

文章编号: 1000-0550(2006)04-0579-06

乌梁素海沉积物中全磷的分布特征^①

孙惠民 何江 高兴东 吕昌伟 樊庆云 薛红喜

(内蒙古大学生态与环境科学系 呼和浩特 010021)

摘要 开展了浅水草型湖泊乌梁素海沉积物中 TP(全磷)的分布特征研究。结果表明,乌梁素海表层沉积物中 TP 含量在 0.37~0.99 g/kg 之间变化,平均值为 0.75 g/kg。水平分布上,TP 含量呈现从湖区四周向湖心递减的变化趋势,大部分湖区已具有生态毒性效应,并对湖区底栖生物群落和生态环境构成了较大威胁;垂向上,尽管沉积物中 TP 含量有所波动,但 0~10 cm 的表层沉积物中 TP 含量均随深度增加而递减,揭示了近年来人类活动的加剧对乌梁素海沉积物中磷累积的重大影响;实验得出了粉砂、粘土粒级 > 极细砂粒级 > 细砂粒级 > 中砂以上粒级的 TP 含量序列,各粒级对 TP 的吸附贡献率由吸附能力和质量百分比共同控制;磷的沉积对乌梁素海富营养化进程有深远影响。

关键词 乌梁素海 富营养化 沉积物 磷

第一作者简介 孙惠民 男 1958 年出生 博士研究生 污染生态学

中图分类号 X141 **文献标识码** A

磷是生命活动的必需元素,对湖泊系统的初级生产力有着重要影响,同时也是引起湖泊富营养化的关键性限制因素。近年来,随着人类对环境资源的开发利用,以及大量含磷污水的排入,使湖泊营养物质的负荷不断加重,湖泊富营养化问题日益突出^[1]。已有的研究表明,全球范围内有 30%~40% 的湖泊遭受不同程度的富营养化影响^[2],我国因受富营养化的影响平均每年约有 30 个湖泊在消亡,其中的绝大多数属于干旱区浅水草型湖泊。乌梁素海是内蒙古高原干旱区最典型的浅水草型湖泊,是黄河中上游重要的保水、蓄水和调水基地,也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环境保护等多功能的大型草型湖泊,为地球上同一纬度最大的自然湿地,对调节内蒙古西部干旱区的生态环境和气候以及维持生物多样性等方面具有重要作用。然而,随着工农业现代化进程的不断推进,乌梁素海已成为典型的重度富营养化草型湖泊,目前腐烂水草及湖泊沉积物正以每年 9~13 mm 的速度在湖底堆积^[3],成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一,有关该区湖泊沉积物中营养盐的分布规律及其地球化学特征研究迄今未见报道。本文针对乌梁素海湖泊湿地功能日趋退化的严酷现实,较为系统地开展了该湖泊湿地生态系统中磷的分布规律及其地球化学特征研究,揭示了浅水草型湖泊内外源负荷的特点及其富营养化机制,以期评价湿地生态系统健康状况、湿地保护与恢复及

湖泊湿地资源的合理开发利用提供理论依据。

1 研究区概况

乌梁素海位于内蒙古自治区乌拉特前旗境内,属黄河河套平原末端,北依阴山,南临黄河,西连河套灌区,东接乌拉山冲(洪)积阶地,是内蒙古自治区第二大、我国第八大的淡水湖泊,也是亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区。湖区界于北纬 40°47'~41°03',东经 108°43'~108°57',湖面高程 1018.5 m,库容量 2.5~3×10⁸ m³,最大水深 3.9 m,80% 的水域水深 0.8~1.0 m。现有水域面积 333.479 km²,其中芦苇区面积为 161.631 km²,主要分布在湖区西侧、北侧及东南侧,明水区面积为 104.824 km²^[4]。湖区西岸为黄河冲积平原,有大面积的人工苇田和农田分布;总排干、通济渠、八排干、长济渠、九排干、塔布渠和十排干等主要灌渠和排水沟均在湖区西岸入湖;东岸和北岸有荒漠化草原分布。总排干除接纳大量的农田退水外,还接纳上游城市生活污水和工业废水,其它干渠则以接纳农田退水为主。

