

乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义

张晓晶, 李畅游, 张 生, 郝中保, 史小红

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要:采用现场采样及室内测试方法,对乌梁素海表层沉积物营养元素(TN、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP 和 TOC)的分布特征进行了分析,系统研究了沉积物碳-氮-磷两两之间的相互耦合关系及其环境意义,并对乌梁素海沉积物的有机污染状况进行了评价。结果表明,乌梁素海表层沉积物 TOC/TN 比平均值为 12.70,反映出有机质来源可能是湖泊水生生物和陆源输入,其中外源输入略占主导;TOC/TP 比值高于 TOC/TN,沉积物中的有机质主导着 TOC/TP 比值的变化趋势;TN/TP 比值的分布表现出与 TOC/TP 比值相似的变化特征。有机污染评价结果显示,全湖的有机指数均值为 0.42,处于尚清洁状态, $w(\text{ON})$ 的均值为 0.17%,属于有机氮污染状态。

关键词:乌梁素海;沉积物;营养元素;环境意义

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1770-07

Distribution Analysis of Nutrient Salt in the Sediment of Lake Wulangsuhai with Respect to Its Effects on the Environment

ZHANG Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, HAO Zhong-bao, SHI Xiao-hong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: In order to get better understanding to the nutrient salt environmental effects, the distribution and interaction of nutrient elements (TN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TP and TOC) were analyzed, which were sampled from the sediment of Lake Wulangsuhai. The results showed that the average ratio of TOC to TN concentration was 12.70, meaning the organic matter in the sediment could be mainly contributed by the aquatic biota within the lake and transported into the lake from the surroundings. The latter source might contribute a little bit more. The ratio of TOC to TP was greater than that of TOC to TN indicated that the organic matter with the sediment might control the ratio of TOC to TP. However, the ratio of TN to TP had the similar change pattern compared with the ratio of TOC to TP. The results of organic contamination assessment illustrated that the average organic index was 0.42 and $w(\text{ON})$ was 0.17%, meaning that the lake water was clean but contaminated by organic N.

Keywords: Wulangsuhai Lake; sediment; nutrient salt; environmental effects

湖泊沉积物是营养盐的重要蓄积库,同时也是湖泊水体营养盐的内负荷。氮是生物生长所必需的营养元素,进入水体中的氮只有转变成溶解状态氮的某些形式(有效氮),如氨氮、硝态氮等才能被生物吸收利用。其中,硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)是各种形态中最稳定的氮化合物,亦是含氮有机物经无机化作用最重要的分解产物;氨氮以游离氨(NH_3)或铵盐(NH_4^+)形式存在于

水体中,其含量和比例在一定程度上决定了水体生态效应和环境污染特征^[1-2]。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^[3]。有机质也是湖泊生态系统中极其重要的生态因子,显著地影响着生态系统的生产力。

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,湖区介于 $40^\circ36'\text{N}$ ~ $41^\circ03'\text{N}$ 和 $108^\circ43'\text{E}$ ~ $108^\circ57'\text{E}$,南北长约 35~40 km,东西宽约 5~10 km,湖面平均高程为 1 018.5 m,湖泊容量为 2.5 亿~3 亿 m^3 ,最大水深为 3 m,平均水深 1 $\text{m}^{[4]}$ 。它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

收稿日期:2010-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50669004,50969005,40901262);
内蒙古自然科学基金重点项目(200711020604);内蒙古自治区水利厅重点支持项目(20080105)

作者简介:张晓晶(1983—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,主要从事水污染控制与水环境保护方面研究。

E-mail: xiaojingzhang1983@yahoo.com.cn

通讯作者:李畅游 E-mail: nndlichangyou@163.com

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^[5]。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^[6-7],营养丰富的沉积物内负荷对水体富营养化的贡献不容忽视。

