



# 农业资源与环境学报

中文核心期刊

中国科技核心期刊

## JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

### 低污染水的定义、水质净化与资源化利用

卢少勇, 国晓春, 王宇娜, 万正芬

引用本文:

卢少勇, 国晓春, 王宇娜, 等. 低污染水的定义、水质净化与资源化利用[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 716–721.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0403>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### [人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展:效果、机制和影响因素](#)

王宇娜, 国晓春, 卢少勇, 刘晓晖, 王晓慧

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 722–734 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0499>

#### [杞麓湖径流区不同湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价](#)

浦江, 张翠萍, 刘淑娟, 杨小燕, 赵斌, 李淑英, 陆轶峰, 王媛媛, 周元清

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 755–763 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0484>

#### [风车草对低污染水体氮磷的净化效能](#)

张云潇, 徐佳敏, 卢少勇, 李锋民, 张亚茹, 王永强, 刘晓晖

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(5): 735–745 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0074>

#### [CAST一体化设备处理农村生活污水工况研究](#)

杨大川, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 丁健

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(5): 575–583 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0142>

#### [一种无动力·蒸发式农村生活污水处理新技术及其工程应用](#)

陈咄圳, 赵建军, 郑向群

*农业资源与环境学报*. 2019, 36(5): 570–574 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0264>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

卢少勇,国晓春,王宇娜,等.低污染水的定义、水质净化与资源化利用[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):716–721.

LU S Y, GUO X C, WANG Y N, et al. Definition, putrification and utilization of low-polluted water[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 716–721.



开放科学 OSID

# 低污染水的定义、水质净化与资源化利用

卢少勇<sup>1</sup>, 国晓春<sup>1</sup>, 王宇娜<sup>1,2</sup>, 万正芬<sup>1</sup>

(1. 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境研究所, 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100012)

**摘要:**“低污染水”这一概念被提出后,即在洱海、星云湖、抚仙湖和太湖等湖泊的水污染防治中得以应用。近年来,关于低污染水的内涵不断得到丰富。本文综述了低污染水的定义与类型、发展脉络、在水体保护中的定位、处理技术和回用等。最后针对低污染水的特点对其处理技术和管理体系等进行了展望,为今后对低污染水的深入研究与资源化利用提供了总体思路。

**关键词:**低污染水;湖泊;污染河水;雨水径流;农业径流;污水处理厂尾水

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)05-0716-06 doi: 10.13254/j.jare.2021.0403

## Definition, putrification and utilization of low-polluted water

LU Shaoyong<sup>1</sup>, GUO Xiaochun<sup>1</sup>, WANG Yunna<sup>1,2</sup>, WAN Zhengfen<sup>1</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu, Key Laboratory of Environmental Protection Agency for Lake Pollution Control, Institute of Lake Ecological Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100012, China)

**Abstract:** “Low-polluted water” was first applied to the concept of water pollution prevention in Erhai Lake, Xingyun Lake, Fuxian Lake, Taihu Lake and other lakes. In recent years, the concept of low-pollution water has been enriched. This study summarizes the definition and type of low-polluted water, development process, positioning in water body protection, treatment technologies and cases and the ways of reuse. Finally, a prospect is put forward for the treatment technology and management system, based on characteristics of low-polluted water, which provides ideas for further research on low-polluted water.

**Keywords:** low-polluted water; lake; polluted river water; rain runoff; agricultural runoff; tailwater from municipal wastewater treatment plant

随着经济快速发展与人口城镇化率迅速增长,污染物排放量总体呈现增加之势,流域水生态环境形势不容乐观。2020年,生态环境部发布了《2019中国生态环境状况公报》<sup>[1]</sup>,公报显示,我国七大水系总体呈轻度污染状况,主要污染指标为高锰酸盐指数、五日生化需氧量及氨氮。湖库水污染较严重,总氮、总磷是

主要污染指标,28%的湖库处于富营养状态。2019年我国人均水资源拥有量为2 077.7 m<sup>3</sup>,仅为全球水平的25%<sup>[2]</sup>。污水处理厂达标排放出水中污染物的浓度通常高于受纳水体中对应污染物的考核浓度,因此对于受纳水体而言,污水处理厂出水是水质、水量相对稳定的点源,是水体生态环境质量改善需重点考虑

