

洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价

余辉¹, 张文斌^{1, 2}, 卢少勇¹, 燕姝雯¹, 胡瑞娟¹, 陈雷², 张璐璐^{1, 2}, 余建平³

(1. 中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012 ; 2. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021 ; 3. 湖南永州职业技术学院, 永州 425000)

摘要 : 为揭示洪泽湖底质的营养盐空间分布特征, 于 2008 年 6 月采集了该湖具有代表性的 10 个点位的表层底质, 测定了其有机质、总氮、有机氮、氨氮、硝氮、总磷、无机磷、铁铝-磷、钙-磷等的含量。结果表明, 底质中的有机质和总氮有很好的相关性, 且有机氮约占总氮的 90% , 说明碳、氮有同源性 ; 底质中的无机磷约占总磷的 70% , 而其中钙-磷占无机磷的比重较大 ; 洪泽湖底质有机质与总氮, 有机氮, 总磷的空间分布特性极为相似, 属洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model 方式) ; 通过 C/N 域值得知沉积物中有机物主要来源为生物沉降。通过用有机指数评价法和有机氮评价法对洪泽湖表层底质的分析表明, 洪泽湖底质除局部区域如龙集乡北表现为一定程度的有机氮污染外, 整体处于清洁至尚清洁范畴。

关键词 : 洪泽湖 ; 底质 ; 空间分布 ; 底质污染评价 ; 回归分析

中图分类号 : X142 ; X524 文献标识码 : A 文章编号 : 0250-3301(2010) 04-0961-08

Spatial Distribution Characteristics of Surface Sediments Nutrients in Lake Hongze and Their Pollution Status Evaluation

YU Hui¹, ZHANG Wen-bin^{1, 2}, LU Shao-yong¹, YAN Shu-wen¹, HU Rui-juan¹, CHEN Lei², ZHANG Lu-lu^{1, 2}, YU Jian-ping³

(1. Research Center of Lake Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China ; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021, China ; 3. Hunan Yongzhou Vocational Technical College, Yongzhou 425000, China)

Abstract In order to illuminate nutrient spatial distribution characteristics in surface sediment of Lake Hongze, sediment samples at 10 representative sampling stations were collected in June of 2008, and concentrations of organic matter, total nitrogen, organic nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate, total phosphorus, inorganic phosphorus, Al-Phosphorus, and calcium-Phosphorus in sediment of each station were measured. Analyze showed that : organic matter and total nitrogen are significantly correlated, and organic nitrogen occupies 90% of total nitrogen, which means that carbon and nitrogen were from the same source ; Inorganic phosphorus is the majority (70%) of total phosphorus, and the calcium-Phosphorus accounts for a large percentage of inorganic phosphorus ; The spatial distribution pattern of organic matter in the lake is very similar with that of total nitrogen, organic nitrogen and total phosphorus, which belongs to a typical sediment distribution pattern called Turbidity Flood Model. The C/N analysis showed that the main sources of organic matter in surface sediments are from the sedimentation of biomass in its water column. By organic matter index evaluation standards and organic nitrogen evaluation standards, the pollution levels of sediment at each sampling stations in the lake were evaluated at clean category, except that at north part of Longji, which was polluted by organic nitrogen.

Key words : Lake Hongze ; sediments ; spatial distribution ; pollution status evaluation ; regression analysis

洪泽湖(33°06′ ~ 33°40′N, 118°10′ ~ 118°52′ E)是中国第四大淡水湖, 湖盆形成于公元 12 世纪, 距今约有 800 年的历史^[1]。相对于“ 古老 ”湖泊, 洪泽湖的形成史较短尚属年轻湖泊, 但黄河侵淮, 泥沙的大量沉积使得洪泽湖湖盆变浅而成为著名的“ 悬湖 ”, 为快速走向衰亡的湖泊之一。对于这样的过水性湖泊, 研究其湖盆底质的特性、营养状态及其空间分布, 具有重要的意义。

湖泊底质是湖泊生态系统的重要组成部分, 是流域营养物质的主要归宿, 湖泊沉积物性质间接地反映水体的污染状况, 作为湖泊主要的内负荷来源, 对湖泊水体产生重要影响^[2~7]。底质营养盐氮、磷含

量在一定程度上代表了湖泊生物生产力的水平。通过研究湖泊底质中氮、磷的含量及其分布特征, 对把握该湖氮、磷的分布规律及其富营养化过程有重要意义^[8]。

近年来针对洪泽湖底质的研究相对较少, 可参阅的文献有限。洪国喜等^[9]对洪泽湖入湖、出湖水

流泥沙特性进行了分析, 朱松泉等^[10]对洪泽湖的底

收稿日期 2009-05-15 ; 修订日期 2009-11-25
基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-001) ; 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2007KYYW29)
作者简介 余辉(1963 ~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为湖泊生态环境, E-mail yuhui@ craes. org. cn

质类型进行了研究,何华春^[11]和刘振坤^[12]等对洪泽湖底质重金属元素进行了探讨研究。

湖泊水体沉积物的堆积方式与其湖盆地形、水流等特性相关.日本学者 Inouchi 等^[13]认为湖体沉积物的堆积有 4 种模式:① Cloud Model,主要适用于深水湖,堆积速率与水深成正比;② Blanket Model,主要适用于水流缓慢的湖泊,堆积速率与水深无关,呈均匀分布;③ Wave Redistributed Model,堆积速率与入出湖河流无关,由波浪作用决定;④ Turbidity Flood Model,主要适用于浅水湖泊,堆积速率与入出湖河流河口及湖湾位置有关.作为淮河流域最大的湖泊,淮河上、中游工业废水和生活污水的主要纳污水体,把握洪泽湖底质营养盐的现状及其分布特性,是开展其综合治理的重要基础.基于此,本研究通过分析洪泽湖沉积物及其污染状况的空间分布规律和所遵从的堆积模式,以为洪泽湖的综合治理提供理论依据。