本文以我国寒旱区湖泊乌梁素海沉积物为研究对象,在常规分析营养元素分布特征的基础上,着重研究了沉积物中碳-氮-磷两两间的相互耦合关系及其生态环境地球化学效应,揭示湖泊的内外源负荷特点及富营养化发生机制,对评价湖泊水体生态系统潜在的富营养化风险和恢复自然生态环境及独特的生态调节功能有一定的价值和指导意义,同时也为乌梁素海湿地生态系统的恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究采用全球定位系统定位,于 2009 年 7 月 9 日利用自行研制的柱状取样器在 12 个(包括总排)点位(图 1)采集沉积物样品,装入洁净的密封袋中,排去袋中空气,避光密封低温保存,带回实验室分析。将样品在室温阴凉处自然风干后用玻璃棒压散,剔除砾石、贝壳及动植物残体等杂质,研磨后过 100 目筛。

1.2 样品分析方法

沉积物氨氮含量的测定采用蒸馏法;硝氮含量的测定采用紫外分光光度法;总氮含量采用 KDN 型定氮仪测定;总磷含量的测定采用硝酸(高氯酸)-硫酸消解法;有机质含量的测定用定量的重铬酸钾-硫酸溶液,在油浴加热条件下,使土样中的有机碳氧化,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁标准溶液滴定,根据氧化前后氧化剂质量差值,计算出有机碳量,再乘以系数 1.724,即为土样有机质含量^[8]。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物营养盐的分布特征

2.1.1 表层沉积物中全氮及形态氮的分布特征

本文对乌梁素海 11 个站位表层沉积物(0~5 cm)全氮及其形态氮分布情况进行了分析(图 2),结果表明,氮素在乌梁素海表层沉积物中的累积由于受沉积速率、矿化作用进程、沉积物的氧化还原环境及沉积粒度等因素影响^[9],不同湖区水平分布有所差异。

乌梁素海表层沉积物中全氮含量在 $0.73\sim 3.47\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 $1.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.53。

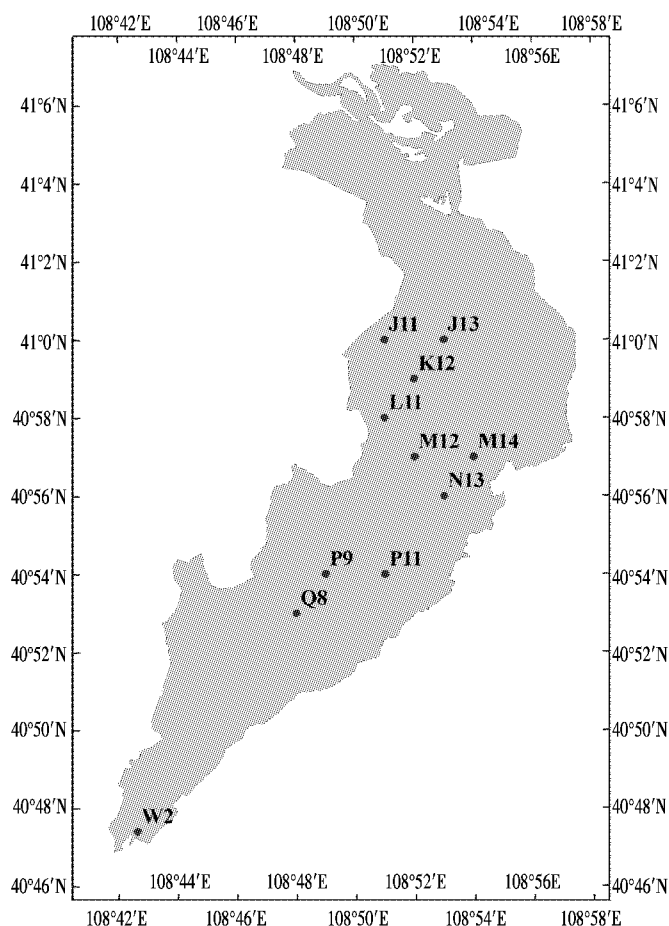


图 1 乌梁素海沉积物采样点分布

Figure 1 Locations of sampling sites in sediments of Wuliangsu Lake

表层沉积物中 TN 在水平分布上表现为沿古河道方向,随着纬度的增高,TN 含量有逐渐增加的趋势,总体上具有从东北到西南、由排干入口到出口方向含量递减的趋势。湖的西北与湖心区呈现一定范围 TN 含量的两个高值区,其中 M12、M14、N13 点 TN 含量在 $3.0\sim 3.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化,J13、K12、L11 点的 TN 在 $2.0\sim 2.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化;湖的入口处及西南部呈现一定范围 TN 含量的两个低值区,其 TN 含量在 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右变化。