收稿日期:2021-06-29 录用日期:2021-08-31

作者简介:卢少勇,博士,研究员,从事湖泊生态修复与污染防治研究。E-mail:lushy2000@163.com

基金项目:科技基础性工作专项(2015FY110900);水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07208008)

Project supported: Ministry of Science and Technology of China(2015FY110900); Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China(2018ZX07208008)

的一类低污染水。面对水资源匮乏且低污染水污染地表水等问题,低污染水的处理与回用成为“十四五”及以后一段时期内的研究和实践重点。

## 1 低污染水的定义与类型

“低污染水”的概念最早应用于洱海、星云湖与抚仙湖等湖泊的水污染防治,2007年,卢少勇等<sup>[3]</sup>开始研究低污染水处理关键技术。经过不断的研究与发展,低污染水的内涵不再局限于湖泊污染防治领域,也拓展到江河海污染防治领域,低污染水的定义也不断完善。金相灿<sup>[4]</sup>等认为低污染水是指经过污染源治理达标后排放的水,对湖泊水体仍存在一定威胁,不满足湖泊水质保护的要求。凌子微<sup>[5]</sup>、薛利红等<sup>[6]</sup>认为低污染水一般指部分水质指标达到城镇污水处理厂的排放标准,但浓度高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类甚至是V类水体标准值的水。笔者认为低污染水是主要污染物(高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总氮、总磷、溶解氧、pH值、悬浮物等)浓度值劣于《地表水环境质量标准》IV类水质标准限值,但不劣于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中三级标准限值的水,包括污染河水、雨水径流、农业径流(农田排灌水、农田退水)、达标排放的污水处理厂/设施出水及类似性质的水。

与低污染水较为接近的概念有微污染河水、微污染水体、微污染水源水,其含义分别如下:微污染河水<sup>[7]</sup>是指受到污染且主要水质指标差于《地表水环境质量标准》IV类水质标准,但不差于《城镇污水处理厂污染物排放标准》的河水;微污染水体<sup>[8]</sup>是指受到有机物污染且部分水质指标浓度超过《地表水环境质量标准》IV类水质标准限值但不高于《城镇污水处理厂污染物排放标准》二级标准限值的水体,其中 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) \leq 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\rho(\text{NH}_3-\text{N}) \leq 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\rho(\text{TP}) \leq 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\rho(\text{BOD}_5) \leq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\rho(\text{SS}) \leq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , $\rho(\text{TN}) \leq 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;微污染水源水<sup>[9]</sup>是指受到有机物污染且部分水质指标超过《地表水环境质量标准》Ⅲ类水体标准的水。低污染水的类型多,性质复杂,若从减少进入待保护水体的污染负荷量角度来考虑,低污染水包括污染河水、经污水处理厂等设施达标排放的尾水、雨水径流及农业径流(含农村分散性生活污水)及类似性质的水<sup>[10]</sup>。低污染水可分为三大类:第一类为连续排放的点源,如污水处理厂等设施的达标排放尾水,具有水量与水质双稳定的特点;第二类为间歇

排放的点源,如雨水径流与农业径流,其中,雨水径流不稳定,间歇性强、冲击性大,农业径流通常也有较强的水质、水量波动性,一些农业径流中混杂有部分村民的生活排水(直排污水、化粪池出水及小型处理设施出水等)、灌溉余水;第三类为连续流或间歇流,如上游污染河水,有的水质、水量均稳定,有的水质、水量均不稳定,有的水质或水量不稳定。

## 2 低污染水的研究脉络

笔者从中国知网数据库检索标题中含“低污染水”的中文文献,共检索到108篇,其中,期刊论文34篇、授权专利43项、学位论文26篇、科技成果2篇、会议论文1篇、报纸报道2篇。Web of Science数据库检索到标题中含“低污染水”的外文文献有11篇。按年份统计,2010年之前关于“低污染水”的研究尚处于起步阶段,相关论文不足10篇;2010年之后,该领域研究迅猛发展,相关论文增至113篇。

