

# 浅层滞缓流水体富营养化成因与防控策略

黄道军<sup>1</sup>, 薛睿康<sup>2</sup>, 李 凯<sup>2</sup>, 许 明<sup>1</sup>, 李永超<sup>1</sup>, 慕佳佳<sup>1</sup>, 黄廷林<sup>2</sup>

(1. 陕西西咸新区水务集团有限公司, 陕西 西安 712000; 2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 大多数的浅层湖泊、水库以及景观水体流动更新慢、滞留时间长, 可称之为浅层滞缓流水体。这类水体水动力条件差, 自净能力弱, 整个水体光照充足、夏秋季水温高, 且风力混合易导致底泥中营养盐释放, 因此在适当的气象条件下易发生富营养化和藻类爆发问题, 给城市环境和居民健康造成严重影响。本文从浅层滞缓流水体的水动力特征出发, 分析了其水质恶化原因和常用的水质污染控制技术, 提出了营养盐削减与藻类控制相结合、原位控制与异位削减协同的防控思路, 为浅层滞缓流水体富营养化控制和水质安全保障提供了思路。

**关键词:** 浅层滞缓流水体; 富营养化; 藻类爆发; 营养盐削减; 控藻

中图分类号: TU991

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)04-0514-06

## Eutrophication and algae bloom in shallow stagnant water bodies: Causes and control strategies

HUANG Daojun<sup>1</sup>, XUE Ruikang<sup>2</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, XU Ming<sup>1</sup>, LI Yongchao<sup>1</sup>,  
MU Jiajia<sup>1</sup>, HUANG Tinglin<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Xixian New Area Water Group Co. Ltd., Xi'an 712000, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Shallow stagnant water bodies refer to shallow lakes, reservoirs and landscape water bodies in which the water flow rate is slow and the hydraulic retention time is long. These shallow stagnant waters are characterized by poor hydrodynamic condition, weak self-purification capability, sufficient sunlight and high temperature in summer and autumn in all depth. Moreover, wind-induced mixing tends to promote release of nutrients from sediments. Therefore, algae blooms are prone to occur in these shallow stagnant waters under appropriate meteorological condition, which would impose a serious impact on urban environment and people's health. Based on the hydraulic characteristics of shallow stagnant water bodies, this paper analyzes the cause of water quality deterioration and common techniques for remediation of these water bodies. A prevention and control strategy of the combination of nutrients reduction and algae control is proposed, and future research directions are highlighted.

**Key words:** shallow stagnant water; eutrophication; algal bloom; reduction of nutrient; algae control

我国拥有大量的湖泊和水库, 其中水面面积在 1 km<sup>2</sup> 以上的湖泊有约 3 000 个, 同时还有 3 000 多座大、中型水库<sup>[1]</sup>; 随着城镇化水平的提高, 许多城市兴建了大量的景观水体。许多湖泊、水库和景观水体的水深较浅(一般在 5 m 以内)、流动缓慢, 可称之为浅层滞缓流水体。这类水体具有流动更新慢、滞留时间长的特点, 水体自净能力差, 外源输入的污染物易在水体内长期蓄积, 且水深较浅导致整个水体光照较强、夏秋季水温较高、沉积物-水界面易被风力扰动, 这为藻类繁殖提供了适宜的光照、水温和营养盐条件, 因此富

营养化和藻类爆发问题十分突出。

浅层滞缓流水体往往承担着城乡供水、景观娱乐等功能, 是城市水系统的重要组成部分。对于作为饮用水水源的水体, 富营养化不但影响自来水厂的正常运行, 造成混凝剂投量增大、滤池堵塞等问题, 还会导致水中臭味、藻毒素、消毒副产物前体物等含量增加<sup>[2]</sup>。城市内的湖泊、池塘等作为景观水体本应发挥其调节局部小气候、调蓄洪水、营造良好生态景观的作用, 但富营养化严重时会导致水生生物缺氧死亡, 加之部分藻类释放的臭味物质, 使水体感官性状急剧恶化, 丧

收稿日期: 2020-03-31

修改稿日期: 2020-07-15

基金项目: 陕西省重点研发计划重点产业链(群)-社会发展领域基金资助项目(2019ZDLSF06-03)

