

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.001

里下河水系九龙口湖荡沉积物性状的垂向特征及环境指示意义

陈立尧¹, 刘 凌¹, 钱 宝¹, 高慧琴²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610)

摘要:对里下河水系九龙口湖荡沉积物中的碳和氮及其粒径进行测定,研究碳、氮元素的垂向分布与积累状况,分析沉积物的总氮(TN)、有机氮(ON)、铵态氮(NH₄⁺-N)、总有机碳(TOC)以及粒径之间的关系。结果表明:九龙口沉积物的中值粒径变化于13.44~82.01 μm,垂向变化可大致分为3段;九龙口沉积物中氮素主要为ON,无机氮以NH₄⁺-N为主,氮素质量的垂向分布特征与九龙口地区20世纪50年代以来人类活动的历史背景相一致;TOC质量比随深度的增加呈先增加后快速减小的趋势。沉积物的w(C)/w(N)介于5.67~26.08之间,指示出沉积物中有机质主要来自有纤维束的陆源植物。沉积物TOC和TN呈极显著相关,w(C)/w(N)对TOC质量比敏感,3个测点中南部湖区受人类活动影响较大。

关键词:原位沉积柱;碳氮分布;中值粒径;湖泊;九龙口;里下河水系

中图分类号:X83 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)05-0001-06

Vertical characteristics and environmental significance of sediments in Jiulongkou Wetland in Lixiahe River system

CHEN Liyao¹, LIU Ling¹, QIAN Bao¹, GAO Huiqin²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. China Water Resources Pearl River Planning, Surveying and Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China)

Abstract: Based on measurement of the concentrations of carbon and nitrogen and their particle sizes in the core sediments from the Jiulongkou Wetland, the accumulation status and the depth-dependent change characteristics of carbon and nitrogen were studied, and the relationships between TN, ON, NH₄⁺-N, TOC, and the median particle were analyzed. The results show that the median particle of sediments ranged from 13.44 μm to 82.01 μm, and the vertical change of the median diameter can be roughly divided into three sections. The total nitrogen was mainly composed of organic nitrogen, and the ammonia nitrogen mainly consisted of inorganic nitrogen. The vertical distribution characteristics of nitrogen were consistent with human activities in the study area since the early 1950s. With the increase of the depth of sediments, the TOC concentration first increased, and then decreased rapidly. The ratio of carbon and nitrogen $w(C)/w(N)$ ranged between 5.67 and 26.08, which indicated that the terrigenous vegetation with fiber bundles was the primary possible source of the organic matter in the sediments. In addition, in the sediments, TOC was significantly correlated with TN, $w(C)/w(N)$ was sensitive to the TOC concentration, and the southern region of the lake was affected by human activities to a greater degree than the other two monitoring sites.

Key words: in situ sediment core; carbon and nitrogen distribution; median diameter; lake; Jiulongkou; Lixiahe River system

基金项目:国家自然科学基金(51279060);江苏省研究生创新计划(CXZZ11-0436)
作者简介:陈立尧(1988—),男,硕士研究生,研究方向为环境水文与水环境保护。E-mail:liyao1945@126.com

苏北里下河湿地是我国典型的潟湖型湖荡湿地。近年来,国内多名学者^[1-3]对其进行研究,受到了人们的关注,但研究侧重于资源的开发利用,关于湿地的环境演变以及人类活动影响等方面的研究较少。随着社会、经济的迅速发展,里下河湿地受开垦、围网、开发利用等人类活动干扰愈来愈强烈,自然环境与生态系统遭到破坏,湿地水体富营养化现象日趋严重,因此有必要开展湿地底泥碳氮生源要素的研究。笔者选取里下河水系盐城九龙口湖荡湿地柱状沉积物进行研究,分析比较沉积柱中营养元素的垂向分布与累积状况,通过对柱状沉积物多环境指标的分析,可重建九龙口湖荡湿地环境演变过程以及人类活动对环境的影响,从而揭示九龙口湖荡湿地富营养状态的演化规律,以期为九龙口湖荡湿地环境沉积学研究和环境综合治理提供科学依据。

