

以再生水为补充水源的景观水体富营养化及其控制技术研究

邵辉煌 方先金 黄 鸥

(北京市市政工程设计研究总院,北京 100082)

摘要 通过分析再生水的营养水平以及水体富营养化发生的条件,得出以再生水为补充水源的景观水体更容易发生富营养化的结论。通过研究控制景观水体富营养化的技术,提出了以再生水为补充水源的景观水体富营养化控制技术路线。

关键词 景观水体 富营养化 植物营养物

为了缓解缺水形势,我国大力开发非传统水源,推广污水再生利用。城市景观水体补水量大,对水质的要求相对较低,许多城市将再生水作为景观水体的补充水源。但是,景观水体水流速度缓慢,自净能力低,水华频发,因此,以再生水为补充水源的城市景观水体的富营养化控制成为关注的焦点。

1 水体及再生水的营养水平

每个水体都有其营养特征,营养物是一个系列,包括碳、氢、氮、磷、硫、钠、钾、钙、铜、铁等元素,其中,

N和P是主要植物营养元素,N和P的浓度决定了水体的营养水平。依据N、P、叶绿素浓度和透明度等参数,水体的营养水平大致可分为极贫营养、贫营养、中营养、富营养和超富营养。

许多学者研究了湖泊水体中N浓度与藻类生产力的关系,发现N、P浓度与藻类生产力之间有正相关关系,见表1^[1]。

为保证再生水用于城市景观水体的安全,我国《城市污水再生利用 景观环境用水水质标准》(GB/T 18921—2002)对N、P指标均给出了明确的限制,见表2^[2]。

“十一五”国家科技支撑项目计划(2006BAB17B05)。

- 12 何晶晶,邵立明,顾国维,等.城市污水厂污泥低温热解动力学模型研究.环境科学学报,2001,21(2):148~151
- 13 郭淑琴,孙孝然.几种国外城市污水处理厂污泥干化技术及设备介绍.给水排水,2004,30(6):34~37
- 14 Krebs G, Commerford P, Welungoda B. Energy - Efficient Sludge Drying, <http://www.p2pays.org/ref/22/21787.pdf>
- 15 马文. VOMM 涡轮干燥技术的特点. 中国给水排水, 2002, 18(12):44
- 16 欧洲污泥干化技术的现状与比较. http://www.laixx.com/article/78/90/show/24198_3.html
- 17 McGrath S P, Chang A C, Page A L, et al. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. Environ. Res., 1994, 2: 108~118
- 18 Cyr M, Coutand M, Clastres P. Technological and environmental behavior of sewage sludge ash (SSA) in cement-based materials. Cement and Concrete Research, 2007, 37: 1278~1289
- 19 Stelmach S, Wasielewski R. Co-combustion of dried sewage sludge and coal in a pulverized coal boiler. J. Mater. Cycles Waste Manag., 2008, 10: 110~115
- 20 Kim Y, Parker W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. Biore-source Technology, 2008, 99: 1409~1416
- 21 韩全州,陈丽娟,刘颖,等.城市污水处理厂污泥低温热解技术.河北农业科学,2009,13(6):98~100
- 22 黄凌军,杜红,鲁承虎,等.欧洲污泥干化焚烧处理技术的应用与发展趋势.给水排水,2003,29(11):19~22
- 23 Rodriguez L A, Padilla A A, Ashworth R A, et al. Alternative fuel comprised of sewage sludge and a particulate solid fuel. United States Patent 4405332, 1983
- 24 胡勤海,熊云龙,毛柯辉,等.城市污泥掺混水煤浆燃烧特性的热重分析.环境污染与防治,2008,30(1):60~63

✉ 通讯处:310027 杭州市浙江大学热能所主楼 307 室
刘建忠

E-mail: jzliu@zju.edu.cn

收稿日期:2010-01-25

表1 湖泊生产力与 N、P 含量的相关关系

湖泊营养类型	无机 N/mg/L	有机 N/mg/L	TP/ μ g/L
极贫营养	<0.2	<0.2	<5
贫—中营养	0.2~0.4	0.2~0.4	5~10
中—富营养	0.3~0.65	0.4~0.7	10~30
富营养	0.5~1.5	0.7~1.2	30~100
超富营养	>1.5	>1.2	>100

