

# 周丛藻类对景观水体水质净化的效果研究

史雅娟<sup>1</sup>, 李小平<sup>2</sup>, 卢丽君<sup>1</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 200051; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

**摘要** 采用水体中自然生长的周丛藻类, 在近自然条件下, 研究周丛藻类对景观水体的净化能力。结果表明, 周丛藻类对  $\text{NH}_4^+$ -N、TN、TP、TSS(总悬浮物)和 Chl<sub>a</sub>(叶绿素 a)的平均去除率分别为 45.2%、26.9%、25.9%、50% 和 41% ;同时, 周丛藻类系统的出水 DO 质量浓度平均增加 5.0 mg/L, pH 值平均提高 0.5 个单位, 而空白系统的出水 DO 质量浓度和 pH 值没有明显变化。回归分析结果显示, 周丛藻类对  $\text{NH}_4^+$ -N、TN 的最高去除率出现在负荷率分别为 0.87 mg/(g·d)(88.9%) 和 0.40 mg/(g·d)(53.3%) 时。试验期间, 周丛藻类的生物量增加了 52.4%, 藻类群落从颗粒态硅藻、绿藻为主的藻群演替为以丝状和颗粒态蓝藻和绿藻为主的群落。

**关键词** 周丛藻类; 景观水体; 水质净化; 氮; 磷

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2008)05-0004-04

## Purification of landscaping water with periphyton

SHI Ya-juan<sup>1</sup>, LI Xiao-ping<sup>2</sup>, LU Li-jun<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The purifying ability of naturally growing periphyton on landscaping water was studied under near-natural conditions, using periphyton. The results show that the average removal rates of  $\text{NH}_4^+$ -N, TN (total nitrogen), TP (total phosphorus), TSS (total suspended solids) and Chl<sub>a</sub> (chlorophyll a) by periphyton were, respectively, 45.2%, 26.9%, 25.9%, 50% and 41%. The average increase of DO (dissolved oxygen) concentration in the effluent of the periphyton system was 5.0 mg·L<sup>-1</sup>, and the average pH value increased by 0.5, while the DO concentration and pH showed no prominent change in the contrast system without periphyton. Results of regression analysis show that, when the periphyton loading rate of  $\text{NH}_4^+$ -N was 0.87 mg/(g·d) and the periphyton loading rate of TN was 0.40 mg/(g·d), their removal rates by periphyton were greatest, at 88.9% and 53.3%, respectively. During the process, the periphyton biomass increased by 52.4%, and the periphyton composition changed from the original particulate diatom and green algae dominated community to a filamentous and particulate blue algae and green algae dominated community.

**Key words** periphyton; landscaping water; water quality improvement; nitrogen; phosphorus

周丛藻类源于英文“periphon”, 由 Wetzel 于 1975 年首次提出, 并将其定义为着生在沉水基质表面的低等植物群落, 主要由硅藻、绿藻和蓝绿藻组成, 还有一些少量的黄褐藻、裸藻及红藻等<sup>[1]</sup>。作为水生生态系统重要的初级生产者, 周丛藻类可通过其特有的生理学过程吸收并降解水体中的各类污染

物质, 从而实现水质的生物净化<sup>[2-3]</sup>。相对于藻类的基础研究过程, 利用周丛藻类进行水环境治理的工程应用研究起步较晚。目前北美、欧洲等国已出现了利用周丛藻类进行农业养殖废水以及受污染自然水体处理的 ATS 技术<sup>[4-6]</sup>和暴雨塘水质处理系统<sup>[7-8]</sup>等, 在我国此类研究则相对较少<sup>[9-10]</sup>。

基金项目: 国家高技术研究发展“863”计划专项(2003AA601020)

作者简介: 史雅娟(1982—)女, 江苏金坛人, 硕士研究生, 研究方向为周丛藻类在水质净化方面的作用。E-mail: jstsjy@mail.dhu.edu.cn