1 样品与试验

1.1 研究区概况

九龙口位于江苏省苏北里下河地区腹部,地处盐城、扬州和淮阴3市交界处,总面积达1.33万hm²,平均水深为1.5~2.0m。九龙口是我国较罕见的原始湖荡型湿地,湖区有林上河、钱家沟、安丰河等9条河汇聚湖中(图1),形成典型的平原型非冲积类水系地貌景观^[4]。

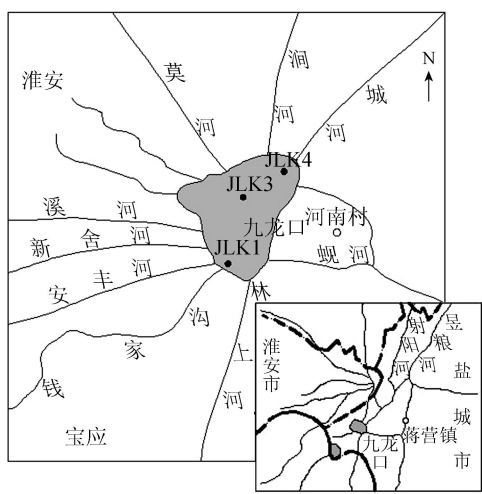


图1 测点示意图

九龙口地区处于亚热带向暖温带过渡地带,具有明显的季风气候特征。年平均气温为14~15℃,年平均降水量为1000mm,65%的降水集中在6—9月。20世纪六七十年代,因围湖造田湖荡面积减少一半;80年代后不适当的开发利用和过度的水产养殖,使水域面积不断减小,大量营养物质侵入湖中,致使水体的富营养化程度不断加重。

1.2 样品采集

本研究于2011年11月进行,在九龙口布设南

部湖区(JLK1)、湖心区(JLK3)、北部湖区(JLK4)3个测点,如图1所示。采样根据GB/T 14581—93《水质湖泊和水库采样技术指导》进行,利用竖直重力柱状采泥器,每个测点采集2个沉积物柱状样。

样品采集后,现场立即进行分割,表层5cm以1cm间隔分层,5cm以下以2cm间隔分层;切片装入聚乙烯密封袋,并迅速冷藏待后期分析。

1.3 实验方法

沉积物粒径:每个样品取0.5g进行前期处理,先加入蒸馏水和10%的过氧化氢去除样品中的有机质,再加入10%的盐酸去除无机碳(主要是钙质胶结物),静置24h,然后加入六偏磷酸钠分散剂,摇匀,置超声振荡器中振荡15min,使颗粒充分分散。利用美国LS13320全自动激光粒度分析仪的测量软件直接输出分析所需的各参数。

在实验室中将样品放入-80℃超低温冰箱冷冻24h,再转入冻干机中冻干以达到自然风干效果。然后将样品剔除大小砾石、贝壳及动植物残体等杂质,用研钵研磨后过100目筛,进行TOC、TN、NH₄⁺-N、ON的分析测定。

TOC:样品经1mol/L盐酸溶液预处理后,以EA4000元素分析仪(德国JENA)测定,以质量分数计。

沉积物TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N:基于凯氏消煮法^[5],利用荷兰skalar连续流动分析仪测定,以质量比计。由于本次实验凯氏消煮法测定的TN包含NH₄⁺-N以及NO₃⁻-N和NO₂⁻-N,故ON的质量比以TN的质量比减去NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N的质量比差值表示。

