

# 三氯化铁和苦草复合应用改善富营养化水体水质的实验

黄沛生<sup>1,2</sup>, 谭 镇<sup>2</sup>, 俞林伟<sup>2</sup>, 刘正文<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632)

**摘要** 利用三氯化铁絮凝剂和沉水植物苦草在治理富营养化水体中的优缺点, 复合应用于改善富营养化水体水质。结果表明, 三氯化铁可有效降低水体的悬浮物浓度和总磷浓度, 为水生植物早期的生长提供良好的条件, 水生植物可保持和加强三氯化铁絮凝剂对水质的处理效果, 并降低水体的总氮浓度。

**关键词** 生态修复; 富营养化;  $\text{FeCl}_3$ ; 苦草

**中图分类号** X171.4 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2007)04-0023-03

## Experiment of $\text{FeCl}_3$ and *Vallisneria spiralis* in the improvement of eutrophic waters

HUANG Pei-sheng<sup>1,2</sup>, TAN Zhen<sup>2</sup>, YU Lin-wei<sup>2</sup>, LIU Zheng-wen<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Institute of Hydrobiology, Ji 'nan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract** Based on the advantages and disadvantages of  $\text{FeCl}_3$  coagulant and the submerged macrophyte *Vallisneria spiralis* in the treatment of eutrophic waters, both of them were used for the improvement of water quality. The results showed that  $\text{FeCl}_3$  could reduce the concentration of SS and TP efficiently, which provided better condition for the growth of aquatic plants of the first growth stage, and the aquatic plants were able to maintain and enhance the water improvement effects by  $\text{FeCl}_3$  as well as to reduce the TN concentration.

**Key words** ecological restoration; eutrophication;  $\text{FeCl}_3$ ; *Vallisneria spiralis*

随着社会经济的发展,越来越多的湖泊出现富营养化,影响了湖泊供水、渔业、旅游等多方面功能,因此湖泊污染控制与水体修复得到广泛重视。在湖泊修复技术中,添加絮凝剂以沉淀水体中污染物和营养盐(特别是磷)是较常用的一种方法,具有见效快、效果明显的特点,但效果维持的时间较短,尤其是在浅水湖泊<sup>[1-2]</sup>。如 Boers 等<sup>[3]</sup>用  $100\text{ g/m}^2$  剂量的  $\text{Fe}^{3+}$  对荷兰的富营养化浅水湖泊 Groot Vogelenzang 湖进行处理,但其水质的改善效果只持续了 3 个月。另一方面,虽然人们发现恢复湖泊水生植物可以改善湖泊生态系统,提高水质,但由于富营养化湖泊往往水体浑浊,浮游植物密度大,透明度低,水生植物尤其是沉水植物难以生长。本研究首先利用三氯化铁降低水中的磷、悬浮物的含量,提高水体透明度,

为水生植物生长创造条件,然后种植沉水植物,探讨多种富营养化水体修复技术的复合应用效果。

## 1 材料与方法

2004 年 11 月,用彼得生采泥器在广州暨南大学校园内明湖采集了底泥和湖水。明湖是一个典型的富营养化浅水城市湖泊,平均水深约 80 cm,透明度 20 ~ 30 cm,上覆湖水总氮质量浓度为  $(5.29 \pm 0.05)\text{ mg/L}$ ,总磷质量浓度为  $(0.36 \pm 0.02)\text{ mg/L}$ ,其底泥呈半流体状,细软,灰黑色,氧化还原电位在 -100 mV 左右。采集到的底泥经充分搅匀后,分置于 9 个直径为 30 cm 的塑料桶里,每个桶里的底泥厚度为 8 cm。缓缓沿桶壁加进湖水,其上覆水深度为 20 cm。静置 24 h 后,在 1 ~ 9 号桶里分别加进不同处

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA60101-4); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12-IV)

作者简介: 黄沛生(1979—)男,广东揭阳人,博士研究生,研究方向为水体生态修复。E-mail: Pythonhuang@126.com

通讯作者: 刘正文, E-mail: zliu@niglas.ac.cn

理量的高浓度三氯化铁溶液, 缓缓搅拌, 其投加量及静置 24 h 后的处理效果见表 1。根据处理结果, 选择  $\rho(\text{Fe}^{3+}) = 36.61 \text{ mg/L}$  为最适处理量。再用同样方法采集明湖的底泥和湖水, 分置 9 个桶里。1~3 号桶不作任何处理, 作为“空白对照”组; 4~6 号桶用  $\rho(\text{Fe}^{3+})$  为  $36.61 \text{ mg/L}$  的处理量进行处理, 称为“三氯化铁”组; 7~9 号桶加进同样的三氯化铁并静置 1 d 后, 再种植湿重在  $64 \sim 66 \text{ g}$  之间、平均叶长在  $18 \sim 20 \text{ cm}$  左右的苦草 (*Vallisneria denseserrulata* Makino) 称为“三氯化铁 + 苦草”组。9 个桶皆置于露天自然条件下, 约 4~6 d 测定 1 次各桶水体的相对浊度、TP 与 TN 质量浓度和 pH 值、氧化还原电位。相对浊度用 OD680 的吸光度表示; TP 和 TN 分别用钼酸铵分光光度法和碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; pH 值和 Eh 值用 HANNA 便携式酸度/ORP 离子计 (型号 HI8424) 测定。

