态环境补水、城市杂用水、林地浇灌用水等,多余部分尾水排入淮河入海水道。

作者简介:郝达平(1969-),男,高级工程师,主要从事水资源、水环境、水生态研究。E-mail:dphao@163.com

1 生物-生态系统处理措施简介

采用生物-生态系统处理城市污水处理厂尾水,是按照仿生学理论,利用培育的植物或培养、接种的微生物的生命活动,与生态工艺、景观工程结合,对水中污染物进行降解及转化,使水体得到净化。

1.1 人工湿地

湿地用来净化污水始于 20 世纪 50 年代。人工湿地污水处理系统是利用生态系统中的物理、化学和生物的三重协同作用,通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物分解来实现对污染水体的高效净化,主要体现在对有机物的降解、脱氮、除磷等方面^[14]。人工湿地具有效率高,投资、运行及维护费用低,适用面广,耐冲击,负荷强等优点。另外,人工构建的生态系统可产生良好的景观效果,还可为野生动物尤其是候鸟提供栖息地^[5]。

按照布水方式的不同,人工湿地可分为 3 种类型:表面流人工湿地、潜流型人工湿地和垂直流人工湿地。不同类型人工湿地对特征污染物的去除效果不同,具有各自的优缺点,见表 1。

表 1 人工湿地类型特点

湿地类型	优点	缺点
表面流人工湿地	污水以较慢速度从湿地表面流过,氧气来源于水面扩散与根系传输,投资少,操作简单,运行费用低	占地面积大,水力负荷小,净水能力有限,夏天易滋生蚊蝇
潜流型人工湿地	水力负荷大,对 BOD ₅ 、COD、SS 和重金属等处理效果好,少有蚊蝇	长时间运行,一些代谢物、腐烂的植物根系、污水中 SS 堵塞填料孔隙,使用寿命受到一定影响
垂直流人工湿地	占地面积小,氧气供应能力强,硝化作用充分,对 N 的去除率高,受气候影响小	污水的流程较短,反硝化作用较弱,运行相对复杂,工程技术要求较高

近年来,湿地技术在世界各国迅速发展,但我国对湿地技术的研究起步相对较晚,直到“七五”期间才有了一定的规模。近年来,我国人工湿地应用较成功的例子有:成都活水公园,深圳洪湖公园人工湿地、观澜河湿地公园等。

1.2 稳定塘

稳定塘是一种生物处理污水的措施。污水在塘内滞留过程中,水中有机物通过好氧微生物的代谢活动被氧化分解,或经过厌氧微生物的分解而达到稳定化的目的。好氧微生物代谢所需的溶解氧由塘表面的大气复氧作用以及藻类的光合作用提供,有时也可通过人工曝气补充供氧^[6-10]。

按塘内充氧状况和微生物的优势群体不同,稳定塘可分为好氧塘、兼性塘、厌氧塘和曝气塘 4 种类型;按照处理后达到的水质要求,稳定塘可分为常规塘和深度处理塘;按照出水的连续性和出水量,稳定

塘可以分为连续塘和贮存塘。不同类型的塘可单独用于污水处理中,也可多种类型稳定塘加以组合。在稳定塘污水处理系统中,常常出现系统的各种组合方式。各类塘不同排列的组合中,有串联和并联的组合,有带回流或多级配水的串联组合等。

1.3 曝气生物滤池

曝气生物滤池将生物膜法与曝气富氧措施相结合,是 20 世纪 80 年代末、90 年代初在普通生物滤池的基础上借鉴给水滤池工艺而开发的一种污水处理工艺,其特点是有机物容积负荷高、水力负荷大、水力停留时间短、所需基建投资少、能耗及运行成本低等,并且出水水质好^[11-14]。