20世纪70年代,我国开始了湖泊水污染治理与富营养化防治,低污染水初步进入科学视野。2007年,卢少勇等<sup>[3]</sup>对低污染水处理技术开展研究。2008年,TIAN等<sup>[11]</sup>进行了膜吸附生物反应器与膜生物反应器处理低污染水的技术比较研究。2009年,《污水处理的人工湿地构建技术》一书中提及低污染水处理。2010年,金相灿等<sup>[4]</sup>结合不同类型湖泊治理实践经验,提出了以“污染源系统治理+流域清水产流机制修复+湖泊水体生境改善+流域管理”为主的湖泊水污染防治理念,其中低污染水的净化与治理模块中指出,经污染源工程治理后达标排放的水对湖泊而言属于低污染水。2011年,“处理低污染水的河道型湿地的关键技术研究及其应用”项目成果公布<sup>[12]</sup>并于2015年发表<sup>[13]</sup>。2012年,一些学者研究了膜反应器对低污染水的处理性能。如YU等<sup>[14]</sup>研究了新型中试规模的生物硅藻土动态膜反应器在连续流模式下用于低污染水处理的性能和机理,MA等<sup>[15]</sup>研究了在低温(10℃)下不同浓度粉末生物炭与膜反应器结合对低污染水的处理性能。

近年来,关于低污染水的研究主要有洱海流域低污染水产生、排放、入河及入湖规律研究<sup>[10]</sup>,以及高原地区初期富营养化湖泊<sup>[16]</sup>和平原河网地区富营养化湖泊<sup>[17~18]</sup>低污染水的水质净化与资源化利用技术研究。具体包括:①研发了以固体缓释碳源作为微生物电子供体和生长载体的地表低污染水强化反硝化脱氮关键技术,可针对性脱除低污染水中营养盐<sup>[17]</sup>;

②攻克了低污染水物化/生物强化生态净化和资源化利用等成套技术,实现了人工湿地高效稳定运行和对低污染尾水中氮磷的深度削减<sup>[18]</sup>;③低污染水处理技术主要有膜反应器<sup>[19]</sup>、生态滤池<sup>[20]</sup>、缓冲带<sup>[21-22]</sup>、人工湿地处理技术及其与生态修复技术的组合<sup>[23-29]</sup>、河塘库湿地集成技术<sup>[30]</sup>;④人工湿地技术或其他净化技术处理低污染水的脱氮除磷过程机理研究较多<sup>[31-35]</sup>;⑤低污染水碳氮比低的问题可通过外加电子供体、植物碳源、生物强化、固相反硝化技术等进行改进<sup>[36-40]</sup>,人工湿地与其他工艺结合可使湿地的出水水质达到《地表水环境质量标准》V类,如光伏电解技术<sup>[36]</sup>、铁碳微电解技术<sup>[41]</sup>和微生物燃料电池技术<sup>[37]</sup>。

### 3 低污染水在水体保护中的定位

低污染水所携带污染负荷的控制是我国水体保护的重要组成部分。2011年,金相灿等<sup>[4]</sup>提出湖泊绿色流域构建的六大体系,其中包括低污染水的净化与处理体系。保护水体的关键是削减入湖污染负荷,尤其是氮磷污染负荷,低污染水中氮磷的浓度远高于湖泊V类水标准值,不能与受纳水体功能良好衔接,低污染水中总氮浓度是水体氮浓度的重要贡献者之一,严重影响河湖水质,尤其是入海河流,一半以上的河流应该控制总氮,以减少对近岸海域海洋环境中无机氮容量的冲击。以云南洱海为例,洱海流域北部片区低污染水产生量最大,为9 750万m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>,其入湖径流量占50%以上<sup>[10]</sup>。以国内9个重要海湾为例,全国直排海污染源污水排放总量65.7亿t,中度及以上富营养化水体主要集中在辽东湾、长江口、珠江口及山东省、江苏省、浙江省部分近岸海域,重要海湾中,杭州湾为严重富营养,长江口、珠江口为重度富营养,辽东湾、渤海湾为轻度富营养<sup>[42]</sup>。第二次全国污染源普查结果表明,2017年水污染物排放量中,农业面源的总磷、化学需氧量大于生活源、工业源,总氮接近生活源而远高于工业源,氨氮低于生活源而高于工业源(表1)。低污染水是现阶段江河湖海等水体水质变差及

