

青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析

陈学民¹, 朱阳春¹, 伏小勇¹, 罗永清²

(1.兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:以青海湖 11 个样点的表层沉积物为研究对象,测定分析其营养元素总磷(total phosphorus, TP)、总氮(total nitrogen, TN)、溶解性磷酸盐(no-apatite inorganic phosphorus, NAIP)和总有机碳(total organic carbon, TOC)含量,并对其分布特征及相关性进行分析。结果表明:TP 含量在 $0.36\sim 0.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 15.42%;TN 平均含量为 $1.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数 43.02%;TOC 含量为 $18.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数 46.61%;TN、TP、TOC 含量间呈极显著($P<0.01$)的直线线性关系,NAIP 与 TN、TP 和 TOC 含量间呈显著($P<0.05$)的 S 型曲线线性关系。分析表明,水深度、扰动程度等内源因素可影响青海湖表层沉积物中 TN、TP 及 TOC 含量,河流补给、旅游活动等外源输入及自然扩散对溶解性磷酸盐分布有一定的影响。

关键词:青海湖;富营养化;表层沉积物;分布特征

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)02-0395-07

Investigation of Eutrophic Elements Distribution and Their Correlation in Qinghai Lake Surface Sediments

CHEN Xue-min¹, ZHU Yang-chun¹, FU Xiao-yong¹, LUO Yong-qing²

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the analysis of sediment samples taken from 11 spots at the surface sedimentary layer of Qinghai Lake, the contents of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), no-apatite inorganic phosphorus (NAIP) and total organic carbon (TOC) were detected while the eutrophic component distribution and relevant correlation were investigated. The result indicated that TP contents were ranged from 0.36 to $0.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ with the mean value of $0.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the coefficient of variation 15.42% when the average content of TN was $1.74\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ with the variation coefficient 43.02%, but $18.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ for TOC content with an variation coefficient 46.61%. The significant linear relationships ($P<0.01$) among TN, TP and TOC were determined, respectively. It was found that the S-shaped curve relationships between NAIP and TN, TP and TOC were apparently formed at the level of 0.05. The study showed that the effects of depth of overlying water and disturbance extent were the key factors to impact the contents of TP, TN and TOC in Qinghai Lake. Additionally, the effects of outer source inputs resulted by river recharges, tourist activities and dismission also had a certain influence on distribution of NAIP in Qinghai Lake.

Keywords: Qinghai Lake; eutrophication; surface sediments; distribution characteristics

富营养化是氮、磷等营养元素过量造成的一种水体生态效应^[1-2]。氮、磷等植物性营养元素进入水体以后,引起藻类和其他类型水生植物的大量繁殖,水体透明度和溶解氧下降,水质恶化,其他水生生物死亡,

水生态系统和水功能受阻碍和破坏^[3]。水体富营养化会导致河流、湖泊功能丧失、生物多样性锐减、生态系统结构变化等多种后果,严重制约了人类对湖泊资源的利用^[4]。造成水体富营养化的主要因素有外源污染和内源污染两种形式,其中外源污染是指由农业非点源污染和城镇化建设^[5]及工矿农业生产^[6]等人为活动将营养元素转移至水体。内源污染是指蓄积在底泥中的营养物质,通过一系列物理、化学、生化等作用,其中一部分沉积到水体底部,在适当条件下,底泥中的污

收稿日期:2011-07-06

基金项目:国家科技重大专项专题(2009ZX07106-001-001)

作者简介:陈学民(1960—),女,甘肃兰州人,教授,主要从事水污染控制工程、废水处理与资源化理论与技术研究。

E-mail: xueminch@sina.com

染物可能会释放出来造成的水体营养元素的增加^[7-9]。

湖泊是人类赖以生存和发展的重要物质基础,加强对湖泊水质的管理与保护,是当前水资源管理的主要任务之一。近年来,我国趋于富营养化的湖泊已达90%,20世纪90年代,滇池、太湖等湖泊营养物质剧增,暴发了严重的蓝藻,导致大量鱼类和水草被吞噬,造成饮用水危机^[10]。我国130余个湖泊的调查资料显示营养化问题严重,高营养化湖泊占调查总数的43.5%,中营养化湖泊占调查总数的45%,以藻型富营养化为主的湖泊主要分布在我国东南部经济发达地区,超营养化湖泊主要分布在城市和城郊附近^[11]。