2 生物-生态系统处理方案的设计

2.1 设计原则

a. 因地制宜原则。尽可能与附近的地形地貌结合,充分利用已有的鱼塘和排灌沟渠布设尾水处理方案。结合现有的灌渠,将处理后的部分尾水直接用于农业灌溉,既节约了优质水源,又减轻了排污压力。在湿地构建中,针对当地的气候、地形条件,以及尾水中的主要超标物质,选择在湿地种植具有相应净化能力的当地物种。

b. 经济适用原则。根据污水处理厂排放尾水中主要污染物的类型和迁移转化的规律,综合考虑投资、管理及长期有效运行等诸多因素,合理设计工艺流程和处理方案,利用地形和重力,使污水尽量自流,减少提水泵站数量,使项目投资、维护及运行费用最小化,发挥最优经济效益。

c. 近期和远期相结合的原则。结合近期和远期尾水处理规模的不同,统一规划,分期实施。通过分组、分单元设计处理措施和调度运行方案,分时段组合并优化净化工艺,最大限度地发挥工程的水质净化效果。

2.2 系统处理规模和进出水水质设定

2.2.1 系统处理规模

根据洪泽县污水排放现状及污水处理规划,以及全县 2 个污水处理厂的尾水排放情况、工程占地面积、工艺的处理能力等因素,设计系统尾水总处理能力为 10 万 m³/d。

2.2.2 系统进出水水质

a. 系统进水水质。本系统是污水处理厂达标尾水的再处理工程,目前洪泽天楹污水处理公司运行稳定,出水水质符合国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 B 排放标准。拟建的清涧污水处理厂仍处于规划阶段,无法用实测资料分析其出水水质。综合两个污水处理厂的尾水情况,在生

物-生态系统处理方案中按 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中的一级 B 标准进行方案设计。

b. 系统出水水质。经过生物-生态系统对污水处理厂尾水进一步处理后,出水可回用于周边农业灌溉、河道生态环境补水、城市杂用水、林地浇灌用水等,多余部分排入淮河入海水道。出水水质按照 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的 V 类水进行控制。

系统设计进出水水质标准见表 2。

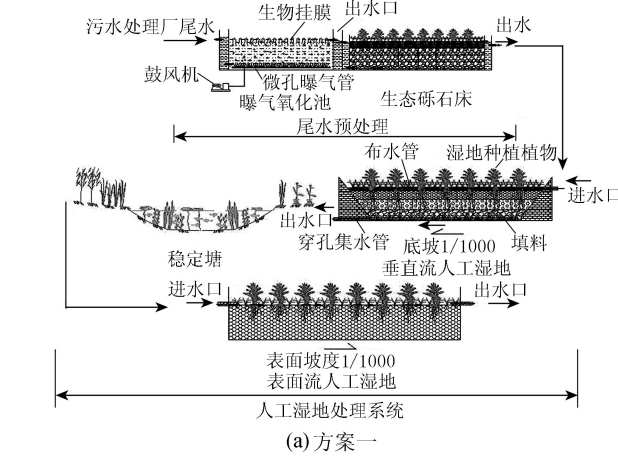
表 2 系统设计进出水水质标准				
	mg/L			
进出水	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	$\rho(\text{TP})$
系统进水	60	20	8.0(15) ^①	1.0
系统出水	40	10	2.0	0.4

注:①当水温大于 12℃ 时, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 8.0 \text{ mg/L}$;当水温小于 12℃ 时, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) = 15.0 \text{ mg/L}$ 。

2.3 备选方案介绍

2.3.1 垂直流-稳定塘-表面流湿地组合方案(方案一)

方案(图 1)在包含预处理部分和人工湿地部分的同时,融入了稳定塘的设计。其中预处理部分由曝气氧化池和生态砾石床组成,人工湿地部分分为垂直流人工湿地与表面流人工湿地的梯级组合,稳定塘串联在两个湿地之中。工程建于大寨河以北,宽 400 m,长约 4800 m 的规划绿化带内,共需占地约 100 万 m²。