乌梁素海表层沉积物中氨氮含量在 $2.78\sim 44.49\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 $20.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.75。氨氮水平分布明显呈现出从东北到西南、由排干入口到出口方向含量逐步递减的趋势,其中 L11、J13 点在 $40\sim 45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内出现两个高值。沉积物氧化还原状态对氨氮水平分布影响较大,一般沉积物氧化还原电位越高,沉积物具有较高的氧化能力,反而不利于铵态氮在沉积物中的累积与赋存。此区域处

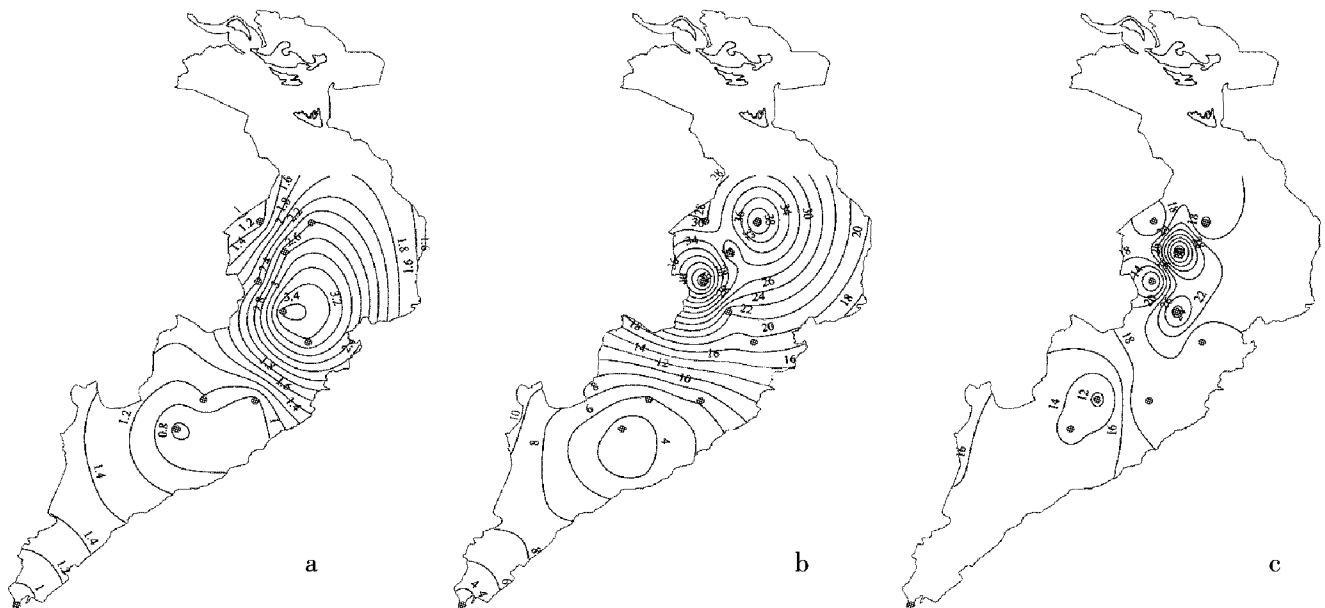


图2 乌梁素海表层沉积物 TN(a)、氨氮(b)、硝氮(c)水平分布图

Figure 2 The spatial distribution of total nitrogen(a), ammonia nitrogen(b) and nitrate nitrogen(c) in surface sediment of Wuliangsuhai Lake

于还原区,有利于铵态氮的积累,因此形成高值区。

硝氮的含量较低,在 $11.74 \sim 33.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 $18.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.37。湖的东北部和中部硝氮含量出现两个高值区,其中 K12 点达到 $33.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的极大值, M12 点的值为 $26.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这是由于该区域属于乌梁素海的深水区,受地表径流影响较小,沉积环境相对稳定,有利于硝态氮的累积与赋存;湖的西南部含量相对较低。

2.1.2 表层沉积物中总磷的分布特征

对乌梁素海表层沉积物的全磷水平分布(图3)研究表明,不同采样点表层沉积物中 TP 水平分布差异较大,总体呈现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。