青海湖是我国最大的高原咸水湖,本研究通过分析青海湖表层沉积物营养元素,对营养元素来源进行分析与评价,并对营养元素影响因子进行探讨,旨在为避免青海湖富营养化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青海省东北部,地处 $36^{\circ}15' \sim 38^{\circ}20'N$, $97^{\circ}50' \sim 101^{\circ}20'E$,海拔3 194~5 174 m,南傍青海南山,北依大通山,东靠日月山,西临阿木尼尼库山,属封闭式内陆盆地。流域总面积29 661 km²^[12],占青海省国土面积的4.1%。流域气候属内陆高原半干旱气候,夏季以东南风为主,冬季以西北风为主,年均气温-1.0~1.0℃,年降水量326.8~500 mm,年蒸发量1 300~2 000 mm^[13]。

青海湖处于青海湖流域的东南最低处,位于青藏高原东北部($36^{\circ}32' \sim 37^{\circ}15'N$, $99^{\circ}36' \sim 100^{\circ}16'E$),是我国最大的内陆高原咸水湖。青海湖东西最长106 km,南北最宽63 km,1982年湖面海拔3 193.92 m,年均气温1.2℃,多年平均降雨量336.6 mm,属于高寒半干旱气候^[14]。湖泊面积4 400 km²,湖水容积 7.39×10^{10} m³,平均水深21.7 m,多年平均入湖总量为 3.70×10^9 m³,年耗水量为 4.05×10^9 m³^[15]。青海湖入湖大小径流约有50条,呈明显的不对称分布,主要包括布哈河、沙流河、哈尔盖河和乌哈乌兰河,均集中在湖北部。布哈河为其最大入湖径流,年径流量 7.85×10^8 m³,约占入湖径流总量的60%^[16]。

1.2 样点分布原则

依据相关要求,在湖(库)的不同水域,如进水区、出水区、深水区、湖心区、岸边区,按照水体类别和功能设置采样点^[17]。

通过分析发现,青海湖虽然湖面面积达4 400

km²,但在湖内的不同区域水质差异性较小,没有出湖河流。基于以上分析,本研究拟采用以下布点方案:

青海湖属于内陆湖泊,补给部分主要为入湖径流,损耗部分几乎全部被蒸发。所以在入湖河流入湖口500~1 000 m范围内设采样点。青海湖入湖河流主要为布哈河、沙柳河、泉吉河、哈尔盖河、甘子河、黑马河6条河流,且哈尔盖河、甘子河目前已成为季节性河流。因此进水区的监测在布哈河(5#)、沙柳河(9#)、泉吉河(10#)、黑马河(11#)入湖口500~1 000 m范围内各设1个采样点。

另外,按照深水区(湖心区)、浅水区、岸边区等不同区域分别布设的原则,拟在湖心区设置2个采样点(3#)湖中心Ⅰ和(7#)湖中心Ⅱ,151码头(1#)、江西沟码头(4#)、鸟岛(6#)、青海湖农场(8#)、沙岛(2#)各设置1个采样点。

具体样点分布见图1。

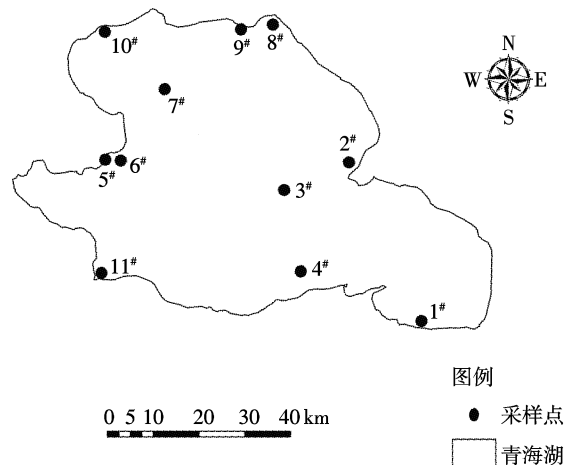


图1 青海湖及采样点位置

Figure 1 Location of Qinghai Lake and sampling sites

1.3 样品采集与处理分析

利用抓斗采泥器采集表层沉积物。从每个采样点分别采集3件样品,分别在不锈钢盆中充分搅匀,取1 kg左右装入密实塑料袋,放入装有冰袋的保温箱(IGLOO)暂存,上岸后立即装入冷冻柜中冷冻保存。

样品运回实验室后,取沉积物1 kg左右,用铝箔包住,放入FD-1冷冻干燥机中干燥3~5 d。取出后碾磨、过筛(100目),保存于聚乙烯瓶中,用密实袋封装,置于冷藏柜中待测^[18]。

取处理完成的沉积物样品,分别测定TP、TN、NAIP及TOC含量。其中TP采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定^[19];TN采用半微量凯氏定氮法测定^[19];NAIP采用欧盟SMT法测定^[20];TOC用重铬酸钾氧化-