表2 GB/T 18921—2002 对 N、P 指标的规定

NH ₃ -N/mg/L	TN/mg/L	TP/mg/L	适用范围
≤5	≤15	≤0.5	观赏性、娱乐性景观用水中的水景类

将表2与表1比较可知,再生水的 N、P 指标较高,属于超富营养类型。原因是目前我国污水处理厂、再生水厂的 actual 处理能力较低,而我国城市景观水体严重缺水,需要利用再生水作为补充水源,因此,降低了对再生水 N、P 指标的要求。

2 水体富营养化

水体的营养水平是一个状态,水体富营养化是一个过程。水体富营养化是水体在自然因素和(或)人为因素的影响下,初级生产力从低营养状态向高营养状态发展的过程。当水体营养物浓度较高、富营养化发生时,藻类繁殖过快,水面呈现不同的颜色,水体的观赏功能下降,在夜间容易发生水体缺氧,导致水生动植物死亡,水体散发出腥臭味,生态功能下降甚至丧失。

从理论上讲,完全由自然影响的水体也存在富营养化问题,但是如果没有人 为因素的干预,富营养化过程极其缓慢。在人为因素的影响下,水体营养水平急剧上升,可能在很短的时间内达到富营养状态,并进一步恶化。

水体发生富营养化的条件主要有三个:充足的 N、P 等营养物质,缓慢的水流流态,适宜的温度条件。一般认为,水体形成富营养化的指标包括:水体中 TN>0.2 mg/L, TP>0.01 mg/L, BOD>10 mg/L, 细菌总量达到 10⁴ 个/mL, 叶绿素 α >10 μ g/L, 水体透明度<0.6 m^[3]。

由表3可知,在我国现行再生水水质标准中, TN>0.2 mg/L、TP>0.01 mg/L, 因此,以再生水为补充水源的城市景观水体具备富营养化的物质条

件,当其他条件适宜时,如缓慢的水流流态、适宜的温度条件等,景观水体就有发生富营养化的趋势。

由于累积效应,以再生水为补充水源的城市景观水体中污染物本底值较高,属于超富营养水体。景观水体水深较浅,一般为 1~2 m, 水体沉积物容易在外力作用下,参与水体营养盐的分布和循环过程,为水体富营养化提供了有利条件。城市景观水体多属于非连续流动水体,流速缓慢,甚至是静止水 体,为藻类的生长提供了良好的水环境。因此,对于以再生水为补充水源的城市景观水体,在每年的高温季节,更容易产生富营养化问题,导致水华的暴发。为维护城市景观水体的美学和生态价值,应采取技术措施控制富营养化的发生。

3 城市景观水体富营养化控制技术

控制水体富营养化的实质是抑制藻类的快速增长。根据湖泊富营养化与污染控制理论,防治营养化的关键是通过减少 N、P 含量抑制藻类的繁殖。但是,对于使用再生水为补充水源的城市景观水体,由于再生水 N、P 含量高,水体 N、P 本底值较高、营养水平高,很难在短时间内降低水体 N、P 含量至合理水平,因此,控制富营养化应从其它方面着手,包括加快水体的流动,循环过滤除藻,生物抑藻除藻并提高水体水质等。

3.1 水力循环技术

水力循环技术是指通过增强水体的流动性,抑制藻类生长。水体流速对藻类生长的影响可用藻类生长函数 $f(u)$ 表示,见方程式(1)^[4]。

$$f(u) = \lambda^{\gamma} \quad (1)$$

式中 u ——水体流速, m/s;

λ 、 γ ——待定系数,其值具有时空地域性,可依据景观河道的实测藻类浓度、水动力条件等资料,拟合分析得出。

将式(1)绘图,见图1。由图1可知,当流速逐渐减小时, $f(u)$ 值逐渐增大,当流速接近 0 时, $f(u)$ 达到最大值 1; 当流速逐渐增大时, $f(u)$ 值逐渐减小。可见提高流速可从一定程度上防止水体富营养化。