表 1 三氯化铁投加量及其处理效果

样本编号	三氯化铁投加量/g	$\rho(\text{Fe}^{3+})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氧化还原电位/mV	pH 值
1	0	0	0.263	4.978	164.5	7.47
2	0.25	3.66	0.208	5.038	167.5	7.22
3	0.50	7.32	0.153	4.208	182.5	6.85
4	1.00	14.64	0.089	4.104	191.2	6.46
5	1.50	21.97	0.034	3.943	200.5	6.20
6	2.00	29.29	—	3.233	210.2	5.84
7	2.50	36.61	0.015	3.084	242.6	5.35
8	3.00	43.93	—	3.233	290.6	4.94
9	5.00	73.22	—	3.913	517.0	3.03

注: “—”表示低于测出水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三氯化铁投加量及其处理效果

从试验结果可知, 处理后的总磷质量浓度与加入三氯化铁的量呈明显的负相关关系, 但对总氮的去除效果不明显 (图 1)。随着三氯化铁投加量的增加, 水体氧化还原电位升高, pH 值降低。由于采用  $\rho(\text{Fe}^{3+})$  为  $36.61 \text{ mg/L}$  的处理量可使湖水的总磷含量达到 A 类国家景观用水的标准, 故采用该处理量进行下一步试验。

### 2.2 对水体浊度和总磷的处理效果

投加三氯化铁絮凝剂之后, 4~9 号桶底部形成了约 10 mm 厚的絮凝体络合物, 到了实验中期, 絮凝体消失。随着实验的进行, 水体的氧化还原电位慢慢降低: “空白对照”组从 250 mV 降到 150 mV 左右, “三氯化铁”组和“三氯化铁 + 苦草”组从 200 mV 左右降到 100 mV 左右, 而 pH 值则逐渐回升, 实验后期“空白对照”组和“三氯化铁”组的 pH 值都在 7.5~

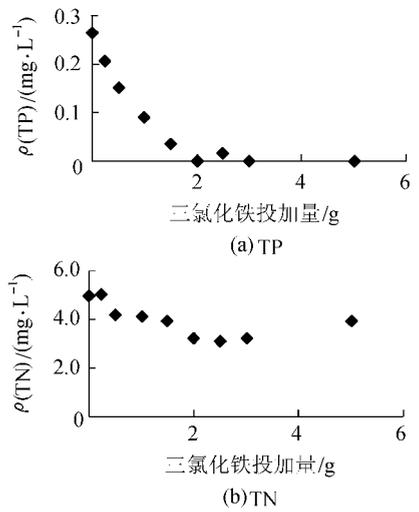


图 1 三氯化铁投加量与处理后总磷、总氮质量浓度关系  
8 之间, 苦草的光合作用使“三氯化铁 + 苦草”组的 pH 值达到 8.5~9.0。7~9 号桶种植苦草时, 稍微引起了底泥的扰动, 所以在实验前期“三氯化铁 + 苦草”实验组的浊度和总磷质量浓度略高于只加三氯化铁的实验组。11 月 28 号之后, 沉水植物适应了其生长条件, 相对浊度和总磷质量浓度总是表现为“空白对照”组大于“三氯化铁”组并大于“三氯化铁 + 苦草”组; “三氯化铁”组和“三氯化铁 + 苦草”组之间的差异明显 ( $P < 0.05$ ), 说明“三氯化铁 + 苦草”法比只投加三氯化铁絮凝剂在控制水体总磷和悬浮物方面有明显优势。

从水体的总磷含量上看, 11 月 28 号之后, “三氯化铁 + 苦草”组的总磷质量浓度稳定在  $0.1 \text{ mg/L}$  以下, 而“三氯化铁”组的总磷质量浓度在  $0.1 \text{ mg/L}$  左右, 到后期有逐渐增加的趋势。在类似的用三氯化铁对富营养化水体进行处理的实际应用<sup>[3]</sup>和模拟实验<sup>[4]</sup>中也发现, 单是用三氯化铁絮凝剂对磷的控制是短期且不稳定的, 随着时间的进行会出现反弹。本研究表明, 如果在水质处理中加上水生植物种植, 则可持续控制水体的浊度和总磷质量浓度, 保持三氯化铁对水体的改善效果, 见图 2。

### 2.3 对水体总氮的处理效果

实验结果发现, 苦草可有效降低水体的总氮质量浓度, 这与宋福等<sup>[5]</sup>的实验结果相同。而只加三氯化铁对总氮的去除效果不明显, 该组的总氮含量与空白组相近。这可能是由于三氯化铁只对磷产生明显的络合钝化作用, 对氮则作用不明显。大型水生植物可吸收底泥和水体中的氮营养物质, 从而有效地降低水体总氮含量, 见图 3。