外加热法测定^[19]。

1.4 数据分析

数据的统计分析用 Excel 2003 和 SPSS(v17.0 专业版)软件进行。用单因素方差分析(ANOVA)对不同区域及不同层次之间的差异性进行显著性分析,利用最小显著性差异(LSD)多重比较方法,在 95%的可靠性下对不同样点间差异性进行比较分析。使用 SPSS 17.0 进行回归分析与线性拟合。

2 结果与分析

2.1 青海湖表层沉积物营养元素含量分析

研究区 11 个样点 TP 含量在 0.36~0.71 g·kg⁻¹ 之间,平均为 0.59 g·kg⁻¹。青海湖表层沉积物 TP 含量具有一定程度的变异,变异系数为 15.42%,不同样点具有显著差异性($F=66.28, P<0.001$)。其中在 1[#]、3[#]、4[#]、6[#]、7[#] 和 8[#] 样点含量较高,显著高于其他样点,TP 含量在 0.62~0.67 g·kg⁻¹ 之间;其次为 5[#]、9[#] 和 11[#] 样点,含量在 0.55~0.57 g·kg⁻¹ 之间,显著高于泉吉河和沙岛;沙岛表层沉积物 TP 含量最低,仅为平均含量的 61.37%,且与其他 10 个样点均具有显著差异性(表 1)。

NAIP 在青海湖表层沉积物中的平均含量为 1.62 mg·kg⁻¹,最小值和最大值分别为 0.05 mg·kg⁻¹ 和 4.37 mg·kg⁻¹。同 TP 相比较,NAIP 具有更大的变异范围,变异系数高达 71.60%。不同样点间同样存在显著差异性($F=539.39, P<0.001$)。其中 5[#] 和 6[#] 样点含量较高,分别为 4.28 mg·kg⁻¹ 和 2.99 mg·kg⁻¹;1[#]、3[#]、4[#]、7[#]、8[#] 和 10[#] 样点次之,NAIP 含量在 1~2 mg·kg⁻¹ 之间;2[#]、9[#] 和 11[#] 样点较低,含量在 1 mg·kg⁻¹ 以下。各样点多重比较结果见表 1。

青海湖表层沉积物中 TN 平均含量为 1.74 g·kg⁻¹,与 TP 相比,总氮含量具有更大的变异,最大含量(2.55 g·kg⁻¹)约为最小含量(0.25 g·kg⁻¹)的 10 倍,变异系数高达 43.02%。从不同样点来看,TN 含量具有“7[#]>4[#]>1[#]>3[#]>6[#]>8[#]>9[#]>10[#]>5[#]>11[#]>2[#]” 的特征,不同样点 TN 具有显著差异性($F=6\ 335.41, P<0.001$),多重比较结果见表 1。

青海湖表层沉积物 TOC 含量为 18.60 g·kg⁻¹,与 TN 类似,具有更大的变异,变异系数高达 46.61%,极差大小为 28.68 g·kg⁻¹。各样点间具有显著差异性($F=1\ 900.45, P<0.001$)。其中 3[#]、4[#] 和 7[#] 样点 TOC 含量较大,均在 27 g·kg⁻¹ 以上;其次为 1[#] 和 6[#] 样点,TOC 含量分别为 26.04 g·kg⁻¹ 和 26.03 g·kg⁻¹;其余样点含量较小,均在 20 g·kg⁻¹ 以下;与其他 3 类元素相同,2[#] 样点的 TOC 含量最低,仅为 1.10 g·kg⁻¹,且显著低于其他样点。各样点 TOC 差异性比较见表 1。

2.2 青海湖表层沉积物营养元素相关性分析

2.2.1 Pearson 相关性分析

从分析结果来看(表 2),青海湖表层沉积物各种

表 2 青海湖表层沉积物富营养化元素 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson correlation index of eutrophic elements in Qinghai

Lake's surface sediments				
项目	总磷 TP	总氮 TN	溶解性磷 NAIP	总有机质 TOC
总磷 TP	1			
总氮 TN	0.90**	1		
溶解性磷 NAIP	0.41*	0.38*	1	
总有机碳 TOC	0.89**	0.99**	0.38*	1

注:Pearson 相关分析采用双尾检验;* 表示在 0.05 水平上具有显著相关性,** 表示在 0.01 水平上具有显著相关性。

表 1 青海湖底泥元素含量
Table 1 Contents of eutrophic elements in Qinghai Lake's surface sediments

