基于人工湿地的水环境治理和优化技术在太湖流域的应用

**黄国动 杜建强 张瑛 施博 邢蓓燕 冯桐**

（苏州德华生态环境科技股份有限公司，苏州 215000）

摘要  水质优化技术在太湖流域水污染治理中起到了重要的作用。介绍了几类常用的基于人工湿地的水质优化技术，包括农村生活污水治理技术、城镇生活污水厂水质优化技术、河道治理技术及雨水治理技术。阐述了人工湿地在太湖流域水系统优化中的应用，包括阳澄湖莲花岛生态湿地对农村生活污水的治理和常熟新材料产业园生态湿地对工业尾水的治理，2个项目水处理效果良好，达到了相应的水质要求。探讨了基于人工湿地的水质优化技术在太湖流域水环境治理和优化的前景，该技术可在海绵城市建设、城镇污水处理厂提标、黑臭河道整治等领域推广和应用。

**关键词** 人工湿地；太湖；农村生活污水；尾水提标

Applications of Constructed-Wetland Based Water Treatment and Optimization Technologies in Taihu Lake Basin

HUANG Guo-Dong DU Jian-Qiang ZHANG Ying SHI Bo XING Bei-Yang FENG Tong.

(Suzhou DeHua Ecological Technology Co., Ltd,B-1 401, 110 Jiuhua Rd, Industrial Park, Suzhou, China, 215000)

**Abstract** Water quality improvement technologies play an important role in Tai Lake watershed water pollution treatment. In this paper, several water quality improvement technologies based on Constructed Wetlands (CWs) are introduced, including domestic wastewater treatment technology for rural domestic wastewater, polishing for urban domestic wastewater treatment plant, water channel treatment technology and stormwater treatment technology. The applications of CWs in Tai Lake watershed water quality improvement are presented, including treatment of rural domestic wastewater with CWs at Lotus Island in Yangcheng Lake and treatment of industrial tail water with CWs at Changshu Advance Material Industrial Park (AMIP). In these two projects, the treatment effect is good and the water quality meets corresponding standards. The prospect of applying water quality improvement technology based on CWs in Tai Lake watershed water environment treatment and improvement is also discussed. This technology can be promoted and applied in fields of Sponge City, polishing of urban wastewater treatment plant and black-smelly channel treatment etc.

**Key words** Constructed Wetland; Tai Lake; Rural Area Domestic Wastewater; Effluent Polishing

太湖是中国的五大淡水湖之一，太湖流域作为我国人口最稠密和经济发展最有活力的地区（龙珍等, 2015），在经济高速发展的同时，城市污水排放量也逐年增长，导致太湖水质不断恶化。2007年，无锡市因太湖蓝藻爆发而引起了供水危机，随后国务院于2008年批复实施了《太湖流域水环境综合治理总体方案》对太湖流域水质进行整治。2008年之前，太湖的主要污染因子为总氮（TN）、总磷（TP）和化学需氧量（COD），其中TP为首要污染物，其次是TN和COD（成芳等, 2010）。经过一段时间的治理，2009年至2011年污染物排放总量逐年下降。值得注意的是，虽然城镇点源污染排放量所占比例下降，但由于雨水径流及农业灌溉等造成的面源污染排放量比例却有所上升（谢蓉蓉等, 2015）。太湖周边的污染物来源主要为农业源污染及流域内河道污染。农业源污染有着隐秘性、不确定性和随机性等特点，其中COD占53%、TN占45%、TP占64%（洪燕婷等, 2015）。流域内河道污染的来源主要为工业点源污染和生活污水污染，其中TN的污染所占比重最大，其次为TP。以苏南运河为例，其对太湖的污染物通量占整个入太湖污染物通量的23%~29%（颜润润等, 2009）。就这两大污染源，治理策略应不局限于统一的污染物收集集中处理，而应科学地计算地区的环境容量，将水处理规划与城市经济发展、社会发展相结合，形成覆盖全区域的不同规模的水处理循环体系，将水处理设施嵌入到城市公共基础设施中，不仅能够有效固定、净化、循环内部水资源，还能逐步恢复区域生态功能，减少对外界环境的依赖性与影响性，形成“绿色分散低排”的污水处理排放形式。基于人工湿地的水环境治理和优化技术兼具净化水质、恢复生态、构建景观等功能，能与城市公共基础设施相融合，在海绵城市建设、城镇污水处理厂提标、黑臭河道整治等领域得到推广和应用。