1 区域概况与方法

1.1 调查区域及采样点

洪泽湖湖盆地形为浅碟形,湖底平坦,高程约在 10.0 ~ 11.0 m 之间,湖盆高出东部里下河地区 5 ~ 9 m,走势为西高东低,北高南低,湖盆由西北向东南倾斜^[1].入湖河流集中在西部,其中淮河为其最大入湖河流,其入湖水量占总入湖径流量的 70% 以上.3 条主要出湖河流分布在东部,其中入江水道的出水量占总出湖水量的 60% ~ 70%^[1].洪泽湖流域水系见图 1。

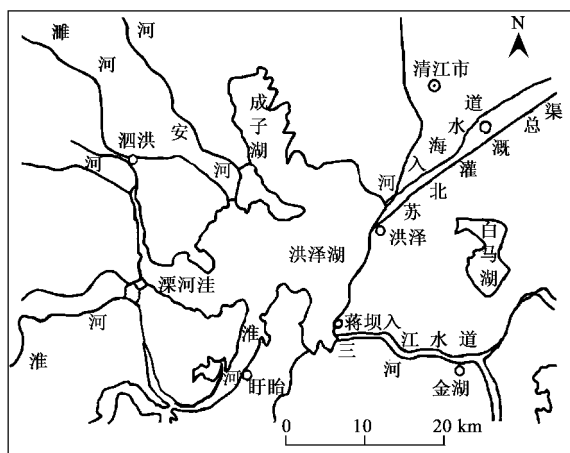


图 1 洪泽湖出入湖河流水系示意

Fig. 1 Watershed of Lake Hongze

2008 年 6 月,在洪泽湖进行了全湖调查采样,为使调查数据具有可比性,采样点的布设参考了江

苏省监测部门在洪泽湖的监测断面,分别在高良涧镇(S1)、老山乡(S2)、淮河口(S3)、临淮乡(S4)、成河乡西(S5)、龙集乡北(S6)、成河乡北(S7)、成河乡东(S8)、成河乡中(S9)、蒋坝镇(S10)共 10 个监测点采集了表层沉积物样品,采样点位见图 2。考虑到洪泽湖是一个大型浅水湖泊,湖底平坦,平均水深 1.77 m,最大水深 4.37 m,这样的采样分布点能反映全湖的沉积物分布概况。

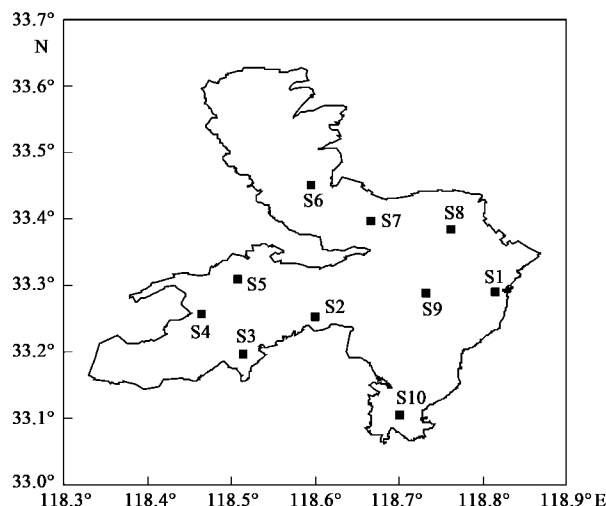


图 2 洪泽湖采样点分布示意

Fig. 2 Locations of the sediment sampling stations in Lake Hongze

采样使用彼得森采样器,将采集的沉积物样品均匀混合后装入聚乙烯自封袋中密封,低温保存送回实验室进行预处理及分析.同时使用美国热电便携式 320P-01/-83 pH 仪及 320D-01DO 仪测定了采样点水体中的 pH、溶解氧及水温等理化指标。

由于洪泽湖是一个大型浅水湖泊,湖底平坦,文中观测点之间采用二维线性插值进行等值线计算。

1.2 样品处理及分析

底质样品使用冷冻干燥机干燥,待干燥后去掉杂物及石块,经玛瑙研钵研磨处理后过 100 目尼龙筛,贮存于塑料自封袋中密封待用.分析项目有:总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、有机氮(Org-N)、总磷(TP)、铁铝-磷(Fe/Al-P)、钙-磷(Ca-P)、无机磷(Inorg-P)、有机质(OM).底质营养盐成分分析根据文献[14]进行。

2 结果与讨论

2.1 底质有机质(OM)含量及其分布特性

OM 是底泥中极为重要的自然胶体之一,是重金属、有机物等污染物发生吸附、分配、络合作用的

活性物质 ,也是反映底泥有机营养程度的重要标志^[8]。洪泽湖底质的 OM 含量及其空间分布见图 3。有机质含量变幅为 5.81 ~ 17.91 g/kg ,均值为 13.64 g/kg。从图 3 中可看出 ,有机质的水平分布差异显著 ,主要入湖河流淮河入湖口附近(S2、S3)受水流的冲刷作用 ,OM 不易沉淀从而有机质含量低 ;敞水区及出湖口附近相对较高 ;而在水流相对停滞的湖湾区 ,OM 易于沉淀从而含量最高 ,是淮河入湖口的 3 倍。湖湾水交换弱 ,湖水滞留时间长易于局部富营养化 ,因此湖湾有机质含量高。由于这里 OM 堆积速率与入出湖河流河口及湖湾位置有关 ,这一分布是典型的洪水冲刷型堆积模式(Turbidity Flood Model 方式)^[13]。