样点	总磷 TP/g·kg ⁻¹	总氮 TN/g·kg ⁻¹	溶解性磷酸盐 NAIP/mg·kg ⁻¹	总有机碳 TOC/g·kg ⁻¹
151 码头(1 [#])	0.66±0.003A	2.47±0.008B	1.98±0.059C	26.04±0.342B
沙岛(2 [#])	0.36±0.004D	0.27±0.016I	0.08±0.043I	1.10±0.194G
湖中心 I (3 [#])	0.62±0.052A	2.45±0.000B	1.26±0.059E	27.39±0.288A
江西沟码头(4 [#])	0.64±0.004A	2.48±0.032B	1.88±0.164C	27.07±0.355A
布哈河(5 [#])	0.57±0.012B	1.45±0.008G	4.28±0.162A	14.72±0.686D
鸟岛(6 [#])	0.67±0.021A	2.28±0.017C	2.99±0.039B	26.03±0.190B
湖中心 II (7 [#])	0.63±0.010A	2.54±0.008A	1.61±0.049D	27.02±0.028A
青海湖农场(8 [#])	0.66±0.003A	1.73±0.032D	1.00±0.073F	17.73±0.514C
沙柳河(9 [#])	0.56±0.002B	1.56±0.016E	0.65±0.073G	17.30±0.337C
泉吉河(10 [#])	0.51±0.027C	1.01±0.008F	1.67±0.051D	11.39±0.201E
黑马河(11 [#])	0.55±0.004B	0.93±0.008H	0.47±0.058H	8.86±0.319F

注:同列数据中相同字母表示在 0.01 水平下不具有显著差异性。

元素间存在显著的正相关关系,其中TN与TP和TOC、TP与TOC间均在0.01水平上呈显著正相关性($P<0.01$),而NAIP与TN、TP和TOC间的正相关显著性水平为 $0.01<P<0.05$ 。

2.2.2 青海湖表层沉积物富营养化元素线性拟合

分析显示,青海湖表层沉积物富营养化元素间存在不同特征的线性关系(图2)。TN与TP呈极显著的linear直线线性关系,其动力学方程为:

$$Y_{TN} = -2\,611.12 + 7.42X_{TP} \quad R^2 = 0.80$$

类似的极显著直线线性关系同样存在于TOC与TN和TP间,此三者间的动力学方程分别为:

$$Y_{TP} = 413.65 + 9.30X_{TOC} \quad R^2 = 0.79$$

$$Y_{TN} = 142.53 + 86.04X_{TOC} \quad R^2 = 0.99$$

由此说明,在青海湖表层沉积物中,TN、TP及TOC具有相同的分布特征或相同的影响因素。

青海湖表层沉积物中NAIP与TN、TP和TOC的线性关系则较为特殊,非简单的linear直线线性关系,而是“S”型曲线线性关系,动力学方程分别为:

$$Y_{NAIP} = e^{4.29 - 2.37238/X_{TP}} \quad R^2 = 0.63$$

$$Y_{NAIP} = e^{0.641 + 0.001/X_{TN}} \quad R^2 = 0.70$$

$$Y_{NAIP} = e^{0.590 - 3.450/X_{TOC}} \quad R^2 = 0.70$$

3 讨论

3.1 青海湖表层沉积物营养元素分布特征

从本次研究来看,不同营养元素在青海湖不同样点具有不同的分布特征。根据相关性分析及线性拟合

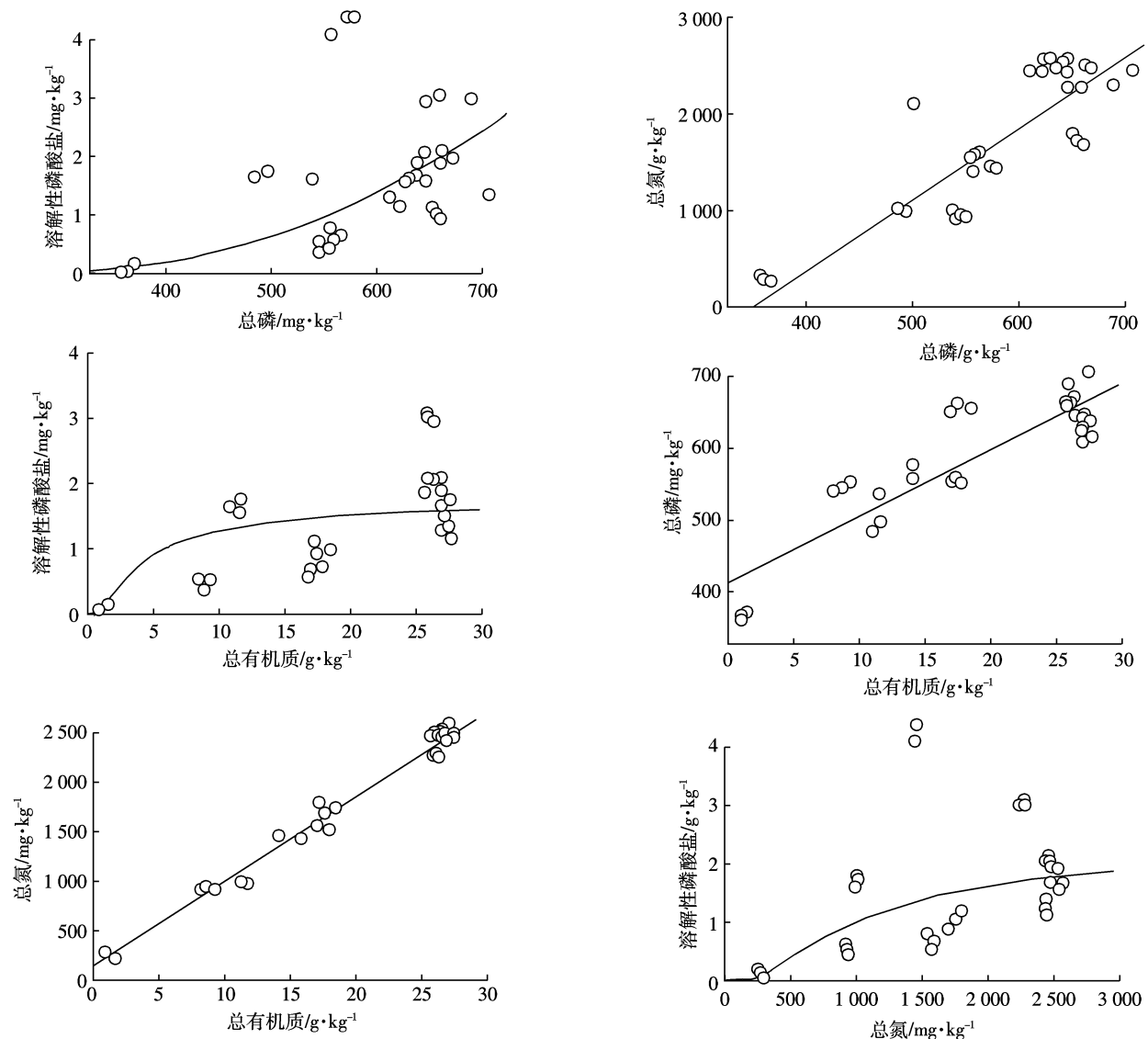


图2 青海湖表层沉积物富营养化元素线性关系

Figure 2 Linear correlation ships of eutrophic elements in Qinghai Lake's surface sediments

结果, TN、TP 及 TOC 3 类富营养化元素在青海湖表层沉积物中的分布具有相同的特征或相同的影响因素, 所以在此将该 3 类元素一起分析。为了评价这 3 类元素在本次研究所选取的 11 个样点间的分布特征, 采用“算术均数”进行统计描述^[2], 以评定这 3 类元素在不同样点总含量的高低水平, 算术均数的计算公式为:

$$\text{算术均数} = \frac{m_{\text{总磷}}/M_{\text{总磷}} + m_{\text{总氮}}/M_{\text{总氮}} + m_{\text{总有机质}}/M_{\text{总有机质}}}{3}$$

式中: m 为各元素的测定值, M 为各元素的平均值。

各样点富营养化元素算术均数见表 3。

从算术均数来看, 湖中心的两个样点(3# 和 7#)最高, 算术均数高达 1.33; 其次为 151 码头(1# 样点)和江西沟码头(4# 样点), 算术均数也达到了 1.32 的水平; 鸟岛(6# 样点)和青海湖农场(8# 样点)的算术均数虽较上述 4 个样点低, 但仍在 1.0 以上, 说明该 3 类元素的平均含量略高于整体平均值; 4 条河流(9# 沙柳河、5# 布哈河、10# 泉吉河与 11# 黑马河)入湖口的富营养化元素富集状况类似, 算术均数分列 5、6、7、8 位。

秦伯强等^[22]通过对太湖的研究表明, 自然风速达到一定强度, 表层沉积物会大幅度发生悬浮, TN 和 TP 含量下降。据此推断, 青海湖表层沉积物中富营养化元素含量及分布可能受人为和自然物理扰动因素影响。湖中心较深的覆水及相对较少的人为干扰等因素可能对各元素的积累有一定作用, 而码头、河流入湖口等强烈的物理扰动可能会在一定程度上造成各类营养元素含量的降低。