乌梁素海表层沉积物中全磷含量在 $0.18 \sim 1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.68。TP 含量高值区分布在西北部总排干入口处(J11)、东部开阔水面区(M14)、东南湖区(P11),低值区分布在芦苇区(L11)及靠近芦苇区(J13)及西南部的开阔水面区(Q8)。西北部 TP 高值区的出现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。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,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,加之南侧挺水植物的围拦和阻碍,使明水区域处

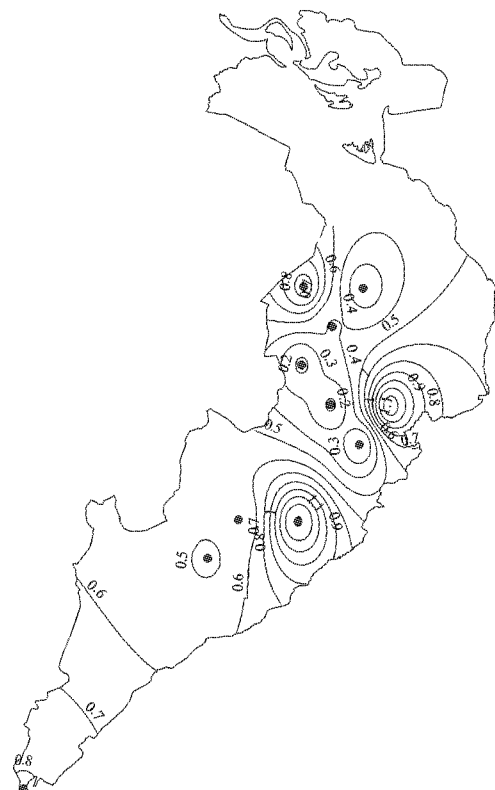


图3 乌梁素海表层沉积物 TP 水平分布图

Figure 3 The spatial distribution of total phosphorus in surface sediments of Wuliangsuhai Lake

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,致使东部开阔水面区表层沉积物中 TP 含量较高,并在全磷水平分布等值线图表现出一定范围的特高值区。TP 含量低值区的出现可能与该区域分布着大量水生植物(挺水、沉水植物)对上覆水体中 TP 的吸附净化作用有关,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。

2.1.3 表层沉积物中有机质的分布特征

有机质对氮、磷等营养元素在沉积物中的迁移、转化等地球化学行为起着至关重要的作用。沉积物中的有机质主要来源于水体中动植物残体、浮游生物及微生物等的沉积所产生的有机质及外界水源循环过程中携带进来的颗粒态和溶解态的有机质。相关研究表明,有机质矿化过程中大量耗氧,同时释放出碳、氮、磷等营养盐,可以造成严重的水质恶化、水体富营养化^[10]。

乌梁素海表层沉积物中有机质含量在 1.48%~6.24% 间变化,平均值为 3.85%,变幅较大,变异系数达 0.39。有机质含量最高值主要分布在芦苇密集区(L11),以该点为分界的西北端和东南端沿水流方向分别呈现明显递减的趋势,而位于西南端开阔水面区的 Q8、W2 点有机质的含量略有增加(图 4)。这主要与该区域分布着大量的水生植物,有机质供给量丰富,且水深较深有利于有机质在表层富集,加之湖周的有机质被携带入湖,致使有机质的含量较高。

2.2 沉积物碳-氮-磷耦合研究

2.2.1 碳-氮耦合及环境意义

C/N 比值在某种程度上可以反映出营养盐类型及主要物质来源,不同来源的有机质中 C/N 比值具有明显的差异,细菌等微生物的 C/N 比值在 2~4 之间,非维管植物 C/N 比值在 4~10 之间,含纤维束的维管陆生植物 C/N 比值大于 20,大多数高等植物具有较高的 C/N 比值,可高达 50 以上^[11-12]。所以 C/N 比值也常被用来表征有机质的潜在输入源,用于湖泊生态环境演化过程的研究。另有研究表明,根据沉积物有机质及其 C 和 N 的组成差别,可以区分内源和外源有机质的比例。一般认为, $w(C)/w(N)>10$ 时,沉积物有机质以外源为主; $w(C)/w(N)<10$ 时,以内源有机质为主, $w(C)/w(N)\approx 10$ 时,外源与内源有机质基本达到平衡状态^[13-14]。