表1 2017年工业、生活、农业源的水污染物排放量(万t)  
Table 1 Water pollutant emissions from industrial, domestic and agricultural sources in 2017 (10<sup>4</sup> t)

来源 Source	总磷 TP	化学需氧量 COD	总氮 TN	氨氮 NH <sub>3</sub> -N
工业源	0.79	90.96	15.57	4.45
生活源	9.54	983.44	146.52	69.91
农业源	21.20	1 067.13	141.49	21.62

水体富营养化的重要污染源之一,因此,低污染水中氮磷浓度的进一步削减对有效控制水体富营养化、保障饮用水安全、实现人水和谐具有重要的现实意义。

### 4 低污染水处理及回用技术体系

不同流域不同类型的低污染水在物理特征(如悬浮颗粒物等)、化学特征(如污染物组成等)和降解难易性方面差异显著,因此需要搭建不同的处理技术体系,融合塘、前置库、砾石床、生态沟渠、水陆交错带、人工湿地等单元,与农村生活排水处理设施出水、种植业排水、污水厂出水、污染河水等有机衔接,把“水进人退”-水质净化-水资源化利用-水生态改善-水经济提升-精细化管理这一体系要素有机结合。例如,我国云南、江苏、湖南等南方地区的常年无水河床通常较窄,因此建议建设旁路净化人工湿地/塘系统,使净化后的水再进入河道,对局部生态改善有一定的作用。在这些省份建设人工湿地工程需要重点考虑可用地面积和初期雨水径流对湿地的冲击。在山东、宁夏、河北等北方地区,常年无水河床通常较宽,因此建议利用河滩地建设人工湿地系统,既能节约用地又可为河道提供生态流量。在这些省份建设人工湿地工程需要重点考虑行洪安全、湿地堵塞、冬季效果提升等。我国目前已经开展的处理低污染水的人工湿地工程建设与运行情况简要概括如下:

(1)云南省开展了大量人工湿地实践:①2014年,杨逢乐<sup>[30]</sup>针对高原湖泊低污染水处理提出河塘库湿地集成技术,即河道原位旁路净化技术、前置库塘调蓄沉淀及净化稳定技术、湿地水质改善和生态修复技术,构成了过程与末端相结合的入湖污染综合防治体系。②“十二五”水专项期间,学者针对流域低污染水的处理技术开展了系列代表性研究,在云南洱海从流域层面系统考虑低污染水处理,形成以河流滨岸带、库塘湿地等近自然体系为骨架,以强化生态工程湿地为辅助的低污染水处理体系<sup>[16]</sup>,上承低污染水排放,下接受纳区域环境要求或受纳水体功能,健全了流域污染治理工程,解决了洱海水质持续改善的难题。③在滇池流域,针对严格控源截污后的河流、上游雨污溢流污染、城郊城区面源污染和低污染的补水问题,杨逢乐<sup>[43]</sup>研究开发了以稳定固相反硝化脱氮技术为核心,集成旁路雨季调蓄、旱季净化,岸带立体拦截,城郊城区及河口全过程减污的清水修复治理技术体系。

(2)江苏省也有不少人工湿地实践:①在太湖流域,针对农田径流、农村分散性生活污水、村落无组织地表径流等不同类型低污染水,吕锡武<sup>[44]</sup>研发了“农村生活污水厌氧-跌水曝气-湿地生物生态组合技术”“功能强化型生化处理+阶式生物生态氧化塘污水处理组合技术”及“村落无序排放污水收集处理及氮磷资源化利用技术”,以适应不同排放类型农村生活污水的处理需求。②杨柳燕<sup>[18]</sup>针对污水厂尾水型低污染水,提出改性生物炭强化人工湿地和光电解人工湿地脱氮除磷技术,集成物化/生物强化人工湿地高效脱氮除磷技术和水生植物季节性交替维稳与资源化技术,形成了全年高效运行的低污染水强化人工湿地深度脱氮除磷和碳循环利用成套技术体系。③在太湖流域蠡湖区域,黄晓峰<sup>[17]</sup>研发了集“陆域面源拦截-河道清水廊道构建-湖滨水域生态修复”于一体的“高速发展的城镇滨湖流域水质改善与生态修复综合整装成套技术”。