第一作者: 黄道军(1975—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水环境保护与水务运营管理研究。E-mail: huangdaojun750@163.com

通讯作者: 黄廷林(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事水水质污染与富营养化控制。E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

失其生态功能<sup>[3]</sup>。目前,国内外对水体富营养化问题已经做了大量研究工作,从削减外源输入、控制内源释放等角度形成了一系列防控技术,在一定程度上解决了部分水体的富营养化问题<sup>[4]</sup>,但并未从根本上控制藻类的爆发和水质的恶化。本文从浅层滞缓流水体的水动力特征出发,结合相关文献,总结了这类水体发生富营养化的原因和防控技术,提出了针对性的控制策略和技术措施。

## 1 浅层滞缓流水体富营养化原因

### 1.1 水体水动力特征

富营养化是指水体氮、磷营养盐大量增加,超过水体自净程度,造成藻类异常繁殖、水质恶化,进而丧失水体生态功能的现象。水体富营养化受到外源输入和内源释放的影响,也受水体流速、置换周期等水动力特征的影响。天然湖泊在正常的自然进程中也会出现富营养化现象,但浅层滞缓流水体的水力特征使其富营养化进程大大加快<sup>[5]</sup>。

浅层滞缓流水体流速低,入流携带的污染物进入水体后易沉积,加之水体更新慢,进入的污染物无法排出,在水体内不断蓄积,导致水体营养盐含量升高<sup>[6]</sup>。水深较浅是浅层滞缓流水体的另一重要特征,较浅的水深导致底泥易受到风力扰动等的影响,水-沉积物之间物质交换较为充分,上覆水中营养盐含量较高,为藻类的繁殖提供了营养条件<sup>[7]</sup>。光照是藻类繁殖的必要条件,水深较浅还使得整个水体光照较强,藻类在各深度均能生长,不存在光限制的情况。水动力条件不仅通过影响营养盐和光照间接影响藻类生长条件,还对水华藻类的生长有着直接的作用,滞缓流水体缓慢的水流流态和较长的更新周期为藻类的生长和聚集提供了适宜的条件<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 营养盐外源输入与内源释放

浅层滞缓流水体中营养盐按照来源可分为外源输入和内源释放。外源输入是随入流水体和地表径流汇入,既有城镇污水处理厂尾水、工业企业排水等点源污染,也包括雨水径流、农田排水等面源污染;内源污染指水体内部污染物迁移转化产生的营养盐,主要是水体底部沉积物释放产生,也包括藻类、水生植物等死亡后分解产生的。浅层滞缓流水体氮磷营养盐来源及迁移转化过程如图1所示。

近年来,随着环境保护和水污染治理工作力度的增大,城镇生活污水和工业废水的污染负荷

得到有效削减,点源污染已得到较好的控制<sup>[10]</sup>,但非点源污染问题日益凸显。降水淋洗使大气污染物进入水环境,特别是氮的沉降已成为水体营养盐的重要来源<sup>[11-12]</sup>。牛勇<sup>[13]</sup>等对环太湖区域营养盐沉降的研究表明,2017年8月—2018年7月大气降水中总氮和总磷的浓度范围分别为1.51~5.13和0.02~0.09 mg/L,总氮和总磷的沉降通量分别为7 641 t和131 t,对水体富营养化的贡献不可忽视。雨水径流对地表的冲刷作用会使大量颗粒态和溶解态营养盐进入水体,营养盐浓度与下垫面性质、降雨特征等密切相关。侯培强等<sup>[14]</sup>对我国主要城市现有面源污染研究数据的分析表明,城市道路和屋面径流中总氮的平均浓度分别为7.84 mg/L和6.20 mg/L,总磷平均浓度分别为0.78 mg/L和0.38 mg/L,显著高于天然雨水。在面积更为广阔的农村地区,面源污染问题更为突出,有研究认为农村面源污染可占河流和湖泊营养盐负荷的60%~80%<sup>[15]</sup>。

