

文章编号:1005-0523(2014)02-0072-07

富营养化景观水体的处理技术及相关研究进展

聂发辉,刘荣荣,刘占孟

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:富营养化景观水体一直以来是国内外水处理的难题。针对这种水体修复效果差、藻类多、溶解氧低、氮磷含量高、透光性小等特点,从物化处理方法和生物处理两个方面综述了国内外这种类型水体的处理技术,根据各种方法的特点,分析了其优势和不足,提出了未来该类水体的主要研究方向,为实践中该类水体的治理提供参考。

关键词:景观水体;富营养化;物化处理;生物处理

中图分类号:X524

文献标志码:A

景观水体在美化城市环境的同时还具有调节气候、改善环境、防灾防旱和维持水体循环的功能,因其特殊的经济价值深受人们的喜爱而广泛地应用于喷泉、瀑布、人工湖、城市河道、护城河和景观池塘等,成为居民休闲和娱乐的重要组成部分。然而景观水是一种封闭缓慢的水体,具有水域面积小、水量少、水位浅、易污染、自净能力差等特点,再加上早期技术局限、设计的不合理和水质的管理不善造成氮磷等营养物质输入景观水而积累,在各种环境因子的综合作用下导致水体富营养化的发生^[1]。目前,主要采用物化和生物法处理富营养化景观水,通过污染物的控制和去除达到水质改善的目的。

1 物化处理

物化法运行稳定,处理后的水质受环境影响较小,在处理藻型及过营养化景观水体时,能在短期时间达到改善水质,恢复水体的欣赏价值,常用的物化处理方法有底泥疏浚法、曝气充氧法、混凝沉淀法、絮凝气浮法、灭藻法和吸附法等。

1.1 底泥疏浚

底泥疏浚法可在较短的时间取得明显效果,有效地提高水体的透明度,降低水中氮、磷的含量。以一定深度底泥疏浚后,沉积物中的营养物、重金属和持久性有机物等污染物的去除明显^[2]。胡小贞等^[3]对滇池草海污染底泥环保疏浚一期工程实施前后水质底质及水生生物的检测与分析,疏浚后草海水体透明度由0.37 m提高到0.8 m,水中的TN(总氮)和TP(总磷)由疏浚前的 $8.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到疏浚后的 $8.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

涂宝华等^[4]通过竺山湖底泥疏浚表层50cm的模拟试验,得到疏浚与对照柱间隙水的 NH_4^+-N 浓度分别为 $2.8 \sim 7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.6 \sim 11.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,沉积物-水界面的 NH_4^+-N 通量分别为 $5.3 \sim 15.3 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $4.5 \sim 62.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,底泥疏浚对竺山湖内源氮释放具有较好的控制作用。

1.2 曝气充氧

曝气充氧法是处理富营养化水体最常用的的方法,通过机械设备曝气或扰动增加水体中氧的浓度,增

收稿日期:2014-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51168031);江西省自然科学基金项目(20114BAB213020);江西省科技支撑基金项目(20122BBBG70081)

作者简介:聂发辉(1977—),男,副教授,主要研究方向城市面源污染控制。

强水体中微生物的活性,提高氧化有机物的能力^[5]。

卢萃云等^[6]研究发现曝气充氧及人工造流技术对污染水体的有一定的修复效果。河道在自然运行条件下对COD(化学需氧量),TP,NH₃-N和TN的去除率分别为7.44%,4.88%,5.70%和21.1%,通过曝气充氧,在最佳气水比条件下,对COD,TP,NH₃-N和TN的去除率分别为26.82%,16.07%,9.51%和23.80%。

孙井梅等^[7]在搅拌和曝气条件,研究扰动对水体富营养化的改善。结果表明:扰动能够有效促进底泥中氨氮向水体扩散,从而使底泥中氮含量明显降低,运行99 d后,曝气反应器中底泥总氮含量从初始3.46 g·kg⁻¹降至0.68 g·kg⁻¹,为对照反应器的1/4,总磷的平均去除率为37%。