所有实验同时进行平行样测定,相对标准误差均小于5%。实验数据统计分析都在SPSS13.0中完成。

2 结果与讨论

2.1 粒度分布特征

粒度分析结果表明,九龙口沉积物中值粒径D₅₀的变化范围为13.44~82.01μm(图2),其中砂

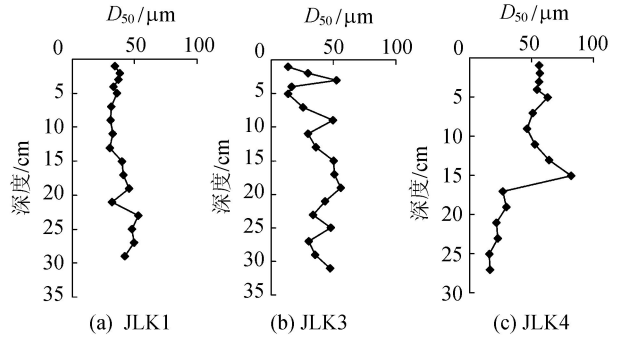


图2 沉积物中值粒径的垂向分布

组分(>20 μm)占36.85%~81.89%,粉砂组分(2~20 μm)占15.56%~54.81%,黏土组分(<2 μm)占2.50%~12.68%。根据美国制土壤分级系统可知,九龙口沉积物以砂质壤土为主。

3个测点中,JLK1和JLK3的 D_{50} 整体表现出随深度增加而沉积物颗粒变大的趋势,而JLK4则相反。已有研究^[6]表明,沉积物粒径增大反映测点离湖岸距离减小;反之,沉积物粒径减小反映测点离湖岸距离增大。因此可以推测测点JLK1、JLK3所处位置由原来的近湖岸区转变为现有的近湖心区,JLK4所处位置由原来的近湖心区转变为现有的近湖岸区,这一结果与里下河腹地湖泊由北向南消退缩小的趋势^[7]相一致。

从各柱沉积物 D_{50} 垂向剖面上可大致分辨出3个变化层段。即0~7 cm,7~20 cm,20~30 cm。0~7 cm层沉积物粒径变化不大,在5 cm左右出现峰值;7~20 cm层沉积物粒径垂向剖面为明显的由细变粗的趋势,剖面曲线呈多峰态波动;20~30 cm层沉积物粒径由粗转细,并小范围波动。在短时间尺度研究中,湖泊水位相对稳定,湖区降雨量的变化可通过影响地表径流强度而在相当程度上决定进入湖泊的陆源颗粒物的粗细和多少^[8]。结合里下河地区近60年来降水变化和苏北地区近100年来气候干湿变化资料^[9],可以发现沉积物 D_{50} 的变化趋势与1950—2007年兴化、盐城的年降水量变化具有良好的-致性,且1965、1991年特大暴雨,1978年大旱等特殊年份均能在粒径剖面图上找到对应的峰值与谷值。根据淮河中下游洪泽湖沉积速率的测量和计算,近百年内该区平均沉积速率约为0.4 cm/a^[10],可推算出九龙口沉积年代与沉积深度的对应关系。即沉积物下层25~30 cm段对应1931—1950年,沉积物10~25 cm段对应1951—1979年,0~10 cm段对应20世纪80年代以后。