此外, 外源输入是造成水体营养元素增加的重要因素^[5-6]。通过本次研究调查表明, 青海湖周边其他区域无大规模的工农业生产活动, 仅在 8# 样点由于接

近青海湖农场, 农场的化肥使用可能在一定程度上造成该点附近水体及沉积物中营养元素的增加。

表层沉积物营养元素与覆水深度的对比表明, 覆水深度越大, 表层沉积物中的营养元素含量越高。覆水深度与营养元素含量的关系可能主要为扰动因素和太阳辐射。王鹏的研究表明^[23], 太阳辐射可引起水温升高, 沉积物的生化反应加剧, 营养元素的释放也随之加快。覆水深度较小时, 表层沉积物富营养化元素向水体释放加快是造成浅层富水区沉积物中营养元素 TN、TP 及 TOC 含量较低的另一原因。

本次研究表明, 青海湖 NAIP 可能来源于 2 种类型(河流与码头)3 个区域输入。第一个区域是以布哈河为源的 5# 和 6# 样点, 其中 5# 样点的 NAIP 含量高达 $4.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与其接近的 6# 样点为 $2.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可能是由于布哈河的输入与自然扩散两种原因; 第 2 个输入源可能是泉吉河, 其 NAIP 含量为 $1.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 布哈河与泉吉河的输入及自然扩散作用可能是距此较近的 7# 样点 NAIP 含量较高的原因; 第 3 个输入源为 151 码头和江西沟码头, 其 NAIP 含量分别为 $1.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从 NAIP 的分布来看, 外源输入可能是导致青海湖表层沉积物 NAIP 增加的原因。

3.2 青海湖表层沉积物富营养化元素含量讨论

为了评价青海湖表层沉积物中富营养化元素水平高低, 结合本次测定数据, 与现有的关于我国湖泊富营养化的部分研究结果进行对比。表 4 为我国部分湖泊的富营养化程度与相应沉积物中 TN 和 TP 的含量。

通过对比发现, 青海湖沉积物中 TP 含量除略高于白洋淀沉积物外均低于其他湖泊沉积物(表 4), TN 平均含量与白洋淀沉积物水平相近, 高于太湖和玄武湖, 最大含量($2.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)高于大明湖、玄武湖、太湖等, 已有研究表明此 3 个湖泊均有不同程度的富营养

表 3 青海湖表层沉积物富营养化元素算术均数

Table 3 Arithmetic mean index of surface sediments in Qinghai Lake

样点	算术均数	排名	覆水深度/m
151 码头(1#)	1.32	2	22.0
沙岛(2#)	0.28	9	4.5
湖中心(3#)	1.33	1	25.0
江西沟码头(4#)	1.32	2	25.0
布哈河(5#)	0.86	6	11.9
鸟岛(6#)	1.28	3	9.2
湖中心(7#)	1.33	1	24.5
青海湖农场(8#)	1.02	4	15.0
沙柳河(9#)	0.93	5	10.0
泉吉河(10#)	0.68	7	5.0
黑马河(11#)	0.65	8	8.6

表 4 中国部分湖泊富营养化状况及沉积物总氮与总磷含量

Table 4 Eutrophication condition and total phosphorus and total nitrogen contents of sediments in some lakes of China

湖泊名称	富营养化程度	总氮含量 TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	总磷含量 TP/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
乌梁素海	草型富营养化	0.26~3.10 ^[24]	0.18~1.21 ^[25]
大明湖	轻度富营养化	2.15~2.35 ^[26]	1.80~2.18 ^[27]
玄武湖	重度富营养化	0.43~1.18 ^[28]	0.79~0.89 ^[27]
东湖	严重富营养化	1.62~3.17 ^[29]	0.23~3.36 ^[29]
东湖	严重富营养化	2~5 ^[30]	0.50~1.50 ^[30]
太湖	严重富营养化	0.72~1.01 ^[31]	0.29~0.96 ^[32]
白洋淀	富营养化	1.86~2.77 ^[33]	0.54~0.61 ^[34]

化现象。岱海为内蒙中部典型的内陆封闭湖泊,与青海湖相似均为咸水湖泊。吕昌伟等^[35]通过对岱海表层沉积物的研究发现,其TN含量在 $0.76\sim 2.84\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 $1.64\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,对底栖生物已造成一定的生态毒性,且随岱海富营养化的加剧,这种毒性从低级趋向严重级。本次研究表明,青海湖TN为 $0.27\sim 2.54\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 $1.74\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,与岱海水平接近,以国外相关标准^[36]规定的TN和TP最低限额分别为 $0.55\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.60\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 评价显示,具有不同程度的生态毒性效应。由此说明,从沉积物水平来看,青海湖存在发生富营养化、并对整个水环境造成生态毒性危害的潜在可能。