Mostefa等^[8]针对卢塞恩(瑞士)的富营养化湖泊,在冬天采用空气曝入空气,水体的溶解氧保持在8 mg·L⁻¹以上,总磷的浓度低于0.15 mg·L⁻¹;夏天采用纯氧曝气,在湖泊的15~30 m处,溶解氧浓度保持在5 mg·L⁻¹以上,总磷浓度低于0.13 mg·L⁻¹,从而能有效的改善湖泊的水质。

1.3 混凝沉淀法

混凝沉淀法可用于处理悬浮物、胶体物质及藻类的富营养化水体,具有操作简单、效果好,使用单一处理往往药剂费用较高,一般作为富营养化水体的预处理。

丁希楼等^[9]采用预氧化和混凝沉淀相结合处理富营养化水体,当高锰酸钾投加量0.6 mg·L⁻¹,氧化时间15 min,PAC投加量30 mg·L⁻¹,沉淀30 min时,在低密度和高密度含藻水中藻类去除率可分别达到95.8%,97.2%,除藻效果良好。

陆洪省等^[10]在28℃、摇床(150 r·min⁻¹)、pH值为7~8条件培养产高效絮凝剂的细菌(SKDX-1),研究发现产生的该絮凝剂对水体中叶绿素的去除率高达87.14%,对浊度的去除率为96%。

胡颖慧等^[11]用粉煤灰酸活化后过滤得到的滤液对壳聚糖进行改性,制备出一种新型絮凝剂,采用高锰酸钾预氧化,壳聚糖较少用量(0.6 mg·L⁻¹)可获得90%的藻去除率;当高锰酸钾投加量为1 mg·L⁻¹时,改性壳聚糖的投加量大大减少(0.3 mg·L⁻¹),藻去除率同比提高了近30%。

1.4 絮凝气浮法

絮凝气浮法利用气泡的顶托作用,气泡上升的过程中被颗粒吸附,絮凝体中夹气泡,使其密度小于水的从而浮在水面,刮除浮渣能有效地去除水体中的氮磷和有机物。由于藻类密度较小,絮凝后絮核轻飘,粘附气泡性能较好,因而相比混凝沉淀,絮凝气浮法处理富营养化水体更具优势^[12]。

郑广宏等^[13]通过正交试验复配了一种能够高效去除藻类、浊度和TP的混凝药剂,在加药量为20 mg·L⁻¹,表面负荷为2.0 mm·s⁻¹和反应时间为4.5 min的最佳试验条件下,对藻类,浊度TP,TN和COD的平均去除率分别达93.2%,89.5%,74.9%,33.8%和43.5%。

柳姝等^[14]采用新型TCRI-17微气泡气浮装置絮凝气浮处理富营养化的含藻废水,当混凝剂PAC、PAM投加量为40 mg·L⁻¹和2 mg·L⁻¹时,通过2 min的混凝,2 min的气浮,SS和COD去除率分别达到98.4%和85.7%。与混凝沉降相比,缩短了处理时间,PAC用量减少至2/3。

汝旋等^[15]用低频交变脉冲电絮凝气浮法对叶绿素a含量为345.3~517.7 mg·m⁻³的富营养化水体进行修复,选择脉冲频率为0.1 kHz脉冲,电压为25 V,占空比为70%的工艺参数,经铝电极电解20 min后对叶绿素a的去除率即可达到92.36%,对UV₂₅₄的去除率为40.83%;经处理后,水体的叶绿素a含量降低至33.48 mg·m⁻³,大大降低了水体中藻类以及有机物的含量。

1.5 灭藻法

灭藻法是通过投加化学药剂把水体中的藻类杀灭,从而增加水体的溶解氧,改善水质和恢复水体的美观,常用的杀藻药剂有二氧化氯、高锰酸盐、硫酸铜、漂白粉等。

季颖等^[16]采用二氧化氯处理富营养化水体,当二氧化氯投加量为2.5 mg·L⁻¹,温度25℃时,pH=7.17,反应15 min,对惠氏微囊藻和铜绿微囊藻的杀灭率分别为97.23%,96.2%;二氧化氯对藻水进行预氧化处理,

当二氧化氯预投量为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水叶绿素的去除率达到 98.5%,藻的杀灭率达到 95%,浊度去除率达到 89.08%。