2.2 氮素分布特征

九龙口沉积物中TN平均质量比为3764.4 mg/kg,ON平均质量比为3604.7 mg/kg。由图3可知,ON

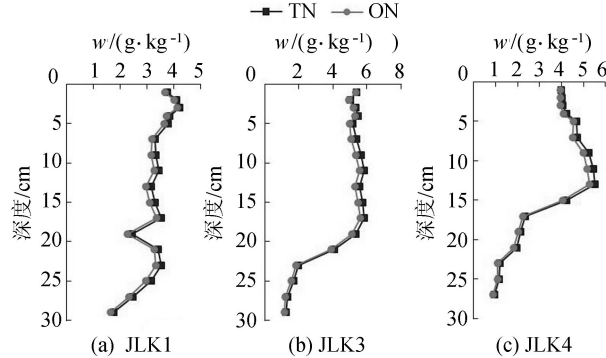


图3 各点沉积物中TN和ON的质量比垂向分布情况

质量比的分布特征与TN的一致,呈波浪形变化,因此可推断九龙口湖沉积物中氮素主要为ON。从TN和ON的垂向分布特征来看,3个测点氮素均主要集中在沉积物表层,且随着沉积物深度的增加其浓度逐渐降低,这种变化趋势与三江平原环型湿地研究结果^[11]相类似,主要原因是水生动植物残体、人为外来营养元素等加入湖体并集中沉积在表层,致使表层氮素富集,同时植被根系随土壤深度的增加明显减少,植物分解作用所归还的氮素也相对减少。

在沉积物深层25 cm以下,TN和ON质量比表现出稳定或缓慢减小的趋势,这可能是由于分解有机质的微生物大多生产在沉积物表层,随着深度增加微生物的数量会逐渐减少,同时还原性缺氧环境使微生物分解有机质的作用大大减弱^[12]。在10~20 cm层,TN和ON质量比骤然减少,出现一个较大的累积峰,结合粒径年代分析结果,这一变化的主要原因是由于九龙口地区20世纪60年代后人类活动增多,人类干扰强度增大,特殊的堆积方式改变了沉积物氮素的分布规律,大量农药化肥流入湖区致使氮素大量累积沉淀。同时,该区20世纪70年代后气候由干旱期转变为湿润期,雨季的增加也使得氮素的淋失作用更加明显,有助于氮素累积峰的形成。在0~10 cm层,TN质量比随深度减小而减小,这一变化与人类活动的转变密切相关。20世纪80年代以后,政府加大了对九龙口地区湖荡湿地的治理,并于1987年在该处建立了九龙口湿地生态保护区,提高了周边工业废水处理能力,减少了农药使用量,入湖营养物质得到有效控制。

在空间分布上,3个测点氮素质量比由大到小顺序为JLK3、JLK4、JLK1,其中,JLK1和JLK4平均质量比相近,JLK3明显高于其余两者,这可能与JLK3接受的陆源氮较多有关,该点位于湖心区,大量陆源物质随径流入九龙口,再经过水动力的冲刷大量堆积于此。此外,JLK3的沉积物粒径较小,易于碳氮的富集,这也是氮素质量比偏高的主要原因之一^[13]。

九龙口沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是无机氮的主要存在形式,平均质量比为156.4 mg/kg,变幅为34.2~297.6 mg/kg,占TN质量分数的4%。通常情况下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比大小与可降解有机物含量、沉积环境及水动力状况有关。在还原环境中,由ON氨化作用释放出来的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 易发生累积,且柱状沉积物中沉积物环境的还原性会随深度的增加而增加,因此, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比通常表现为自上而下逐渐增加的趋势。从图4中可以看出,九龙口沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量比垂向变化在上半层即0~15 cm层基本符合

随深度增加而增大的规律,这与 TN、ON 的垂向剖面特征相对应,进一步说明九龙口沉积物中无机氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。但在 15 cm 以下,沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比明显随深度的增加而减少。其原因除了与氮素总量减少、氨挥发、微生物量减少相关外,也与植物根系吸收有关。因为该地区主要为砂质土壤,黏粒含量较少,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附作用较差,且在 15 cm 以下芦苇根状茎发达,对有效态氮素吸收量较多,导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比显著下降。

