

文章编号: 1000-6524(2003)04-0381-05

天然矿物材料修复富营养化水体的实验研究

薛传东^{1,2}, 杨浩¹, 刘星²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008; 2. 昆明理工大学地球科学系, 云南昆明 650093)

摘要: 采用底泥掩蔽技术, 选取天然红土, 添加适量的粉煤灰及石灰粉作为掩蔽覆盖物, 对滇池富营养化水体进行现场修复实验。结果表明: 用天然矿物材料减小底泥内源营养盐负荷的释放修复富营养化水体的效果良好; 红土是有效的底泥覆盖材料, 添加粉煤灰和石灰粉有助于消减底泥中 TP、TN 的释放量, 还可提高对藻类等浮游植物繁殖的营养基础和对藻、藻细胞及其胚胎上浮生长的控制效率, 最终达到除藻的目的, 为滇池及类似湖库富营养化水体的修复提供了崭新的思路。

关键词: 天然矿物材料; 内源负荷; 富营养化修复; 底泥掩蔽技术; 滇池

中图分类号: X524; P579

文献标识码: A

An experimental application of natural mineral materials to the remedy of the eutrophic water

XUE Chuan_dong^{1,2}, YANG Hao¹ and LIU Xing²

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Department of Earth Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In this paper, the polluted sediment capping technique was used to control the eutrophic water from the Dianchi Lake on the basis of field simulating experiments. The capping experimental materials include natural laterite and additives such as coal ash and powder of lime, which are all cheap geological materials. An analysis of the 125-day monitoring data consisting of the physical and chemistry indexes showed the eutrophication of the experimental barrel water and the interrelated water, it is held that the application of natural mineral materials to controlling the water eutrophication through the reduction of the internal pollutant loading of the polluted sediments in the eutrophic lake or reservoir is an effective technique, and that the laterite is an efficient superstratum for separating the polluted sediments from the upper eutrophic water. It is also considered that laterite plays an important role in reducing the release of the total phosphorus and the total nitrogen and increasing the controlling efficiency of the breeding and floating of the phytoplanktons such as alga, algae cells and algae embryos by means of the addition of the additives like coal ash and powder of lime. The algae may be eventually eliminated from the water. The technique can provide a new train of thought for the remedy of the eutrophic water in the Dianchi Lake and similar lakes.

Key words: natural mineral materials; internal pollutant loading; eutrophication remedy; sediment capping technique; Dianchi Lake

我国主要湖库、河流特别是城郊湖泊的水体富营养化问题十分突出, 是目前环境污染治理中的一个热点和难题。研究证明, 水体中氮、磷等营养盐的富集是导致水体浮游植物大量繁殖的根本原因, 至今尚无单一的生物学、化学和物理学措施能彻底去除水中的氮、磷等营养盐, 通常的二级生化处理方

法也只能去除 30%~50% 的氮和磷(王宁等, 2001)。对于富营养化湖库水域, 底泥是营养盐的重要蓄积库, 其内源负荷释放是水环境体系营养水平的主导因子之一, 浅水湖泊底泥的内源负荷释放导致的水体富营养化问题更加突出(Phillips *et al.*, 1994; 李震宇等, 1998; 孙亚敏等, 2000; 谢丽强等,

收稿日期: 2003-07-31; 修订日期: 2003-10-05

基金项目: 中国科学院农业可持续发展国家重点实验室重点项目; 中国科学院南京土壤研究所创新基金资助项目(005301)

作者简介: 薛传东(1971-), 男, 副教授, 博士, 从事资源环境与地质的教学与研究工作, E-mail: cdxue@hotmail.com。

2001; 王国祥等, 2002)。因此, 富营养化水体的修复主要是对污染底泥内源性营养盐释放的消减。掩蔽(底泥覆盖)是在污染底泥上放置一层或多层覆盖物使底泥与水体隔离、防止底泥污染物向水体迁移的一种原位固定技术。大量试验表明, 掩蔽能有效防止底泥中营养物、PCBs、PAH及重金属进入水体而造成二次污染, 对水质有明显改善作用(Azcue *et al.*, 1998), 其优势在于成本低、适用范围广、环境潜在危害小、不增加水深即可为水生植被的修复提供优质的生长环境, 而且适宜于水体 pH 值较高(大于 9.0)、沉积物氧化和化学沉淀等不能抑制内源磷释放的情形。本文选取本地广泛产出的红土、电厂粉煤灰及石灰粉等为覆盖物, 进行掩蔽滇池底泥的实验, 为滇池及类似富营养化水体的修复和污水净化提供切实有效的方法和思路。

