

再生水景观水体富营养化因素的垂直变化特征

黄伟伟¹, 郑兴灿², 廖飞凤², 刘莉³

(1. 河北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063009; 2 国家城市给水排水工程技术研究中心, 天津 300074; 3 西南大学 资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 合肥市环城水系是以再生水为唯一补水水源的城市景观水体, 选择环城水系中具有代表性的银河水体, 对河道水体中的磷、氮、溶解氧和 pH 值的垂直分布及变化规律进行了研究。结果表明, 沿水体的深度方向, 总磷、氨氮、正磷酸盐浓度逐渐增高, pH 值和溶解氧浓度则逐渐降低。溶解氧和 pH 值可间接反映藻类的生长情况和密度, 可作为水华暴发的简便预警指标。

关键词: 再生水; 景观水体; 富营养化; 影响因素; 垂直分布

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000 - 4602(2008)01 - 0065 - 05

Vertical Variation Characteristics of Eutrophication Factors in Landscape Water Body Supplemented by Reclaimed Water

HUANG Wei-wei¹, ZHENG Xing-can², LAO Fei-feng², LIU Li³

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China; 2 National Engineering Research Center for Urban Water and Wastewater, Tianjin 300074, China; 3 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: The city-circling water system in Hefei City is landscape water body supplemented only by reclaimed water. The representative river, Yinhe River in the city-circling water system was chosen, and the vertical distribution and variation rule of phosphorus, nitrogen, DO and pH in it were investigated. The results show that the concentrations of TP, NH₃ - N and PO₄³⁻ - P increase gradually with the depth increasing, while pH and DO decrease. The pH value and DO can indirectly reflect the growth and density of the algae, and may be used as an alarm signal of water bloom.

Key words: reclaimed water; landscape water body; eutrophication; influence factors; vertical distribution

以再生水构建城市人工水体或补充天然水体时, 由于再生水中的磷、氮含量偏高, 故容易导致水体中藻类的过度繁殖。我国城市再生水用于景观环境用水的相关水质标准偏低, 虽然再生水厂的出水水质达到了相关水质标准的要求, 但相对于自然状态的河流而言, 水中的污染物本底值仍较高, 加上自然水体的稀释自净能力较差, 因而易暴发水华现象。

合肥市环城水系是在老护城河的基础上建立起来的, 主要包括逍遥津、银河、包河、雨花塘和黑池坝

等水体, 水面面积约为 46 hm²。目前, 除逍遥津公园外, 其他景观水体全部采用城市再生水作为唯一补水来源, 部分水体相互连通。其中, 银河是一条带状河道, 有一定的自然落差, 全长约为 1.05 km, 水面面积为 3.65 hm², 水深为 1~2 m, 河道总容积约为 10.2 × 10⁴ m³。再生水经管道输送至银河最前端, 一部分向东供给银河, 再由银河流入包河, 由包河排入南淝河; 另一部分经泵站提升, 向西供给雨花塘、琥珀潭、黑池坝、杏花公园, 最后流至南淝河。

2005年和 2006 年的夏季,合肥环城水系的部分水体出现了蓝藻和绿藻的过度生长,藻类在水面漂浮、聚集,明显影响了景观水体的感官效果和水质。笔者对银河再生水景观水体中的磷、氮、溶解氧和 pH 值的垂直变化进行了监测,以期为城市再生水景观水体的水质维护和藻类生长的控制提供依据。

1 材料与方法

1.1 水样采集

采用自制的水样采集装置,在银河出水口附近设置采样点,每周采样两次。在水体垂直方向上分别取表层和 30、50、100、150、200 cm 深度处的水样,采样量均为 500 mL,将水样装入干净的塑料瓶中,带回实验室后分别测定水样的 pH 值、TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 及 NH_3-N ,同时对水样进行藻类镜检;DO 和水温则采用便携式溶解氧仪现场实测。

取样日期(样品编号)分别为:2006 年 7 月 27 日(A)、7 月 30 日(B)、8 月 3 日(C)、8 月 12 日(D)、8 月 17 日(E),采样时刻均为上午 9:00—10:00。为考察再生水水质对水体的影响,于 2006 年 8 月 29 日—31 日对再生水厂的出水水质进行了 48 h 的连续监测。

1.2 分析方法

TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、 NH_3-N 和 pH 值的测定参照《水和废水监测分析方法》^[1]及《湖泊富营养化调查规范》^[2]中的相关方法,藻类的鉴定参照《淡水微型生物图谱》^[3]。