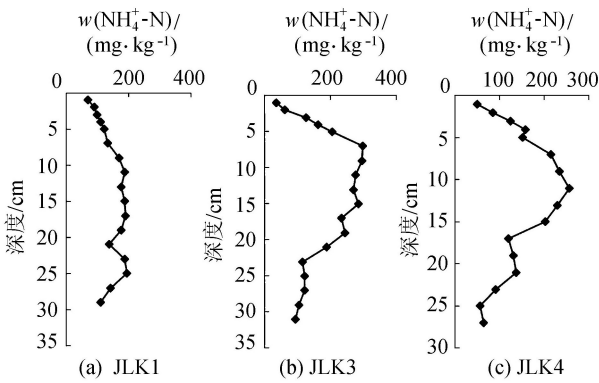


图4 沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量比垂向分布

2.3 TOC 垂向变化特征

TOC 的质量分数可反映沉积物腐殖质含量的变化,同时也反映湖泊的营养化程度。九龙口沉积物中 TOC 质量分数平均值可达 8.40%,变化幅度为 0.66% ~ 14.96%,变异系数为 48.3%。垂向分布上,各测点的 TOC 质量分数表现为随深度呈波状减小的趋势,且垂向上具有明显的分层性(图 5)。0 ~ 15 cm 层 TOC 质量分数随深度减小而减小,这一剖面分布特征可能与 TOC 的矿化和可溶性 TOC 的淋失相关,该时期降水量不断增加导致表层可溶性 TOC 的淋失量增大;同时,湖荡围垦开发后,传统农业种植向圩内水产养殖发展,湖荡区芦苇等植被减少导致有机质输入量的减少。此外,九龙口湖区水深仅 1 ~ 2 m,湖泊表层沉积物易受风浪影响而发生再悬浮,导致 TOC 再次矿化分解。在沉积物 15 cm 以下,TOC 质量分数波动较大,随深度增加而剧烈

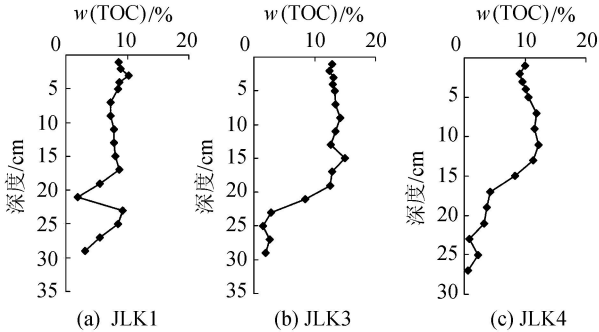


图5 沉积物中 TOC 的质量分数垂向分布

减小,这与氮素含量的突变特征相一致,说明 20 世纪 60 年代以后,频繁的人类活动使入湖 TOC 和 TN 急剧增加。3 个测点虽然变化趋势相同,但剧减深度不一致,在时间上表现为 JLK1 和 JLK3 较 JLK4 更早发生突变,这可能是由于 20 世纪 60 年代以后,围荡种粮大力推行,宝应、兴化、建湖南部的种植业与渔业依托里下河湿地快速发展,九龙口南部受到人类活动污染所致。

2.4 沉积物 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 的变化特征

湖泊沉积物中 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 是判断沉积物中有有机物污染来源的一个重要依据,因此研究沉积物营养盐垂向分布规律有助于了解不同历史时期有机质的输入特征。研究^[14]表明,生物种类不同, $w(\text{C})/w(\text{N})$ 不同,有纤维束植物碎屑的 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 大于 20,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。

由图 6 可知,3 个测点 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 随深度的增加而减小,尤其末端 20 cm 以下部分,减小速度明显增大,且呈波动状态。越深入沉积物底部, $w(\text{C})/w(\text{N})$ 越接近 10,说明沉积物中底层部分随深度的增加,有机质的内源贡献部分越来越大。各测点 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 介于 5.67 ~ 26.08 之间。其中 JLK1 靠陆源较近, $w(\text{C})/w(\text{N})$ 最高,平均值为 22.06,表明该点附近受陆源有机污染较严重。JLK3 的 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 相对较小,但均值仍大于 10,其 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 随着沉积深度的增加出现小幅度的减小,说明近年来内源有机质的比重加大。JLK 4 的 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 平均值最小,在 23 cm 和 27 cm 处的 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 小于 10,最小值仅为 6.89,表明 JLK4 所在的北部湖区受外源有机质影响最小。