乌梁素海表层沉积物 TOC/TN 比值在 7.83~20.45 之间变化(图 5),平均值为 12.70,反映有机质



图4 乌梁素海表层沉积物有机质水平分布图

Figure 4 The spatial distribution of organic matter in surface sediments of Wuliangsuhai Lake

来源可能是湖泊水生生物和陆源输入,其中外源输入略占主导。表层沉积物中 TOC/TN 比值在 Q8、W2 及 L11 点出现高值区。Q8 与 W2 点位于西南湖心区,有机质受人类活动及外源输入影响很小,但该区域湖底大量分布着以龙须眼子菜为优势种的沉水植物,且由于 TOC 含量高而 TN 含量低所致,使这一区域 TOC/TN 比值出现高值。L11 点位于芦苇密集区,有机质来源于芦苇等大型挺水植物和渠干附近陆源有机质的输入。这在一定程度上也说明了乌梁素海富营养化的内源性,以及采用机械工程措施收割芦苇和水草阻止富营养化进程的可行性。

乌梁素海表层沉积物中 TN 与 TOC 相关性研究表明,二者之间具有显著的正相关关系,建立的线性回归方程为 $TOC=1.49TN+0.735$, 相关系数为 0.852,这是由于碳、氮都是生物体的有机组成元素,在生物体内含量较恒定,且具有同源性,其来源均为有机物,同时由实测数据可知,氨氮和硝氮只占 TN 含量的 1%~4%,表明氮主要以有机氮的形式存在。

2.2.2 碳-磷耦合及环境意义

乌梁素海表层沉积物 TOC/TP 比值在 9.79~199.74 之间变化(图 6),平均值为 73.93,西南湖区(P9、P11、Q8、W2 点)及排干入口下游(J11 点)TOC/TP 比值较低,湖区中部(M12 点)、西北部(L11 点)芦苇区及 N13 点 TOC/TP 比值较高。生物死亡后,磷快速地分解释放,而碳的释放则较慢,因此表层沉积物中 TOC/TP 比值相对较高。

由于乌梁素海沉积物中 TN 含量高于 TP,TOC/TP 比值高于 TOC/TN,而且 TOC 的含量远高于 TP 的含量,故沉积物中的有机质主导着 TOC/TP 比值的变化趋势。沉积物中 TOC 与 TP 的线性关系不够好,相关系数低,这主要因为磷在沉积物中的存在形态比较复杂,且主要以无机磷的形态存在。

2.2.3 氮、磷比值研究

沉积物中 N、P 含量及比值通常为水中 N、P 聚积、沉积及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映^[15]。N/P 从某种程度上反映了湖泊的富营养状态。

乌梁素海表层沉积物 TN/TP 比值在 0.75~18.48 之间变化(图 7),平均值为 6.55,它的水平分布表现

出与 TOC/TP 比值相似的变化特征,也即西南湖区及排干入口下游 TN/TP 比值较低,湖区中部、西北部芦苇区及 N13 点 TN/TP 比值较高。J11 点磷的含量较高,而氮的含量相对较低,且两者含量较接近;西南湖区 4 个采样点氮磷含量都较低,且相差较小,故 TN/TP 比值低,表明西南湖区的富营养化程度较低。

2.3 沉积物有机污染状况

有机指数通常被用作水域沉积物环境状况的指标:有机指数= $w(\text{OC}) \times w(\text{ON})$ 。其中, $w(\text{OC})$ 为有机碳质量分数,%; $w(\text{ON})$ 为有机氮质量分数,%, $w(\text{ON})=0.95w(\text{TN})$ 。 $w(\text{ON})$ 也是衡量湖泊表层沉积物是否遭受氮污染的重要指标。参照国内相关标准^[16],结合实际情况制定的评价标准见表 1。采用有机指数法对乌梁素海表层沉积物有机污染状况进行评价,如表 2 所示。