李星等^[17]以高锰酸盐、氯化铝、氯化钠及酸溶氯化亚铜制取的复合除藻剂除藻效果显著,对浊度和叶绿素 a 的去除率最高达到 99.1% 和 97.8%,能有效的把总氮和总磷最低残余量控制在 $1.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

韩铁军等^[18]采用铜电解组合技术工艺灭藻,在处理第 12 天,除藻率为 68.84%,浑浊度、COD、嗅阈值、氨氮分别下降 57.14%,50.00%,48.44%,39.13%,溶解氧增加了 66.7%,铜电解组合技术工艺对综合改善景观水质有显著效果。

1.6 吸附法

吸附法是利用吸附剂把水中的污染物和营养物质吸附去除,常用的吸附材料如硅酸钙、沸石、钢渣、工业炉渣、树脂等,具有费用低、吸附效果好等优点。

韩剑宏等^[19]采用粒径大小为 100 目的硅酸钙处理富营养化湖水,当投加量为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,pH 值为 8,震荡时间为 60 min 时,对氨氮的去除率达到 81.67%,能有效地降低水体中的氨氮浓度。

刘丽娜等^[20]采用中钙粉煤灰处理总磷(TP)为 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可溶性磷酸盐(DP)为 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的重度富营养化水体,对 DP 的去除率为 88.30%。

段金明等^[21]利用钢渣与氢氧化铝以 4:3 质量配比混合,在 700°C 下进行 2 h 煅烧,得到改性钢渣脱氮除磷能力远远大于原钢渣,当 pH 值为 4~8,氨氮(以 N 计)最大吸附量在 10,20,30 $^\circ\text{C}$ 下分别为 1.67,2.59,3.24 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$,磷酸根(以 P 计)的最大吸附量在 10,20,30 $^\circ\text{C}$ 下分别为 1.02,1.19,1.37 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.7 其他物化方法

周小平等^[22]对 2007—2008 年引江济太调水对太湖的水质影响分析,发现 2008 年 5 月与去年同期相比贡湖的高锰酸盐指数、总磷和总氮质量浓度分别从 7.04,0.106,4.10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 3.35,0.087,2.87 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

Wauer 等^[23]利用硝酸盐、铁复合物对德国的 Dagow 湖和 Globosow 湖进行底泥原位处理,水体的磷释放量由处理前 $4\sim 6 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 降低到几乎为 0。

Lüring 等^[24]研究絮凝剂聚合氯化铝(PAC)与改性吸附剂膨润土组合药剂对富营养化湖泊水处理效果,结果发现,当 PAC 投加量为 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,改性膨润土投加量为 $390 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对水体中藻类和浊度的去除效果较好,水体中叶绿素 a 浓度从 $19.5(\pm 36.5) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为 $3.7(\pm 4.5) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,TP 的浓度从 $169(\pm 126) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低为 $14(\pm 15) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

于红蕾等^[25]采用纳滤(NF90、NF270)预处理景观水体,研究纳滤的对 DIN 的去除效果和 DON 的精确性。结果表明,NF270 对 DIN 的去除效果好,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均去除率为 55.9%、73.1% 和 72%;同时 DON 有较强的保留性,能把 DIN/TNT 控制在 47.5% 至 84.5% 之间。

2 生物处理

生物法具有去污效果好,运行费用低、不造成二次污染等优点,是目前富营养化水处理中最为有效的方法^[26]。生物法可以灵活运用于富营养化水体,与物化法进行组合能达到很好的处理效果,常用的生物法有生物床、微生物修复、植物浮床、人工湿地等。

2.1 生物床

生物床常用物理化学稳定、机械强度高、比表面积大、截留效果好的基质作为滤池的填充材料,通过挂膜技术使微生物附着在填料上形成生物膜,把水体引入生物滤池,通过滤层的物理吸附、化学结合、微生物降解的综合作用,去除水中的氮磷等营养物质。

张孝中等^[27]用复合生物滤池处理城市高污染水体,当滤池容积负荷为 $0.3\sim 5 \text{ kg COD}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,水力负荷 $4.5\sim 5 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,C/N 为 5~8 时,通风比为 9%,滤池对 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 平均去除率分别为 80%,83% 和 63%,达到高效同步硝化反硝化状态。