1 实验

1.1 场地及装置

滇池是一个典型的浅水型城郊湖泊, 目前全湖已达重富营养-异常营养状态, 以每年 5 月至 8 月最为严重, 水质为超 V 类, 底泥中含有较高的 N、P 和 As、Hg、Cr 等(栢元蒙, 2002; 田升平等, 2002), 水域 pH 值已普遍达 9.1~9.5。实验场地为紧靠呈贡县斗南镇梅子村附近的滇池北东岸人工圈围的池塘水域, 呈长方形, 南北长 100 m, 东西宽 85 m, 水深常年稳定在 1.50 m。清除大型植物及浮游植物、鱼。池塘底部为天然沉积层, 松软淤泥层厚 0.2~0.3 m。池塘西、北侧以 0.3~2.0 m 宽的石砌堤坝为界与滇池水体相邻, 两者通过堤坝内设置的铁丝防护网的水孔相连。西侧风浪较大, 底泥多为砂、砾及卵石层, 少见淤泥层, 水深一般 1.2(旱季)~2.0 m(雨季)。

实验装置为市售 PVC 压力管竖直安装固定在池塘中部水域而成的试桶, 共 10 个, 每个桶长 1.80 m, 桶体结实, 纯白色, 内外径均一, 内外壁光滑平整, 桶内径为 300 mm, 壁厚 6 mm。桶口敞开, 底端插入底泥 0.15 m, 顶端高出水面 0.15 m, 用于阻挡池塘水涌入和固定防雨、防尘伞罩。全部试桶固定在搭建的圆木格架上, 以防倾斜和保护底泥的稳定。安装试桶时避免扰动桶底范围底泥的自然状态。试桶安装完毕后, 将桶内水全部抽出, 缓慢放入池塘水, 之后静置 15 d, 即可用于后续实验。此时, 桶内外水面一致, 水深均为 1.50 m, 桶内水体积为 0.106 m³。

1.2 材料及方法

红土取自昆明市松华坝水库水源地保护区内, 未遭受耕作和人为污染影响, 取样时从地表向下刻槽至 5 m 深处, 粉碎后混匀。粉煤灰取自昆明电厂干灰库内的一级灰。石灰粉是市售的普通石灰粉。样品全部过 200 目筛, 并经 200℃ 烘干 3 h, 置于干燥器中备用。

10 个试桶分 5 组, 每组 1 个重复, 其中一次性分别向 4 组试桶内投撒一定量的相应试剂, 均匀覆盖试桶底泥。红土

1 红土 2、混合土 1、混合土 2 4 组试桶内分别加入 5.98 g/cm³ 的红土层 2.39 g/cm³ 的红土层 2.43 g/cm³ 的红土与粉煤灰混合土层 2.46 g/cm³ 的红土与石灰粉混合土层。另外 1 组试桶作为空白对照, 不投加任何试剂。全部实验于 2003 年 3 月 7 日开始, 试剂投加时间为 3 月 8 日上午 10 时。实验期间, 按时取样测定各试桶内及试桶外池塘水的总磷、总氮及浮游植物生物量(以叶绿素 a 含量计), 并现场观测气温、水温、颜色、SD(透明度)、pH 值以及生物量等, 以考察底泥覆盖的效果。每次取样时间为当日上午 9:00, 取样深度均为 1 m。具体为: 投撒实验之前 1 天及之后 6 小时各取样测定 1 次, 之后第 1 月每周测定 1 次, 第 2 月每两周测定 1 次, 第 3 月后每六周测定 1 次, 并同时现场观测其他指标。样品的采集、预处理和保存均严格遵照规范, 总磷(TP)用钼酸铵分光光度法测定, 总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)测定, 叶绿素 a(ChL_a)用丙酮萃取分光光度法测定。平行测定允许误差小于 ±3~±5%。