2 结果与讨论

2.1 水体富营养化状况

一般认为,水体富营养化的指标为^[4]:

水体中含磷量 >0.01 mg/L,含氮量 >0.2~0.3 mg/L;

生化需氧量 >10 mg/L;

淡水中细菌总量达到 10^4 CFU/mL;

标志藻类生长的叶绿素 a 浓度 >10 $\mu\text{g/L}$ 。

表 1 为银河水体的基本水质情况,可见银河水体中的磷、氮含量均超出了水体富营养化指标的限值,属于富营养化水体。

监测期间发现银河部分水域中浮有绿色藻类。镜检结果表明,水中出现的藻类主要为蓝藻和绿藻,包括微囊藻、丝藻、栅藻、色球藻等,其中微囊藻占多数。蓝藻的细胞内有气泡,通过气泡的萎陷和再生

使之产生上浮或下沉的现象^[5],蓝藻的这种能够进行垂直迁移的特性,使得它们在与其它藻类竞争营养盐,尤其是竞争光能方面具有明显的优势。

表 1 银河水体的基本水质

Tab 1 Water quality data of Yinhe River

项目	范围
温度 /	28.1~31.5
TP/(mg·L ⁻¹)	0.089~0.189
PO ₄ ³⁻ -P/(mg·L ⁻¹)	0~0.097
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	0.236~1.32
DO/(mg·L ⁻¹)	1.5~17.14
pH	7.55~8.57
藻类种属	蓝藻和绿藻

许多试验者研究并描述了浅层水域蓝藻垂直分布的特点,指出微囊藻的生物量在上午时间段内的垂直分布为:表层>中层>底层^[6];水华期间,叶绿素的垂直分布也为:表层>中层>底层。

2.2 营养盐含量垂直分布特征

2.2.1 磷含量的垂直分布特征

TP 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 沿水深的分布情况分别见图 1、2。

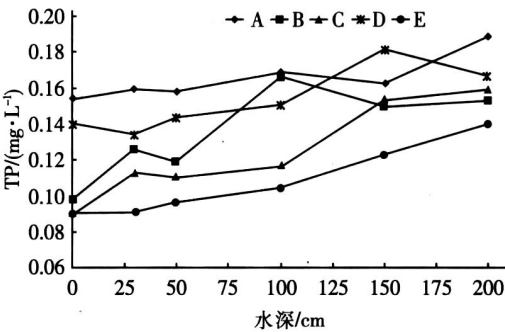


图 1 银河水体中总磷的垂直分布

Fig 1 Vertical distribution of total phosphorus concentration

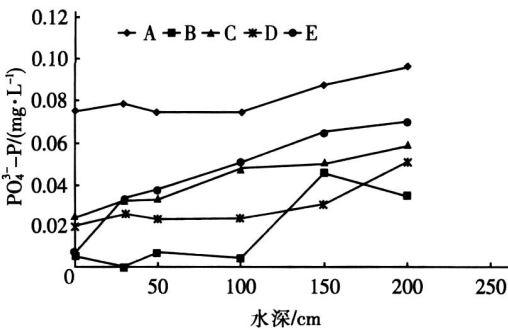


图 2 银河水体中溶解性磷酸盐的垂直分布

Fig 2 Vertical distribution of dissolved phosphate concentration

从图 1、2 可以看出,在试验期间,总磷和溶解性

磷酸盐的含量均随水体深度的增加而呈逐渐升高的趋势。

试验中,总磷含量随水深增加而略有增加,这与其他研究者的结论不同^[7],经分析其原因可能包括以下几方面:

水质监测期间未发生严重水华现象,水样中藻类含量相对较少,藻类梯级下沉;

取样点处水力扰动较小,无机磷吸附于固体颗粒上并随之下沉,使表层总磷含量较低;

所研究的水体以再生水作为唯一补水水源,水质状况与自然景观水体有所不同;

河底沉积物内源磷释放的作用对其分布也有一定影响^[8]。

总磷浓度在垂直方向上较为平缓的上升趋势,其具体原因还有待进一步研究。

从图 2 可看出,溶解性正磷酸盐含量随水深的增加而增大。溶解性正磷酸盐具有生物活性,可作为营养物质被藻类直接利用,在藻类生长量多的水层,其消耗的量也多,由于随着水深的增加藻类的生长量逐渐减少,因此溶解性正磷酸盐的含量随之增加。溶解性正磷酸盐含量沿水深方向呈增加的趋势还可能与河底沉积物的内源磷释放有关。