2.2 底质氮含量及其分布特性

洪泽湖底质各形态氮的含量及其空间分布特性见图 4。

2.2.1 总氮(TN)

TN 含量变幅为 0.43 ~ 1.52 g/kg ,均值为 1.02 g/kg。TN 空间分布差异显著 ,高低值变幅相差 3.5

量较入湖口高约 2 ~ 2.5 倍 ,湖湾区的 S6 最高 ,约为入湖口的 3.5 倍。TN 的分布再次证明该湖沉积物的堆积是 Turbidity Flood Model 方式^[13]。

2.2.2 有机氮(Org-N)

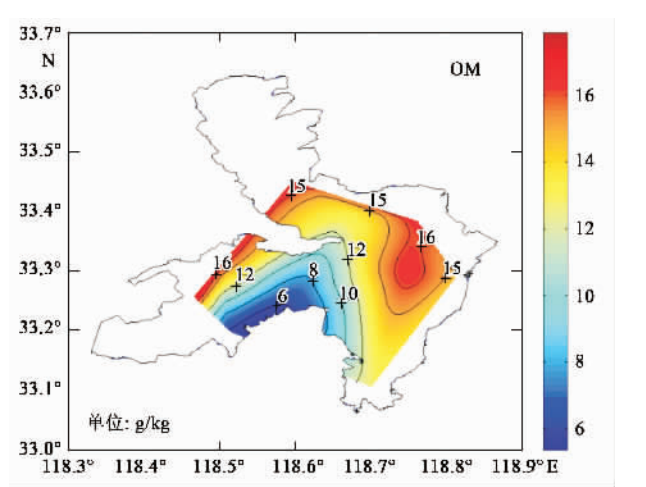


图 3 洪泽湖底质表层沉积物有机质含量及其空间分布
Fig.3 Distribution of organic matter(OM) concentration in the surface sediment of Lake Hongze in June of 2008