李文松等^[28]采用折流式活性炭纤维生物膜工艺处理景观水体,在折流状态下,温度为10~28℃,pH为6.8~7.4,HRT(水力停留时间)为3 h情况下,系统对COD,NH₃-N,TP和浊度去除率分别达到了82%,67%,45.3%和79.4%。出水COD为14.8 mg·L⁻¹,NH₃-N和TP的质量浓度分别为1.02 mg·L⁻¹和0.063 mg·L⁻¹,浊度为7 NTU。

Chen等^[29]采用水生植物、沸石、陶粒和卵石组成的生物滤床,当水力负荷为1.2 mg·d⁻¹时,SS(悬浮固体),TN,NH₄⁺-N,NO₃-N,NO₂-N和TP的去除率均保持在50%以上,水生植物能有效地去除SS,NH₄⁺-N和除磷,COD主要由生物陶瓷去除,砾石床对总氮的去除率为60.6%。

Jing等^[30]采用多孔粉煤灰、陶瓷颗粒为基质的生物滤池,引入污水流经滤池运行16 d完成接种,在水力负荷为4.0~5.0 m³·(m² d)⁻¹,C/N比为6~10的最佳条件下,COD、氮分别通过上滤层硝化作用和下滤层的反硝化作用去除,COD,NH₄⁺-N,TND的去除率分别为80%,85%和60%。

2.2 微生物修复

人工培养和筛选出对氮磷、有机物等物质吸收、降解效果好的细菌,如光合细菌、硝化细菌等,利用这些微生物高效的处理能力,达到治理富营养化水体的目的。

缪鑫昕等^[31]研究了添加碳源及投加反硝化细菌对低碳氮比景观水体生物脱氮的影响,结果表明,B. subtilis FS05投加能显著促进水体的生物脱氮作用,水体在28℃静置72 h后,对TN、氨氮、硝酸盐及亚硝酸盐的去除率分别达到了66.9%,73.4%,66.0%和82.2%。

Yang等^[32]利用光合细菌、硝化细菌、复合细菌等细菌处理富营养化水,在pH为8的条件下投加微生物菌群,水中COD、叶绿素a和氨氮的平均去除率分别为60%,90%和50%,溶解氧含量从1 mg·L⁻¹增加到7 mg·L⁻¹。

周慧华等^[33]采用自主研发的水体生物基、底泥生物基和微动力涡轮水循环曝气系统处理富营养化水体。结果发现,水体生物基对水体中COD,NH₄⁺-N和TP的平均去除率分别为82.33%,98.00%和54.73%,在投加5 d内可达到20%以上的底泥减量率;组合系统对水体营养盐去除和底泥有机质降解效果较好,COD,NH₄⁺-N和TP的去除率分别为52.0%,33.6%和23.4%,同时河道底泥中有机质成分下降了26%。

2.3 植物浮床

植物浮床是利用植物高度发达的根系通过吸附和吸收作用把水体中氮磷等营养物质转移到植物上,选择合适的时间进行打捞和收割,最终降低水体中氮磷的含量。

郑立国等^[34]采用浮法控制器、水循环增氧系统和造浪-输送系统为辅助设备的组合型生态浮床处理景观水,研究上覆水-沉积物中氮磷形态的迁移转化。结果表明:实验期间上覆水中TN,NH₄⁺-N和TP的去除率分别达到61.92%,63.09%和80.0%,DO由原来的8.7~8.9 mg·L⁻¹上升到9.3~10.4 mg·L⁻¹;沉积物中TN和NH₄⁺-N的去除率分别达到23.79%和37.04%,同时TP含量上升了43.71%。

Li等^[35]采用空心菜、滤食性贝类和人工半软装配介质作为生物膜载体组成生态浮床系统,在太湖岸边进行围隔实验,当交换周期7 d时,浮床对TN,NH₄⁺-N,TP,TOC和叶绿素a的平均去除率为52.7%,33.7%,54.5%,49.2%和89.2%。

丛海兵等^[36]采用陆地湿生的耐寒植物-黄菖蒲作为生态浮床植物,对TN,TP的平均去除速率为763.79,86.92 mg·(m²·d)⁻¹,氮、磷的年去除量分别为186 365.78,21 207.64 mg·(m²·a)⁻¹。