乌梁素海主要补给水源为河套灌区的农田退水,其次为工业废水、生活污水、大气降水和地下水(表 1)。资料显示河套灌区化肥用量由 1978 年的 7×10⁴ t 迅速上升到 1997 年的 43.8×10⁴ t,至 2002 年化肥用量已超过 52×10⁴ t,其中氮肥利用率为 30%~50%,磷肥利用率仅为 7%~15%,大量流失的化肥

①内蒙古自治区自然科学基金资助。

收稿日期:2005-11-22;收修改稿日期:2006-01-05

随农田退水进入湖体。近年来每年入湖总氮约 1088.59 t, 总磷约 65.75 t, 出湖总氮约 759.9 t, 总磷约 37.8 t, 每年留在湖中参与积累储备的总氮约 328.7 t, 总磷约 28.0 t, 这些超负荷积累的营养物已使乌梁素海有序的生态结构严重退化, 极大地加速了湖泊富营养化和沼泽化进程。据 1970~2002 年水质监测资料, 乌梁素海上覆水中总氮平均 1.74 mg/L, 总磷平均 0.07 mg/L, 分别为国际通用判断富营养标准的 8 倍和 3.5 倍, 乌梁素海已成为以大型水生植物过量生长为主的重度富营养化草型湖泊, 并向芦苇沼泽→碱蓬盐化草甸→白刺荒漠方向演化^[5~6]。

表 1 乌梁素海补给水状况^[7]

Table 1 The annual input of water in Wuliangsuhai

项目	来自排干系统	降水、山洪	地下水补给
水量 / ($10^8 \text{ m}^3 / \text{a}$)	6.18	0.657(降水)、0.52(山洪)	0.175
总氮 / (mg/D)	3.18	2.8	1.12
总磷 / (mg/D)	0.322	0.18	0.097

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2004 年 8 月对乌梁素海主体湖区进行了系统的现场监测和样品采集, 鉴于北部湖区主要为人工苇田分布区, 本次研究未进行样品采集。沉积物柱芯使用挪威 Swedaq 公司 KC mod A och B 型无扰动采样器采集, 其中 34 个柱芯位于湖中明水区, 3 个柱芯位于入湖与出湖支流, 同步采集上覆水, 沉积物柱芯以 2 cm 间隔现场分层, 样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存, 回实验室冷冻。乌梁素海沉积物的粒度较细, 可分为软底和硬底两类, 前者为灰色或黑色淤泥, 且有少许植物和小型动物壳的碎片, 多为疏松状沉积物; 后者则为黄土状物质, 相对比较致密。采样站位 (图 1) 使用全球卫星定位系统 (GPS) 定位, 同时结合地形图加以校正。

2.2 样品分析

称取风干沉积物样品 0.2000 g 置于凯氏烧瓶中, 加入 3 mL 硫酸和 10 滴高氯酸, 加热消解至溶液颜色转白并显透明, 继续煮沸 20 min。将凯氏烧瓶中溶液用去离子水洗入容量瓶中, 吸取定量溶液于容量瓶中, 加 1 滴对硝基酚指示剂, 用 4 mol/L NaOH 溶液调节溶液至黄色, 再用 0.5 mol/L 硫酸溶液调节溶液至微黄色, 加入 5 mL 钼锑抗显色剂, 加去离子水稀释至刻度。放置 30 分钟后, 在分光光度计上测定全磷含量。