低污染水的水质净化应与再生回用、资源化利用充分结合,尤其在缺水地区,低污染水可直接回用,或治理后回用,或分质回用。低污染水直接回用是依据其水质特点,直接作为自然水体的补充水源、要求不高的景观用水<sup>[45]</sup>或农业灌溉水等<sup>[46]</sup>。农业灌溉回用既能充分消纳氮磷,又能减少农田化肥用量,减轻水体污染,达到农业生产与生态环境治理双重效益<sup>[47]</sup>。一些低污染水可能需经一定处理或生态修复后才可进一步回用<sup>[46]</sup>:如污水处理厂尾水需经膜技术组合工艺、活性炭技术组合工艺、氨吹脱和臭氧氧化技术或人工湿地技术等深度处理<sup>[46]</sup>;雨水径流需经生物滞留池<sup>[48]</sup>或人工湿地<sup>[49]</sup>等处理;农业径流可引入生态拦截和人工湿地等治理措施<sup>[50]</sup>处理。低污染水经深度处理后可用于生态景观用水、城市杂用水(厕所冲水、道路喷洒、消防等),或供给相应工业用户(电厂、钢铁厂、石化、化工厂等),用于工业生产冷却用水、洗涤用水、锅炉补给水等<sup>[46]</sup>。根据城市杂用水(GB/T 18920—2002)与工业冷却用水(GB/T 19923—2005)、河道类观赏性景观用水(GB/T 18921—2002)的水质要求,低污染水经人工湿地等工艺净化后出水水质至少达《地表水环境质量标准》V类标准限值。

低污染水回用一方面可缓解我国水资源短缺问题,将低污染水“变废为宝”,减少自来水消耗量,另一方面可减少低污染水对受纳水体的污染,降低河湖污染物浓度,减轻水体富营养化程度,改善水体环境。

## 5 展望

“十二五”以来,对低污染水的处理技术、管理体系等方面的研究越来越多,但在示范和推广应用中,管理、制度与机制方面还不完善,工程技术的环境、经济和社会效益未充分体现。低污染水具有量大面广、部分水碳氮比低及可生化性差的特点,这对处理技术提出了较高的要求。然而我国地域辽阔,海拔、气象、耕作制度、水资源禀赋等的差异较大,目前学界对低污染水的产生、排放和进入水体的规律尚不十分清楚,对低污染水水质净化技术的耦合和集成研究还不足,对工程措施适用性、不同技术组合集成应用对低污染水净化影响的研究尚不充分,需要形成源头-过程-末端-资源化相结合的低污染水污染防治及资源利用技术体系,并大规模推广应用。

随着社会经济发展,人们对水环境、水生态、水资源、水安全、水文化提出了更高需求,作为水环境质量改善与可利用水资源的重要组成部分,低污染水的处理与管理意义重大。鉴于低污染水的处理技术主要包括生态沟渠、塘、人工湿地等,亟需推动发布人工湿地低污染水水质净化技术指南,规范人工湿地水质净化工程的设计、施工、质量验收、环保验收和运行维护,使湿地水质净化工程的环境、生态、社会及经济效益得到有效保障。

## 参考文献:

- [1] 生态环境部.中国环境状况公报[R].北京:生态环境部,2020.  
Ministry of Ecology and Environment of the PRC. Report on the state of the environment in China[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the PRC, 2020.
- [2] 国家统计局.中国统计年鉴2020[M].北京:中国统计出版社,2020.  
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [3] 卢少勇,金相灿,宗文骥,等.处理低污染水的河道型湿地的关键技术研究及其应用[R].北京:中国环境科学研究院,2007. LU S Y, JIN X C, ZONG W J, et al. Key technology research and application of river wetland for treating low-polluted water[R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Sciences, 2007.
- [4] 金相灿,胡小贞.湖泊流域清水产流机制修复方法及其修复策略[J].中国环境科学,2010,30(3):374-379. JIN X C, HU X Z. Concept and tactic of clean water runoff generation mechanism restoration in lake watershed[J]. China Environmental Science, 2010, 30(3):374-379.
- [5] 凌子微.强化充氧人工湿地处理低污染水的研究[D].上海:上海交通大学,2013. LING Z W. Study on treatment of low-contaminated water with aerating constructed wetland[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