通讯作者: 李小平, 教授, E-mail: xiaoping\_lee@hotmail.com

景观水体是城市人居环境中重要的组成部分。与自然水体相比,景观水体与外界水域的沟通相对较少,易成为居民生活污水、雨水的受纳体,从而导致不同程度的水质污染以及水体富营养化的发生。相对于目前常用的有关景观水体的物理、化学环境修复技术,其高成本以及对生态环境的影响等问题,使得利用周丛藻类进行水质净化的研究引起了人们越来越多的关注。

鉴于此,本研究拟通过建立自然的周丛藻类水质处理系统,研究其对受污染景观水体的水质处理能力,从而为周丛藻类在水体景观设计中的应用研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

试验用水质处理系统由3个独立的65 cm × 40 cm × 45 cm(有效容积约100 L)透明聚乙烯水槽组成,其中2个水槽设置为周丛藻类水质处理重复系统,另1个为空白对照。各系统分别内置12块竖立的透明聚乙烯插板,板间距5 cm,并使进水在各板间迂回流动(图1)。周丛藻类处理系统中,各插板表面均附着周丛藻类,空白对照系统则无藻类着生。

### 1.2 试验设计

试验用受污染景观河道水体取自上海市浦汇塘(漕宝路段)。试验期间水质指标变化如表1所示。

表1 浦汇塘的水质指标

水质指标	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TN})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{PO}_4^{3-}-\text{P})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{TP})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	pH	$\rho(\text{DO})$ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
变化范围	4.69~10.66	0.21~0.83	8.17~12.74	0.18~0.74	0.23~0.88	7.0~7.5	2.17~4.16

设计进水流量为2.1 L/h,水力停留时间为3 d。试验最初3 d为周丛藻类的受污水体驯化期,从第4 d开始正式的水质处理试验。

试验期为2006年8月30~11月16日。试验前期,进行周丛藻类的自然条件培养,将透明聚乙烯插板水平悬挂于周丛藻类大量出现的景观池塘水面下5 cm处,于14 d后将已均匀附着周丛藻类的透明聚

乙烯插板回收,并迅速将其置于周丛藻类水质处理系统中。

试验于半人工气候室内进行,试验期间,日平均最大光照强度约为5 200 lx,日平均光照时间为14 h,日平均最高气温为33℃。

### 1.3 采样测定方法

试验第1周每隔3 d于上午9:00采集进水水样,隔3 d后采集相应的出水水样,从第27 d开始每周采样,采样同时使用pH试纸和便携式溶解氧仪分别测定水体pH值和溶解氧浓度,并参照《水和废水监测分析方法》测定水质指标,即采用纳氏试剂比色法测定 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,用紫外分光光度法测定 $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,用钼酸铵分光光度法测定 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和TP,用90%丙酮提取法测定Chl $a$ [11]。每周采集1次藻样,随机刮取系统四壁4个2 cm × 2 cm小样方,透明聚乙烯插板上6个2 cm × 2 cm小样方,分两组,一组根据《环境监测技术规范》测定其Chl $a$ 含量[12],用以表征周丛藻类的生物量;另一组则根据《中国淡水生物图谱》定性鉴定藻种[13]。

### 1.4 数据统计

周丛藻类水质处理系统的污染物质去除效果以相对去除率表示,即

$$R = \frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_0} 100\%$$

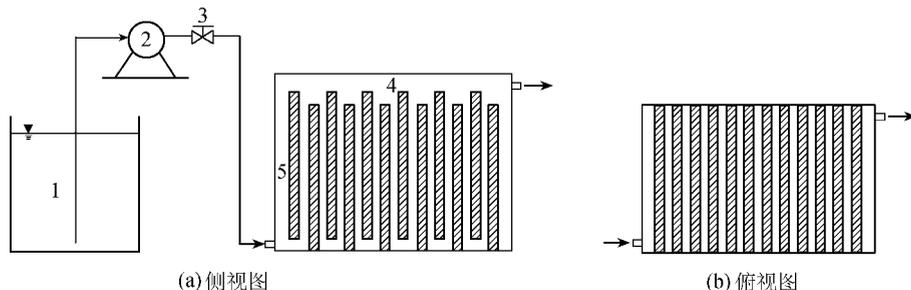
式中: $R$ 为相对去除率; $\rho_0$ 、 $\rho_1$ 分别为进、出水污染物质质量浓度。