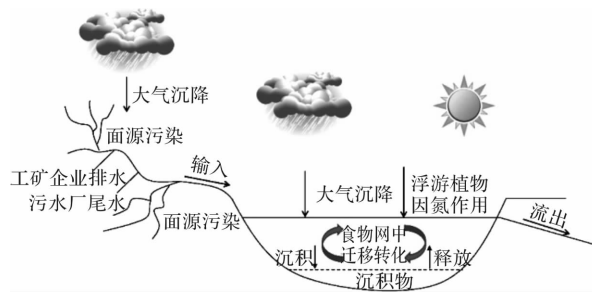


图1 浅层滞缓水体营养盐来源与迁移转化过程示意图

Fig. 1 Source and migration of nitrogen and phosphorus in shallow stagnant water

沉积物中营养盐的释放是内源污染的主要形式,与深水湖库相比,浅层水体不会出现稳定的热分层,因此较少出现厌氧条件下底泥污染物的释放问题<sup>[16]</sup>,但其底泥易受风浪等水力扰动影响发生再悬浮,导致营养盐大量释放<sup>[17-18]</sup>。此外,已发生富营养化的水体,藻类衰亡分解过程中会产生大量的营养盐<sup>[19-20]</sup>,这些营养盐在水体内蓄积会进一步促进藻类繁殖,该过程会周而复始,形成恶性循环。

因此,浅层滞缓流水体自身较弱的自净能力和适宜藻类生长的水动力条件、外源污染物的输入与内源污染的释放共同导致了其富营养化加剧、水质不断恶化。

## 2 浅层滞缓流水体富营养化防控策略

### 2.1 削减外源污染输入

近年来,随着点源污染逐步得到控制,面源

污染已成为外源污染控制的重点和难点。浅层滞缓流水体富营养化风险更高,应在其汇水区域内通过海绵城市建设、初期雨水和合流制溢流污水处理等措施控制城市径流污染<sup>[21-22]</sup>,通过农村人居环境整治、农业种植结构调整、合理控制化肥使用量等削减农村面源污染负荷<sup>[23]</sup>。需要指出的是,面源污染控制是一项长期系统工程,短期内往往难以见效。

此外,作为景观水体的湖泊、池塘等由于缺乏补给水源,大多以再生水为水源。再生水中营养盐水平通常较高,这是景观水体富营养化的重要原因<sup>[24-25]</sup>。为进一步降低营养盐水平,就须对污水厂尾水进行深度处理,例如采用膜生物反应器+反渗透技术等可将水中的营养盐降至较低水平,但这些系统通常投资较大,且运行费用较高<sup>[26]</sup>,在很多地区难以大规模推广应用。

## 2.2 控制内源污染释放

底泥疏浚或覆盖是沉积物内源污染控制的常用技术。底泥疏浚是通过挖除营养盐、有机物等含量较高的受污染底泥来减少污染物向上覆水体的释放。科学合理的底泥疏浚能够移除水体内部污染源,有效减少底泥污染物的释放,降低水体营养盐水平<sup>[27]</sup>。但若疏挖措施不当,会导致间隙水中污染物大量释放;或疏挖深度不当,可能使营养盐含量更高的深层底泥暴露于上覆水体,反而使水体中营养盐含量升高,加剧富营养化<sup>[28]</sup>。此外,底泥疏浚工程量大,特别是疏浚过程中产生大量污染物含量很高的淤泥,须设置专门区域和处理工艺进行处置,整体费用较高<sup>[29]</sup>。底泥覆盖是通过投加改性沸石、黏土、红泥等材料在底泥表面形成覆盖层,阻止底泥中污染物向水体释放,对于底泥污染严重、淤积速度缓慢的水体,底泥覆盖技术可在短期内有效地控制污染物的释放<sup>[30]</sup>。但由于污染物依然存在于底泥中,随着时间推移,有再次从底泥释放的风险。

生物修复技术利用水生植物或微生物的新陈代谢作用削减水中的营养盐。水生植物在生长过程中从水体和底泥中吸收营养物质,通过定期收割可达到从根本上去除营养盐的目的,同时水生植物还能起到稳定沉积物、削弱风浪对底泥的再悬浮作用<sup>[31]</sup>。但无论是滨岸带的人工湿地还是生态浮床,其影响范围有限,不适用于大面积水域,且植物的生长受季节影响较大。微生物作为生态系统的分解者,在水体生物修复中有广泛的应用,但大多数微生物仅能实现有机物的分解,传统的