2.2.2 氨氮含量的垂直分布特征

图 3 为银河水体中氨氮含量的垂直变化情况。

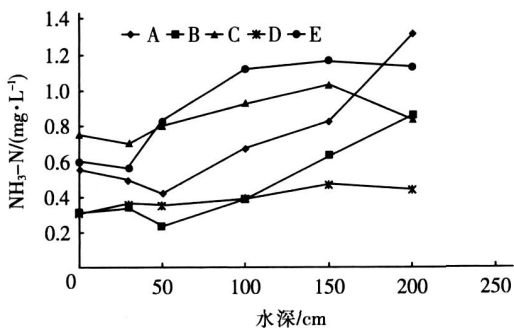


图 3 银河水体中氨氮的垂直分布

Fig 3 Vertical distribution of ammonia nitrogen concentration

由图 3 可见,试验期间水体中的氨氮浓度随水深的增加而呈逐渐升高的趋势。氨氮浓度在表层水体 0~50 cm 深度内出现明显的下降,并在 30~50 cm 深度处达到最低值,之后才逐渐上升。大气圈中的氮气为具有固氮能力的植物与藻类提供了丰富的外部氮源,水体中的一些藻类具有固氮能力,能够把大气中的氮转化为可被吸收和利用的氨氮及硝酸盐氮,从而使得藻类能够获得充足的氮类营养物质。

城市污水经二级处理后含氮化合物主要以氨氮和硝酸盐氮的形式存在于水中,氨氮易被藻类利用,而藻类在上午阳光不是很强烈时由于其趋光性而聚集于表层水中,因此氨氮在表层水中的含量很少,而沿深度方向不断增加。

2.3 pH 值和溶解氧的垂直变化规律

图 4、5 分别为银河水体中 pH 值和 DO 的垂直变化规律。

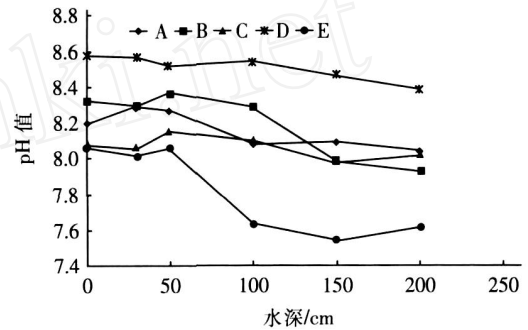


图 4 银河水体的 pH 值垂直变化规律

Fig 4 Vertical change of pH value

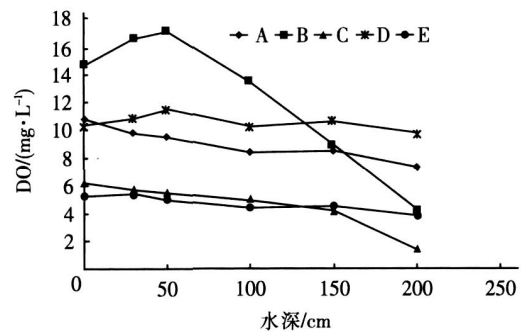


图 5 溶解氧的垂直变化规律

Fig 5 Vertical change of dissolved oxygen concentration

从图 4 可以看出,pH 值随水深的增加而逐渐降低,其垂直变化规律与藻类分布有着密切的关系。藻类经光合作用吸收水中的 CO_2 ,释放出氧气,使水体的 pH 值升高。由于藻类数量随水深的增加而减少,所以 pH 值随水深的增加而逐渐降低。李一平的研究表明,清洁水体的 pH 值接近中性,富营养化水体的 pH 值一般为中性或弱碱性^[9]。一般藻类生长旺盛的水域,水体的 pH 值较高;有的藻类(如蓝藻)在较高 pH 条件下可以很好地生长,这一点对防治水华十分不利。

从图 5 可以看出,水中的溶解氧浓度随水深的增加而逐渐降低,其垂直变化规律与藻类分布也有着相当密切的关系。藻类的光合作用吸收二氧化碳放出氧气,使水中的溶解氧浓度增加,而随着水深的