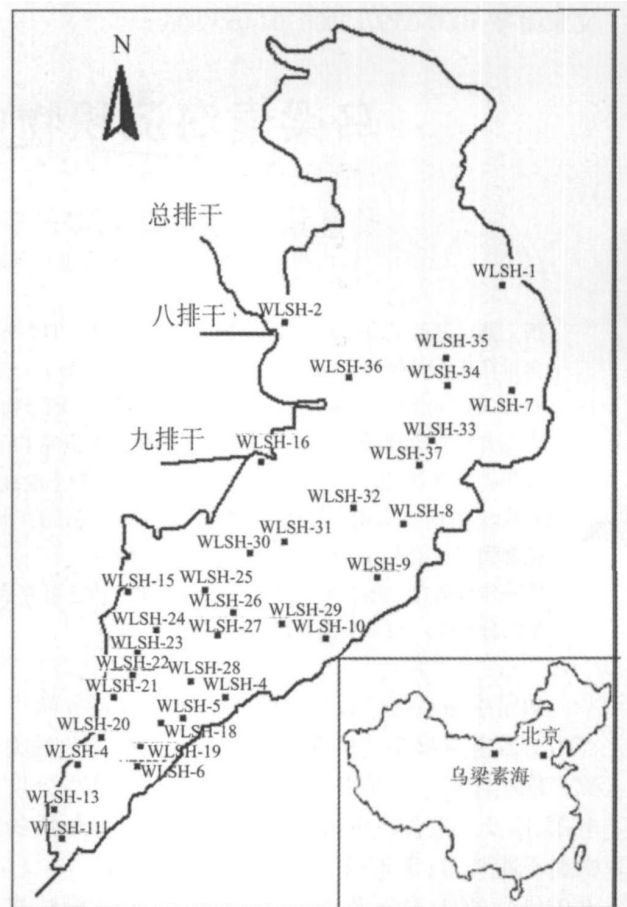


图 1 站位分布示意图

Fig. 1 Location of the samples

3 结果与讨论

3.1 全磷的水平分布特征

应用 Surfer 7.0 软件中 Krigin 内插法对湖泊表层沉积物 (沉积物柱芯顶部 0~10 cm) 作全磷水平分布等值线图, 结果表明 (图 2) 表层沉积物中 TP 水平分布差异较大, 总体有从湖区四周向湖心递减的变化趋势, 揭示了沉积环境和水动力条件的变化对磷在沉积物中的累积有一定影响, 也在一定程度上反映了磷来源的多样性。已有研究表明^①, 乌梁素海接纳的各类废水中, 以城市生活污水对磷的贡献率最大 (占 51.6%), 其次为农田退水 (占 35.2%) 和工业废水 (占 13.2%); 通过总排干排入乌梁素海的各类污染物占入湖污染物总量的 90% 以上, 其中磷主要通过总排干输入。现场观测表明, 通过总排干由湖区西北端入湖的河套灌区农田退水、上游工业废水和生活污水, 入湖后由于受到芦苇和菖蒲等大型挺水植物的阻碍,

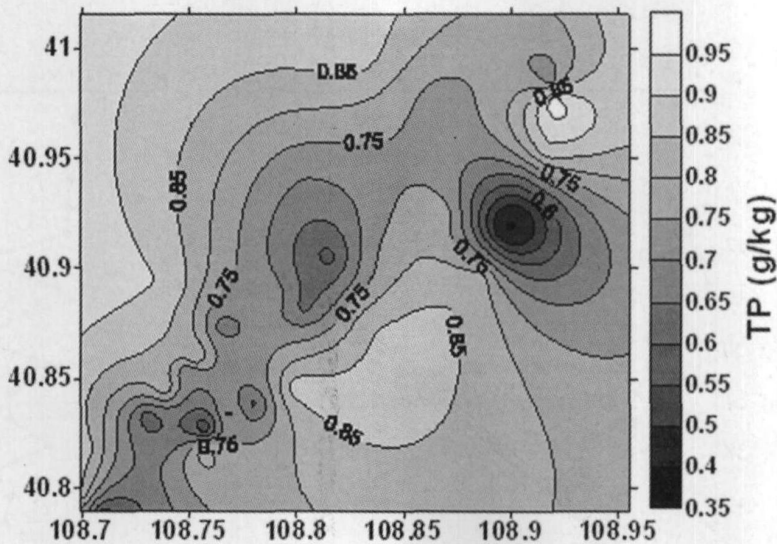


图 2 乌梁素海湖区表层沉积物中全磷的水平分布(样本数为 34)

Fig 2 The spatial distribution of TP in surface sediments of Wuliangsu Lake (samples 34)