2 结果与分析

在 2003 年 3 月 7 日至 7 月 9 日的 125 天内, 分别于 3 月 7 日 3 月 8 日 3 月 14 日 3 月 21 日 3 月 28 日 4 月 12 日 4 月 25 日 5 月 23 日 7 月 9 日共 9 次取样测试, 不同水体中 TP、TN 及 a(ChL_a) 的测定结果分别见图 1、图 2、图 3。各指标值均为每组试桶及池塘中水实际测定值的平均值。

2.1 模拟试桶的理化环境变化

根据历时 125 天的实验监测, 试桶内、外水温度随气温变化, 桶内波动范围在 11.0~24.0℃, 桶内、外相差甚微, 一般桶内温度高出 0.3℃~0.5℃。对于空白试桶和池塘内水体, SD 分别在 20~40 cm 和 12~24 cm 之间变化, 前者逐渐增大, 后者则逐渐减小; pH 值分别为 9.2~9.4 和 8.7~8.8, 两者相差 0.5~0.7, 但动态趋势一致; TP 和 ChL_a 也具有明显一致的变化(图 1、图 3), 只是相对于池塘水, 从 3 月 21 日开始空白试桶水的 TP 稳定表现出约 40%~50% 的自

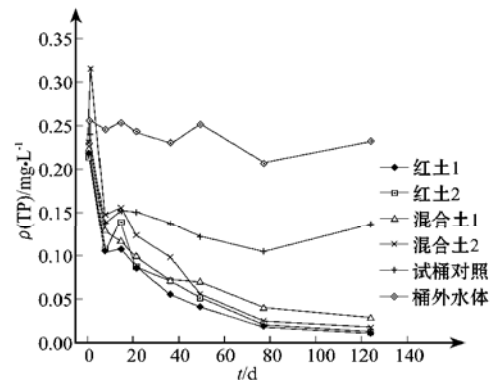


图 1 实验水体中总磷浓度变化曲线

Fig. 1 Variation of total phosphorus (TP) content of the water under different conditions

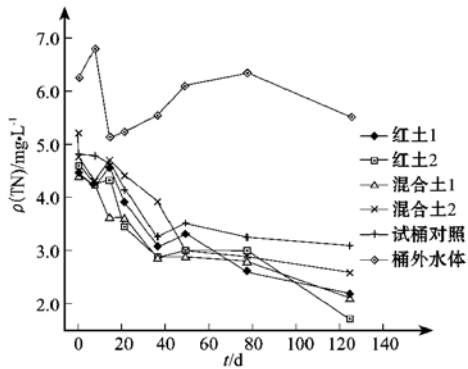


图 2 实验水体中总氮浓度变化曲线

Fig. 2 Variation of the total nitrogen (TN) content of the water under different conditions

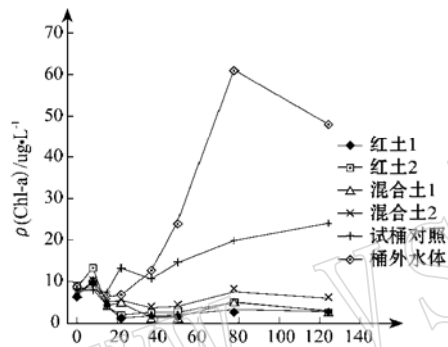


图 3 实验水体中叶绿素 a 浓度变化曲线

Fig. 3 Variation of the chlorophyll a (Chl_a) content of the water under different conditions

净率, Chl_a 的增幅则低 2~5 倍。而 TN 则明显不同(图 2), 在整个实验期间, 相对于池塘水 TN 总体下降中存在两次明显的升高, 空白试桶水的 TN 小幅下降, 自净率在 9.4%~48.9% 之间变化。空白试桶和池塘水体 N/P 值具有相近的变化趋势, 均在 19.8~34.5 和 20.1~30.3 之间。