Hu等^[37]采用炉渣(粘合剂)、膨胀珍珠岩(轻量级剂)和稳定化处理的疏浚淤泥进行固化菖蒲浮床,当污泥、炉渣、膨胀珍珠岩混合比为29:5:6时,固化产物具有1.55 MPa抗压强度和0.24 MPa弯曲强度,对TN,TP,NH₄⁺-N和叶绿素a的去除率分别为36.3%,35.7%,44.3%和47.9%。

2.4 人工湿地

人工湿地作为一种新型污水生态处理技术,在国内外取得了较快速的发展。它具有工艺简单、易于维护、缓冲容量大、抗污染负荷,在实现净化污水的同时还能美化环境和提高景观的欣赏价值等优点,在环境污染治理方面已得到广泛的应用^[38-39]。

黄德锋等^[40]采用风车草水平潜流、美人蕉水平潜流、砾石复合垂直流和沸石-页岩复合垂直流4种类型湿地处理富营养化景观水,发现各类污染物均有较好的去除效果,对浊度和叶绿素a的去除率分别为80.2%~92.3%和92.2%~98.3%;COD_{cr},TP,TN去除率分别为56.6%~77.4%,73.0%~95.0%和58.1%~85.3%。

He等^[41]采用由砾石、沸石和矿灰组成的三级人工湿地系统处理富营养化水体,运行14周后,相比以砂砾为基质的单级人工湿地,TN、TP的去除率分别提高了21.56%~62.27%,19.37%~65.27%。

余江等^[42]采用改良混合式平面流人工湿地系统在水力停留时间为3 d时,系统总体上运行到25 d后逐渐趋于稳定,TP,TN的平均去除率可达到60.0%,80.5%;随后提高进水中氮磷浓度,保持水力停留时间不变,在21 d运行期内,系统一直保持比较高的抗冲击和稳定性,TP、TN的平均去除率可达到86.8%,90.1%。

Li等^[43]采用垂直潜流、水平潜流和表面流三种人工湿地处理太湖富营养化水体,水力负荷为 $0.64 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,对COD、氨氮、硝酸盐氮、TN和TP的去除率分别为17%~40%,23%~46%,34%~65%,20%~52%和35%~66%;通过收割表面流人工湿地的植物,对TN和TP去除率为20%和57%,当土地受限制时,采用高水利负荷率的垂直潜流和水平潜流的人工湿地具有很好的脱氮除磷效果,最终出水的总磷浓度分别为 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.052 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3 结论与展望

1) 采用单一的处理方法如引水稀释、曝气充氧、絮凝沉淀、加药气浮、吸附法等治理富营养化水体,效果往往不佳,尽管底泥疏浚法处理效果好,但费用较高限制了其大规模的运用。絮凝法能有效去除水体中悬浮物、藻类、有机物、氨氮,但作为单一处理会造成二次污染,通常作为预处理工艺,协助生物法处理。利用微生物的高效吸收和降解作用,筛选、培养和分离对氮磷降解能力强的微生物,通过植物浮床、人工湿地、基质提供微生物附着,能有效地改善水质。从长远来看,拥有高效、经济、环保处理效果的生物处理技术将是今后研究的主体方向,通过联合物理、化学、物化等技术手段,将常规技术与生物技术的综合处理方法进行优化,从而有效治理富营养化水体。

2) 采用化学药剂处理藻水费用一般较高而且往往会造成二次污染,因而研究制取广谱、高效的抑藻-杀藻剂是未来的主要研究方向。目前研究的水生植物化感-抑制控藻技术、植物的提取液及微生物的分泌物对抑制、控制藻类已经取得一定的成效,它有效的减少水体水华和恶臭的发生,把藻的生物量控制在较低的水平,为实践中藻型富营养化水体治理提供参照。

3) 人工湿地具有缓冲容量大、工艺简单、经济高效、美化环境等优点在我国有一定的运用,同时人工湿地也存在易堵塞、受季节性影响的问题。通过有效的措施解决人工湿地的堵塞问题,采用污染负荷高、吸附效果好、截留效果好、使用周期长的基质,提高人工湿地的处理效率;研究氮磷吸收效果好的抗寒型植物-人工湿地,使湿地在寒冷的环境也能保持较好的氮磷去除效果;优化人工湿地的布水方式,增加水体的溶解氧,从而加强植物-微生物的协同净化能力。在此基础上采用脱氮除磷效率高的复合、多级的新型人工湿地将为人工湿地提供一个广阔的发展前景。