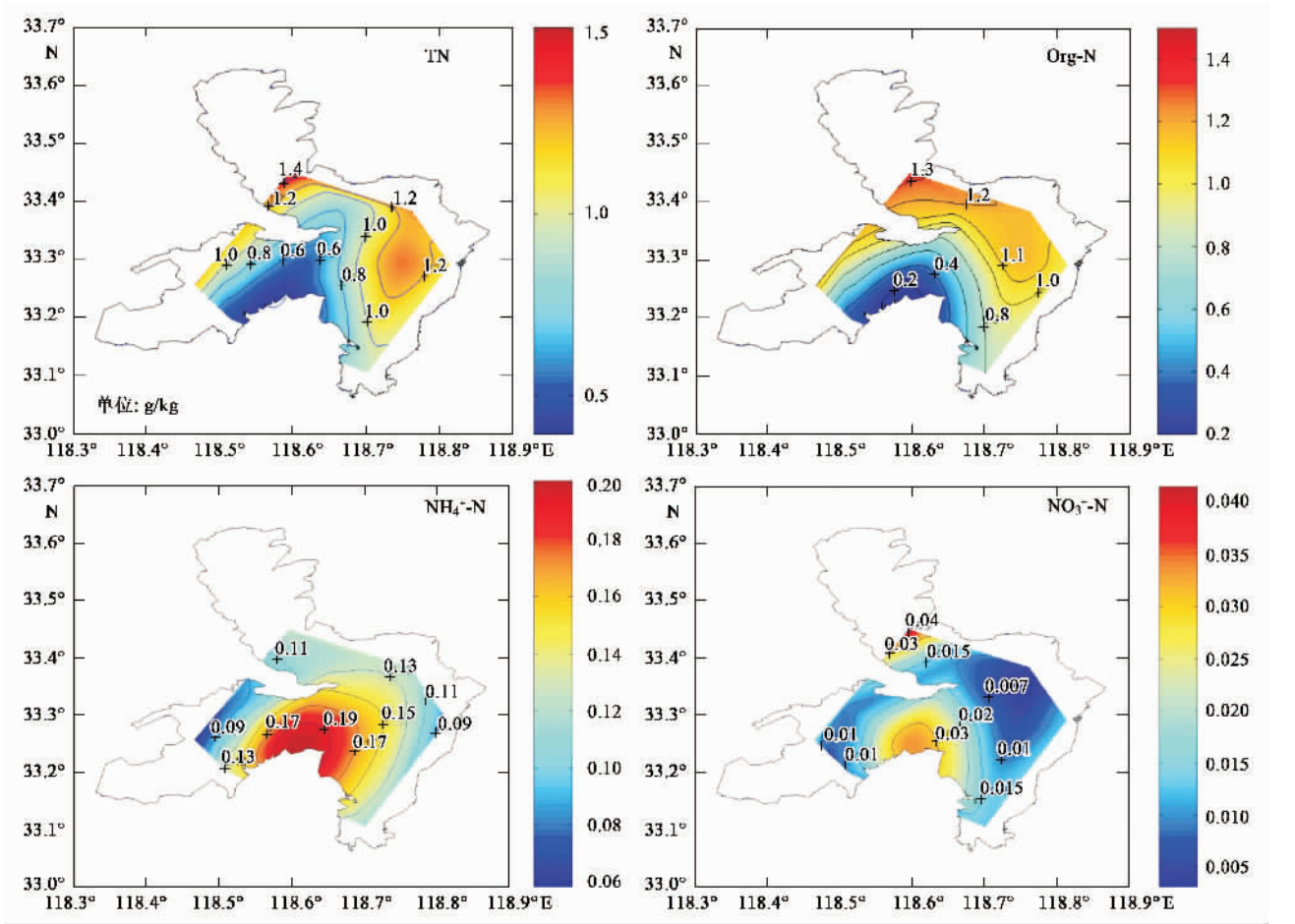


图 4 洪泽湖底质表层沉积物总氮、有机氮、氨氮及硝氮含量及其空间分布

Fig.4 Distribution of TN ,organic nitrogen(Org-N) ,NH₄⁺-N ,and NO₃⁻-N concentrations in the surface sediments of Lake Hongze in June of 2008

Org-N 含量变幅为 0.19 ~ 1.35 g/kg, 均值为 0.91 g/kg. 其空间分布特性与 TN 一致. 淮河入湖口附近含量较低, 分别为 0.32 g/kg、0.19 g/kg, 约占总氮的 50%, 而在其他水域约占总氮的 90% 以上. 洪泽湖底质中 Org-N 是氮的主要存在形式, Org-N 与 TN 之间存在显著相关关系 ($r = 0.9454$, $p < 0.01$), 见图 5. 该分布由有机物的 Turbidity Flood Model 堆积方式^[13]所造成.

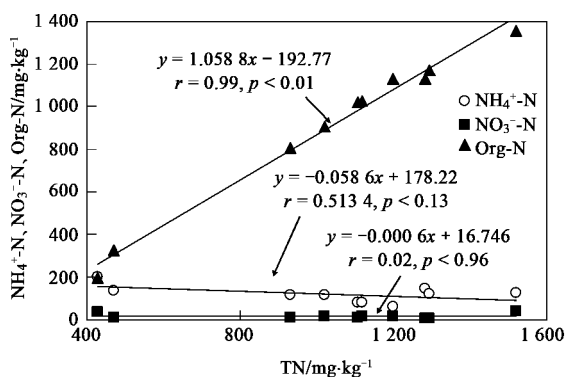


图 5 洪泽湖底质总氮与各形态氮的相关关系

Fig. 5 Regressions of NH_4^+-N , NO_3^--N and

Org-N to TN in the surface sediments of Lake Hongze

2.2.3 氨氮 (NH_4^+-N) 及硝氮 (NO_3^--N)

NH_4^+-N 含量变幅为 0.06 ~ 0.20 g/kg, 均值为 0.12 g/kg. 淮河入湖口 (S2) 较高, 约占总氮的 47%, 淮河入湖口附近水域 (S3) NH_4^+-N 含量约占总氮的 29%, 其他水域 NH_4^+-N 含量较低, 约占总氮的 10%. 洪泽湖底质的 NH_4^+-N 空间分布特性与 TN 及 Org-N 相反, 淮河入湖口附近最高, 且随淮河入湖口水流方向递减. 一般情况下底泥中的氨氮主要源于有机氮的氨化作用, 但洪泽湖底泥氨氮的这一分布特性无法用有机物的氨化作用来解释. 因为如果这一分布由有机物的氨化作用造成, 氨氮的峰值应出现在有机物含量高的湖湾区. 此外, 洪泽湖属过水性浅水湖, 不易形成水温成层, 且调查期间水体中溶解氧平均浓度达 7.8 mg/L, 底质表层难于形成厌氧状态而不利于有机氮的氨化. 根据环保部发布的“2008 年中国环境状况公报”(<http://www.mep.gov.cn/gzfw/xzxx/wdxz/>), 氨氮为淮河干流主要污染指标之一, 因此, 这一分布可能与淮河水中的氨氮在河口沉积物表面的吸附有关. 由于氨氮是浮游植物最容易利用的形式, 这一分布特征对揭开洪泽湖富营养化过程极为重要, 这一问题还需进一步研究.

NO_3^--N 含量变幅为 0.005 ~ 0.03 g/kg, 均值为 0.02 g/kg. 空间分布差异相对较小, 除淮河入湖口

(S2) 及湖湾 (S6) 含量稍高外, 其他区域分布均一. NO_3^--N 含量占 TN 的 1% ~ 8%.

2.3 底质磷含量及其分布特性

洪泽湖底质各形态磷的含量及其空间分布特性见图 6.

2.3.1 总磷 (TP)

TP 含量的变化范围为 0.43 ~ 0.73 g/kg, 均值为 0.58 g/kg. 与有机质和总氮的显著空间分布差异不同, 底质中 TP 的分布相对均衡, 高低值变幅为 1.7 倍. 虽然差异较小, 但分布特征明显: 淮河入湖口附近的总磷含量较出湖口略低, 湖湾及敞水区相对较高. 显然这里 TP 堆积速率与入出湖河流河口及湖湾位置有关, 再次证明该湖沉积物的堆积是 Turbidity Flood Model 方式^[13].

2.3.2 无机磷 (Inorg-P)

无机磷为洪泽湖底质中磷的主要存在形态, 约占总磷的 70%. 无机磷含量变幅为 0.27 ~ 0.51 g/kg, 均值为 0.44 g/kg. 其空间分布特性与 TP 一致, 空间差异较小, 分布特征明显.