4 结论

青海湖表层沉积物中TP、TN及TOC含量分别为 0.59 、 $1.74\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $19.60\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,不同样点间具有显著差异性,在青海湖的分布特征基本一致,不同类型样点间的大小顺序为“湖中心>码头>鸟岛>农场>河流入湖口”,且具有极显著的直线线性关系。分析表明,不同样点TN、TP及TOC含量与覆水深度及扰动程度有一定关系;NAIP在青海湖表层沉积物的分布变异较大,平均含量为 $1.62\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与TN、TP及TOC呈S型曲线线性关系,从分布特征来看,NAIP主要受外源输入因素影响。

参考文献:

- [1] Phillips G, Jackson R, Bennett C, et al. The importance of sediment phosphorus release in the restoration of very shallow lakes (The Norfolk Broads, England) and implications for biomanipulation[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 275/276: 445–456.
- [2] Jeppesen E, Kristensen P, Jensen J P, et al. Recovery resilience following a reduction in external phosphorus loading of shallow, eutrophic lakes: Duration, regulating factors and methods for overcoming resilience[J]. *Mem Ist Ital Idrobiol*, 1991, 48: 127–148.
- [3] 成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析[J]. 科学通报, 2006, 51(7): 848–855.
- [4] Portielje R, Vander Molen D. Relationships between eutrophication variables: From nutrient loading to transparency[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 408/409: 375–387.
- [5] 屈冉, 孟伟, 李俊生, 等. 土地利用和沉积物对富营养化的影响及控制对策[J]. 土壤通报, 2009, 40(4): 968–971.
QU Ran, MENG Wei, LI Jun-sheng, et al. The influence of land use and sediment on eutrophication and controlling countermeasures[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4): 968–971.
- [6] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193–202.
- [7] 徐俊. 杭州西湖底泥磷分级分布[J]. 湖泊科学, 2001, 13(3): 247–254.
- [8] 沈丽丽, 何江, 吕昌伟, 等. 哈素海表层沉积物中内源磷的释放研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1219–1224.
- [9] SHEN Li-li, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Phosphorus release from surface sediment of the Hasuhai lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(6): 1219–1224.
- [10] Bostrom B, Jansson M, Forsberg C. Phosphorus release from lake sediments[J]. *Arch Hydrobiol Beih Ergebn Limnol*, 1982(18): 5–59.
- [11] 于世龙, 韩玉林, 付佳佳, 等. 富营养化水体植物修复研究进展[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(31): 13811–13813, 13818.
- [12] YU Shi-long, HAN Yu-lin, FU Jia-jia, et al. Research progresses on the phytoremediation of eutrophic water body [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 36(31): 13811–13813, 13818.
- [13] 陈玉成. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [14] CHEN Yu-cheng. Pollution environmental bioremediation engineering [M]. Beijing, Chemical Industry Press, 2003.
- [15] 李岳坦, 李小雁, 崔步礼, 等. 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量变化(1961—2007年)及趋势分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 616–624.
- [16] LI Yue-tan, LI Xiao-yan, CUI Bu-li, et al. Trend of pan evaporation and its impact factors over Lake Qinghai basin from 1961—2007[J]. *Journal of Lakes Sciences*, 2010, 22(4): 616–624.
- [17] 李广英, 赵生奎. 青海湖流域生态环境保护与经济社会可持续发展对策[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 148–151.
- [18] LI Guang-ying, ZHAO Sheng-kui. Eco-environmental protection and sustainable development in Qinghai Lake catchment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 148–151.
- [19] 付明义, 刘卫国, 李祥忠, 等. 青海湖及柴达木盆地地区现代湖泊沉积物中长链烯酮的分布特征[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 285–290.
- [20] FU Ming-yi, LIU Wei-guo, LI Xiang-zhong, et al. The distribution of long-chain alkenones in modern lacustrine sediments in the Lake Qinghai and lakes from the Qaidam Basin[J]. *Journal of Lakes Sciences*, 2008, 20(3): 285–290.
- [21] 燕华云, 贾绍风. 青海湖水量平衡分析与水资源优化配置研究[J]. 湖泊科学, 2003, 15(1): 35–40.
- [22] YAN Hua-yun, JIA Shao-feng. Water balance and water resources allocation of Qinghai Lake [J]. *Journal of Lakes Sciences*, 2003, 15(1): 35–40.
- [23] 曾奕, 张信宝, 周卫健, 等. 青海湖表层底泥中放射性同位素 ^{137}Cs 的来源[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 516–521.
- [24] ZENG Yi, ZHANG Xin-bao, ZHOU Wei-jian, et al. On the source of radioisotope ^{137}Cs in the surface sediments of Lake Qinghai[J]. *Journal of Lakes Sciences*, 2007, 19(5): 516–521.
- [25] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [26] State Environmental Protection Administration Water and Wastewater