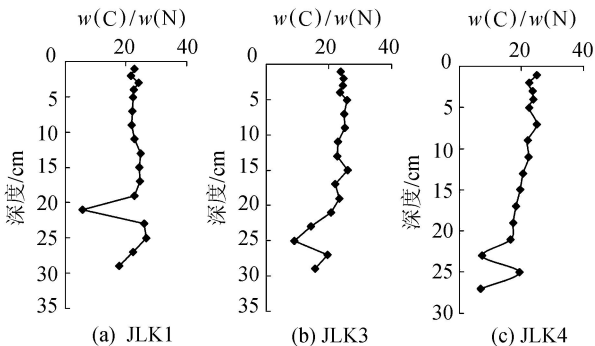


图6 各测点 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 垂向分布

九龙口沉积物中 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 基本没有大幅度的变化,保持稳定的减小趋势。 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 均值指示出沉积物中有机质主要来自有纤维束的陆源植物。由 $w(\text{C})/w(\text{N})$ 分布特征可以看出,3 个测点在 20 ~ 25 cm 处均出现突变点。这种突发变化可能与该沉积段所代表年代的流域气候环境的不稳定性有

关。根据相关资料,20 世纪五六十年代降水量小,地表径流贫乏,导致湖泊咸化,不利于植物生长,同时,人类不断的围垦和水利建设使得湖荡区面积日益缩小,湖区水位下降,最终导致湖泊氧化环境增强,有机质被大量降解,不利于存储^[15], $w(C)/w(N)$ 大幅减小。

2.5 各要素之间的关系

沉积物 D_{50} 、TN、TOC、 $w(C)/w(N)$ 相关系数见表 1。3 个测点 TOC 和 TN 呈极显著相关,两者消涨趋势相一致,说明沉积物中氮、碳有同源性。沉积物中 TOC 与 $w(C)/w(N)$ 呈极显著正相关,而 TN 与 $w(C)/w(N)$ 相关性不如前者,说明九龙口地区 $w(C)/w(N)$ 对 TOC 质量比敏感,沉积物 $w(C)/w(N)$ 的大小主要决定于 TOC 的质量比,这与毛志刚等^[16] 关于盐城滨海湿地的研究结论一致。

表 1 九龙口 JLK1 沉积柱各沉积物指标间的相关系数							
测点	沉积物 指标	$w(\text{TOC})$	$w(\text{TN})$	$w(\text{NH}_4^+\text{-N})$	$w(\text{ON})$	D_{50}	$w(C)/w(N)$
JLK1	$w(\text{TOC})$	1.000	0.697 **	0.010	0.684 **	-0.240	0.806 **
	$w(\text{TN})$		1.000	-0.262	0.998 **	-0.593 *	0.144
	$w(\text{NH}_4^+\text{-N})$			1.000	-0.322	0.096	0.279
	$w(\text{ON})$				1.000	-0.588 *	0.124
	D_{50}					1.000	0.150
	$w(C)/w(N)$						1.000
JLK3	$w(\text{TOC})$	1.000	0.987 **	0.515 *	0.987 **	-0.041	0.908 **
	$w(\text{TN})$		1.000	0.527 *	0.999 **	-0.003	0.846 **
	$w(\text{NH}_4^+\text{-N})$			1.000	0.489 *	0.323	0.406
	$w(\text{ON})$				1.000	-0.020	0.847 **
	D_{50}					1.000	-0.162
	$w(C)/w(N)$						1.000
JLK4	$w(\text{TOC})$	1.000	0.984 **	0.662 **	0.986 **	0.830 **	0.847 **
	$w(\text{TN})$		1.000	0.743 **	1.000 **	0.855 **	0.772 **
	$w(\text{NH}_4^+\text{-N})$			1.000	0.724 **	0.521 **	0.377
	$w(\text{ON})$				1.000	0.859 **	0.780 **
	D_{50}					1.000	0.660 **
	$w(C)/w(N)$						1.000