2.3.3 钙磷 (Ca-P) 及铁铝磷 (Fe/Al-P)

Ca-P 含量的变幅为 0.19 ~ 0.36 g/kg, 均值为 0.30 g/kg. 其分布特性与 TP 及 Inorg-P 有所不同, 淮河入湖口附近的 Ca-P 含量较出湖口高, 湖湾 (S6) 最低. Ca-P 在 Inorg-P 中所占比重较高, 平均约占总无机磷的 74%, 淮河入湖口及其附近 (S2、S3) Ca-P 的比重高达 85%, 出湖口偏低约 70%.

Fe/Al-P 含量的变幅为 0.06 ~ 0.16 g/kg, 均值为 0.10 g/kg. Fe/Al-P 的空间分布特性与 Ca-P 相反, 而与 TP 极为相似. 淮河入湖口附近的铁铝磷含量较出湖口低, 敞水区 (S7、S9) 相对较高. Fe/Al-P 的含量约占 Inorg-P 的 17%, 远低于钙磷所占比重.

对洪泽湖底质磷含量的各存在形态进行了回归分析, 结果如图 7、图 8 所示. 可见洪泽湖沉积物中的 TP 与 Fe/Al-P 的含量呈显著正相关 ($r = 0.85$, $p < 0.01$), 而与 Ca-P 相关性不显著 ($r = 0.56$, $p < 0.10$). Fe/Al-P 具有明显的环境意义, 可以作为判断沉积物质量及污染水平的指标之一^[15]. 随着沉积物富营养程度的提高, Fe/Al-P 的含量也将随 TP 含量的上升而显著增加. 但从 Fe/Al-P 和 Ca-P 与无机磷 (Inorg-P) 的回归关系 (图 8) 中可看出, 无机磷 (Inorg-P) 与 Ca-P 有显著相关性 ($r = 0.92$, $p < 0.01$), 其相关程度远大于 Fe/Al-P ($r = 0.66$, $p < 0.05$), 且 Ca-P 在无机磷中所占的比重远高于 Fe/Al-P. 这一特性与洪泽湖的过水性湖泊特征相关, 洪

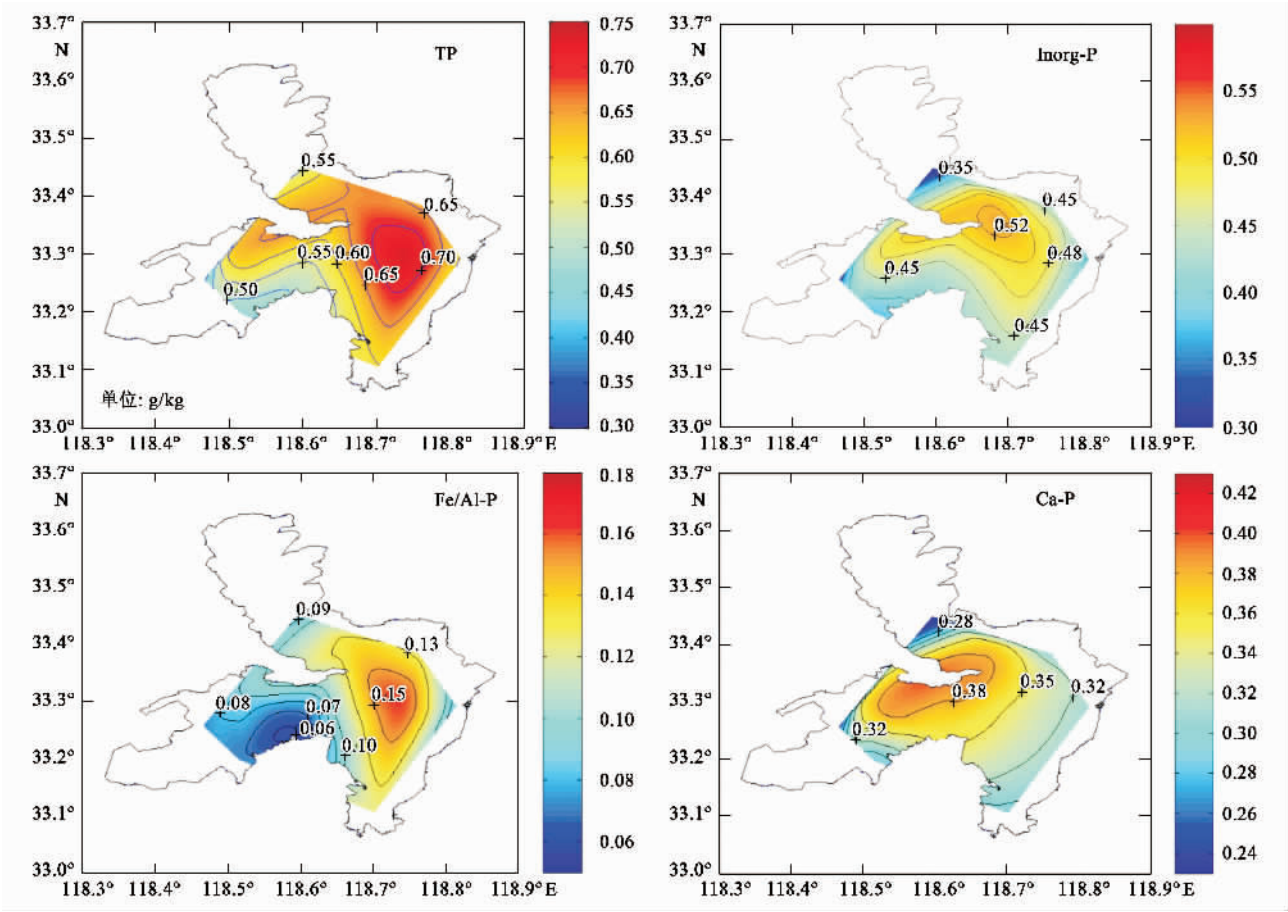


图 6 洪泽湖底质表层沉积物总磷、无机磷、铁铝-磷及钙-磷含量及其空间分布

Fig. 6 Distribution of TP , Inorg-P , Fe/Al-P and Ca-P concentrations in the surface sediment of Lake Hongze in June of 2008