脱氮微生物为严格厌氧菌,无法实现天然水体中好氧条件下氮的去除<sup>[32]</sup>。好氧反硝化菌的发现为天然水体中营养盐的原位去除提供了可能,能在脱氮的同时实现有机物的削减,在浅层滞缓流水体原位修复与水质改善方面有广阔的应用前景<sup>[33-34]</sup>。

## 2.3 控制藻类生长

藻类爆发是富营养化水体最突出的问题,如果能在高藻期快速降低水中藻密度,将极大的改善水体感官质量,营造良好的水体景观。

控藻方法可分为物理、化学和生物控藻三种。物理法控藻以人工或机械捞除、超声波控藻、遮光控藻等为主。陈雪初<sup>[35]</sup>等开展的原位围隔实验表明,在叶绿素 a 高达  $100 \mu\text{g/L}$  时,实施遮光处理 7~9 d,叶绿素 a 浓度可以下降到  $30 \mu\text{g/L}$ 。Rodriguez-Molares 等<sup>[36]</sup>的研究表明超声波能够破坏蓝藻细胞的气囊,促进藻细胞的沉降从而抑制有害藻类的繁殖。但上述技术存在着费用较高、实施难度大、不适合大面积水域的问题。深井增压控藻技术(图 2)利用深水压力使蓝藻细胞的气囊破裂,浮力调节功能丧失,该技术运行能耗和费用极低,在浅层滞缓流水体藻类控制方面具有较好的应用前景<sup>[37-38]</sup>。化学法是使用杀藻剂使藻细胞衰亡裂解,但杀藻剂在快速降低藻密度的同时也影响其他水生动植物的生长,其在食物链中的富集成为潜在的生态安全隐患,因此在实际工程中使用较少。生物法控藻包括滤食性鱼类的滤食作用和溶藻细菌对藻类的分解作用等<sup>[39]</sup>,这类方法具有成本低、无二次污染的特点,但仅能在一定程度上减缓藻类的爆发,并不能从根本上控制藻类的繁殖。

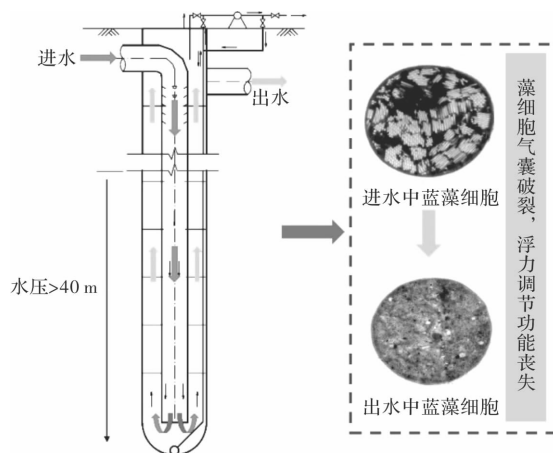


图2 深井增压控藻技术原理示意图<sup>[37-38]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of algae control through deep well circulation

## 2.4 浅层滞缓流水体富营养化综合控制技术

在浅层滞缓流水体富营养化控制中,改善水动力条件是前提,削减营养盐是根本,控制藻类繁殖是关键。在陕西省重点研发计划重点产业创新链项目的支持下,西安建筑科技大学联合陕西西咸新区水务集团有限公司正在开展浅层滞缓流水体营养盐削减与藻类控制技术研发,基于好氧反硝化脱氮<sup>[33-34]</sup>、深井增压控藻<sup>[37]</sup>、循环造粒流化床高效固液分离<sup>[40]</sup>等关键技术开发浅层滞缓流水体富营养化综合控制技术。