试桶内、外水体的理化环境存在一定的差异, 是由于试桶内的相对静水环境使水体表现出一定的自净能力, 并具有一定的不稳定性所致。但总体上, 二者仍具有较强的可比性, 模拟实验结果应具有较强的实用价值。

2.2 修复效果

从图 1 可见, 加入试剂 6h 后, 除红土试桶外, 其余试桶中水的 TP 浓度均出现一个 0.10 mg/L 的增高, 增幅约 42%。这可能是粉煤灰、石灰粉与磷酸盐等作用形成的悬浮态“絮团”尚未全部沉降到底部造成的。之后, 除红土试桶水在 3 月 21 日稍有回升外, 其余各试桶中 TP 浓度均迅速降低, 至 7 月 9 日降低为 0.01~0.03 mg/L。红土 1、红土 2、混合土 1、混合土 2 试桶中 TP 的去除率分别为 94.9%、94.3%、86.6%、91.0%, 即红土 1>红土 2>混合土 2>混合土 1, 均远高于对

照试桶 40.5% 的自净率。这说明, 4 种材料的覆盖对底泥释磷均有明显的效果, 其中红土效果最好, 分别添加石灰粉和粉煤灰的试桶则依次略有降低, 但均大幅低于上覆水的 TP 浓度。

从图 2 可见, 加入试剂后, 除 3 月 21 日和 5 月 23 日出现两次小幅回升外, 各试桶 TN 浓度均稳定下降。红土 1、红土 2、混合土 1、混合土 2 试桶水中 TN 的去除率分别为 52.9%、63.0%、56.0%、50.2%, 即红土 2>红土 1>混合土 1>混合土 2, 均高于对照试桶 36.1% 的自净率, 但明显低于对 TP 的去除率(40.5%)。

与 TP 相似, 加入试剂 6 h 后, 各试桶内 Chl_a 浓度也均出现一个 2.0~4.9 μg/L 的增幅(图 3), 约增加 24.6%~58.2%。这可能与红土、粉煤灰、石灰粉与藻类等浮游植物细胞吸附、凝聚而形成悬浮颗粒尚未全部沉至桶底有关。之后, 除 5 月 23 日小幅回升外, 其他时段各试桶水 Chl_a 均稳定下降。红土 1、红土 2、混合土 1、混合土 2 试桶水 Chl_a 的去除率分别为 49.8%、63.0%、64.4%、15.7%, 即混合土 1>红土 2>红土 1>混合土 2, 而对照试桶及池塘水中 Chl_a 却已增为实验初期的 3.1~7.1 倍。可见, 各种试剂均有效地抑制了水中藻类等浮游植物的大量繁殖。

2.3 可行性探讨

粘土矿物、铁锰氧化物、氢氧化物等天然矿物由于其特殊的晶体结构、晶体化学性质可用作理想高效的吸附剂、水流阻挡层和密封材料, 经活化、改性、改性处理还可提高其性能, 对水体和土壤污染修复具有天然净化作用, 其资源丰富、价格低廉、处理简便、无二次污染, 具低温可再生性, 展现出广阔的应用前景, 成为天然矿物净化污染方法研究的重点对象之一 (Spark *et al.*, 1995; 鲁安怀, 1999, 2001; Daniels *et al.*, 2001; 汤艳杰等, 2002)。本实验选用的红土富含粘土矿物、铁锰铝的氧化物、氢氧化物等, 其中以伊利石、蒙脱石、高岭石、褐铁矿、石英为主, 次为绿泥石、蛭石、针铁矿、纤铁矿、氢氧化铝、氢氧化铁、氢氧化锰等(薛传东等, 2001)。从实验结果看, 红土对水体中 TN、TP、Chl_a 均表现出较高的去除率, 尤其是 TP 浓度已经降至 0.011~0.013 mg/L, 大大低于静止水体发生富营养化的 0.086 mg/L 的临界值 (UK Environmental Agency, 1998)。这表明, 红土覆盖很好地控制了底泥磷负荷的释放, 也与磷的地球化学性质在现代沉积物中主要与粘土矿物有关的认识(俞志明等, 1995)吻合。红土 1、红土 2、混合土 1、混合土 2 试桶水 N/P 值分别从初期的 19.0、20.4、13.9、15.0 大幅增高为 199.6、132.9、71.1、129.5, 远高于空白试桶、池塘和滇池水体, 可见各试桶水体的富营养化趋势已显著降低。