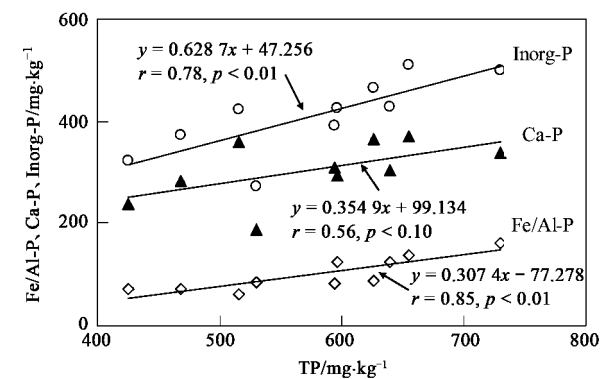


图 7 洪泽湖沉积物中 TP 与 Al/Fe-P、Ca-P 的回归关系

Fig. 7 Regressions of Fe/Al-P and Ca-P to TP in the surface sediments of Lake Hongze

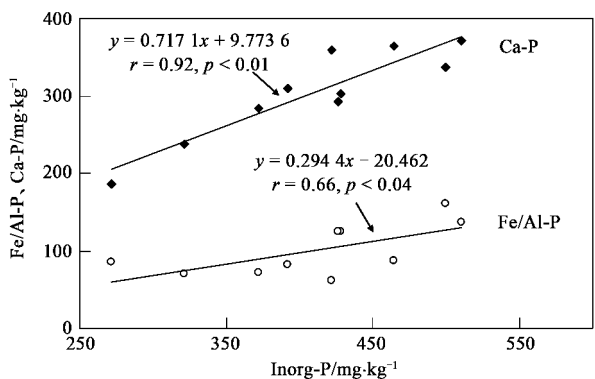


图 8 洪泽湖沉积物中无机磷与 Fe/Al-P、Ca-P 的回归关系

Fig. 8 Regressions of Fe/Al-P and Ca-P to Inorg-P in the surface sediments of Lake Hongze

泽湖泥沙沉积严重,上游河流的入湖输沙量在 20 世纪 70 年代极严重,高达 881×10^4 t/a,到 2001 ~ 2004 年,年输沙量减至 490×10^4 t/a,但泥沙沉积率高达 70%^[16]. 泥沙的大量输入是洪泽湖 Ca-P 含量高的主要原因.

2.4 底质营养盐比值

2.4.1 C/N 值

湖泊沉积物中 C/N 在某种程度上可反映有机质来源,因为生物种类不同,C/N 不同. 高等植物的 C/N 为 14 ~ 23,水生生物为 2.8 ~ 3.4,浮游动物与浮游植物为 6 ~ 13,藻类为 5 ~ 14^[17]. 洪泽湖表层沉积物 C/N 均值为 7.86,且空间分布均一,变幅较少为 6.55

~ 8.65 ,高低值相差 1.3 倍(见图 9). 表明表层沉积物 中有机物主要来源于浮游动物和浮游植物.

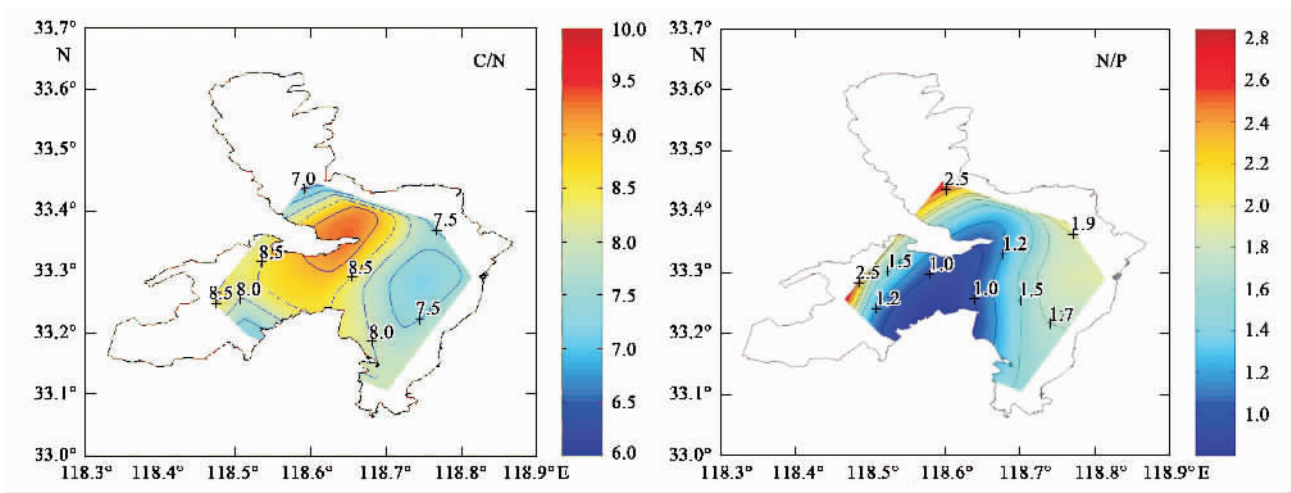


图 9 洪泽湖底质表层沉积物 C/N 及 N/P 值的其空间分布

Fig. 9 Distribution of C/N and N/P ratio in the surface sediments of Lake Hongze in June of 2008