4) 污水处理厂的出水的二级处理技术组合和优化具有广泛的应用前景。外源物质中氮磷等营养释放、积累是导致水体发生富营养化的主要原因,从预防的角度我们应该采用适当污水的截留措施,通过加强管理把水体污染源控制住,与此同时采用经济的污水处理厂的二级处理出水来补充景观水体,能有效的减少水体的氮磷负荷。

参考文献:

- [1] HILTON J O, HAREN M, BOWES M J O, et al. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. *Sci Total Environ*, 2006, 365: 66–83.
- [2] 张丹, 张勇, 何岩, 等. 河道底泥环保疏浚研究进展[J]. *净水技术*, 2011, 6(1): 1–3.
- [3] 胡小贞, 金相灿, 刘倩, 等. 滇池污染底泥环保疏浚一期工程实施后环境效益评估[J]. *环境检测与预警*, 2010, 6(4): 46–49.
- [4] 涂宝华, 李有纯, 雷春生, 等. 竺山湖底泥疏浚对内源氮释放的控制作用研究[J]. *中国给水排水*, 2011, 24(21): 86–88.
- [5] ZHANG X. Restoration of a small, shallow, eutrophic lake by submerged aeration and comparison with a similar lake[D]. Colorado: Colorado State University, 2013.
- [6] 卢萃云, 庞志华, 林方敏, 等. 曝气充氧和人工造流技术修复河道污染水体[J]. *环境工程学报*, 2012, 12(4): 1135–1141.
- [7] 孙井梅, 王志超, 席兆胜, 等. 扰动对水体富营养化的改善作用[J]. *生态环境学报*, 2012, 12(8): 1447–1451.
- [8] MOSTEFA G, AHMED K. Treatment of water supplies by the technique of dynamic aeration[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 33: 209–214.
- [9] 丁希楼, 李家, 赵凯, 等. 预氧化+混凝沉淀工艺处理景观水[J]. *环保科技*, 2009, 4(2): 28–31.
- [10] 陆洪省, 魏文超, 薛婷婷. 微生物絮凝剂的研制及其对水体叶绿素a的去除[J]. *环境工程学报*, 2013, 9(2): 530–534.
- [11] 胡颖慧, 乔俊莲, 董磊, 等. 粉煤灰改性壳聚糖处理城市景观水的研究[J]. *水处理技术*, 2010, 12(7): 50–52.
- [12] KWON S B, AHN H W, AHN C J, et al. A case study of dissolved air flotation for seasonal high turbidity water in Korea[J]. *Wat Sci Tech*, 2004, 50(12): 245–253.
- [13] 郑广宏, 夏邦天, 乔俊莲, 等. 混凝气浮工艺处理富营养化景观水的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(11): 72–75.
- [14] 柳姝, 黄培坤, 汪群慧, 等. 混凝-微气泡气浮法处理含藻废水的研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 12(12): 1639–1643.
- [15] 汝旋, 喻泽斌, 韦武林, 等. 低频交变脉冲电絮凝气浮法修复重度富营养化水体[J]. *中国给水排水*, 2011, 24(9): 16–20.
- [16] 季颖, 付娇, 黄君礼, 等. 二氧化氯杀灭水中微囊藻的效果研究[J]. *化学工程师*, 2008, 12(1): 17–20.
- [17] 李星, 赵亮, 杨艳玲, 等. 复合除藻剂灭藻效能及其机理[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 12(10): 1402–1407.
- [18] 韩铁军, 曾卓, 崔绘. 景观水灭藻处理的研究[J]. *环境与健康杂志*, 2007, 12(1): 34–36.
- [19] 韩剑宏, 杨冬梅, 刘派. 硅酸钙处理富营养化湖水中氨氮的实验研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 9(3): 490–493.
- [20] 刘丽娜, 刘志明, 吴德意, 等. 粉煤灰吸附去除城市景观水体中磷的初步研究[J]. *环境科学与技术*, 2006, 12(2): 40–42.
- [21] 段金明, 林锦美, 方宏达, 等. 改性钢渣吸附氨氮和磷的特性研究[J]. *环境工程学报*, 2012, 12(1): 201–205.
- [22] 周小平, 翟淑华, 袁粒. 2007—2008年引江济太调水对太湖水质改善效果分析[J]. *水资源保护*, 2010, 6(1): 40–43.
- [23] WAUER G, GONSIORCZYK T, KRETSCHMER K, et al. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release[J]. *Wat Res*, 2005, 39 (2): 494–500.
- [24] LÜRLING M, OOSTEHOUDT F. Controlling eutrophication by combined bloom precipitation and sediment phosphorus inactivation[J]. *Water Research*, 2013, 47(17): 6527–6537.
- [25] 于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 等. 纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征[J]. *环境科学*, 2013, 12(6): 2256–2262.
- [26] SHAN M, WANG Y, XUE S. Study on bioremediation of eutrophic lake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 16–18.
- [27] 张孝中, 黄新荆, 肇乾, 等. 复合生物滤池处理城市高污染水体[J]. *环境工程学报*, 2013, 11(2): 541–545.
- [28] 李文松, 金腊华, 陈冠宏, 等. 折流式活性炭纤维生物膜工艺处理景观水研究[J]. *水处理技术*, 2009, 12(12): 68–70.
- [29] CHEN X, HUANG X, HE S, et al. Pilot-scale study on preserving eutrophic landscape pond water with a combined recycling purification system[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 383–389.
- [30] JING Z, LI Y, CAO S, et al. Performance of double-layer biofilter packed with coal fly ash ceramic granules in treating highly polluted river water[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 212–217.
- [31] 缪鑫昕, 张磊, 谈曙明, 等. 碳源及反硝化芽孢杆菌强化低C/N比景观水体的生物脱氮[J]. *环境工程学报*, 2013, 11(5): 1661–1664.
- [32] YANG Z, ZHANG H, ZHANG D, et al. Study on biological denitrification removal technologies treating eutrophication water[C]. Springer Berlin Heidelberg, 2014, 250: 1229–1236.