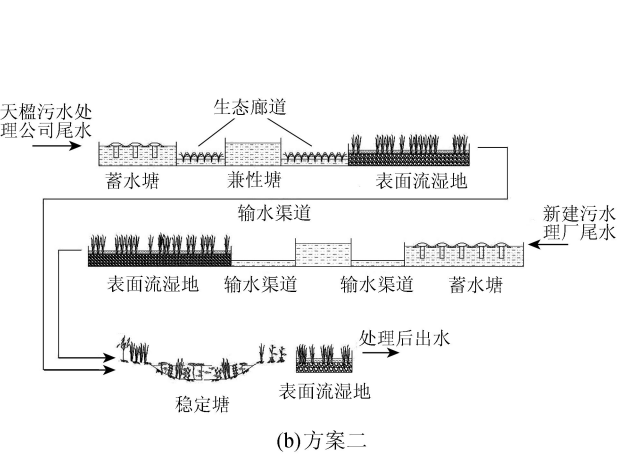


(a) 方案一

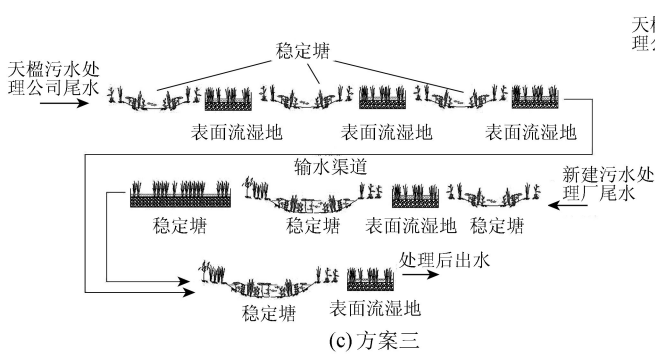
方案的预处理部分中,首先在曝气池增加水中溶解氧的含量,为氨氮的硝化反应提供可靠保障。大量有机物被生物膜吸附降解,有机氮被氨化后,在曝气条件下容易发生硝化反应,大大提高尾水中氨氮的去除率。经曝气池处理后的水通过布水渠进入生态砾石床。由于不与表面大气接触,生态砾石床处于缺氧和厌氧状态,水直接进入床的中、底部,有利于曝气池氧化产生的硝态氮进行反硝化反应,产生 N₂O 和 N₂。生态砾石床的脱氮作用提高了氮的去除率。另外,生态砾石床还有截留曝气塘中脱落的生物膜和悬浮物的作用,防止堵塞垂直流湿地。

人工湿地部分分为垂直流湿地和串联的表面流湿地。垂直流湿地具有对水质、水量的变化适应性强,出水稳定等特点,其表层为好氧层,易发生硝化反应,有利于氨氮的硝化;底层为厌氧层,为反硝化反应营造条件,有利于氮的去除。该湿地内部相当于具有多个好养-厌氧反应器的组合。而表面流湿地为好氧-兼性-缺氧状态,与垂直流湿地共同组成一个大的厌氧和好氧反应器,进行硝化和反硝化反应。

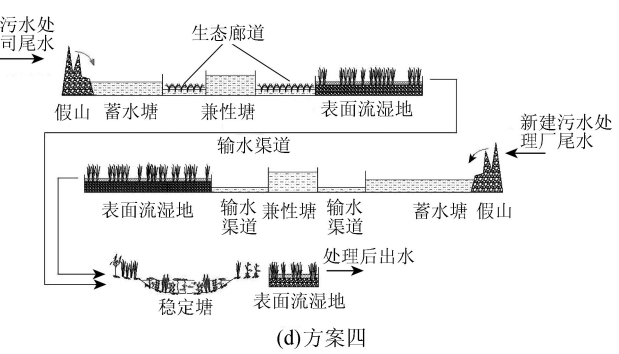
稳定塘为好氧型处理塘,水深控制在 1 ~ 1.5 m,阳光照射其中,有利于植物的生长,大气中的氧气可溶于水中,营造好氧环境。在稳定塘中种植不同类型的水生植物,并放养鱼类和底栖生物。通过塘中微生物的吸附分解、水生植物的吸收转化以及水生动物的生命活动等共同作用,建立起具有自我净化



(b) 方案二



(c) 方案三



(d) 方案四

图 1 4 个生物-生态系统处理方案流程图

能力的生态系统,以达到再次去除氮、磷及有机物的目的。此塘对于氮磷的去除有着良好的效果,同时稳定塘还能起到缓冲水体与美化环境的作用。

2.3.2 蓄水塘-廊道-兼性塘-表面流湿地组合方案(方案二)

洪泽天楹污水处理公司尾水中的主要污染物为TN和NH₃-N,方案二的设计遵循氮转化需要连续的“好氧-厌氧”环境这一规律,由“曝气蓄水塘-生态廊道-兼性塘-表面流湿地”组成,形成串联式的好氧与厌氧反应器(A/O),促进脱氮反应的进行。同时利用曝气富氧、厌氧分解、植物吸收、土壤吸附等途径去除尾水中的有机质、含磷污染物等。