周丛藻类的污染负荷率按如下公式计算:

$$L = \frac{(\rho_0 - \rho_1)Q}{MS}$$

式中: $L$ 为周丛藻类的污染负荷率; $Q$ 为进水流量; $M$ 为周丛藻类的生物量(用Chl $a$ 浓度表示); $S$ 为周丛藻类的附着面积。

采用Origin6.0软件进行数据统计分析,应用方差分析比较周丛藻类对水体N、P污染物处理效果间的差异性,对周丛藻类的污染负荷率和去除率之间的关系进行回归预测分析。



1—水质均化槽 2—隔膜计量泵 3—流量控制阀 4—周丛藻类装置 5—周丛藻类-聚乙烯板; → 为水流方向

图1 周丛藻类处理系统结构示意图

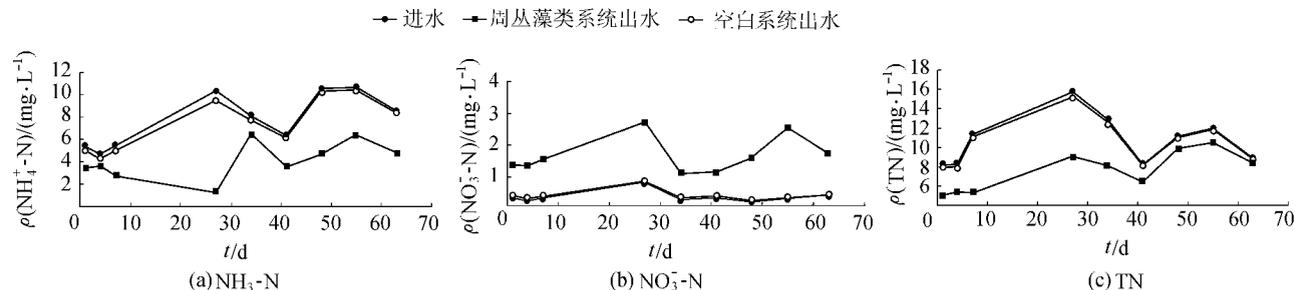


图2 水质处理系统中氮营养物随时间变化曲线

## 2 结果与分析

### 2.1 周丛藻类对 N、P 污染物的处理效果分析

对周丛藻类水质处理系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TN 污染物处理效果进行分析,结果见图 2。进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TN 的平均质量浓度分别为  $7.79 \text{ mg/L}$ 、 $0.37 \text{ mg/L}$  和  $10.74 \text{ mg/L}$ ,出水平均质量浓度则分别为  $4.10 \text{ mg/L}$ 、 $1.69 \text{ mg/L}$  和  $6.96 \text{ mg/L}$ 。与进水相比,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 质量浓度均显著降低 ( $p < 0.05$ ),而出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度则显著增加 ( $p < 0.05$ )。空白系统的平均出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 TN 质量浓度分别为  $7.44 \text{ mg/L}$ 、 $0.41 \text{ mg/L}$  和  $10.55 \text{ mg/L}$ ,与进水质量浓度无显著差异。