- [33] 周慧华,宋晓光,吴革,等. 水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究[J]. 环境科学,2013,12(10):3879-3887.
- [34] 郑立国,杨仁斌,王海萍,等. 组合型生态浮床对上覆水和沉积物之间氮磷的影响[J]. 环境科学,2013,12(8):3065-3071.
- [35] LI X N, SONG H L, LI W, et al. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4):382-390.
- [36] 丛海兵,吴黎明. 2种耐寒生态浮床植物的水质改善性能研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1):51-56.
- [37] HU G, ZHOU M, HOU H, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake silt for purification of eutrophic water[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10):1448-1458.
- [38] 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, 2013, 4(2):128-133.
- [39] 李安峰,徐文江,潘涛,等. 新型复合折流人工湿地处理富营养化水的效果[J]. 中国给水排水, 2013, 18(3):29-32.
- [40] 黄德峰. 人工湿地净化富营养化景观水的效果及机理研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [41] HE S B, YAN L, KONG H N, et al. Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water[J]. Pedosphere, 2007, 17(4):522-528.
- [42] 余江,陈文清,刘建泉,等. 人工湿地对氮磷去除效果试验研究[J]. 四川大学学报, 2012, 6(3):7-12.
- [43] LI L, LI Y, BISWAS D K, et al. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: evidence from Taihu Lake of China[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6):1656-1663.

Treatment Technology of Eutrophication Landscape Waters

Nie Fahui, Liu Rongrong, Liu Zhanmeng

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Eutrophic landscape water has been recognized as a treatment problem both at home and abroad. In view of the poor effect of repairing water, more water weed, low dissolving oxygen, high content of nitrogen and phosphorus, small light transmission, this paper discusses in details the features, advantages and disadvantages of different treatment technologies from physicochemical and biochemical perspective. Besides, it points out the relevant future research direction and provides reference for treating eutrophication landscape waters.

Key words: landscape waters; eutrophication; physicochemical treatment; biochemical treatment