考虑地形、投资成本等因素,方案二分为南线工程和北线工程两个处理系统,分别处理洪泽天楹污水处理公司和清涧污水处理厂的尾水,工程区总长度为6500 m,占地约260万m²。南线工程始于宁连高速公路入口以北1200 m处,处理洪泽天楹污水处理公司的尾水,处理规模为4万m³/d,工程区长2700 m,占地108万m²。北线工程始于双喜河以南850 m处,处理清涧污水处理厂的尾水,处理规模为6万m³/d,工程区长3800 m,占地152万m²。

南线工程中,现有污水处理厂尾水通过管道进入1号蓄水塘曝气富氧,后由1号生态廊道输至1号兼性塘进行厌氧分解,再由2号生态廊道进入1号表面流湿地,出水由倒虹吸穿过大寨河再经泵站提升后流入2号表面流湿地。系统出水经现有的灌溉渠道穿过花河排入5号和6号表面流之间的稳定塘。

北线工程中,清涧污水处理的厂尾水通过管道进入2号蓄水塘,后由现有灌渠进入2号兼性塘,出水经泵站提升进入3号表面流湿地,再由灌渠连接进入4号和5号表面流湿地。出水通过倒虹吸穿过花河进入稳定塘,再由渠道进入6号和7号表面流湿地后流出系统。

2.3.3 表面流湿地和稳定塘组合方案(方案三)

方案三直接利用高速公路一侧约400 m宽、6500 m长的绿化带对尾水进行处理,除需要平整土地、穿越排灌渠道、设泵站提水外,基本不增加其他工程。6500 m长的绿化带中,空地部分全部作为表面流湿地,总面积为126.9万m²。原来的鱼塘改造为蓄水塘或稳定塘,对尾水进行处理,总面积为42.1万m²。尾水出水首先进入蓄水塘,经调蓄后进入表面流湿地和稳定塘。在表面流湿地中,设计多条弯曲的小沟渠,使水在流动过程中尽可能增加与土壤的接触,在每块表面流湿地周边设置低的围堤,使表面流湿地形成浅的蓄水(水深小于0.4 m)。在表面流湿地中种植芦苇、茭白、香蒲、美人蕉、鸢尾、再力等生物

量大、根系发达、吸收净化污染物效果好的挺水植物。

方案三根据污水处理厂位置也分为南线工程和北线工程两个处理系统,分别处理洪泽天楹污水处理公司和清涧污水处理厂的尾水,工程区总长度为6500 m,占地约260万m²。南线工程始于宁连高速公路入口以北1200 m处,处理洪泽天楹污水处理公司的尾水,处理规模为4万m³/d,工程区长2700 m,占地108万m²。北线工程始于双喜河以南850 m处,处理清涧污水处理厂的尾水,处理规模为6万m³/d,工程区长3800 m,占地152万m²。

南线工程中,洪泽天楹污水处理公司的尾水通过管道进入1号蓄水塘,经调蓄后进入表面流湿地和稳定塘。北线工程中,清涧污水处理厂的尾水通过管道进入2号蓄水塘,经调蓄后进入表面流湿地和稳定塘。在蓄水塘和稳定塘周边的浅水区种植芦苇、茭白、香蒲、黄花菖蒲、美人蕉、鸢尾、再力、水葱、千屈菜等挺水植物,在向塘的方向种植荷花、睡莲、菱角等浮叶植物,在水较深处培育苦草、菹草、狐尾藻等沉水植物,使浅的蓄水塘或稳定塘具有氧化塘的效果,使深的蓄水塘或稳定塘发挥厌氧塘或兼性塘的功能。利用表面流湿地的土壤吸附、微生物分解、植物吸收等作用净化尾水中的污染物,使蓄水塘和稳定塘起到自然沉降、植物吸收、微生物降解污染物的作用。

2.3.4 假山跌水-廊道-兼性塘-表面流湿地组合方案(方案四)