通过对该水质处理系统中 N 污染物的去除效果分析可知,周丛藻类对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 均有显著的去除效果,其平均去除率分别可达  $45.2\%$  和  $26.9\%$ 。受自然挥发等因素影响,空白系统出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度也有所下降,但降低浓度不显著。众多研究表明,周丛藻类对水体中 N 污染物,尤其是  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  具有很好的吸收效果,周丛藻类会对水体中的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  物质优先吸收,只有在  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度极低或耗尽的水体中,才会选择  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  作为代谢 N 源<sup>[14-15]</sup>。此外,试验结果也表明,出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度出现上升趋势,与 Rodrigo 等<sup>[16]</sup>的研究结果相似。水体中 N 污染物的去除包括硝化和反硝化两个过程,硝化过程与周丛藻类的固氮酶活性有关<sup>[16]</sup>,丝藻(*Ulothrix spp.*)、颤藻(*Oscillatoria spp.*)、色球藻(*Chroococcales spp.*)等丝状和颗粒态蓝藻在白天进行固氮酶硝化作用是水体  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度下降、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度升高的重要原因<sup>[17]</sup>。

图 3 为周丛藻类水质处理系统中进、出水 P 污染物质量浓度随时间的变化情况。试验期间,  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 、TP 的平均进水质量浓度分别为  $0.43 \text{ mg/L}$  和  $0.58 \text{ mg/L}$ 。与 N 污染物的去除效果相比,该系统对于  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的去除效果相对较低,未达到显著水平,但由于周丛藻类对颗粒态的 P 有一定的拦截作用,故该类系统对 TP 表现出一定的去除能力,平均去除

率可达  $34.3\%$ ,减去空白,周丛藻类对 TP 的平均去除率为  $25.9\%$ 。

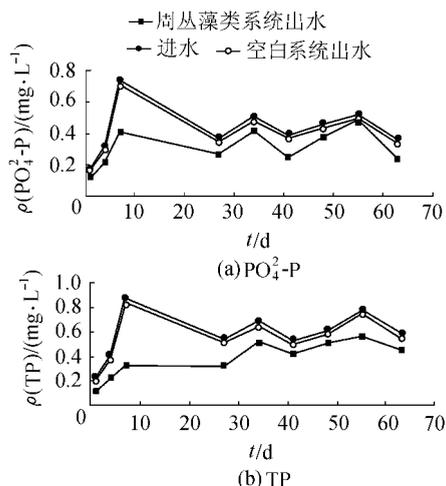


图3 水质处理系统中磷营养物随时间变化曲线

### 2.2 周丛藻类水质处理系统其他指标的变化

试验期间,水质处理系统的平均进水 pH 值在  $7.0 \sim 7.5$  范围内变化,溶解氧质量浓度在  $2.20 \sim 4.20 \text{ mg/L}$  之间。周丛藻类系统的出水 pH 值平均升高  $0.5$  个单位,溶解氧质量浓度明显增加,在  $6.37 \sim 10.67 \text{ mg/L}$  范围内变化,平均溶解氧质量浓度为  $7.95 \text{ mg/L}$ ,而空白系统的出水 pH 值仍维持在  $7.0 \sim 7.5$  之间,溶解氧质量浓度没有太大变化,平均溶解氧浓度约为  $2.80 \text{ mg/L}$ 。另外,在设计流量条件下,周丛藻类系统还表现出一定的对 Chla、TSS 去除能力,对 Chla 的去除率最大可达  $70\%$  以上,平均去除率为  $41\%$ ,对 TSS 也有约  $50\%$  的拦截能力,而空白系统由沉淀作用产生的去除能力表现不明显。此外,周丛藻类的生物量在水质处理期间也发生了相应的改变,聚乙烯插板上周丛藻类生物量(Chla)从最初的  $9.50 \text{ mg/cm}^2$ ,至试验结束时增加为  $19.96 \text{ mg/cm}^2$ ,增幅  $52.4\%$ 。群落组成由最初的以颗粒态硅藻、绿藻为主,占群落密度的  $90\%$  左右,转变为丝状和颗粒态蓝藻、绿藻为主的藻群,水绵(*Spirogyra spp.*)、衣藻(*Chlamydomonas spp.*)、丝藻(*Ulothrix spp.*)、纤维藻(*Ankistrodesmus spp.*)、颤藻(*Oscillatoria spp.*)等大量出现,占群落密度的  $70\%$  以上,硅藻种