- Monitoring Method Editorial Committee. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th edition. Beijing, China Environmental Science Press, 2002.
- [18] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 583–586.
- HUANG Qing-hui, WANG Dong-hong, WANG Chun-xia, et al. Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(6): 583–586.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis of agricultural soil [M]. 3rd Edition. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [20] González Medeiros J J, Pérez Cid B, Fernández Gómez E. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005, 381(4): 873–878.
- [21] 姚志麒. 环境质量指数的数学计算问题[J]. 环境科学, 1980, 5(6): 53–57.
- YAO Zhi-qi. Problem of mathematical calculation of environmental quality index[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 1980, 5(6): 53–57.
- [22] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 150–153.
- QIN Bo-qiang, FAN Cheng-xin. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake[J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(2): 150–153.
- [23] 王 鹏. 富营养化湖泊营养盐的来源及治理 [J]. 水资源保护, 2004, 20(2): 9–12.
- WANG Peng. Origins of nutrient salt in eutropic lakes and its control[J]. *Water Resources Protection*, 2004, 20(2): 9–12.
- [24] 孙惠民, 何 江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1003–1012.
- SUN Hui-min, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1003–1012.
- [25] 张晓晶, 李畅游, 张 生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1770–1776.
- ZHANG Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of lake Wuliangsu with respect to its effects on the environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9): 1770–1776.
- [26] 王晓明, 王 波, 李小明. 大明湖主要营养元素内外源负荷的分析与评价[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2010, 24(3): 262–267.
- WANG Xiao-ming, WANG Bo, LI Xiao-ming. Analysis and assessment on main nutritious elements from inner and exterior contamination in Daming Lake[J]. *Journal of University of Jinan(Sci & Tech)*, 2010, 24(3): 262–267.
- [27] 王 超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1303–1307.
- WANG Chao, ZOU Li-min, WANG Pei-fang, et al. Relation between distribution of phosphorus form in the sediment of typical urban shallow lakes and eutrophication [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1303–1307.
- [28] 徐洪斌, 吕锡武, 俞 燕, 等. 玄武湖底泥营养物释放的模拟试验研究[J]. 环境化学, 2004, 23(2): 152–156.
- XU Hong-bin, LÜ Xi-wu, YU Yan, et al. Simulated study on nutritional ingredient release of Xuanwu Lake sediment in Nanjing[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(2): 152–156.
- [29] 孟春红, 赵 冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7): 1831–1837.
- MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediments of Donghu Lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7): 1831–1837.
- [30] 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 Lake Donghu[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3): 342–345.
- [31] 张 彦, 张 远, 于 涛, 等. 太湖沉积物及孔隙水中氮的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1333–1342.
- ZHANG Yan, ZHANG Yuan, YU Tao, et al. Spatial and temporal distribution of nitrogen species in sediment and interstitial waters of Taihu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 23(11): 1333–1342.
- [32] 王 琦, 姜 霞, 金相灿, 等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J]. 湖泊科学, 2006, 18(2): 120–126.
- WANG Qi, JIANG Xia, JIN Xiang-can, et al. Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationship in the sediments from different regions of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(2): 120–126.
- [33] 万晓红, 周怀东, 刘玲花, 等. 白洋淀湖泊湿地中氮素分布的初步研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 166–169.
- WAN Xiao-hong, ZHOU Huai-dong, LIU Ling-hua, et al. Research of nitrogen distribution in Baiyangdian wetland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 166–169.
- [34] 申世刚, 乔子路, 秦 哲, 等. 白洋淀沉积物中磷的存在形态及垂直变化规律研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2112–2116.
- SHEN Shi-gang, QIAO Zi-lu, QIN Zhe, et al. Investigation of phosphorus species and vertical variation in the sediments of Lake Baiyangdian [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(9): 2112–2116.
- [35] 吕昌伟, 何 江, 高兴东, 等. 岱海表层沉积物中氮素的水平分布及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2305–2308.
- LÜ Chang-wei, HE Jiang, GAO Xing-dong, et al. Spatial distribution of nitrogen in surface sediments of Daihai Lake and its environmental significance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6): 2305–2308.
- [36] Levoun M, Niemisto L. Sedimentation of trace metals in Gulf of Bothnia[J]. *Chemosphere*, 1992, 31(8): 3838–3856.