# 人工湿地的水质优化技术

## 农村生活污水治理技术

农村地区因地域和经济模式的特点，具有人口分散，经济收入低等特点，直接制约了管网铺设和大型污水处理设施的建设，因此着重于原位处理的分散式污水处理技术应运而生（贺墨梅等, 2006）。目前使用的分散式污水处理技术主要有人工湿地系统、稳定塘系统、地下渗透系统、序批式活性污泥法、固定床生物膜等。其中人工湿地不仅能有效处理污水，还具有处理过程生态可持续、处理效率高、控制地表径流、临时蓄水等特点，在满足了农村地区分散式污水处理要求的同时解决了剩余污泥问题，不产生二次污染，在许多国家都有广泛应用。

## 城镇生活污水治理技术

城市地区人口密集，经济水平较高，适宜对污水进行收集与集中处理。目前广泛使用的集中式城镇污水治理技术最大程度上降低了污水管理的难度、便利了污水的收集和处理、提高了污水处理和回用的效率（Tjandraatmadja et al, 2005），主要包括活性污泥法、氧化沟、MBR等。虽然这些技术已成功使用多年，但仍存在一些问题，例如产生大量剩余污泥、处理过程大量使用化学试剂易产生二次污染等（戴晓虎, 2012）。人工湿地系统可实现对小规模城镇污水处理厂尾水的高效深度净化，且投资较低、操作简单、维运费用低，且出水水质好（江林等, 2015）；另一方面，近些年发展起来的污泥芦苇床是一种利用人工湿地处理污泥的技术，可以减缓剩余污泥问题，该技术通过植物的蒸发蒸腾作用和水面蒸发作用对污泥进行脱水和稳定处理，以达到污泥的无害化（Nielsen , 2003）。

## 河道治理技术

城市一般沿河而建，随着城市的发展，河流也不断受到污染（张长滨等, 2013）。国内城市黑臭河道等诸多问题逐渐引起公众的关注，这主要是城市中的污染排放导致。其主要的治理技术为：水道截留和河道清淤、覆盖、藻类去除等为主的物理处理法，以化学絮凝、添加化学除藻剂、投加石灰等为主的原位化学处理法和以水生植物恢复、土地处理技术、曝气、微生物强化、生物膜、人工湿地和活性污泥技术等为主的生物处理法。由于化学法有引起二次污染的风险，物理法则大大提高了治理成本，生物法成为了主流的河道治理技术。生物法相比物理法和化学法的单次实施、碎片化处理，具有治理河道、区域性规划、持续效果长、治理无二次污染等特点。在提升河道水质的同时可恢复周边生态系统，提升河道抗污能力（Hein et al, 2016）。其中，人工湿地具有多功能性，可拦截处理污染源、提升河道水质、改善河道水动力，最终实现区域的水生态修复（张瑛等, 2015）。

## 雨水治理技术

雨水冲刷道路、建筑及农田会形成径流污染，造成附近河流、湖泊富营养化污染。根据雨水污染的形成，现有的雨水治理技术主要分为源头削减技术、管路控制技术及末端治理技术三方面。如屋顶湿地系统对雨水进行初期利用，降低污染负荷，多余的雨水收集后进入下游处理系统；城市雨水径流污染的管路控制技术，通过屋顶雨水排水系统、停车场雨水蓄流系统及道路雨水蓄流系统对雨水的径流污染进行控制；城市雨水径流污染的末端处理技术，通过雨水湿地系统、生态廊道及雨水花园技术对雨水径流产生的污染进行处理，然后排入受纳水体或进行雨水回用。其中，屋顶湿地系统、停车场雨水蓄流系统及道路雨水蓄流系统、雨水湿地系统等，都是基于人工湿地技术。