有部分污水向东分流。向东分流的污水由于直接汇入湖区东北端明水区,加之南侧芦苇和菖蒲的围拦和阻碍,使明水区域处于相对封闭的状态,水动力条件相对微弱,从而有利于水体中磷的沉积,致使该区(WLSH-33, 34, 35)表层沉积物中 TP 含量较高,并在全磷水平分布等值线图上表现出一定范围的特高值区。由总排干入湖的大部分污水向南分流并在 WLSH-37 点附近与向东分流的污水再次汇合后继续向南流动,由于局部水动力条件的变化而在湖区东部形成另一较大分布范围的高值区。湖区东北端与湖区东部高值区之间的低值区则可能与该区受山洪冲积影响严重有关,并与该区湖泊沉积物的粒度普遍大于其他湖区相一致。西部湖区大面积 TP 高值区的出现则是总排干污水与八排和九排等以农田退水为主的干渠污水混合叠加的结果。而 TP 由湖区四周向湖心递减的趋势则在一定意义上体现了湖泊自身的滤过作用。

表层沉积物与底栖生物关系密切,其沉积物质量对底栖生物生境有重要影响,当污染物超过某一含量水平时,将对底栖生物产生毒性效应。本项研究表明,乌梁素海表层沉积物中 TP 含量在 0.37~0.99 g/kg 之间变化,平均值为 0.75 g/kg。按加拿大环境部(1992)发布的沉积物中能引起最低级别生态毒性效应的总磷浓度(600 $\mu\text{g/g}$)及具有严

重级别生态毒性效应的总磷浓度(2000 $\mu\text{g/g}$)标准^[8],乌梁素海大部分湖区已具有生态毒性效应,并已对湖区底栖生物群落和生态环境构成了较大威胁。相关研究表明^[9],当入湖营养盐负荷量减少或完全被截污以后,由于沉积物中营养盐内负荷的存在,营养盐会逐步被释放出来,故仍可发生水体富营养化。按磷的总输入量 65.75 t/a 总输出量 37.80 t/a 核算,每年约有 42.6% 的磷滞留在乌梁素海湖体内,从而加剧了乌梁素海的内源负荷。因此,即使外源负荷得以控制,沉积物中磷的内源负荷对乌梁素海的富营养化仍有长久深远的影响。

3.2 全磷的垂向分布特征

磷在湖泊沉积物中的垂向变化较为复杂,夏学惠等人的研究表明,滇池沉积物中磷的垂向变化通过不同深度磷剖面垂向变化表现比较明显^[10]。乌梁素海 WLSH-35、8、26、22、11 等 5 个站位沉积物柱芯中 TP 研究结果表明,由于受沉积环境、早期成岩作用和人类活动等多种因素的共同作用,不同湖区 TP 的垂向变化存在较大差异(图 3)。WLSH-35 站位由于长期处于半封闭状态,沉积磷再悬浮释放能力较弱,使沉积物柱芯中 TP 含量呈现高值,在 0.70~0.86 g/kg 之间变化,平均值为 0.76 g/kg。WLSH-8 站位 TP 含量较低,在 0.33~0.52 g/kg 之间变化,平均值为 0.41 g/kg。垂向分异相对较小,与通过地表径流(坡