类仅占群落组成的 20% 左右。

### 2.3 水质处理系统中周丛藻类的污染负荷分析

在上述分析结果的基础上,进一步研究周丛藻类污染负荷率对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除影响,见图 4。由图 4 可知,周丛藻类的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 负荷率和各自相应的去除率均呈正相关,相关系数分别为 0.7965、0.7352 和 0.7170。周丛藻类对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的高去除率( $>50\%$ )发生在负荷率大于  $0.70\text{ mg}(\text{g}\cdot\text{d})$  时,并且,当  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  负荷率为  $0.87\text{ mg}(\text{g}\cdot\text{d})$  时,周丛藻类对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率达到峰值( $88.9\%$ )。随着 TN 负荷率的增加,周丛藻类对 TN 的去除率也随之上升,当负荷率达到  $0.40\text{ mg}(\text{g}\cdot\text{d})$  时,周丛藻类对 TN 的最高去除率为  $53.3\%$ 。周丛藻类对 TP 的去除率随着 TP 负荷率的增加而增加。

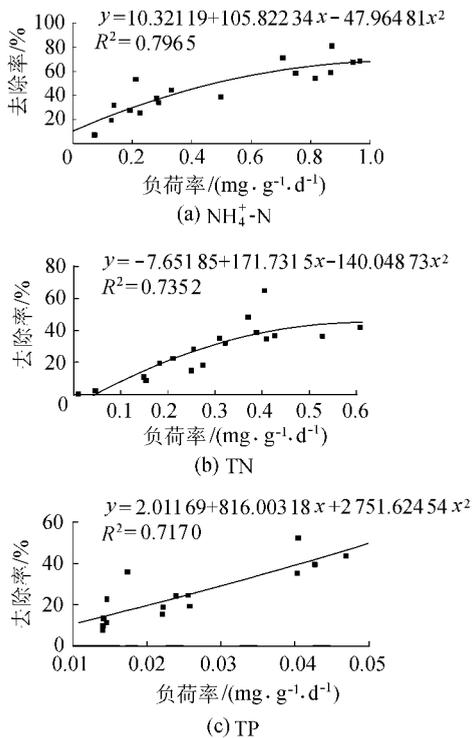


图 4 周丛藻类  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 污染负荷率与去除率关系

### 3 结论

周丛藻类对受污染景观河道水体中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 污染物均具有一定的去除能力,平均去除率分别可达  $45.2\%$ 、 $26.9\%$  和  $25.9\%$ ,同时还可以降低水体 TSS( $50\%$ )与 Chla( $41\%$ )浓度,但对  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除效果不显著。此外,周丛藻类系统的出水 DO 质量浓度明显增加,从  $2.2\sim 4.2\text{ mg/L}$  提高至  $6.4\sim 10.7\text{ mg/L}$ ,平均增加  $5.0\text{ mg/L}$ ,pH 值也平均升高 0.5 个单位,而空白系统的出水 DO、pH 值和进水没有明显差异。周丛藻类的污染负荷率和去除率呈正相关,并且周丛藻类对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 的最高去

除率分别出现在负荷率为  $0.87\text{ mg}(\text{g}\cdot\text{d})$  ( $88.9\%$ ) 和  $0.40\text{ mg}(\text{g}\cdot\text{d})$  ( $53.3\%$ ) 时。试验期间,周丛藻类系统中藻类群落对污染物表现出良好的负荷能力,藻类生物量增长了  $52.4\%$ ,藻类群落组成也从试验初期以颗粒态硅藻、绿藻为主,逐渐演替为以丝状和颗粒态蓝藻、绿藻为主的藻群。