尽管较大的流速有利于防止水体富营养化,但流速越大,日循环水量越大,循环动力费用越高。在运行调度时,应设置合理的水动力条件,以最小的经

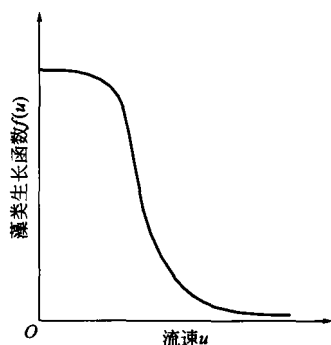


图1 流速对藻类生长的影响

济投入达到理想的效果。

为控制水体富营养化,《城市污水再生利用 景观环境用水水质》对水体的流动性做出了规定:①当完全使用再生水时,景观河道类水体的水力停留时间宜在5天以内。②完全使用再生水作为景观湖泊类水体,在水温超过25℃时,水体静止停留时间不宜超过3天;在水温不超过25℃时,可适当延长水体静止停留时间,冬季可延长水体静止停留时间至一个月左右。

事实上,《城市污水再生利用 景观环境用水水质》对水力停留时间的规定不足以控制水体富营养化^[5]。以再生水中易发的小球藻为例,在夏季适宜光照下培养,在一天内个体数可增加若干倍;固氮蓝藻在适宜条件下第1天增长169%,第2天增长226%,第3天增长414.6%;因此,为控制富营养化,在满足水力停留时间的同时,尚应采取其他技术措施。

3.2 循环过滤技术

循环过滤技术即在水力循环的同时,增加过滤技术,通过去除水体中的SS和浊度,快速去除水体中的藻类和各种污染物,达到控制富营养化和提高水体水质的目的。

李春丽等采用循环过滤技术控制再生水为补充水源的景观水体的富营养化,通过中试试验研究了循环过滤技术对水体营养盐和藻类的去除情况,对水体景观功能的改善程度等^[6]。过滤器滤料为纤维滤料,滤速约30 m/h,工作压力<0.35 MPa。采用PAC为混凝剂,纯度(按 Al_2O_3 计)为10%。

试验结果显示,当PAC投加量为30 mg/L时,对TP的去除率为30%左右,对藻类的去除率为46%,在此投加量下,循环过滤系统可以保证水体的

景观功能。

结合镜检结果和试验池塘景观水体感观进行分析:静态补水时,由于营养盐的累积,藻数量不断上升,景观水体爆发了绿藻水华,藻数量达到 7×10^8 Cell/L以上,叶绿素达到100 mg/m³以上时,透明度只有20~40 cm,严重降低了水体的景观功能。经过滤器过滤后,去除了水体中的限制性营养盐总磷和藻类,水质不断改善,藻量逐渐降低,透明度上升,当水体中的藻数量和叶绿素分别控制在 10^7 Cell/L和10 mg/m³以下时,水深为1.4 m的池塘水体透明度达到1.2 m以上,没有水华现象,可以满足水体的景观功能。

3.3 水生植物净化技术

水生植物净化技术即大型水生植物通过化感作用抑制藻类生长,吸收水体中的营养物质,提高水体水质。

城市景观水体水流速度缓慢,当缺少水生植物时,自净能力低下,各种污染物容易在水体和底泥中累积,导致水体富营养化的不断发展,而栽种水生植物能有效地提高水体自净能力。首先,水生植物能吸收水体中的营养物质,为营养物质提供输出渠道;其次,植物根区的微生物能降解水体中的有机污染物;第三,水生植物能够分泌抑制藻类生长的化感物质,控制水体富营养化的发生。抑藻水生植物普遍存在、数量丰富,容易获得和栽种。

3.4 人工湿地

人工湿地净化技术利用湿地生态系统中的基质、植物、微生物,通过物理、化学、生物三重协同作用净化水体水质,同时控制水体富营养化。

基质为微生物的生长提供稳定的依附界面,为水生植物提供生长载体和营养物质,同时通过物理化学作用直接净化水体。当景观水体流经人工湿地时,基质通过离子交换、专性与非专性吸附、螯合作用、沉淀反应等过程,去除水体中的藻类、氮磷等污染物质。

植物的净化作用可分为直接净化作用和间接净化作用。直接净化作用指植物通过吸收、吸附和富集等作用直接去除水体中的污染物质。间接净化作用指植物通过根茎为微生物提供附着载体、为好氧微生物输送氧气,提高和改善湿地生态