2.4.2 N/P 值

与 C/N 比的均一分布不同 ,N/P 值水平分布差异较大 ,变幅为 0.83 ~ 2.87 ,高低值相差 3.5 倍(见图 9). 淮河入湖口附近的老山乡(S2)和淮河口(S3)N/P 比值仅为出湖口附近 N/P 比值的 1/2. 而在湖湾区(S4、S6)N/P 比值较高 ,是淮河入湖口附近的 3 倍. 由于底质中磷的空间分布差异相对较小 ,N/P 比值直接受氮的含量高低的影响 ,因此 N/P 比值的空间分布特性与 TN(图 4)相一致.

2.5 底质各营养盐相关性比较

对洪泽湖底质中有机质(OM)与氮、磷含量进行了回归分析 ,见图 10. 结果表明氮含量与有机质之间存在显著正相关关系 ,其中有机质(OM)对总氮(TN)和有机氮(Org-N)的相关程度高(分别为 $r = 0.945\,4$, $p < 0.01$; $r = 0.779\,9$, $p < 0.01$) ,说明有机质按 Turbidity Flood Model 方式在底质中的富集是其氮的主要来源. 由于底质中的氮氮主要来源于有机质的厌氧还原反应^[18] ,而总氮(TN)和有机氮(Org-N)对氨氮的相关性不明显($r = 0.475\,5$, $p < 0.17$) ,调查期间洪泽湖水体中的溶解氧浓度在 7.5 ~ 7.8 mg/L 水平 ,由此可以推断洪泽湖底质中的氨氮主要不是由底质中的厌氧还原反应造成.

OM 与 TP 间不存在显著相关性($r = 0.309\,5$, $p < 0.39$) ,表明磷主要不是由底质中 OM 的富集造成. 如前述 ,无机磷约占 TP 的 70% ,为洪泽湖底质中磷的主要存在形态 ,笔者推论底质中的无机磷源于外源的 Turbidity Flood Model 方式的泥沙沉降.

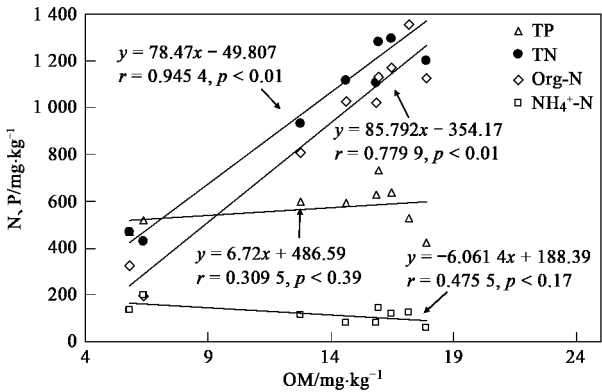


图 10 洪泽湖底质的有机质与总磷、总氮、有机氮及氨氮的相关性

Fig. 10 Regressions of TP ,TN ,Org-N and NH₄⁺-N to organic matter in the surface sediment of Lake Hongze

3 底质污染状况评价

3.1 评价方法及标准

目前国内外对湖泊底质环境的评价尚缺乏统一的评价方法和标准. 本研究采用了有机指数评价方法和有机氮评价方法 ,对洪泽湖底质污染状况进行评价. 有机指数通常用作水体底质环境状况的指标 ;有机氮常用来衡量湖泊表层沉积物有否遭受氮污染的重要指标^[19 20] . 计算方法如下 :

$$\text{Org-Index} = \text{Org-C}(\%) \times \text{Org-N}(\%) \quad (1)$$

式中 ,Org-C(%) = OM(%)/1.724 ,评价标准如表 1.

表 1 底质有机指数及有机氮评价标准^[19, 20]

Table 1 Sediment evaluation standards by organic index and organic nitrogen index

有机指数(Org-Index)评价标准						有机氮(Org-N)评价标准 /%			
<0. 05	≥0. 05	<0. 20	≥0. 20	<0. 50	≥0. 5	<0. 003 3	0. 003 3 ~ 0. 066	0. 066 ~ 0. 133	>0. 133
清洁	较清洁		尚清洁		有机污染	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
I	II		III		IV	I	II	III	IV

3. 2 评价结果

根据有机指数和有机氮评价方法和标准 ,洪泽湖各采样点的表层沉积物评价结果见表 2。从表 2 可见 ,洪泽湖各监测点沉积物有机指数为 0. 01 ~ 0. 14 ,全湖平均为 0. 08 ,达到Ⅱ级标准 ,湖体底质环境状况属较清洁。老山乡(S2)和淮河口(S3)达到

一级标准 ,水体底质环境状况属清洁。

洪泽湖各监测点底质有机氮为 0. 04% ~ 0. 14% ,全湖平均为 0. 10% ,达到Ⅲ级标准 ,氮污染程度属尚清洁。老山乡和淮河口污染程度较轻 ,属较清洁。龙集乡北为有机氮污染 ,该采样点水草茂盛 ,该处有机氮污染严重与生物沉积有关。

表 2 洪泽湖沉积物营养程度评价结果

Table 2 Evaluation results of surface sediments in Lake Hongze by the sediment evaluation standards