基于周丛藻类对景观水体的净化效果,以及景观水体的水质特点,周丛藻类水质处理系统在水体景观设计中具有一定的应用价值。周丛藻类在自然水体中普遍生长,无需引进额外藻种,节省原料,且在户外条件下易于培养。此外,构建周丛藻类系统,设计结构简单,运行成本低。在水体景观设计中,该类系统不仅是一道景观,而且还可净化水质,对环境保护和水体改善起到一定的促进作用。

### 参考文献:

- [1] WEITZEL R G. Limnology[M]. Philadelphia:Saunders College Publishing, 1975.
- [2] HOFFMANN J P. Wastewater treatment with suspended and nonsuspended alga[J]. J Phycol, 1998, 34: 757-763.
- [3] CRAGGS R J. Wastewater treatment by algal turf scrubbing[J]. Water Sci Technol, 2001, 44(11-12): 427-433.
- [4] MULBRY W W, WILKIE A C. Growth of benthic freshwater algae on dairy manures[J]. J Applied Phycol, 2001, 13: 301-306.
- [5] WILKIE A C, MULBRY W W. Recovery of dairy manure nutrients benthic freshwater algae[J]. Bioresource Technol, 2002, 84: 81-91.
- [6] MULBRY W, WESTHEAD E K, PIZARRO C, et al. Recycling of manure nutrients: use of algal biomass from dairy manure treatment as a slow release fertilizer[J]. Bioresource Technol, 2005, 96: 451-458.
- [7] MEYERS M B, FITZPATRICK J J. Predicted phosphorus removal in a stormwater treatment area using a wetland water quality model[C]//Bridging the gap: meeting the world's water and environmental resources challenges. New York: American society of civil engineers, 2001.
- [8] ABTEW W, GOFOETH G, GERMAIN G. Stormwater treatment areas constructed wetlands for phosphorus removal in south Florida surface waters[C]//Critical transitions in water and environmental resources management. New York: American society of civil engineers, 2004.
- [9] 马沛明, 况琪军, 刘国祥, 等. 底栖藻类对氮、磷去除效果研究[J]. 武汉植物学研究, 2005, 23(5): 465-469.
- [10] 马沛明, 凌晓欢, 胡征宇. 藻类生物类技术脱氮除磷效果研究[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 742-746.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 389-392.

(下转第 11 页)

情况。在 3 层土样中,各层土样中铬质量比在实验前 3 d 均有增加的趋势,随后下降,并低于原始土样中 Cr 的质量比,6 d 后趋于平稳。模拟江水中配制的铬为六价(详见 1.2),故在试验前期,土壤中溶出的有机化合物将部分六价铬还原成溶解度较低、迁移能力弱的三价铬。由于土壤胶体对三价铬有强烈的吸附作用,故试验前期被浸土样中铬质量比升高。实验证明,在 pH 值为 6.5~8.5 范围内时,土壤的三价铬能被氧化成六价铬<sup>[8]</sup>。试验过程中模拟江水及土样的 pH 值在 7.4~8.3 范围内。因此,随着试验时间的延长,土样中的三价铬又可能部分被氧化成六价铬而浸出,致使各层土样中的铬质量比降低。

从图 5 中可以看出,在浸泡的前 3 d,无论江水中 Cu 离子质量浓度为 2 mg/L、3 mg/L 还是 4 mg/L,3 层土样中 Cu 质量比均降低,随后在 20 cm、30 cm 土层中 Cu 质量比趋于稳定,但均低于原始土样中 Cu 的质量比,土样表层中的 Cu 质量比 3 d 后却呈上升趋势,9 d 后接近或高于原始土样中 Cu 的质量比。造成上述变化的原因有两点:①二价铜的强酸盐一般能溶于水,在中性或碱性条件下,容易产生氧化物、氢氧化物和碳酸盐的沉淀,这些化合物的溶解度都很小。而长江水体 pH 值为 8 左右,呈弱碱性,故易生成迁移能力较弱的沉淀沉积在土样的表层,导致土样上层的铜质量比在一定时间后升高。②在模拟江水的浸泡作用下,土样中的有机质溶出。而土壤有机质对铜的迁移转化有着重大影响,有机质具有络合和固定铜的能力,所形成的有机铜螯合物,有一些是可溶的,有一些溶解度较低(如胡敏酸铜螯合物)。因此土样中的铜与有机质形成可溶的有机铜螯合物迁移至模拟江水中,导致深度为 20 cm、30 cm 处土样中的铜质量比降低。