该集成技术针对浅层滞缓流水体的污染特征,将原位控制与异位削减相结合,根据水质污染程度采取针对性的控制技术,具体来说,在水体内设置生物填料单元,利用微生物负载技术将好氧反硝化细菌负载在填料上,保持微生物的活性、脱氮特性、抗水力冲击性等,实现在好氧、贫营养条件下原位高效持续脱氮除碳;中低污染负荷时,在利用好氧反硝化生物膜削减浅层水体的营养盐的同时,通过原位低能耗深井循环降低藻类活性的同时,增加湖湾、库湾等滞流区水体流动,改变水体流场,以极低的能耗增强水体流动、实现物理控藻;外源补水水质差或水体内部藻类高发时,通过原位好氧反硝化、深井增压控藻、循环造粒流化床高效固液分离等单元协同工作,在削减水中的氮磷营养盐的同时高效分离藻类、有机物,避免污染物在水体内的蓄积,保障水质安全。

## 3 结语与展望

国内外针对浅层滞缓流水体富营养化问题已从控源截污、内源控制、生物修复等方面开展了许多研究工作,在非点源污染控制、再生水深度净化、底泥疏浚与覆盖、水生植物和微生物修复以及不同原理的藻类控制技术等方面取得了丰硕的成果。但这些技术单独使用仅能解决某一方面的问题,并不能完全解决浅层滞缓流水体的富营养化问题。此外,水体富营养化控制工程往往涉及水域面积大、长期运行,应充分考虑技术的投资和运行成本。

为从根本上解决浅层滞缓流水体水质污染与富营养化问题,发挥其应有的生态环境与社会效益,应从改善水动力条件、降低营养盐水平和控制藻类繁殖等多方面着手,筛选经济高效的适用技术,通过技术集成和优化,在削减外源输入的同时,增强水体流动性,利用功能微生物原位削

减营养盐,通过物理或生物方法抑制藻类繁殖,并在高污染负荷和高藻期进行高效净化,标本兼治,保障水质安全和水体功能。

## 参考文献 References

- [1] 中华人民共和国水利部编. 中国水利统计年鉴 2019 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China statistical yearbook of water resources of 2019 [M]. Beijing: China Water Power Press, 2019.
- [2] 黄廷林. 水源水库水质污染原位控制与改善是饮用水水质安全保障的首要前提[J]. 给水排水, 2017, 43(1): 1-3, 69.  
HUANG Tinglin. In-situ control and improvement of water pollution in source reservoirs is the primary prerequisite for the safety of drinking water quality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(1): 1-3, 69.
- [3] BROOKS BRYAN W, LAZORCHAK JAMES M, HOWARD MEREDITH D A, et al. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems? [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2016, 35(1): 6-13.
- [4] LE C, ZHA Y, LI Y, et al. Eutrophication of lake waters in China: Cost, causes, and control[J]. Environmental Management, 2010, 45(4): 662-668.
- [5] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.  
QIN Boqiang, YANG Liuyan, CHEN Feizhou, et al. Mechanism and control technology of lake eutrophication and its application[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [6] ZAN Fengyu, HUO Shouliang, XI Beidou, et al. A 100-year sedimentary record of natural and anthropogenic impacts on a shallow eutrophic lake, Lake Chaohu, China[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(3): 804-816.
- [7] WANG Jianjian, PANG Yong, LI Yiping, et al. Experimental study of wind-induced sediment suspension and nutrient release in Meiliang Bay of lake Taihu, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(14): 10471-10479.
- [8] 梁培瑜, 王烜, 马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 455-462.  
LIANG Peiyu, WANG Xuan, MA Fangbing. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: A review[J]. Journal of Lake Science, 2015, 22(14):