方案四是在方案二的基础上,将蓄水塘的曝气方式由机械曝气改为假山跌水曝气,其他工程布置均相同(从蓄水塘出水后的路径与方案二相同)。

分别在南线工程和北线工程设置两座假山,标记为1号假山和2号假山,假山高度为6 m,底部宽15 m,长度25 m。两座污水处理厂的尾水分别直接接口到1号和2号假山,接口处距地面约5 m(水位15 m),尾水从假山上瀑泻而下,经3级跌坎直接进入1号和2号蓄水塘(水位10 m左右)。每级跌坎的落差约1.5 m,在跌坎下的平台上放置不规则的大石块,水呈薄层下泻,凸凹不平的石块促进了水的曝泻,也增加跌水曝气的效果。当系统接口处水位达到15 m时,无需设置泵站,因此运行费用小。相比于机械曝气,假山曝气成本较低,另外,假山和跌水增加了景观效果,美化了环境。南线工程污水处理厂的尾水经假山进入1号蓄水塘后,通过1号生态廊道进入1号兼性塘,再通过2号生态廊道排入2号表面流湿地,出水经现有灌区直接排入5号和6号表面流湿地之间的稳定塘。北线工程污水处理厂的尾水经假山进入2号蓄水塘后,由灌渠进入2号兼性塘,出水经泵站提升进入3号、4号和5号表面

流湿地,通过倒虹吸穿过花河,进入稳定塘,与南线工程的处理水混合,再由渠道进入 6 号和 7 号表面流湿地流出。处理后的尾水回用于周边农业灌溉、河道生态环境补水、城市杂用水、林地浇灌用水等,多余部分排入淮河入海水道。

4 个生物-生态系统处理方案流程见图 1。

3 方案比选

从处理效果、占地面积、运行管理、投资估算等方面对上述 4 种方案进行比选,并与常规深度处理尾水进行比较,见表 3。从表 3 可以看出,方案二总投资较低,处理效果较好,且工艺简单,运行管理方便,因此拟定方案二为推荐方案。

根据文献[15]的相关参考标准,对于处理规模为 10 万 m³/d 的污水处理厂,若将其出水水质从一级 B 标准提升为一级 A 标准,提标改造用地标准为 0.25 m²/(m³ · d),工程费用投资估算指标为 550 元/(m³ · d),即需要改造用地 2.5 万 m²,改造工程直接费用为 5 500 万元。再加上勘察、设计等其他费用和基本预备费用,污水处理厂 10 万 m³/d 规模提标建设总投资约6 200 万。采用推荐的方案二,投资费用比提标建设少 2 200 万,水质处理效果好于一级 A,且运行费用远小于提标建设。

4 结论及建议

4.1 结论

洪泽污水处理厂的尾水在排放线路上采用生物-生态技术进行处理,具有良好的用地条件和成熟的技术条件,投资少,操作简单,维护和运行费用低,能耗低,无需添加化学药剂,无二次污染,处理效果

好,抗冲击力强,不破坏生态环境,还可以兼顾景观效果,是适合洪泽县实际情况的尾水处理方案。为保证南水北调东线工程调水水质及淮安市饮水安全,促进地方经济持续、稳定、健康发展,采用生物-生态处理工艺对洪泽县污水处理厂达标的尾水进行收集、处理及利用,以最大限度地节约和保护水资源,因此项目的建设是非常迫切而且必要的。方案二“蓄水塘-廊道-兼性塘-表面流湿地”组合投资较低,污水处理效果较好,且工艺简单,运行管理方便,尾水处理后的水质满足农田灌溉水质标准及一般工业企业的中水回用要求。

4.2 建议

a. 控制进水水质。尾水处理系统不能替代污水处理厂,而只是污水处理厂达标尾水的再处理工程,污水处理厂必须按国家要求正常建设与运行。尾水处理系统对以生活污水为主的尾水处理效果较好,因此污水处理厂的进水配比必须达到可生化要求。工业污水中常含有重金属和有毒有害污染物质,排入湿地后会导致植物死亡,影响处理效果及处理后尾水的回用,因此,应避免引进高污染、高能耗以及排放重金属等有毒有害物质的企业。

b. 加强湿地植物的管理。①合理选择植物的栽种期;②湿地进水之前,对已栽种植物需保证有 4~5 周的培育期,避免尾水对植物产生不可逆转的影响;③控制植物的蔓延范围,适时对植物进行收割和叶片的去除,避免植物残体影响湿地系统的处理效果和水质,以防产生二次污染。