根据表 2 对乌梁素海表层沉积物各采样点的有机污染状况进行分析,结果表明:整体上看,全湖的有机指数均值为 0.42,处于尚清洁状态, $w(\text{ON})$ 的均值为 0.17%,属于有机氮污染状态。针对各采样点而言,

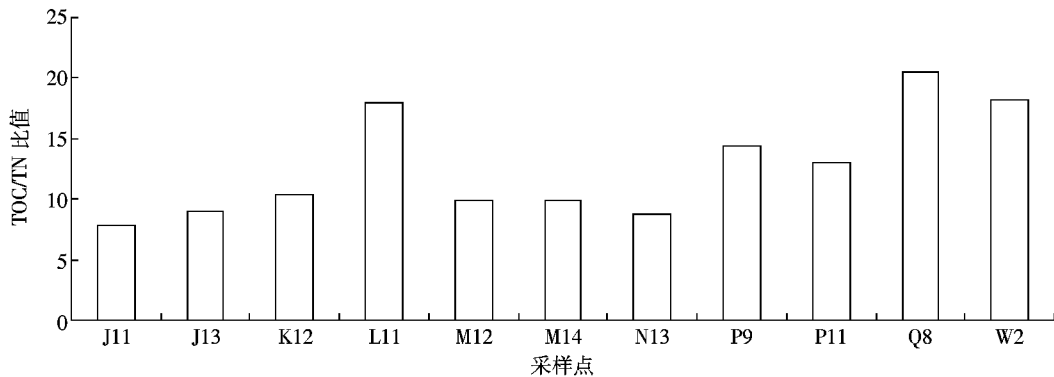


图 5 乌梁素海表层沉积物中碳氮比值

Figure 5 The TOC/TN in surface sediments of Wuliangsuhai Lake

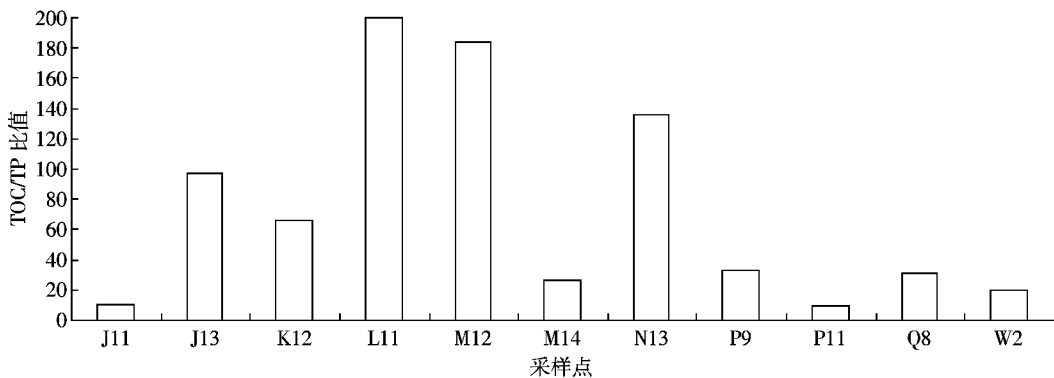


图 6 乌梁素海表层沉积物中碳磷比值

Figure 6 The TOC/TP in surface sediments of Wuliangsuhai Lake

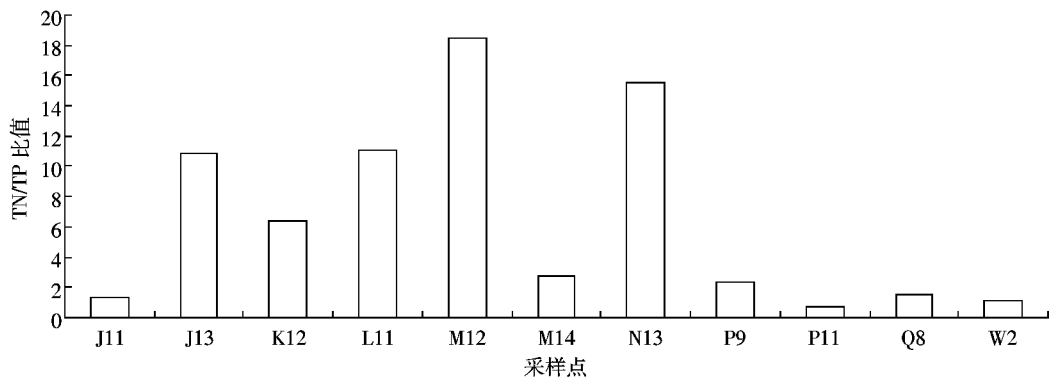


图 7 乌梁素海表层沉积物中氮磷比值
Figure 7 The N/P in surface sediments of Wuliangsuhai Lake

表 1 水体沉积物有机指数评价标准				
Table 1 Evaluation criterion of organic index in sediments				
等级	I	II	III	IV
有机指数类型	<0.05 清洁	0.05~0.20 较清洁	0.20~0.50 尚清洁	≥0.50 有机污染
w(ON)/%类型	<0.033 清洁	0.033~0.066 较清洁	0.066~0.133 尚清洁	≥0.133 有机氮污染

表 2 乌梁素海沉积物有机污染评价				
Table 2 The organic contamination appraise in the sediments of Wuliangsuhai Lake				
采样点	有机氮/%	有机氮污染级别	有机指数	有机污染级别
J11	0.09	III	0.09	II
J13	0.18	IV	0.36	III
K12	0.24	IV	0.63	IV
L11	0.19	IV	0.63	IV
M12	0.29	IV	0.92	IV
M14	0.25	IV	0.68	IV
N13	0.29	IV	0.88	IV
P9	0.11	III	0.16	III
P11	0.07	III	0.08	II