- 10471-10479.
- [9] 黄鹏, 田腾飞, 张文安, 等. 水动力条件对水体中藻类生长的抑制作用[J]. 环境工程, 2018, 36(12): 64-69.
- HUANG Peng, TIAN Tengfei, ZHANG Wenan, et al. Inhibition of algae growth in water by hydrodynamic force[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(12): 64-69.
- [10] QU Jiuhui, WANG Hongchen, WANG Kaijun, et al. Municipal wastewater treatment in China: Development history and future perspectives[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, 13(6): 1-7.
- [11] LIU Xuejun, ZHANG Ying, HAN Wenxuan, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494(7438): 459-462.
- [12] ZHU Jianxing, HE Nianpeng, WANG Qiufeng, et al. The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems[J]. Science of The Total Environment, 2015, 511(511): 777-785.
- [13] 牛勇, 牛远, 王琳杰, 等. 2009-2018年太湖大气湿沉降氮磷特征对比研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1): 122-129.
- NIU Yong, NIU Yuan, WANG Linjie, et al. Comparative study on nitrogen and phosphorus characteristics of atmospheric wet deposition in Lake Taihu from 2009 to 2018[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(1): 122-129.
- [14] 侯培强, 王效科, 郑飞翔, 等. 我国城市面源污染特征的研究现状[J]. 给水排水, 2009, 45(S1): 188-193.
- HOU Peiqiang, QANG Xiaoke, ZHENG Feixiang, et al. Study status of the characteristics of urban non-point source pollution in China[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(S1): 188-193.
- [15] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299.
- QUAN Weimin, YAN Lijiao. Effects of agricultural non-point source pollution on eutrophication of water body and its control measure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(3): 291-299.
- [16] HUANG Tinglin. Water pollution and water quality control of selected Chinese reservoir basins[M]. Germany: The Handbook of Environment Chemistry, 2015: 109-115.
- [17] 李安峰, 杨冲, 胡翔, 等. 北京奥林匹克公园龙形水系底泥氮磷释放实验研究[J]. 环境工程, 2013, 31(4): 40-44, 47.
- LI Anfeng, YANG Chong, HU Xiang, et al. Experiments of nitrogen and phosphorus release of sediment in dragon-shaped water system of Beijing olympic park[J]. Environmental Engineering, 2013, 31(4): 40-44, 47.
- [18] 石文平, 朱佳, 张朝升, 等. 水库浅水区底泥营养物质释放与藻类生长关系研究[J]. 环境工程, 2015, 33(5): 75-80.
- SHI Wenping, ZHU Jia, ZHANG Chaosheng, et al. Relationship between sediment nutrient release and algae growth in the shallow area of the reservoir[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(5): 75-80.
- [19] YAN Xingcheng, XU Xiaoguang, WANG Mingyue, et al. Climate warming and cyanobacteria blooms: Looks at their relationships from a new perspective[J]. Water Research, 2017, 125: 449-457.
- [20] 尚丽霞, 柯凡, 李文朝, 等. 高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J]. 湖泊科学, 2013, (1): 47-54.
- SHANG Lixia, KE Fan, LI Wenchao, et al. Laboratory study on the contaminants release during the anaerobic decomposition of high-density cyanobacteria[J]. Journal of Lake Science, 2013, 25(1): 47-54.
- [21] 李平, 王晟. 生物滞留技术控制城市面源污染的作用与机理[J]. 环境工程, 2014, 32(3): 75-79.
- LI Ping, WANG Sheng, Effect and mechanism of bioretention technology for urban non-point source pollution control[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(3): 75-79.
- [22] 曾思育, 董欣. 城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J]. 给水排水, 2015, 51(10): 1-3.
- ZENG Siyu, DONG Xing. Development and practice of urban rainfall runoff pollution control technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(10): 1-3.
- [23] 杨林章, 吴永红. 农业面源污染防控与水环境保护[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 168-176.
- YANG Linzhang, WU Yonghong. Prevention and control of agricultural non-point source pollution and aquatic environmental protection[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(2): 168-176.
- [24] CHEN Rong, AO Dong, JI Jiayuan, et al. Insight into the risk of replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater[J]. Journal of Hazardous Material, 2017, 324(Pt B): 573-582.
- [25] 刘轩, 陈荣, 雷振, 等. 再生水补水条件下底泥对藻类生长影响作用[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 37-41.
- LIU Xuan, CHEN Rong, LEI Zhen, et al. Effect of