- [6] 薛利红, 杨林章. 太湖流域稻田湿地对低污染水中氮磷的净化效果[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1): 117–124. XUE L H, YANG L Z. Purification of water with low concentrations of N and P in paddy wetlands in Taihu Lake region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(1): 117–124.
- [7] 生态环境部. 人工湿地水质净化技术指南[R]. 北京: 生态环境部, 2021. Ministry of Ecology and Environment of the PRC. Technical guidelines of constructed wetland water purification[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the PRC, 2021.
- [8] 山东省质量技术监督局. 人工湿地水质净化工程技术指南:DB 37/T 3394—2018[S]. 2018. Shandong Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical guide of constructed wetland water purification system: DB 37/T 3394—2018[S]. 2018.
- [9] 孙迎雪, 田媛. 微污染水源饮用水处理理论及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011. SUN Y X, TIAN Y. Theory and engineering application of slightly – polluted water source treatment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [10] 白献宇, 胡小贞, 庞燕. 洱海流域低污染水类型、污染负荷及分布[J]. 湖泊科学, 2015, 27(2): 200–207. BAI X Y, HU X Z, PANG Y. Pollution load, distribution and characteristics of low-polluted water in Lake Erhai watershed[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(2): 200–207.
- [11] TIAN J Y, LIANG H, YANG Y L, et al. Membrane adsorption bioreactor (MBR) for treating slightly polluted surface water supplies: As compared to membrane bioreactor (MBR) [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 325(1): 262–270.
- [12] 生态环境部. 2011年度国家环保科技成果登记表[R]. 北京: 生态环境部, 2011. Ministry of Ecology and Environment of the PRC. Registration form of national environmental protection scientific and technological achievements in 2011[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the PRC, 2011.
- [13] 卢少勇. 处理低污染水的河道型湿地的关键技术研究及其应用[J]. 中国科技成果, 2015(6): 55. LU S Y. Study on key technologies of river wetland for low-polluted water treatment and its application [J]. *Chinese Scientific and Technological Achievements*, 2015(6): 55.
- [14] YU Z X, CHU H Q, CAO D, et al. Pilot-scale hybrid bio-diatomite/ dynamic membrane reactor for slightly polluted raw water purification [J]. *Desalination*, 2012, 285: 73–82.
- [15] MA C, YU S L, SHI W X, et al. High concentration powdered activated carbon–membrane bioreactor (PAC–MBR) for slightly polluted surface water treatment at low temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 113: 136–142.
- [16] 储昭升, 庞燕, 卢少勇, 等. 两大举措助力突破洱海水质改善瓶颈[N]. 中国环境报, 2018-04-11. CHU Z S, PANG Y, LU S Y, et al. Two measures help break through the bottleneck of Erhai Lake and improve the water quality[N]. *China Environment News*, 2018-04-11.
- [17] 黄晓峰. “太湖新城湖滨流域水质改善与生态修复综合示范”课题(2012ZX07101-013)成果简介[R]. 无锡: 无锡城市发展集团有限公司, 2020. HUANG X F. Brief introduction to the achievements of the project “comprehensive demonstration of water quality improvement and ecological restoration in lakeside basin of Taihu new town” (2012ZX07101-013)[R]. Wuxi: Wuxi City Development Group Co., Ltd., 2020.