泥、粘土在水中分散形成大量的悬浮颗粒, 颗粒之间及颗粒与藻细胞之间通过碰撞絮凝而沉入水底, 对消除水华、水中一些无机、有机化合物等及其分布和迁移转化都有重大影响(罗岳平等, 1998; 俞志明等, 1999; 周慈由等, 1999)。投加试剂试桶水的 Chl_a 含量的大幅降低也说明, 试剂中相应矿

物或组分一方面本身具有较强的吸附能力而吸附上覆水体中营养盐等组分,另一方面作为覆盖封闭层,在水体-底泥界面附近的营养物及有毒有害有机物的迁移、沉积变化中起着重要控制作用,遏止了下沉至底泥内的藻、藻细胞及其胚胎等的上浮生长和繁殖,阻止其穿透覆盖层而进入上覆的水体。在大幅减少藻类等浮游植物繁殖的物质基础——氮、磷营养盐的同时,试剂所形成的阻隔层还有效地遏止了底泥中藻、藻细胞及其胚胎等的上浮生长和繁殖,达到控制水体富营养化的目的。对比发现,较厚的红土1对TP的去除率略高0.6%、N/P值稍大外,对TN和ChL_a的去除率则分别低于较薄的红土2 10.1%和13.2%。可见,对于富营养化水体的修复,红土层不是越厚越有效,红土用量的影响值得进一步探讨。

从红土添加粉煤灰的实验结果看,除可有效去除水中TN、TP外,对ChL_a的去除率最高(64.4%),控制富营养化效果最佳。用红土结合粉煤灰作为覆盖层掩蔽底泥,类似生物膜(吴为中等,2003)可起到对藻类、藻细胞及其胚胎的生物絮凝、吸附、附着作用,大大减少了水体中游离的藻、藻胚胎数量,最终达到除藻的目的。红土、粉煤灰与藻细胞之间的凝聚与两者的颗粒浓度、藻细胞的生理状态、环境条件有关,应加强这方面的机理研究。

向水中加入铝、铁、钙盐,可抑制内源磷的释放(Salonen *et al.*, 2000)。从控制内源磷释放的效果看,从铝盐、铁盐到钙盐依次降低。但铝盐价格昂贵,溶解性铝对水生生物及人体有毒副作用;铁盐投加时需要保证沉积物的氧化状态,与沉积物氧化配合使用,成本较高。研究表明,在天然方解石形成过程中所伴随的羟基磷灰石[Ca₁₀(OH)₂(PO₄)₆]等钙盐沉淀稳定,大于铝盐、铁盐生成磷酸盐沉淀的3~4倍,可以彻底去除水中大量的磷,自然条件下这部分Ca、P很难再释放到水体中,还可使水中石油类、COD_{Cr}等共沉而得以净化,且其来源广、成本低。实验结果证实,在一定用量条件下添加石灰粉不仅不会造成水体pH值的明显升高,而且对磷的控制效果好,去除率为91.0%,高于红土添加粉煤灰的去除率(86.6%);对氮的去除率(50.2%)也基本与添加粉煤灰的去除效果(52.9%)接近。

为检验所用试剂的安全性,分别用蒸馏水对红土、粉煤灰、石灰粉及其混合土进行溶解实验,结果显示,各试样土溶滤水中均未检测出TN、TP和有毒有害元素(TP、TN的最低检测限分别为0.01 mg/L和0.05 mg/L),不会污染水体。

3 结论

(1) 用天然矿物材料作为掩蔽层来控制富营养化湖库底泥内负荷源释放的效果良好,红土是有效的底泥覆盖材料,并可有效吸附上覆水体中TP、TN和抑制藻类等浮游生物的生长繁殖。但红土用量的影响值得进一步探讨。