①内蒙古湖泊恢复治理项目—乌梁素海综合整治研究

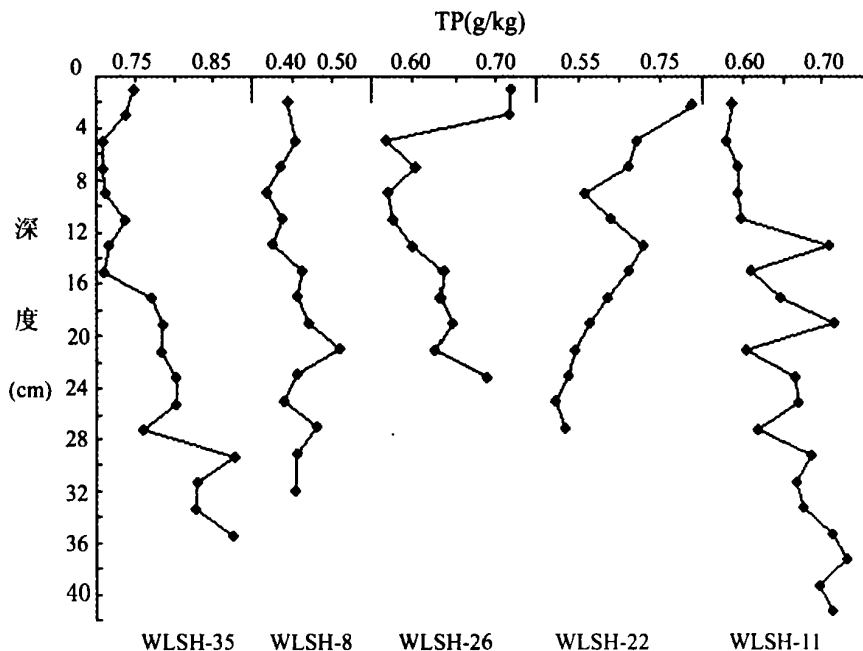


图 3 沉积物柱芯中全磷的垂向分布

Fig 3 The vertical distribution of TP in the sediment core

面径流)从东北部山坡集水区汇入湖区的大气降水较多,对该区具有较强的冲刷和稀释作用(尤其是降水期)有关。WLSH-26 站位 TP 含量在 0.56~0.71 g/kg 之间变化,平均值为 0.62 g/kg 自上而下呈现先减小后增大的趋势,可能与该站位所处区域水动力作用相对较强有关。WLSH-22 站位 TP 含量在 0.50~0.83 g/kg 之间变化,平均值为 0.63 g/kg TP 自上而下呈递减趋势,该区域主要受河套灌区农田退水的影响,TP 垂向变化特征与河套灌区化肥用量逐年加大相符。河套灌区化肥用量 2002 年比 1978 年增长了 7 倍多,且增幅主要集中于近十年,大量流失的化肥随农田退水进入湖体,使乌梁素海营养负荷逐年加重。WLSH-11 站位 TP 含量在 0.57~0.72 g/kg 之间变化,平均值为 0.64 g/kg 表层 0~12 cm TP 含量变化相对稳定,12 cm 以下总体有随深度增加 TP 含量逐渐增大的趋势,且波动较大,可能与沉积环境不稳定有关。

垂向上,尽管各沉积物柱芯中 TP 含量有所波动,但在 0~10 cm 的柱芯中 TP 含量均表现出随深度增加而递减的趋势。相关研究表明乌梁素海的沉积速率为 9~13 mm/a 按此推算,表层 0~10 cm 代表了近十年的沉积,磷在该层沉积物中的变化特征与河套灌区化肥用量逐年加大,以及近年来大量生活污水

和工业废水排入乌梁素海相吻合,说明人类活动对乌梁素海沉积物中磷的累积有重大影响。WLSH-35、26、11 站位沉积物柱芯中 TP 含量表现出底层高的特点,可能与底层沉积物为黄色粘土,而黄色粘土更易吸附磷^[11]有关,还可能与湖盆早期演化和成岩作用有关,确切原因有待进一步研究。

3.3 全磷分布与沉积物粒度的关系

不同粒级沉积物的比表面、表面电荷密度和数量及矿物组成等均有明显的差异,从而导致不同粒级的吸附特性不同。按温德华粒度分级标准^[12],本文对粒度分级明显的 WLSH-8 沉积物柱芯进行了 TP 的粒度效应研究(表 2)。结果表明,TP 含量随沉积物粒级增大而明显减小,并有粉砂、粘土粒级 > 极细砂粒级 > 细砂粒级 > 中砂以上粒级的 TP 含量序列,TP 主要富集于粒径小于 63 μm 的沉积物之中,与沉积物粒级越小比表面越大,对磷的吸附就越强^[13]相符,也与元素粒度控制律^[14]相一致。

沉积物中不同粒级组分对吸附的贡献可用吸附贡献率表示^[15],吸附贡献率公式为: $\alpha_i = \frac{Q_i Z_i}{\sum Q_i Z_i}$