c. 注重冬季植物的管理。人工湿地对污染物的去除受环境,特别是温度的影响较大。冬季低温条件下,湿地植物出现休眠现象,根系微生物代谢减

表 3 处理方案比较

方案	占地面积	处理效果	运行管理	工程建设费用
方案一	100 万 m²	1. 一级 B 标准进水,出水 COD 和 BOD ₅ 可以达到Ⅲ类以上,而 NH ₃ -N 和 TP 为Ⅳ类标准 2. 一级 A 标准进水, COD、BOD ₅ 、NH ₃ -N 和 TP 均可以达到Ⅲ类标准	1. 总体工艺较为复杂,湿地面积较大,运行管理难度大 2. 年度运行总费用为 612.5 万元,平均运行费用为 0.17 元/t	总投资金额为 9 447 万元,包括工程建设费 8 359 万元,其他费用 638 万元,基本预备费 450 万元
方案二	260 万 m²	1. 一级 B 标准进水, COD 为Ⅲ类水标准, BOD ₅ 和 TP 能达到Ⅴ类水标准, ρ(NH ₃ -N)= 3.14 mg/L,略劣于Ⅴ类水标准 2. 一级 A 标准进水, COD、BOD ₅ 和 TP 均达Ⅲ类, NH ₃ -N 达到Ⅴ类水标准	1. 工艺结合实际,运行管理简单方便 2. 年度运行总费用为 196.3 万元,平均运行费用为 0.05 元/t	总投资金额为 3 932 万元,其中工程建设费 3 403 万元,其他费用为 342 万元,基本预备费 187 万元
方案三	260 万 m²	1. 一级 B 标准进水, COD 达到Ⅳ类标准, 其余指标均劣于Ⅴ类水标准 2. 一级 A 标准进水, COD、BOD ₅ 和 TP 均可达到Ⅳ类水标准。 ρ(NH ₃ -N)= 3.38 mg/L, 略劣于Ⅴ类水标准	1. 总体工艺简单,运行方便 2. 年度运行总费用为 175.7 万元,平均运行费用为 0.05 元/t	总投资金额为 3 230 万元,其中工程建设费 2 758 万元,其他费用为 318 万元,基本预备费 154 万元
方案四	260 万 m²	1. 一级 B 标准进水, COD 可以达到Ⅳ类水, BOD ₅ 和 TP 达到Ⅴ类水, NH ₃ -N 劣于Ⅴ类水标准,质量浓度为 3.99 mg/L 2. 一级 A 标准进水, COD、BOD ₅ 和 TP 均达到Ⅲ类, ρ(NH ₃ -N)= 2.39 mg/L	1. 工艺较为简单,运行方便 2. 年度运行总费用为 191.6 万元,平均运行费用为 0.05 元/t	总投资金额为 3 591 万元,其中工程建设费 3 088 万元,其他费用为 332 万元,基本预备费 171 万元

缓甚至停止,导致湿地处理效率大幅度下降。因此,除了采取必要的保温、改变布水方式和水力负荷等措施外,湿地植物的选取还应考虑耐寒性,在湿地中配种黑麦草、水芹、水葱等耐寒植物,增强湿地冬季的净化效果。同时由于伊乐藻、菹草等沉水植物在冬季仍能生长,因此应加强稳定塘在冬季的净化效果,以弥补表面流湿地在冬季净化效果差的不足。

d. 积极开展后续研究。本项目是江苏省乃至全国范围内对尾水收集、处理、再利用的积极探索,通过分析系统各单元实际尾水处理效果,验证系统的科学性、有效性;根据各单元尾水实际处理能力,分析评估系统的负荷与承载能力;针对不同运行方案的监测结果,分析系统的不足与风险,提出相应的优化措施,适时调整和合理设置系统运行条件及运行参数,确保工程运行安全,促进污水处理厂尾水处理实用技术的筛选和推广。

e. 为充分发挥湿地效益,在项目建设过程中融入景观设计,真正建成一个集环境效益、经济效益、社会效益、生态景观于一体的特色工程,进一步提升城市品位。

参考文献:

[1] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1995, 16 (3): 83-86. (WU Xiaolei, Mechanism of wastewater treatment in constructed wetlands[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1995, 16 (3): 83-86. (in Chinese))