- sediment on the growth of algae under recycled water supplement conditions[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(7): 37-41.
- [26] 秦桂海. 改良 AAO/MBR/RO 工艺用于半地下式污水处理厂工程设计[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(12): 46-49.
- QIN Guihai. Project design of improved AAO/MBR/RO process in semi-underground wastewater treatment plant[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(12): 46-49.
- [27] 王敬富, 陈敬安, 孙清清, 等. 底泥疏浚对阿哈水库内源污染的影响[J]. *环境工程*, 2018, 36(3): 69-73, 147.
- WANG Jingfu, CHEN Jingan, et al. Effect of dredging of the sediment pollution in AHA reserboir[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(3): 69-73, 147.
- [28] 陆子川. 湖泊底泥挖掘可能导致水体氮磷平衡破坏的研究[J]. *中国环境监测*, 2001, 17(2): 40-42.
- LU Zichuan. Study on digging up the lake sediments which may lead to destroying the balance of nitrogen and phosphorus in water[J]. *Environmental Monitoring of China*, 2001, 17(2): 40-42.
- [29] 薄涛, 季民. 内源污染控制技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 514-521.
- BO Tao, JI Min. Study progress of endogenous pollution control technology[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2017, 26(3): 514-521.
- [30] 郭贇, 赵秀红, 黄晓峰, 等. 原位活性覆盖抑制河道底泥营养盐释放的效果研究及工程化应用[J]. *环境工程*, 2018, 36(6): 6-11.
- GUO Yun, ZHAO Xiuhong, HUANG Xiaofeng, et al. Study on in-situ active capping for eutrophic sediment nutrients control in river and its engineering application[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(6): 6-11.
- [31] 纪荣平, 吕锡武, 李先宁. 人工介质对富营养化水体中氮磷营养物质去除特性研究[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(1): 39-45.
- JI Rongping, LU Xiwu, LI Xianning. Performance of artificial medium for removing nutrients in eutrophic water[J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(1): 39-45.
- [32] MARCHANT H K, AHMERKAMP S, LAVIK G, et al. Denitrifying community in coastal sediments performs aerobic and anaerobic respiration simultaneously[J]. *The ISME journal*, 2017, 11(8): 1799-1812.
- [33] WEN Gang, WANG Tong, LI Kai, et al. Aerobic denitrification performance of strain *Acinetobacter johnsonii* WGX-9 using different natural organic matter as carbon source: Effect of molecular weight[J]. *Water Research*, 2019, 164.
- [34] ZHANG Haihan, ZHAO Zhenfang, KANG Pengliang, et al. Biological nitrogen removal and metabolic characteristics of a novel aerobic denitrifying fungus *Hanseniaspora uvarum* strain KPL108[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 267: 569-577.
- [35] 陈雪初, 孙扬才, 曾晓文, 等. 低光照度对源水中铜绿微囊藻增殖的抑制作用[J]. *中国环境科学*, 2007, (3): 352-355.
- CHEN Xuechu, SUN Yangcai, ZENG Xiaowen, et al. The inhibition of low light intensity on the growth of *microcystis aeruginosa* in raw water[J]. *China Environment Science*, 2007, 27(3): 352-355.
- [36] RODRIGUEZ-MOLARES A, DICKSON S, HOBSON P, et al. Quantification of the ultrasound induced sedimentation of *microcystis aeruginosa* [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(4): 1299-1304.
- [37] 黄廷林, 胡瑞柱, 丛海兵. 一种无动力投药与混合式深井增压强化控藻水处理设备, 中国, CN106348357B [P/OL]. 2019-06-11.
- HUANG Tinglin, HU Ruizhu, CONG Haibing. A water treatment equipment composed of non-power dosing and deep well circulation with static mixer for algal control, CN106348357B [P/OL]. 2019-06-11.
- [38] CONG Haibing, SUN Feng, WU Jun, et al. Study on method and mechanism of deep well circulation for the growth control of *microcystis* in aquaculture pond [J]. *Water Science and Technology*, 2017, 75(11): 2692-2701.
- [39] 王红强, 李宝宏, 张东令, 等. 藻类的生物控制技术研究进展[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(5): 38-41.
- WANG Hongqiang, LI Baohong, ZHANG Dongling, et al. Research advance in biological techniques for controlling algae growth[J]. *Safety and Environment Engineering*, 2013, 20(5): 38-41.
- [40] 黄廷林, 胡瑞柱. 一种高效固液分离的循环造粒流化床, 中国, CN208327492U [P/OL]. 2019-01-04.
- HUANG Tinglin, HU Ruizhu. A circulating granulator fluidized bed for high efficiency solid-liquid separation, CN106348357B [P/OL]. 2019-06-11.

(编辑 沈 波)