(2) 添加粉煤灰和石灰粉有助于消减底泥中TP、TN的

内源释放量,粉煤灰还可以明显提高其对藻类等浮游植物繁殖和藻类、藻细胞及其胚胎的上浮生长的控制效果,最终达到消除藻类和富营养化的目的。

(3) 经检测,所选用的红土、粉煤灰、石灰粉较安全,不会污染待修复水体。

(4) 本方法还存在工程量大、需要大量清洁覆盖物、降低水体有效深度和库容、发生化学作用等问题,并应与其他内外源污染控制技术结合使用,但其利用廉价易取的天然红土和工业废物、环境效益高、施工简便的优势显著,既达到了水体修复的目的,又以废治废,是一套富营养化水体修复的可行技术。

分析测试工作得到了云南农业大学汤利教授、郑毅教授的大力支持和协助,谨致谢意。

References

- Azeue J M, Zeman A J, Aean Mudroch, *et al.* 1998. Assessment of sediment and pore water after one year of sub aqueous capping of contaminated sediments in Hamilton Harbour, Canada[J]. *Water Science & Technique*, 37(6-7): 323~329.
- Daniels B G, Lindsay R and Thornton Q. 2001. A review of quantitative structural determination of adsorbates on metal oxides surface[J]. *Surf. Rev. Lett.*, 8(1-2): 95~120.
- Li Zhenyu, Zhu Yinmei and Wang Jin. 1998. Some physical and chemical characteristics of sediment in Westlake, Hangzhou[J]. *Journal of Lake Sciences*, 10(1): 79~84(in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai. 1999. The application of environmental minerals materials to the treatment of contaminated soil, water and air[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(4): 292~300(in Chinese with English abstract).
- Lu Anhuai. 2001. Basic properties of environmental mineral materials: natural self-purification of inorganic minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 371~381(in Chinese with English abstract).
- Luo Yueping, Qiu Zhenhua, Ma Jianmin, *et al.* 1998. Aggregation and sinking behavior of *Chlorella vulgaris* with kaolin under laboratory conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 18(3): 278~284(in Chinese with English abstract).
- Phillips G, Jackson R, Bennett C, *et al.* 1994. The importance of sediment phosphorus release in the restoration of very shallow lakes(The Norfolk Broads, England) and implications for biomanipulation[J]. *Hydrobiologia*, 275/276: 445~456.
- Salonen V P and Varjo E. 2000. Gypsum treatment as a restoration method for sediments of eutrophied lakes—experiments from Southern Finland[J]. *Environmental Geology*, 39(3-4): 353~359.
- Spark K M, Joson B B and Wells J D. 1995. Characterizing heavy metal absorption on oxides and oxyhydroxides[J]. *Europ J of Soil Sci.*, 46: 621~631.
- Sun Yamin, Dong Manling and Wang Jiaquan. 2000. Effects of internal pollution sources of the eutrophic lake and countermeasures[J].