# 人工湿地在太湖流域的应用

在阳澄湖莲花岛、常熟新材料产业园定点设置监测点，定时采样。在阳澄湖莲花岛各生态湿地的进水井和出水井设置监测点，每月采样监测；在常熟新材料产业园水处理生态湿地的总进水、各单元湿地出水以及总出水设置共6个监测点，每天采样监测，包括总进水（调节池）、垂直流出水、生态塘出水、表面流出水、饱和流出水和总出水。采用专业水样采集器采集水样，并冷藏保存在冰箱。

在苏州德华生态实验室测定水样，根据国家标准进行水质监测。化学需氧量（COD）：重铬酸钾法（GB11914-89）；悬浮物（SS）：重量法（GB11901-89）；总氮（TN）：碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 （GB11894-89）；氨氮（NH3-N）：纳氏试剂分光光度法（HJ535-2009）；总磷（TP）：钼酸铵分光光度法（GB 11893-89）。

## 阳澄湖莲花岛农村生活污水治理生态湿地



图1 莲花岛4个人工湿地项目地理位置

Fig.1 Four constructed wetlands (CWs) locations on Lotus Island

莲花岛地处苏州市阳澄湖中心，面积约3km2，全岛约1200人，以养殖大闸蟹和农家乐的餐饮业为主。莲花岛上生活污水处理以分散式处理技术为主，包括混合型人工湿地技术、小型MBR技术、SBR工艺等，其中，人工湿地技术的项目运行稳定、处理效率较好、运营维护简单，在众多处理技术中脱颖而出。目前共有4个人工湿地在莲花岛不同地点进行生活污水处理（图1，污水日处理总量400m3），主要应用组合型人工湿地（包括垂直流滤床和水平流滤床），出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准。



图2 莲花岛4个自然村生态湿地工艺流程图

Fig.2 Treatment procedure for CWs in four natural villages

on Lotus Island

莲花岛4个人工湿地项目的工艺差异性较小（图2），主要由格栅去除杂物后经调节池水泵提升至垂直流滤床进行间歇布水，再流入水平流滤床。西洋村和下营田项目水平流出水后直接排入连接阳澄湖的小河；东咀和西咀项目先排入生态塘，再对外排放。从调节池产生的污泥进入污泥干化床后自然干化，渗滤液回流至调节池并由人工湿地处理。在此人工湿地系统中，垂直流滤床作为第一个生化单元，对污染物去除起决定性作用。污水间歇布水到滤床表面以给生物硝化提供环境和足够的氧气供给。

对莲花岛4个人工湿地项目的处理效率进行评价（数据为2015年全年的均值），5项水质指标为化学需氧量（COD）、悬浮物（SS）、总氮（TN）、氨氮（NH3-N）、总磷（TP）（图3）。由图3及表1可知，莲花岛4个人工湿地进水中污染物指标浓度差别较大进水水质COD、SS和TN含量较高。该项目使用的组合型人工湿地可有效去除各类污染物，确保出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB18918-2002）一级A标准，各项目对污染物去除率较高，各污染物去除率分别约为84.25%（COD）、79.10%（SS）、72.73%（TN）、94.60%（NH3-N）、81.15%（TP）（表1）。



化学需氧量；(b) 悬浮物；(c)总氮；(d)氨氮；(e) 总磷(a) COD; (b) SS; (c)TN; (d)NH3-N; (e) TP

图3莲花岛上各项目的污染物进出水水质

Fig.3 Influent and effluent water quality of four CWs on Lotus Island

 **表1 莲花岛上各项目污染物去除率 %**

 **Tab. 1 Removal rate of four CWs on Lotus Island**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **COD** | **TP** | **TN** | **NH3-N** | **SS** |
| **下营田** | 88.6 | 77.7 | 64.6 | 96.7 | 81.8 |
| **西洋村** | 74.2 | 85.6 | 74.2 | 95.8 | 90.5 |
| **东咀** | 84 | 88.2 | 76.9 | 98.7 | 91.5 |
| **西咀** | 90.2 | 73.1 | 75.2 | 87.2 | 52.6 |