其中 α_i 为沉积物中 i 粒级组分吸附贡献率,粒级组分吸附 TP 的数量为 Q_i , 粒级组分的质量百分比为 Z_i 。WLSH-8 站位表层沉积物(0~10 cm)不同粒

级的全磷贡献研究表明(图4),吸附贡献率最大值出现在63~125 μm 的极细砂粒级沉积物中,而不是粒径最小(<63 μm)的沉积物中,这是由于<63 μm 的粉砂和粘土粒级在沉积物中所占的质量百分比比较小所致。

表2 不同粒级沉积物中TP含量

Table 2 The content of TP in different particle size for sediments

粒级	范围/(g/kg)	平均值/(g/kg)
<63 μm	0.70~0.89	0.78
63~125 μm	0.35~0.57	0.43
125~250 μm	0.27~0.49	0.36
>250 μm	0.22~0.44	0.31

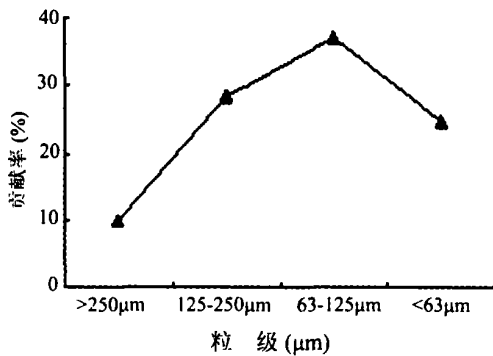


图4 表层沉积物不同粒级的全磷贡献率

Fig 4 The adsorption contribution rates of TP in different particle size for surface sediment

4 结论

(1) 乌梁素海表层沉积物中TP含量在0.37~0.99 g/kg之间变化,平均值为0.75 g/kg水平分布上,TP含量呈现从湖区四周向湖心递减的变化趋势,大部分湖区已具有生态毒性效应,并对湖区底栖生物群落和生态环境构成了较大威胁。

(2) 垂向上,尽管沉积物中TP含量有所波动,但0~10 cm的表层沉积物中TP含量均随深度增加而递减,揭示了近年来人类活动的加剧对乌梁素海沉积物中磷累积的重大影响。

(3) 实验得出了粉砂、粘土粒级>极细砂粒级>细砂粒级>中砂以上粒级的TP含量序列,各粒级对TP的吸附贡献率由吸附能力和质量百分比共同控制。

参考文献 (References)

- 王雨春,万国江,王仕禄,等. 红枫湖、百花湖沉积物中磷的存在形态研究. 矿物学报, 2000, 20(3): 273~278 [Wang Yuchun, Wan Guojiang, Wang Shilu, et al. Forms of phosphorus in sediments of Lake Baihua and Lake Hongfeng Guizhou. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(3): 273~278]
- 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 575~578 [Ma Jingan, Li Hongqing. Preliminary discussion on eutrophication status of lakes, reservoirs and rivers in China and overseas. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(6): 575~578]
- 于瑞宏,李畅游,刘廷玺,等. 乌梁素海湿地环境的演变. 地理学报, 2004, 56(6): 948~955 [Yu Ruihong, Li Changyou, Liu Tingxi, et al. Change of wetland environment in Wuliangsu Hai. Acta Geographica Sinica, 2004, 56(6): 948~955]
- 李畅游,刘廷玺,高瑞忠,等. 乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析及综合评价. 水文, 2004, 24(3): 14~17 [Li Changyou, Liu Tingxi, Gao Ruizhong, et al. Study and synthetic assessment for the season-year change of the eutrophication main-control factors in Wuliangsu Hai Lake. Hydrology, 2004, 24(3): 14~17]
- 尚士友,杜建民,李旭英,等. 乌梁素海富营养化及其防治研究. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4): 7~12 [Shang Shiyou, Du Jianmin, Li Xuying, et al. The study on the management of eutrophication in Wuliangsu Hai Lake. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2003, 24(4): 7~12]
- 尚士友,申庆泰,杜建民,等. 内蒙古乌梁素海沉水植物的收割工程技术. 湖泊科学, 2004, 16(2): 169~177 [Shang Shiyou, Shen Qingtai, Du Jianmin, et al. The harvesting projects technology of submerged plant in Lake Wuliangsu Hai of Inner Mongolia. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(2): 169~177]
- 王效科,赵同谦,欧阳志云,等. 乌梁素海保护的生态需水量评估. 生态学报, 2004, 24(10): 2124~2129 [Wang Xiaoke, Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, et al. Researches on ecological water demand of Wuliangsu Hai Lake. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2124~2129]
- Leivuori M, Niemisto L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia. Chemosphere, 31(8): 3839~3856
- 王永华,钱少猛,徐南妮,等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价. 环境科学, 2004, 17(6): 22~25 [Wang Yonghua, Qian Shaomeng, Xu Nanni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the East Area of Chaohu Lake. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(6): 22~25]
- 夏学惠,东野脉兴,周建民,等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境的影响. 沉积学报, 2002, 20(3): 416~420 [Xia Xuehui, Dongye Maixing, Zhou Jianmin, et al. Geochemistry and influence to environment of phosphorus in modern sediment in Dianchi Lake. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 416~420]
- 金相灿,王圣瑞,赵海超,等. 五里湖和贡湖不同粒径沉积物吸附磷实验研究. 环境科学研究, 2004, 17(增刊): 6~10 [Jin Xiangcan, Wang Shengrui, Zhao Haichao, et al. Study on the phosphate