- Journal of Hefei University of Technology (Natural Sciences), 23 (2): 210~ 213 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yanjie, Jia Jianye and Xie Xiande. 2002. The environmental mineralogical significance of contaminated soil[J]. Advance in Earth Science, 17(4): 557~ 564 (in Chinese with English abstract).
- Tian Shengping, Dongye Maixing, Zhou Jianmin, *et al.* 2002. Phosphorus burden on water body of Dianchi lake and its impact on water environment[J]. Geology of Chemical Minerals, 24(1): 11~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Tuo Yuanmeng. 2002. Eutrophication of Dianchi and its trend and treatment[J]. Yunnan Environmental Sciences, 2002, 21(1): 35~ 38 (in Chinese with English abstract).
- UK Environmental Agency. 1998. Environmental issues series_aquatic eutrophication in England and Wales[R]. UK Environmental Agency Consultative Report, December.
- Wang Guoxiang, Cheng Xiaoying and Pu Peimin. 2002. Lake eutrophication control in technology, theory and application[J]. Journal of Lake Sciences, 14(3): 273~ 282 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ning, Zhu Jun, Feng Junming, *et al.* 2001. The function of metal in prevention of algal bloom[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(4): 533~ 535 (in Chinese with English abstract).
- Wu Weizhong, Xing Chuanhong and Wang Zhansheng. 2003. Efficiency and operating parameters of bio_ceramic filter for the pretreatment of eutrophic reservoir water[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis(Natural Sciences), 39(2): 262~ 269 (in Chinese with English abstract).
- Xie Liqiang, Xie Ping and Tang Huijuan. 2001. The concentration and dynamics of sediment phosphorus in various lake region of lake Donghu[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 25(4): 305~ 310 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chuandong, Tan Shucheng, Li Feng, *et al.* 2001. Clay minerals in Quaternary clayey soil and its relation to the land subsidence in Kunming basin area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(4): 437~ 440 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhiming, Ma Xinian and Xie Yang. 1995. Study on the adsorption of clay minerals to some main nutrient salts in seawater[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 26(2): 208~ 213 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zhiming, Song Xiuxian, Zhang Bo, *et al.* 1999. Condensing of the surfactant modified on clay minerals to red tide organisms[J]. Chinese Science Bulletin, 44(3): 308~ 311 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Ciyou, Fang Zhishan, Zheng Airong, *et al.* 1999. Effect of bentonite modified removing red tide organisms and DRP, COD of sea water[J]. Acta Oceanologica Sinica, 21(2): 49~ 55 (in Chinese).

附中文参考文献

- 李震宇, 朱荫涓, 王 进. 1998. 杭州西湖沉积物的若干物理和化学性状[J]. 湖泊科学, 10(1): 79~ 84.
- 鲁安怀. 1999. 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用[J]. 岩石矿物学杂志, 18(4): 292~ 300.
- 鲁安怀. 2001. 环境矿物材料基本性能——无机界矿物天然自净化功能[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4): 371~ 381.
- 罗岳平, 邱振华, 马剑敏, 等. 1998. 小球藻(*Chlorella vulgaris*)与高岭土在实验条件下的凝聚沉降行为研究[J]. 环境科学学报, 18(3): 278~ 284.
- 孙亚敏, 董曼玲, 汪家权. 2000. 内源污染对湖泊富营养化的作用及对策[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 23(2): 210~ 213.
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 铁锰氧化物在污染土壤修复中的作用[J]. 地球科学进展, 17(4): 557~ 564.
- 田升平, 东野脉兴, 周建民, 等. 2002. 滇池湖泊磷负荷及其对水环境的影响[J]. 化工矿产地质, 24(1): 11~ 16.
- 栢元蒙. 2002. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策[J]. 云南环境科学, 21(1): 35~ 38.
- 王国祥, 成小英, 濮培民. 2002. 湖泊藻型富营养化控制——技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 14(3): 273~ 282.
- 王 宁, 朱 俊, 冯俊明, 等. 2001. 金属元素调控在水华治理中的作用初探[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4): 533~ 535.
- 吴为中, 邢传宏, 王占生. 2003. 生物陶粒滤池预处理富营养化水库水源的净化效果与工艺参数[J]. 北京大学学报(自然科学版), 39(2): 262~ 269.
- 谢丽强, 谢 平, 唐汇娟. 2001. 武汉东湖不同湖区底泥总磷含量及变化的研究[J]. 水生生物学报, 25(4): 305~ 310.
- 薛传东, 谈树成, 李 峰, 等. 2001. 昆明盆地第四系粘性土中的粘土矿物[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4): 437~ 440.
- 俞志明, 马锡年, 谢 阳. 1995. 粘土矿物对海水中主要营养盐的吸附研究[J]. 海洋与湖沼, 26(2): 208~ 213.
- 俞志明, 宋秀贤, 张 波, 等. 1999. 粘土表面改性对赤潮生物凝聚作用[J]. 科学通报, 44(3): 308~ 311.
- 周慈由, 方志山, 郑爱榕, 等. 1999. 改性膨润土对赤潮藻种及海水中 DRP、COD 的去除效应[J]. 海洋学报, 21(2): 49~ 55.