Q8	0.07	III	0.10	II
W2	0.08	III	0.10	II

以古河道为界湖的东北部(除 J11、J13 点外)有机指数均大于 0.50,属标准Ⅳ等,为有机污染状态;东北湖区(除 J11 点外) $w(\text{ON})$ 均大于 0.133%,也属标准Ⅳ等,为有机氮污染状态。而湖的西南部(P9、P11、Q8 及 W2 点)有机指数均较低,处于较清洁或尚清洁状态, $w(\text{ON})$ 均属标准Ⅲ等,为尚清洁状态。

3 结论

乌梁素海表层沉积物中全氮与形态氮的水平分

布特征具有相似性,均表现出从东北到西南、由排干入口到出口方向逐步递减的趋势。这与近年来人类工农业生产活动的加强,人类向湖泊水体中输入的氮量明显增加有关,致使乌梁素海的氮负荷逐年增大。TP 水平分布差异较大,总体呈现从湖区四周向湖心递减的变化趋势。有机质含量最高值主要分布在芦苇密集区,以该点为界,湖的西北端和东南端沿水流方向分别呈现明显递减的趋势。

对乌梁素海表层沉积物碳-氮-磷两两间的相互耦合关系及其环境意义的研究显示,沉积物 TOC/TN 比平均值为 12.70,反映出有机质来源可能是湖泊水生生物和陆源输入,其中外源输入略占主导。TN 与 TOC 相关性研究结果表明,二者之间具有显著的正相关关系,相关系数为 0.852,建立的线性回归方程为: $\text{TOC}=1.49\text{TN}+0.735$ 。TOC/TP 比值高于 TOC/TN,而且 TOC 的含量远高于 TP 的含量,故沉积物中的有机质主导着 TOC/TP 比值的变化趋势。沉积物中 TOC 与 TP 的线性关系不够好,相关系数低,这主要因为磷在沉积物中的存在形态比较复杂,且主要以无机磷的形态存在。TN/TP 比值的分布表现出与 TOC/TP 比值相似的变化特征。

乌梁素海表层沉积物有机污染评价结果表明,全湖的有机指数均值为 0.42,处于尚清洁状态, $w(\text{ON})$ 的均值为 0.17%,属于有机氮污染状态。对各采样点而言,以古河道为界湖的东北部(除 J11、J13 点外)有机指数均大于 0.50,属于有机污染状态;东北湖区(除 J11 点外) $w(\text{ON})$ 均大于 0.133%,也属于有机氮污染状态。而湖的西南部(P9、P11、Q8 及 W2 点)有机指数均较低,处于较清洁或尚清洁状态, $w(\text{ON})$ 均属尚清洁状态。

参考文献:

- [1] 吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 湖泊沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用和环境效应 I. 界面氮循环及其环境效应[J]. 矿物学报, 1996, 16(4):403-409.
WU Feng-chang, WAN Guo-jiang, HUANG Rong-gui. Biogeochemical processes of nutrition elements at the sediment-water interface of lakes I. Nitrogen cycling and its environmental impacts[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1996, 16(4):403-409.
- [2] 范成新, 张路, 秦伯强. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化: I. 铵态氮释放速率的空间差异及源-汇通量[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1):11-20.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, QIN Bo-qiang. Migration mechanism of biogenic elements and their quantification on the sediment-water interface of Lake Taihu: I. Spatial variation of the ammonium release rates and its source and sink fluxes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(1):11-20.
- [3] 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[J]. 矿物学报, 2000, 20(3):273-278.
WANG Yu-chun, WAN Guo-jiang, WANG Shi-lu, et al. Forms of phosphorus in sediments of Lake Baihua and Lake Hongfeng, Guizhou[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(3):273-278.
- [4] 武国正, 李畅游, 周龙伟, 等. 乌梁素海浮游动物与底栖动物调查及水质评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(3):76-81.
WU Guo-zheng, LI Chang-you, ZHOU Long-wei, et al. Zooplankton and zoobenthos investigation in Lake Wuliangsu and the estimation of nutrition status[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(3):76-81.
- [5] 孙惠民, 何江, 高兴东, 等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(4):579-584.
SUN Hui-min, HE Jiang, GAO Xing-dong, et al. Distribution of total phosphorus in Sediments of Wuliangsu Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4):579-584.
- [6] 李畅游, 刘廷玺, 高瑞忠, 等. 乌梁素海富营养化主控因子年际变化分析及综合评价[J]. 水文, 2004, 24(3):14-17.
LI Chang-you, LIU Ting-xi, GAO Rui-zhong, et al. Study and synthetic assessment for the season-year change of the eutrophication main-control factors in Wuliangsu Lake[J]. *Hydrology*, 2004, 24(3):14-17.
- [7] 尚士友, 杜建民, 李旭英, 等. 乌梁素海富营养化及其防治研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4):7-12.
SHANG Shi-you, DU Jian-min, LI Xu-ying, et al. The study on the management of eutrophication in Wuliangsu Lake[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2003, 24(4):7-12.
- [8] 金相灿, 屠清瑛, 等. 湖泊富营养化调查规范[M]. 第二版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990:219-230.
JIN Xiang-can, TU Qing-ying, et al. Lake eutrophication investigation standard[M]. The second edition. Beijing: China Environmental Science Press, 1990:219-230.
- [9] 马红波. 渤海沉积物中氮的赋存形态及其在循环中的作用[D]. 北京: 中国科学院海洋生物研究所, 2001.
MA Hong-bo. Nitrogen forms and their functions in biogeochemical cycling in Bohai Sea sediments[D]. Beijing: Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 2001.
- [10] 高兴东. 岱海湖泊营养盐的环境地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2006.
GAO Xing-dong. Environmental geochemical characteristics of nutrient in Daihai Lake[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2006.
- [11] Meyers P. A preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 114(3-4):289-302.
- [12] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录[J]. 地球化学, 2000, 29(2):189-197.
WAN Guo-jiang, BAI Zhan-guo, WANG Hao-ran, et al. The geochemical records of C-N-S-P in recent sediments of Lake Erhai, China[J]. *Geochimica*, 2000, 29(2):189-197.
- [13] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3):342-345.
FENG Feng, WANG Hui, FANG Tao, et al. The correlation between microbial biomass and carbon, nitrogen, phosphorus in the sediments of Donghu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3):342-345.
- [14] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India[J]. *Nat*, 1986, 323(11):150-152.
- [15] 杨丽原, 王晓军, 刘恩峰. 南四湖表层沉积物营养元素分布特征[J]. 海洋湖沼通报, 2007(2):40-44.
YANG Li-yuan, WANG Xiao-jun, LIU En-feng. Characteristics of nutrient distribution in surface sediments of Nansihu Lake[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2):40-44.
- [16] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993:224-228.
SUN Shun-cai, HUANG Yi-ping. Taihu[M]. Beijing: Ocean Press, 1993:224-228.