图 6 表明,消落带土壤受被 Zn 污染的江水浸泡后,3 层土样中的 Zn 质量比均随浸泡时间快速上升,9 d 后土样中的 Zn 质量比高出原始土样 2~3 倍左右。主要原因可能是模拟江水淹没土壤后,土壤氧化还原电位降低,Zn<sup>2+</sup>和土壤中 S<sup>2-</sup>有很强的亲和力<sup>[8]</sup>,在还原条件下易形成 ZnS 被土壤吸附,不易溶出,造成各层土样中的 Zn 质量比显著增加。

### 3 结 语

从试验结果可以推断,长江水体一旦受重金属 Pb、Zn、Cu、Cr 污染,在淹水期,土壤中除 Cr 质量比可能降低外,Pb、Zn、Cu 的质量比会显著增加,从而造成消落带的 Pb、Zn、Cu 的污染。Zn 几乎以同等程度迁移至各层土壤中,Pb 和 Cu 主要滞留在土壤表

层。而且,随着江水受污染程度的加重,各种金属在土壤中的质量比均会有不同程度的升高。在水流相对静止的长江支流流域,各种重金属污染物将不可避免地在消落带土壤沉积、迁移。若水体环境如 pH 值、氧化还原电位等改变时,土壤中的重金属污染物亦可能重新溶出而进入长江水体。因此,这种影响具有长期性、交替性和滞后性。

### 参考文献:

- [1] 冯大兰,刘芸,钟章成.三峡库区消落带现状与对策研究[J].生态农业科学,2006,2(4):378-381.
- [2] 苏维词.三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J].长江科学院院报,2004,21(2):33-34.
- [3] 黄京鸿.三峡水库水位涨落带的土地资源及其开发利用[J].西南师范大学学报:自然科学版,1994,19(5):528-533.
- [4] 牛志明,解明曙.三峡库区水库消落区水土资源开发利用的前期思考[J].科技导报,1998(4):61-62.
- [5] 钟成华.三峡水库对重庆段水环境影响及其对策[M].重庆:西南师范大学出版社,2004:2-12.
- [6] 张金洋,王定勇,石孝洪.三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究[J].水土保持学报,2004,18(6):120-123.
- [7] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农业化学常规分析方法[M].北京:科学出版社,1983:125-356.
- [8] 廖自基.环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化[M].北京:科学出版社,1989:139-235.

(收稿日期 2007-11-19 编辑 徐 娟)

(上接第 7 页)

- [12] 国家环境保护总局.环境监测技术规范[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,1986:17-18.
- [13] 韩茂森,束蕴芳.中国淡水生物图谱[M].北京:海洋出版社,1995.
- [14] KAYA V M, NOÛE J de la, PICARD G. A comparative study of four systems for tertiary wastewater treatment by *Scenedesmus bicellularis*: new technology for immobilization[J]. J Applied Phycol, 1995, 7(1):85-95.
- [15] ABE K, JIMAMAKI A, HIRANO M. Removal of nitrate, nitrite, ammonium and phosphate ions from water by the aerial microalga *Trentepohlia aurea*[J]. J Applied Phycol, 2002, 14(2):129-134.
- [16] RODRIGO V, EBERTO N. Seasonal changes in periphyton nitrogen fixation in a protected tropical wetland[J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 43:367-372.
- [17] STEWART P M, BUTCHER J T, GEROVAC P J. Diatom (Bacillariophyta) community response to water quality and land use[J]. Natural Areas Journal, 1999, 19:155-165.

(收稿日期 2007-09-20 编辑 徐 娟)