采样点			有机指数(Org-Index)评价结果			有机氮(Org-N)评价结果		
			有机指数	水域沉积物环境状况		有机氮指数	氮污染程度	
淮河入湖口	S2	老山乡	0. 01	I	清洁	0. 04	II	较清洁
	S3	淮河口	0. 01	I	清洁	0. 04	II	较清洁
湖湾及敞水区	S4	临淮乡	0. 12	II	较清洁	0. 11	III	尚清洁
	S5	成河乡西	0. 10	II	较清洁	0. 10	III	尚清洁
	S6	龙集乡北	0. 14	II	较清洁	0. 14	IV	有机氮污染
	S7	成河乡北	0. 10	II	较清洁	0. 12	III	尚清洁
	S9	成河乡中	0. 11	II	较清洁	0. 12	III	尚清洁
出湖口	S1	高良涧镇	0. 09	II	较清洁	0. 10	III	尚清洁
	S8	成河乡东	0. 12	II	较清洁	0. 12	III	尚清洁
	S10	蒋坝镇	0. 06	II	较清洁	0. 09	III	尚清洁
全湖平均			0. 08	II	较清洁	0. 10	III	尚清洁

4 结论

(1)洪泽湖底质表层沉积物中有机质与总氮、有机氮的分布特性极为相似 ,空间差异较大 ,受河流冲刷等水动力学条件及湖盆地形的影响 ,入湖口附近含量远低于出湖口 ,而在敞水区及水流滞留的湖湾含量较高。沉积物的富集属典型的 Turbidity Flood Model 方式。而磷的分布特性有所不同 ,空间分布差异较小。有机质、氮和磷的空间分布特性存在的差异表明 ,洪泽湖底质各营养盐受陆源输入、湖体内负荷、底质沉积物的氧化还原性质及水动力条件等驱动因素的影响有所不同 ,各因素的影响机制还有待进一步深入探讨。

(2)沉积物中有机氮是氮的主要存在形式 ,约占总氮的 90% ,磷的主要存在形式是无机磷 ,约占总磷的 70% ,而其中钙-磷占无机磷的比重较大。根据 C/N、N/P 比值及有机质与氮、磷含量的回归分析 ,表明碳、氮具有同源性 ,底质中有机质及氮主要源于生物沉降 ,而磷主要源于外部输入。

(3)通过用有机指数评价法和有机氮评价法对

洪泽湖表层底质的分析表明 ,洪泽湖底质沉积物环境质量整体较好 ,属于清洁至较清洁 ,氮污染程度整体上属于尚清洁。

参考文献 :

[1] 楚恩国. 洪泽湖水文特性初探[J]. 水文 ,2001 , 21(5) : 56-59.

[2] Von Gunten H R , Sturm M , Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations [J]. Environmental Science and Technology , 1997 , 31(8) : 2193-2197.

[3] 吴艳宏 ,王苏民. 湖泊沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算——以龙感湖为例[J]. 第四纪研究 ,2006 , 26(5) : 843-848.

[4] 薛滨 ,姚书春 ,王苏民 ,等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究 ,2007 , 27(1) : 122-127.

[5] 杨丽原 ,沈吉 ,张祖陆 ,等. 近四十年来山东南四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. 地球化学 ,2003 , 32(5) : 453-460.

[6] 伍钧 ,孟晓霞 ,李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展[J]. 土壤 ,2005 , 37(3) : 258-264.

[7] Zhang M K , Ke Z X. Heavy metals , phosphorus and some other elements in urban soil of Hangzhou City , China [J]. Pedosphere , 2004 , 14(2) : 177-185.

- [8] 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[J]. 环境科学研究 ,2004 ,**17**(6) 23-26.
- [9] 洪国喜 ,韩国民. 洪泽湖入湖、出湖水流泥沙特性分析[J]. 水利科技与经济 ,2007 ,**13**(4) 240-241.
- [10] 朱松泉 ,龚鸿身. 洪泽湖[M]. 合肥 :中国科学技术大学出版社 ,1993. 1-95.
- [11] 何华春 ,许叶华 ,杨競红 ,等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析[J]. 第四纪研究 ,2007 ,**9** 767-768.
- [12] 刘振坤 ,张书海. 洪泽湖底质重金属污染变化趋势分析[J]. 江苏环境科技 ,2005 ,**18**(4) 41-43.
- [13] Inouchi Y. Terashima S. Sedimentation mechanism of fine materials in Lake Biwa[J]. Internationale Vereinigung fuer Theoretische und Angewandte Limnologie Verhandlungen IVTLAP ,1988 ,**23**(1) 567-572.
- [14] 金相灿 ,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第 2 版) . 北京 :中国环境科学出版社 ,1990. 211-230.
- [15] Hisashi J. Fractionation of phosphorus and releasable traction in sediment mud of Osaka Bay[J]. Bul Jap Soc Sci Fish ,1983 ,**49** (4) :447-454.
- [16] 陈雷 ,张文斌 ,余辉 ,等. 洪泽湖输沙淤积、底泥理化特性及重金属污染变化特征分析[J]. 中国农学通报 ,2009 ,**25**(12) : 219-226.
- [17] 蔡金榜 ,李文奇 ,刘娜 ,等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. 农业环境科学学报 ,2007 ,**26**(3) 892-893.
- [18] 岳维忠 ,黄小平 ,孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼 ,2007 ,**38**(2) : 112-113.
- [19] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学 ,1996 ,**8**(4) 323-324.
- [20] 孙顺才 ,黄漪平. 太湖[M]. 北京 :海洋出版社 ,1993. 224-228.