## 常熟新材料产业园水处理生态湿地

江苏常熟新材料产业园位于常熟沿江产业带，规划面积15.02km2，重点发展新材料、精细化工、生物医药产业。为了实现园区内中水回用，建设了水处理生态湿地，对园区工业污水厂排出的一级A出水进行提标。提标后的出水提供给工业水厂回用，减少对长江的污染。该项目日处理量为4000 m3，出水标准参照《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）中IV类水质标准。

本项目工艺流程如图4所示，整个项目使用重力流布水，调节池接收工业水厂尾水，并通过重力作用平均分布到20个垂直流滤床。垂直流滤床出水由管道收集后汇入生态塘，经由表面流滤床，最终进入饱和流滤床。处理后直接进入工业水厂用于园区工业生产。本项目设有太阳能电站，在保证了中心用电的前提下，余电能够输送至当地电网。在建设时也考虑到暴雨问题，全中心采用雨水控制方案，所有雨水均由内部接收处理。此项目垂直流滤床布水均由PLC控制，出水由自动检测站监测。



图4常熟新材料产业园水处理生态湿地工艺流程图

Fig.4 Treatment procedure of AMIP wetland center

对项目进出水水质进行评价（采样时间为2015年1月—2016年12月）（图5），由图可知常熟新材料产业园项目的进水较为稳定，这也体现了工业尾水和生活污水水质特征的不同。此外，项目出水较为稳定，全年满足地表IV类水质标准要求。



(a) 总氮；(b) 总磷；(c)化学需氧量；(d)氨氮

(a)TN; (b) TP; (c) COD; (d) NH3-N

图5常熟新材料产业园水处理生态湿地2015-2016年度进出水水质

Fig.5 Influent and effluent water quality of wetland center in AMIP 2015-2016

人工湿地对产业园区污水污染物具有较好的去除率，主要表现在对SS、TN、NH3-N三种污染物的去除（图6a）。SS、NH3-N、COD的去除主要由垂直流滤床完成，分别占总去除量的87%、91%和62%； TP的去除主要在生态塘中完成，占总去除量的 83%；饱和流滤床主要去除TN，利用滤床的厌氧状态进行反硝化作用去除TN，饱和流滤床占总去除量的50%（图6b）。

常熟产业园区工业尾水中氯离子的平均浓度为1000 mg/L，组合型人工湿地可在含氯环境中稳定有效运行。通过垂直流湿地湿地植物的生产观察，筛选出可在含盐量高的环境中生长的湿地植物，其中，芦竹*Arundo donax*、芦苇*Phragmites communis*、黄菖蒲*Iris pseudacorus*、美人蕉*Canna indica*、荻*Miscanthussacchariflorus*等对高盐度废水有较高的耐受性。



(a)进出水污染物浓度及总各污染物总去除率；

(b)人工湿地各工艺阶段去除污染物的贡献率

(a) Contaminate concentration in Influent and effluent and total removal rate;

(b) Contribution to removal rate by different sections of CW

图6常熟新材料产业园水处理生态湿地各阶段去除效率：

Fig.6 Removal efficiency of different sections from AMIP wetland center:

常熟产业园区 水处理生态湿地项目运营后，为园区污染物减排做出了贡献。2015至2016年累积回用了203.8 m3尾水，减排了COD100 t、氨氮7.2 t、总氮15.2 t。本项目是常熟市“十二五”重点工程，投入运营后助力全省建设“零排放示范工业园区”。

# 结论

基于人工湿地水环境治理和优化技术具有投资较低、操作简单、维运费用低、无二次污染、持续时间长，出水水质好，且能恢复生态系统等优势，能用于包括农村污水治理、城镇污水治理、河道治理及雨水治理等多个领域。