- [18] 杨柳燕.“低污染水生态净化技术集成研究与工程示范”课题(2012ZX07101-006)成果简介[R]. 南京:南京大学, 2020. YANG L Y. Brief introduction to the achievements of the project “integrated research and engineering demonstration of low-polluted water ecological purification technology” (2012ZX07101-006)[R]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [19] 应云飞, 江桂红, 王敏, 等. 平板膜在河道低污染水体净化处理中的试验研究[J]. 安徽化工, 2020, 46(4): 90–92. YING Y F, JIANG G H, WANG M, et al. Experimental study on flat membrane in purification of low-polluted water in river[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2020, 46(4): 90–92.
- [20] 单保庆, 尹澄清. 生态滤池在低污染水体治理中的应用及其季节效应[J]. 中国给水排水, 2010, 26(11): 21–23. SHAN B Q, YIN C Q. Application and seasonal effect of ecological filter in treatment of low-polluted water[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(11): 21–23.
- [21] 赵斌, 李明, 卢少勇, 等. 水生植物缓冲带对洱海流域低污染水中氮的净化效果[J]. 玉溪师范学院学报, 2019, 35(6): 52–57. ZHAO B, LI M, LU S Y, et al. The nitrogen removal effect of aquatic plant buffer strip on slightly polluted water in the Erhai Lake watershed[J]. *Journal of Yuxi Normal University*, 2019, 35(6): 52–57.
- [22] 张俊朋, 陆铁峰, 国晓春, 等. 表面流湿地去除洱海缓冲带低污染水氮模拟研究[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(5): 488–494. ZHANG J P, LU Y F, GUO X C, et al. Nitrogen removal of simulated low-polluted water of Lake Erhai buffer zone by surface-flow wetland[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5): 488–494.
- [23] LI C J, DONG Y, LEI Y H, et al. Removal of low concentration nutrients in hydroponic wetlands integrated with zeolite and calcium silicate hydrate functional substrates[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 442–450.
- [24] LIU Y, LIU X H, LI K, et al. Removal of nitrogen from low pollution water by long-term operation of an integrated vertical-flow constructed wetland: Performance and mechanism[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 977–988.
- [25] 潘傲. 人工湿地对低污染水体净化效果和基质微生物群落多样性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. PAN A. Purification of low-polluted water and diversity of microbial communities in constructed wetlands[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [26] 肖雨涵. 多级生态库塘-湿地对低污染水体中氮磷去除效果研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019. XIAO Y H. Removal of nitrogen and phosphorus in low-polluted water by multi-stage pond-wetland [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019.
- [27] 周灵君, 范亚民. 太湖流域低污染水处理技术研究[J]. 环境科技, 2016, 29(4): 50–55. ZHOU L J, FAN Y M. Applied research on treatment technique for low-polluted water in the Taihu Lake basin [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 29(4): 50–55.
- [28] 储昭升, 靳明, 叶碧碧, 等. 海菜花-螺蛳经济湿地对农田低污染水的净化[J]. 环境科学研究 2015, 28(6): 975–980. CHU Z S, JIN M, YE B B, et al. Research on purification of low-level contaminated water by *Ottelia acuminata*-*Margarya melanoides* constructed wetland[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(6): 975–980.