系统中微生物的数量和种群结构,通过生化作用净化水体。

微生物不仅直接吸收和降解各种污染物,而且能捕获水体中的溶解性成分与动物或植物共生利用。有机物的降解、氮化合物的脱氮作用、磷化合物的转化等主要由湿地植物根区的微生物完成。

李林锋等研究了潜流人工湿地对富营养化湖水的净化效果^[7]。结果表明:栽种三种植物(茭白、水葱和鸢尾)的人工湿地能够有效地控制水体富营养化,对富营养化湖水有较好的净化效果,对 COD_Cr 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别为 29.2%~39.1%、37.5%~47.2%、70.3%~74.9%、48.6%~59.1% 和 54.6%~57.3%。且有植物的人工湿地对富营养化水体污染物的去除效果显著优于无植物的人工湿地。

3.5 技术路线

城市景观水体水面面积较大,仅靠加快水体流速抑制藻类的快速繁殖难度较大,而且再生水的营养水平较高,以再生水为补充水源的景观水体会发生营养物质的累积,加快水体流速不能从根本上杜绝富营养化问题。N、P 等营养物质是水体富营养化的基础,营养水平较高的水体在外界条件适宜时,必然会发生富营养化现象。因此,对于以再生水为补充水源的城市景观水体,在控制藻类过快繁殖的同时,降低水体营养物质浓度,提高水体水质,才能从根本上解决富营养化问题。

过滤技术具有快速除藻能力,占地面积较小,但去除污染物的效果较差。人工湿地去除藻类和污染物的效果较好,但占地面积较大。水生植物去除污染物的效果较好,抑制藻类生长的效果一般,但能丰富水生生态系统,提高水体自净能力,提升水体的美学和生态价值。基于上述分析,提出城市景观水体富营养化控制技术路线:保持水体的连续流动,采用过滤技术或人工湿地去除水体中的藻类和营养物质,栽种大型水生植物提高水体的自净能力。当占地面积许可时,应尽量采用人工湿地,在控制富营养化的同时提升水体水质,美化水体的周围环境;当占地面积受限时,可采用过滤技术,在快速去除藻类的同时去除营养物质。

4 结语

(1) 再生水营养水平较高,属超富营养类型。城市景观水体流速缓慢,水深较浅,在高温季节,更容易产生富营养化问题,导致水华暴发。

(2) 较大的水体流速有利于防止富营养化,但是流速越大,循环动力费用越高。《城市污水再生利用 景观环境用水水质》对水力停留时间的规定不足以控制水体富营养化。

(3) 循环过滤能有效去除水体中的植物营养盐和藻类等污染物,水体水质得到改善,富营养化得到控制。

(4) 缺少水生植物的水体自净能力低下,各种污染物容易在水体和底泥中累积,导致水体富营养化的不断发展,而栽种水生植物能有效地提高水体自净能力。

(5) 人工湿地能有效地控制水体富营养化,对各种污染物的去除效果较好,能够提高水体水质。

(6) 城市景观水体富营养化控制技术路线:保持水体的连续流动,采用过滤技术或人工湿地去除水体中的藻类和营养物质,栽种大型水生植物提高水体的自净能力。

参考文献

- 1 刘光钊等编译. 水体富营养化及其藻害. 北京:中国环境科学出版社,2005
- 2 GB/T 18921—2002 城市污水再生利用 景观环境用水水质
- 3 白宇,于德森,周军,等. 再生水用于景观水体维护与保障技术示范研究. 给水排水,2007,33(8):40~42
- 4 司彦杰. 城市景观水体维护及优化运行研究:[学位论文]. 天津:天津大学环境科学与工程系,2007
- 5 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. 给水排水,2007,33(4):38~42
- 6 李春丽,周律. 再生水回用于景观水体的水质控制系统研究. 现代城市研究,2005,(4):32~35
- 7 李林锋,王季槐,年跃刚. 潜流式人工湿地处理富营养化湖水研究. 贵州科学,2008,26(4):23~29

8 通讯处:100082 北京市西直门北大街 32 号 3 号楼

E-mail:shaohuihuang@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2010-03-31