* 表示显著性水平为 0.05 (显著); ** 表示显著性水平为 0.01 (极显著)。

3 个测点各要素关系也存在空间差异。JLK1、JLK3 的 TN、TOC 与 D_{50} 之间无明显的相关性, JLK4 的 TN、TOC 与 D_{50} 之间呈显著正相关。从粒度的变化曲线上可以看出,在粒径增大的位置, JLK3 与 JLK4 的 TOC 值会出现相应的减小,而 JLK1 的 TOC 质量比则表现出随粒径的增大而增加。这与粒径小的颗粒比表面积大,具有更强的 TOC 吸附功能不符。可能是由于 JLK1 离陆源输入河流较近,大量粗粒有机质难以搬运就近沉积下来。同时, JLK1 的 TN 与 $w(C)/w(N)$ 无显著相关性,这与 JLK3、JLK4 差异明显,说明南部湖区入湖营养物质受陆源植物碎屑影响的同时,还受到其他氮源影响。20 世纪 60 年代以来,里下河湖荡区大量围圩养殖导致湖荡面

积不断缩小,水质营养化速度加快,湖荡区农药、鱼药等污染物质的流入和沉积,使湖区氮素出现异常变化,九龙口南部河流受人类活动污染较重。

3 结 论

a. 九龙口沉积物 D_{50} 变化范围为 13.44 ~ 82.01 μm , JLK4 D_{50} 分布特征与 JLK1、JLK3 相反,反映出九龙口湖荡区正由北向南萎缩。3 个测点沉积物垂向剖面特征可分为 3 个变化层段,即沉积物 25 ~ 30 cm 层、10 ~ 25 cm 层、0 ~ 10 cm 层,对应的沉积年代分别为 1931—1950 年、1951—1979 年、20 世纪 80 年代以后。

b. 九龙口沉积物中氮素主要为 ON, TN 中 ON 占 90% 以上, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是无机氮的主要形式。TN、ON 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比的垂向分布特征存在差异。3 个测点 TN 和 ON 均主要集中在沉积物表层,且随着沉积物深度的增加其浓度逐渐降低, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量比随着深度的增大先逐渐增加后迅速减小。氮素的变化与九龙口地区 20 世纪 50 年代以来人类活动的历史背景相一致。

c. 沉积物中 TOC 的质量分数平均值可达 8.40%, 变化幅度为 0.66% ~ 14.96%, 变异系数 48.3%。垂向分布上,各测点的 TOC 表现均具有明显的分层性。0 ~ 15 cm 层 TOC 质量分数随深度减小而减小; 15 cm 以下 TOC 质量分数波动较大,随深度增加而剧烈减小。

d. 沉积物 $w(C)/w(N)$ 介于 5.67 ~ 26.08 之间,主要集中在有纤维束的陆生高等植物范围,表明九龙口沉积物有机质以外源为主。 $w(C)/w(N)$ 垂向分布趋势为由表层向下逐渐减小,有机质外源贡献逐年不断增大。各要素相关性分析中, TOC 和 TN 呈极显著相关,且 $w(C)/w(N)$ 对 TOC 质量分数敏感。3 个测点间也存在空间差异,南部湖区 JLK1 受河流陆源碎屑影响的同时,受到人类活动的影响较大。

参考文献:

[1] 柯长青. 苏北里下河地区湿地资源的可持续利用研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2001, 11 (增刊 1): 39-41. (KE Changqing. Sustainable exploitation and utilization of wetland resources in Lixiahe region, northern Jiangsu [J]. China Population, Resources and Environment, 2001, 11 (S1): 39-41. (in Chinese))

[2] 谭少华,倪绍祥,周飞. 苏北里下河地区湿地资源可持续利用的思考 [J]. 农村生态环境, 2003, 19 (3): 61-64. (TAN Shaohua, NI Shaoxiang, ZHOU Fei. Sustainable utilization of wetland in Lixiahe region in north Jiangsu Province [J]. Rural Eco-environment, 2003, 19 (3): 61-