目前基于人工湿地的水质优化技术已在太湖流域得到成功应用。其中，苏州阳澄湖莲花岛4个生态湿地项目，主要采用以调节池、垂直流滤床、表面流滤床组合的人工湿地技术，将农村生物污水进行治理，有效降低污水中的COD、SS、TN、NH3-N，出水水质稳定达到一级A标准。应用调节池、垂直流滤床、生态塘、水平流滤床及饱和流滤床的组合型人工湿地，将常熟新材料产业园工业污水排出的一级A出水提标至地表IV类水，在实现对长江及环境污染物减排的同时，实现园区内的中水回用，节约了水资源。组合型人工湿地系统中各个不同的功能单元对于污染物的去除具有不同的作用和贡献。通过合理组合和利用人工湿地单元，可以治理不同来源和水质的污水。

“十三五”规划对污水厂提标改造和再生水提出了明确的任务目标：到2020 年，全国提标改造污水处理设施规模 4053万m3/d（江苏375 万m3/d），新增再生水利用设施规模 2113 万m3/d（江苏139.8 万m3/d）。并且鼓励利用人工湿地等生态设施，进一步提高出水水质，作为河道补充水、景观用水。2016年，苏州也对10条“挂牌”黑臭河道进行了整治行动。

相比于传统处理技术，基于人工湿地的水质优化技术的运营投入成本较低，在实现提标目标的同时，还能修复小区域的水生态环境，实现污染减排和资源节约。在苏州大力支持海绵城市建设、城镇污水处理厂提标、黑臭河道整治等背景下，基于人工湿地的水环境治理和优化技术将有较大的市场前景，能为太湖流域及江苏省的水安全提供保障。

# 参考文献

成芳, 凌去非, 徐海军, 等. 2010. 太湖水质现状与主要污染物分析[J]. 上海海洋大学学报, 19(1): 105-110

戴晓虎. 2012. 我国城镇污泥处理处置现状及思考[J]. 给水排水, 38(2): 15

贺墨梅, 刘焱. 2006. 污水集中式与分散式处理技术的比较研究[J]. 西南给排水, 28(4): 20-23

洪燕婷, 仇蕾. 2015. 太湖流域农业面源污染防控措施研究分析[J]. 环境科技, 28(3): 17-21

江林, 刘润龙, 朱丹,等. 2015.垂直潜流人工湿地处理城镇污水处理厂尾水的研究[J]. 环境工程, 33(9):74-77

龙珍, 张亚平, 管永祥, 等. 2015. 江苏省太湖流域农村生活污水处理设施建设情况剖析[J]. 安徽农业科学, 43(11): 220-224

谢蓉蓉, 逄勇, 徐心彤, 等. 2015. 江苏省太湖流域污染物排放变化规律及总量削减率的确定[J]. 水资源保护, 31(6): 165-169

颜润润, 程炜, 逄勇, 等. 2009. 苏南运河污染特征及治理对策研究[J]. 人民长江, 40(21): 66-70

张长滨, 范欣. 2013. 国内外近自然河道生态修复初探[J]. 森林工程, 29(6): 40-43

张瑛, 邢蓓燕, 杜建强. 2015. 苏南污染河道整治的生态湿地中心应用探讨[J]. 污染防治技术, 2015(4):11-13

Hein T, Schwarz U, Habersack H, et al. 2016. Current status and restoration options for floodplains along the Danube River[J]. Science of The Total Environment, 543(Pt A): 778-790

Nielsen S. 2003. Sludge drying reed beds. Water Science and Technology , 48(5): 101-109

Pan Baozhu, Yuan Jianping, Zhang Xinhua, et al. 2016. A review of ecological restoration techniques in fluvial rivers[J]. International Journal of Sediment Research, 31(2):110-119

Tjandraatmadja G, Burn S, McLaughlin M, et al. 2005. Rethinking urban water systems–revisiting concepts in urban wastewater collection and treatment to ensure infrastructure sustainability[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 5(2): 145-154

**基金项目：**用于处理工业尾水的强化型垂直流湿地硝化效率研究，2015年苏州市中小科技企业技术创新计划（工业部分）

**作者简介：**黄国动（1981-），男，山东菏泽人，中级工程师，主要从事人工湿地水处理项目的实施及运行管理研究。E-mail:123598093@qq.com

**通讯作者：**邢蓓燕，E-mail: rd@dehua-eco.com