- sorption of the different particle size fractions in the sediments from Wuli Lake and Gonghu Lake. *Research of Environmental Sciences* 2004, 17: 6~10]
- 12 王国平, 刘景双, 张玉霞. 向海湿地全硫与有效硫垂向分布. *水土保持通报*, 2003, 23(2): 5~8 [Wang Guoping, Liu Jingshuang, Zhang Yuxia. Vertical distribution of total sulfur and available sulfur in Xianghai Wetlands. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2003, 23(2): 5~8]
- 13 李凤彬, 代礼, 肖勇, 等. 洋河水库底泥对富营养化影响的研究. *水资源保护*, 2003, 3: 31~34 [Li Fengbin, Dai Li, Xiao Yong et al. Impact of bottom sludge on eutrophication of Yanghe Reservoir. *Water Resources Protection* 2003, 3: 31~34]
- 14 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式. *地质科学*, 1983, 4: 307~314 [Zhao Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the china seas. *Chinese Journal of Geology* 1983, 4: 307~314]
- 15 王玉, 张一平. 壤土不同粒级组分 K^+ 吸附研究. *土壤学报*, 2001, 38(2): 241~247 [Wang Yu, Zhang Yiping. Studies on K^+ adsorption of different fractions of Lou soil. *Acta Pedologica Sinica* 2001, 38(2): 241~247]

Distribution of Total Phosphorus in Sediments of Wuliangsu Hai Lake

SUN Huimin HE Jiang GAO Xingdong LV Changwei FAN Qingyun XUE Hongxi

(Department of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Hohhot 010021)

Abstract Based on analysis of total phosphorus horizontal and vertical characteristics of sediments in Wuliangsu Hai Lake are discussed. The results indicate that the content of total phosphorus in surface sediments ranges from 0.37 to 0.99 $g \cdot kg^{-1}$, with mean content of 0.75 $g \cdot kg^{-1}$. The horizontal distribution of TP had decreasing trend from bank to center and the content of TP in surface sediment of most the lake districts had certain ecological toxic effects. The vertical distribution of TP in the sediment core is various which indicate that effluents from human activity influence TP contents. The sequence of TP contents is silt > clay > very fine sand > fine sand > medium sand. TP enriched in the sediments with grains smaller than 63 micron in diameter. The adsorption contribution rates of TP are under the control of adsorbability and mass percentage. Sediment internal load would be a dominant factor controlling water quality when external load was reduced or cut off in Wuliangsu Hai Lake.

Key words the Wuliangsu Hai Lake eutrophication sediments phosphorus