增加藻类数量减少或者藻类转为呼吸耗氧,故溶解氧浓度不断降低。在夏季,富营养化湖泊中的藻类和浮游植物不仅生长率极高,而且不断死亡,死亡的藻类和浮游植物落入水底后分解并消耗大量的溶解氧,可导致深层水中的溶解氧浓度较低。C、E水样的溶解氧值明显低于饱和溶解氧值,其原因可能是天气和藻类的呼吸作用所造成的。

2.4 再生水厂出水水质

由于银河水体以再生水为唯一补水来源,因此再生水厂的出水水质将直接影响银河的水质及其富营养化程度,为此在 2006 年 8 月 29 日—31 日对王小郢再生水厂出水中总磷、磷酸盐和氨氮含量的变化情况进行了 48 h 连续监测,结果如图 6、7 所示。

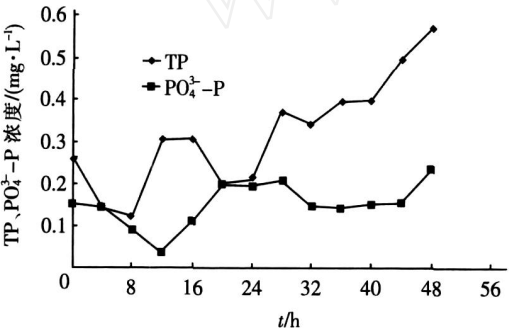


图 6 王小郢中水厂出水磷浓度变化情况

Fig 6 Variation of phosphorus concentration in reclaimed water

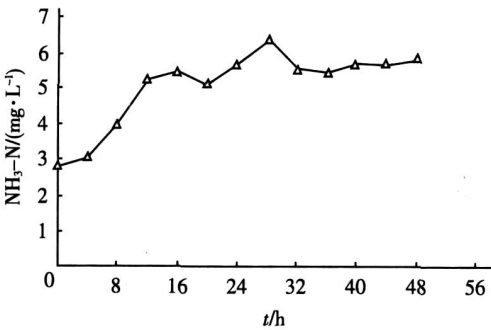


图 7 王小郢中水厂出水氨氮浓度变化情况

Fig 7 Variation of ammonia nitrogen concentration in reclaimed water

由图 6、7 可知,在该监测时段内 TP 浓度为 0.123 ~ 0.57 mg/L,平均为 0.317 mg/L; PO₄³⁻-P 浓度为 0.038 ~ 0.237 mg/L,平均为 0.144 mg/L;氨氮浓度为 2.817 ~ 6.369 mg/L,平均为 5.056 mg/L。另外,对出水的 pH 值监测结果显示出水的 pH 值约为 7.5。

再生水厂出水的磷含量波动较大,不利于防治环城水体的富营养化和控制藻类的暴发,今后需对再生水厂的运行加以优化,以降低出水中的总磷浓度,提高水质的稳定性。

3 藻类生长预警与运行控制探讨

笔者和其他研究者的研究结果均表明,藻类生长时 pH 值和 DO 浓度均会升高^[10],据此可以建立藻类暴发预警系统,通过监测水体 pH 值和 DO 浓度的变化,来预测藻类大量暴发的可能时间,以便提前采取有效措施控制水质进一步恶化,避免因水华而影响景观水体的水质和美观效果。在预测到藻类暴发的可能时间后,可采取适时、适量补水的方法控制水力停留时间^[11],或采取破坏藻体生长能力的手段,来缓解藻类的大规模暴发。

水华暴发的时间主要集中在夏季,所以在夏季对再生水厂出水应采取更为严格的水质控制指标,使磷、氮含量保持在较低的水平。考虑到再生水厂运行的经济可行性,可采取季节性调节措施,即在常规处理工艺之后增设深度处理单元,使之在夏季藻类易暴发时间段运行,其他时间停运,这样既缓解了水华发生问题,又不会增加太多的运行费用。

4 结论与建议

在以再生水为唯一补水水源的城市景观水体中,夏季高温期时,水中总磷、溶解性正磷酸盐、氨氮含量均随水深的不断增加而逐渐增加;溶解氧和 pH 值则随水深的增加而逐渐降低;水中营养盐、DO 和 pH 值的垂直变化规律与藻类的分布及其活动特性密切相关。