### 2.4 苦草的生长状况

实验期间, 苦草生长良好 (表 2), 其湿重增加了 38% 以上, 并产生分枝, 长度增加, 说明种植前期向

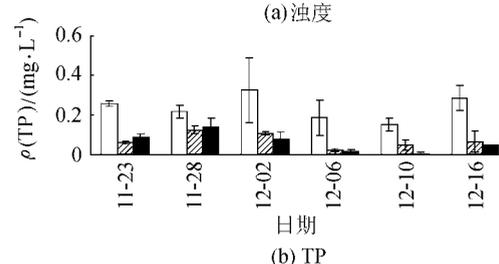
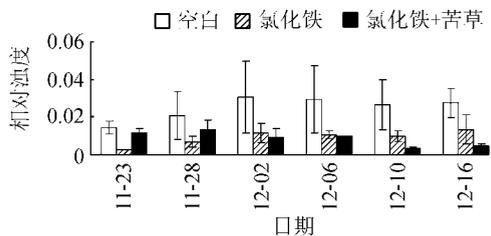


图2 各实验组水体浊度和总磷质量浓度的变化

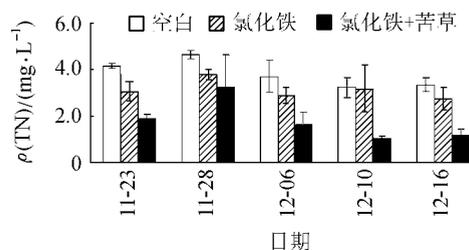


图3 各实验组水体总氮质量浓度的变化

水体添加三氯化铁对苦草的生长并无有害影响。絮凝剂的添加,有效地降低了水体的浊度,提高了水体透明度,为苦草的生长提供良好的环境条件。

表2 苦草的生长状况

日期	编号	湿重/g	叶长/cm		增重/g	分支率/%
			最长	平均		
11-21	7号桶	64.90	25.5	19.2		
	8号桶	65.90	29.1	18.3		
	9号桶	66.07	26.7	19.6		
12-16	7号桶	92.25	26.0	21.0	27.35	31.25
	8号桶	91.21	30.0	21.3	25.31	25.00
	9号桶	96.36	27.0	21.0	30.29	9.09

### 3 结论

三氯化铁可有效降低水体的悬浮物浓度和总磷浓度,为水生植物早期的生长提供良好的条件,水生植物可保持和加强三氯化铁絮凝剂对水质的处理效果,并降低水体的总氮浓度。本实验初步证明了两者的复合运用可把两者的优点结合起来,修复富营养化水体,使水质得到持续改善,为淡水湖泊的生态修复提供一种新的思路。

#### 参考文献:

[1] COOKE G D, WELCH E B, PETERSON S A, et al. Restoration and management of lakes and reservoirs[M]. Second Edition.

New York: Lewis Publishers, 1993.

[2] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 273-282.

[3] BOERS P, VAN der DOES J, QUAAK M, et al. Fixation of phosphorus in lake sediments using iron (III) chloride: experience, expectations[J]. Hydrobiologia, 1992, 233: 211-212.

[4] 朱广伟, 陈英旭, 周根娣, 等. 运河(杭州段)沉积物磷释放的模拟试验[J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 343-349.

[5] 宋福, 陈艳卿, 乔建荣, 等. 常见沉水植物对草海水体总氮去除速率的研究[J]. 环境科学研究, 1997, 10(4): 47-50.

(收稿日期 2006-07-24 编辑:傅伟群)

(上接第17页)

b. 水源区及北部泉水溢出带地下水来自深层地下水的补给,此溢出带深、浅层水氟值一致,也表明优势补给通道的存在。

c. 平面上自山前戈壁带至细土平原带,径流途径越长,地下水年龄越老,垂向上存在由深部向浅部的越流补给,受控于含水层结构和优势,补给通道垂向越流表现出地段性差异。

d. 浅层水局部地段已受污染。为遏制污染向深部蔓延,考虑到农业开采井分布范围广,细土带农业区开采层位宜控制在80m以浅,工矿企业等大型水源区开采深度宜控制在80m以深,同时成井过程中必须做好止水工作,一方面实现区域上的分层开采以减少井间干扰,另一方面有利于水资源保护。

#### 参考文献:

[1] 崔振卿, 杨丽萍, 王福利, 等. 甘肃省张掖市城区供水扩建工程东郊水源区水文地质勘探报告[R]. 兰州:甘肃省地质矿产勘察开发局水文地质工程地质勘察院, 2005.

[2] 丁宏伟, 张荷生, 王文科, 等. 河西走廊地下水勘查[R]. 兰州:甘肃省地质调查院, 2003.

[3] 张光辉, 刘少玉, 谢悦波, 等. 西北内陆黑河流域水循环与地下水形成演化模式[M]. 北京:地质出版社, 2005: 158-318.

[4] 丁宏伟, 崔振卿. 黑河干流中游地区泉水资源衰减原因及趋势分析[J]. 甘肃地质学报, 2001, 10(1): 71-73.

(收稿日期 2006-08-15 编辑:傅伟群)