- [29] WANG J, ZHANG L Y, LU S Y, et al. Contaminant removal from low-concentration polluted river water by the bio-rack wetlands[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(6):1006–1013.
- [30] 杨逢乐. 高原湖泊低污染水治理技术及应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014. YANG F L. Treatment technology and application of low-polluted water in plateau lakes[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [31] HUANG T, LIU W, ZHANG Y, et al. A stable simultaneous anammox, denitrifying anaerobic methane oxidation and denitrification process in integrated vertical constructed wetlands for slightly polluted wastewater[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114363.
- [32] ZHANG L, CUI B H, YUAN B X, et al. Denitrification mechanism and artificial neural networks modeling for low-pollution water purification using a denitrification biological filter process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2021, 257:117918.
- [33] 吴浩恩, 魏才健, 吴为中. 多级土壤渗滤系统处理低有机污染水的脱氮效果与机理解析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(12):4392–4399. WU H E, WEI C J, WU W Z. Study on nitrogen removal performance and mechanism of external carbon source added two-stages multi-soil-layering systems for low pollutant loading wastewater treatment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(12):4392–4399.
- [34] 凌子微, 全欣楠, 李亚红, 等. 处理低污染水的复合人工湿地脱氮过程[J]. 环境科学研究, 2013(3):320–325. LING Z W, TONG X N, LI Y H, et al. Study on nitrogen removal process of treatments for slightly contaminated water on hybrid constructed wetlands[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013(3):320–325.
- [35] 杭前宇. 植物-硫混养反硝化强化农田低污染水脱氮及其机理研究[D]. 北京:中国环境科学研究院, 2017. HANG Q Y. Nitrate-rich agricultural runoff treatment by plant-sulfur mixotrophic denitrification process and its mechanism[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2017.
- [36] 单淇. 光照强度对光能自养生物膜去除低污染水体中硝态氮的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(3):15–19. SHAN Q. The effect of light intensity on removal efficiency of nitrate in low-polluted water treated by phototrophic biofilm[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, 35(3):15–19.
- [37] TAO M N, GUAN L, JING Z Q, et al. Enhanced denitrification and power generation of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) effluents with biomass in microbial fuel cell coupled with constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709:136159.
- [38] SHAO Y Y, PEI H Y, HU W R, et al. Bioaugmentation in lab scale constructed wetland microcosms for treating polluted river water and domestic wastewater in northern China[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 95:151–159.
- [39] GAO Y, YAN C, WEI R P, et al. Photovoltaic electrolysis improves nitrogen and phosphorus removals of biochar-amended constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138:71–78.
- [40] 王宇娜, 国晓春, 卢少勇, 等. 人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展:效果、机制和影响因素[J/OL]. 农业资源与环境学报:1–27.(2020–12–09). <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0499>. WANG Y N, GUO X C, LU S Y, et al. Review of nitrogen removal in low-polluted water by constructed wetlands: Performance, mechanism, and influencing factors[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*:1–27.(2020–12–09). <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0499>.
- [41] SHEN Y H, ZHUANG L L, ZHANG J, et al. A study of ferric-carbon micro-electrolysis process to enhance nitrogen and phosphorus removalal efficiency in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359:706–712.
- [42] 环境保护部. 2016中国近岸海域环境质量公报[R]. 北京:环境保护部, 2017. Ministry of Environmental Protection of the PRC. China coastal waters environmental quality bulletin 2016[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the PRC, 2017.
- [43] 杨逢乐.“流域入湖河流清水修复关键技术与工程示范”课题(2012ZX07102002)成果简介[R]. 昆明:云南省环境科学研究院, 2020. YANG F L. Introduction to the achievements of the project “key technologies and engineering demonstration of clean water restoration of rivers entering lakes in river basins”(2012ZX07102002)[R]. Kunming: Yunnan Academy of Environmental Sciences, 2020.
- [44] 吕锡武.“竺山湾农村分散式生活污水处理技术集成研究与工程示范”课题(2012ZX07101005)成果简介[R]. 南京:东南大学, 2020. LÜ X W. Introduction to the achievements of the project “integrated research and engineering demonstration of rural decentralized domestic sewage treatment technology in Zhushan Bay”(2012ZX0710005)[R]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [45] 胡颖, 张蔚. 常州新龙生态林低污染尾水净化与回用技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(12):49–58. HU Y, ZHANG W. Research on lightly contaminated tail water purification and recycling in Changzhou Xinlong ecological forest[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(12):49–58.
- [46] 金凤杰, 王栋鹏. 西安市中水回用模式探讨[J]. 环境工程, 2016, 34(S1):437–440. JIN F J, WANG D P. Discussion on the model of reclaimed water reuse in Xi'an City[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(S1):437–440.
- [47] 马资厚, 薛利红, 潘复燕, 等. 太湖流域稻田对3种低污染水氮的消纳利用及化肥减量效果[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4):570–576. MA Z H, XUE L H, PAN F Y, et al. Utilization of nitrogen in wastewater low in pollution degree in paddy fields and its effect on reducing fertilizer application in Tai Lake region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4):570–576.
- [48] 李晨. 城市雨水径流污染特征分析与资源化利用渗滤系统研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2019. LI C. Study on pollution characteristics of urban rainwater runoff and leachate system for resource utilization[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019.
- [49] 何丽君. 人工湿地对城镇降雨径流面源污染的净化机理及动力学研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012. HE L J. Research on purification mechanism and dynamics of towns runoff non-point pollution with constructed wetland[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [50] 张俊朋. 表面流湿地去除农业径流污染物的性能研究及应用[D]. 昆明:云南大学, 2018. ZHANG J P. Application and study on performance of pollutants removal from agricultural runoff by surface flow wetland[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.