在以再生水为唯一补水水源且生态系统功能不完备的情况下,引起水华的优势藻类为蓝藻和绿藻,主要包括微囊藻、丝藻、色球藻、栅藻等。

藻类生长与其所引起的水体溶解氧和 pH 值的变化密切相关,一定程度上水体的 pH 值和溶解氧可间接反映藻类的生长情况和密度,可作为水华暴发的简便预警指标。

以再生水为补水的景观水体的水华暴发现象与再生水厂的出水水质直接相关,出水中营养盐的含量直接影响景观水体中藻类的生长和水体的感官效果。

城市景观水体是一个非常复杂的系统,许多因素相互作用,其中某一因素的变化就可能导致水体

(下转第 72 页)

四氯化碳为溶剂,采用乳液聚合法制备出了苯胺分子印迹聚合物。采用该分子印迹聚合物对溶液中的苯胺进行吸附,初始时其吸附量增加很快,随着时间的延长,吸附量的增加趋于缓慢。苯胺分子印迹聚合物对苯胺的吸附量随着苯胺溶液初始浓度的增大而趋于饱和,当苯胺溶液的初始浓度为 0.02 ~ 43 mmol/L 时,平衡吸附量从 0.26 mmol/g 增加到 6.21 mmol/g。苯胺分子印迹聚合物对苯胺分子的吸附类型符合 Langmuir 吸附等温式,吸附方式为单分子层吸附。

参考文献:

- [1] 肖华,周荣丰. 微污染水源水处理技术的现状与发展[J]. 北方环境, 2005, 30(1): 62 - 66
- [2] 吕丽行,黄露露. 国内给水厂常规工艺改造的必要性和措施[J]. 工业安全与环保, 2004, 30(4): 12 - 13
- [3] 徐鸣,罗建中,肖明威. 微污染水源水预处理技术进展[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 65 - 67
- [4] 姜忠义. 分子印迹技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2003
- [5] Meng Z H, Chen W, Mulchandani A. Removal of estrogenic pollutants from contaminated water using molecularly imprinted polymers[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39(22): 8958 - 8962
- [6] Le Noir M, Guieysse B, Mattiasson B. Removal of trace contaminants using molecularly imprinted polymers[J]. Water Sci Technol, 2006, 53(11): 205 - 212
- [7] Le Noir M, Lepeuple A S, Guieysse B, et al. Selective removal of 17 β - estradiol at trace concentration using a molecularly imprinted polymer[J]. Water Res, 2007, 41(12): 2825 - 2831
- [8] 李欣,朱建华,齐晶瑶. 分子印迹技术选择性吸附去除水中 Cu()离子的研究[J]. 给水排水, 2007, 33(5): 35 - 37
- [9] 朱建华,李欣,强亮生. 铜()离子印迹聚合物的制备及性能[J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(10): 1853 - 1855

E - mail: jyq@hit.edu.cn

收稿日期: 2007 - 07 - 17

(上接第 68 页)

的污染,而解决水华暴发问题决不是单一方法即可做到的,因为一个因素的变化会使许多因素随之而变。对于以再生水为唯一补水水源的景观水体,在强化再生水厂除磷脱氮效果的同时,建立完善的水生生态平衡系统是非常必要的,应充分利用水体自然净化与水生生物系统中各类生物之间功能上的协同作用来净化水质,利用生物之间的相克作用来修复水质,利用食物链关系来有效回收和利用资源,以此来取得水质净化、废物资源化和良好景观效果相结合的综合效益,这是水体污染及富营养化治理的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第 4 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002
- [2] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第 2 版)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990
- [3] 周凤霞,陈剑虹. 淡水微型生物图谱[M]. 北京:化学工业出版社, 2005
- [4] 任南琪,马放. 污染控制微生物学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2002
- [5] 胡川,康升云. 蓝藻发生与控制方法初探[J]. 江西水产科技, 2001, (4): 35 - 38
- [6] 唐汇娟,谢平,陈非洲. 微囊藻的昼夜垂直变化及其迁移[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(增刊): 236 - 239
- [7] 刘春光,金相灿. 城市小型人工湖围隔中生源要素和藻类的时空分布[J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 1040 - 1045
- [8] 徐轶群,熊慧欣,赵秀兰. 底泥磷的吸附与释放研究进展[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(11): 147 - 149
- [9] 李一平,逢勇,吕俊. 太湖富营养化的驱动因子分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 644 - 647
- [10] 钱静. 再生水景观利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(8): 20 - 22
- [11] 周律,邢丽贞,段艳萍,等. 再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 38 - 42

E - mail: tjzxc@vip.sina.com

收稿日期: 2007 - 07 - 30