64. (in Chinese))
- [3] 凌申. 里下河湿地休闲渔业旅游 SWOT 分析与发展对策: 以盐城市九龙口湿地为例[J]. 资源与产业, 2012, 14(1): 106-110. (LING Shen. A case study on Yancheng's Jiulongkou wetland: SWOT analysis and strategy of Lixia River wetland fishery tourism [J]. Resources & Industries, 2012, 14(1): 106-110. (in Chinese))
- [4] 凌申. 江苏九龙口湿地生态旅游的开发[J]. 资源调查与环境, 2003, 24(4): 275-280. (LING Shen. Development of wetland eco-tourism of Jiulongkou in Jiangsu [J]. Resources Survey & Environment, 2003, 24(4): 275-280. (in Chinese))
- [5] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [6] 谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原江陵湖泊沉积物粒度特征及气候环境意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 570-577. (XIE Yuanyun, LI Chang'an, WANG Qiuliang, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Jiangling lake sediments in Jiangnan Plain [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(3): 570-577. (in Chinese))
- [7] 吴必虎. 黄河夺淮后里下河平原河湖地貌的变迁[J]. 扬州师院学报: 自然科学版, 1988, 8(增刊1): 132-138. (WU Bihu. Geomorphological changes of Lixiahe Basin in north Jiangsu Province [J]. Journal of Yangzhou Teachers College: Natural Science Edition, 1988, 8(S1): 132-138. (in Chinese))
- [8] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录: 以沉积物粒度为例[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(6): 563-568. (CHEN Jing'an, WAN Guojiang, ZHANG Feng, et al. An environmental record of lake sediments in different time scales using sediment particle size [J]. Science in China: Series D, 2003, 33(6): 563-568. (in Chinese))
- [9] 陈家其, 姜彤, 许朋柱. 江苏省近两千年气候变化研究[J]. 地理科学, 1998, 18(3): 219-226. (CHEN Jiaqi, JIANG Tong, XU Pengzhu. Climatic change during the last 2000 years in Jiangsu Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(3): 219-226. (in Chinese))
- [10] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 80-86. (HE Huachun, DING Haiyan, ZHANG Zhenke, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 80-86. (in Chinese))
- [11] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. 土壤学报, 2006, 43(2): 247-255. (LIU Jiping, LU Xianguo, YANG Qing, et al. Soil nutrient distribution of annular wetlands in Sanjing Plain [J]. Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 247-255. (in Chinese))
- [12] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 195-199. (YUE Weizhong, HUANG Xiaoping. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River Estuary [J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 195-199. (in Chinese))
- [13] 闫颖, 何红波, 白震, 等. 有机肥对棕壤不同粒级有机碳和氮的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 738-742. (YAN Ying, HE Hongbo, BAI Zhen, et al. Effect of manure application on the organic C and N in brown earth and particle-size fractions [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 738-742. (in Chinese))
- [14] 沈丽丽, 何江, 吕昌伟, 等. 哈素海沉积物中氮和有机质的分布特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 158-165. (SHEN Lili, HE Jiang, LYU Changwei, et al. Distribution characteristics of nitrogen and organic matter in sediments of the Hasu Lake [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 158-165. (in Chinese))
- [15] 翟秋敏, 郭志永, 沈娟. 豫西渑池盆地湖泊沉积特征与古环境[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 922-928. (ZHAI Qiumin, GUO Zhiyong, SHEN Juan. Sedimentary characteristics of lacustrine sediment profile and paleoenvironment in Mianchi Basin, Western Henan Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(8): 922-928. (in Chinese))
- [16] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(2): 293-297. (MAO Zhigang, WANG Guoxiang, LIU Jin'e. Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 293-297. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-04-10 编辑: 徐娟)