[2] 袁东海,景丽洁,高士祥,等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005,26 (1): 51-55. (YUAN Donghai, JING Lijie, GAO Shixiang, et al. Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems [J]. Environmental Science, 2005, 26 (1): 51-55. (in Chinese))

[3] 贺赞,吴振斌,陶菁,等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学,2005,26 (1): 47-50. (HE Feng, WU Zhenbin, TAO Jing, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2005,26 (1): 47-50. (in Chinese))

[4] 张丽,朱晓东,邹家庆. 人工湿地深度处理城市污水处理厂尾水[J]. 工业水处理, 2008, 28 (1): 85-87. (ZHANG Li, ZHU Xiaodong, ZOU Jiaqing. Application of constructed wetland to the advanced treatment of effluent in a municipal sewage plant[J]. Industrial Water Treatment,2008,28 (1): 85-87. (in Chinese))

[5] 付国楷,张媛,林洁. 人工湿地污水净化技术概述[J]. 三峡环境与生态,2008,1 (3): 5-10. (FU Guokai,

ZHANG Yuan, LIN Jie. Summary of constructed wetland [J]. Environmental and Ecology in the Three Gorges, 2008,1 (3): 5-10. (in Chinese))

[6] 何小莲,李俊峰,何新林,等. 稳定塘污水处理技术的研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2007,18 (5): 75-77. (HE Xiaolian, LI Junfeng, HE Xinlin, et al. Study on the development of sewage treatment technology by stabilization pond [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007,18 (5): 75-77. (in Chinese))

[7] 汪慧贞,吴俊奇,曹秀芹. 超深厌氧塘的技术特性[J]. 环境工程,1997, 15 (3): 6-8. (WANG Huizhen, WU Junqi, CAO Xiuqin. Technical characteristic of deeper anaerobic pond [J]. Environmental Engineering,1997,15 (3): 6-8. (in Chinese))

[8] 沈劲风. 氧化塘的系统研究[J]. 环境科学与技术,1995 (2): 6-10. (SHEN Jinfeng. System study of deeper anaerobic pond [J]. Environmental Science and Technology,1995 (2): 6-10. (in Chinese))

[9] 向连城. 新型稳定塘污水处理技术 AIPS[J]. 环境科学研究,1995 (1): 48-50. (XIANG Liancheng. AIPS, a new stabilization pond technology [J]. Research of Environmental Sciences,1995 (1): 48-50. (in Chinese))

[10] 王宝贞,王琳. 水污染治理新技术[M]. 北京:科学出版社,2004:159-165.

[11] 孙志国,陈季华,陈思贫. 曝气生物滤池废水深度净化工艺研究[J]. 工业水处理,2003,23 (4): 35-39. (SUN Zhiguo, CHEN Jihua, CHEN Sipin. Study on advanced treatment for the organic sewage using biological aerated filter[J]. Intustrial Water Treatment,2003,23 (4): 35-39. (in Chinese))

[12] 曹春艳,范丽华,张洪林. 曝气生物滤池及其填料性能[J]. 黑龙江科技学院学报,2005, 15 (3): 192-195. (CAO Chunyan, FAN Lihua, ZHANG Honglin. Biological aerated filter and performance of its stuffings [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science,2005,15 (3): 192-195. (in Chinese))

[13] 李魁晓. 臭氧-曝气生物滤池深度处理组合工艺研究[J]. 水工业市场,2010 (5): 48-52. (LI Kuixiao. Study on combined process of ozone-biological aerated filter for advanced treatment [J]. Water-Industry Market, 2010 (5): 48-52. (in Chinese))

[14] 张亚维,甘一萍. 曝气生物滤池在污水深度处理中的研究进展[J]. 给水排水动态,2011 (4): 22-24. (ZHANG Yawei, GAN Yiping. Research progress in wastewater treatment by biological aerated filter [J]. Water Supply and Drainage Dynamics,2011 (4): 22-24. (in Chinese))

[15] 江苏省住房和城乡建设厅. 江苏省太湖流域城镇污水处理厂指标建设技术导则[M]. 北京:光明日报出版社,2011.

(收稿日期:2013 - 02 - 04 编辑:彭桃英)