

巢湖沉积物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  记录的生态环境演化过程周志华<sup>1,2</sup>, 刘丛强<sup>1</sup>, 李军<sup>1</sup>, 朱兆洲<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 天津师范大学水环境与水资源重点实验室, 天津 300074)

**摘要:**通过对巢湖 2 处柱状沉积物样品中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、C/N 比值、TOC 和 TN 含量的测定, 分析了近百年来巢湖沉积物有机质的来源, 探讨受人类活动影响的湖泊生产力变化和富营养化过程. 结果表明, 巢湖沉积物有机质的主要来源是水生藻类, 陆生有机质的输入量较少, 但是城市污染物的输入与农业面源污染的影响是不可忽视的. 巢湖沉积物剖面上,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、TOC 和 TN 含量变化按沉积深度可以明显划分为 2 个阶段: ① 10 cm 以下, H3 点  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  波动在  $-21.74\%$  ~  $-19.34\%$  的范围内, 其余数据表现相对平缓, 湖泊内的生物物种是固氮植物和非固氮植物共存, 2 个采样点具有不同的湖泊营养化进程; ② 10 cm 至表层段, 2 个剖面的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  迅速减小,  $\delta^{15}\text{N}$ 、TOC 和 TN 则是显著增大, 巢湖闸的建成使得内源营养物质快速积累, 湖泊初始生产力水平迅速提高, 富营养化加剧.

**关键词:** 巢湖; 沉积物; 有机碳同位素; 氮同位素; 有机质来源; 沉积环境

**中图分类号:** X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2007)06-1338-06

Record of Ecosystem Evolvement Processes Provided by  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  Values in Chaohu Lake SedimentsZHOU Zhi-hua<sup>1,2</sup>, LIU Cong-qiang<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, ZHU Zhao-zhou<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Aqueous Environment and Water Resource, Tianjin Normal University, Tianjin 300074, China)

**Abstract:** Variations of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values, C/N ratios, TOC and TN contents in Chaohu Lake sediments reflect the sources of organic matter in lake sediments, evolution of lake productivity and the eutrophic status in Chaohu Lake during last 100 years. Our results suggest that the sedimentary organic matter was derived mainly from aquatic algae and partly from land matter. However, the input of the pollutants from city and agriculture into the lake could not be neglected. Two stages can be found in the sediments cores according to the profiles of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  values, TOC and TN contents. Below 10cm,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values vary between  $-21.74\%$  and  $-19.34\%$ . Nitrogen fixing and non-nitrogen fixing phytoplankton coexist together. Two cores show different nutrition processes. Above 10cm, in both profiles, the values of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  start to decrease sharply, but  $\delta^{15}\text{N}$ , TOC and TN increase. The construction of Chaohu Gate leads to the enhancement of lake productivity and development of eutrophication.

**Key words:** Chaohu Lake; sediment; organic carbon isotope; nitrogen isotope; sources of organic matter; sedimentary environment

巢湖位于长江中下游的安徽省中部, 是合肥市的重要水源地, 也是我国富营养化严重的三大湖泊之一. 湖泊总面积  $760\text{ km}^2$ , 东西长  $54.5\text{ km}$ , 南北平均宽  $15.1\text{ km}$ , 平均水深  $2.4\text{ m}$ . 风浪扰动作用强烈, 入湖河流携带大量泥沙, 湖水总悬浮物含量高, 蓝藻发育, 透明度低. 湖泊基底是晚更新世的下蜀黄土层, 上部的现代沉积物厚度约为  $50\sim 100\text{ cm}$ <sup>[1-6]</sup>. 近百年来, 由于流域农业和城市化的发展, 导致湖水营养盐含量增加, 逐渐形成富营养化湖泊. 尤其是在 1962 年巢湖市西南出口处建成的巢湖闸, 使得湖水滞留时间显著增加, 汇水盆地污染物大量排入湖中, 湖泊水体受到更为严重的污染.

湖泊的自然演化以及受人类影响的演变信息不

仅可以用来了解湖泊的现状, 更有利于展望湖泊系统未来的发展<sup>[7]</sup>. 因此有关巢湖的各项研究早在 20 世纪 80 年代就已经广泛开展, 然而目前已有的研究工作多是通过湖泊水质、浮游藻类、沉积物粒度以及饱和烃碳数分布等参数, 来探讨巢湖的沉积环境<sup>[1, 5, 8]</sup>, 并对湖泊水质的改善方法提出一定见解. 利用稳定同位素示踪的方法, 来探讨巢湖沉积物的有机质来源的研究尚不多见, 尤其是利用氮同位素示踪近百年来巢湖沉积环境演化过程的研究尚未见到相关报道.

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2006-09-30

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-12)

作者简介: 周志华 (1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: basalin@sina.com.cn

湖泊沉积物中的有机质能够保存浮游植物种类更替、原始生产力水平状况、水体的营养状况转变过程、自然因素控制的水质改变进程等重要历史信息,为恢复湖泊古环境和古气候提供重要依据<sup>[9~14]</sup>.湖泊沉积物中稳定同位素比值的测定则是湖泊生态系统古环境历史重建的最有效手段之一.本研究通过对巢湖柱状沉积物样品中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、C/N 比值、TOC 和 TN 含量的测定,分析了近百年来湖泊沉积物有机质的来源,探讨了受人类活动影响的湖泊生产力变化和富营养化过程.

## 1 材料与方法

利用中国科学院南京地理与湖泊研究所自行研制的柱状采样器,于2002-10在巢湖采集了2个点的沉积物柱样品,采样位置为图1中H2(31°35'48"N, 117°24'24"E)点和H3(31°31'55"N, 117°36'13"E)点.现场测定了采样点的基本理化性质数据(表1).

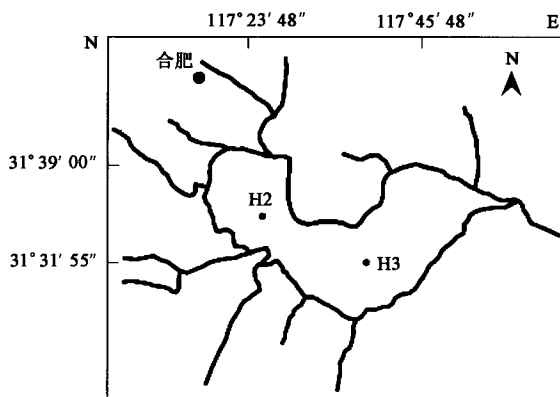


图1 巢湖流域采样点位置

Fig.1 Sampling sites in Chaohu Lake

表1 采样点的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the sample sites

指标	H2	H3
水深/m	3.3	3.8
沉积物深度/m	> 1	> 3
沉积物与上覆水体界面温度/°C	20.2	20.8
pH	7.86	7.95
电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	242	235
总溶解质含量(TDS)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	117	115
溶解氧(DO)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.94	4.30
盐度/‰	0.1	0.1

采集到的沉积物剖面长24 cm,现场以1 cm间隔分样,4°C下密闭保存.样品在实验室内用离心机离心,分离沉积物和孔隙水.分离出的沉积物样品再进行真空冷冻干燥,研磨,用于测量有机碳含量、总氮

含量、有机碳与总氮比值、有机碳同位素组成以及氮同位素组成.

### 1.1 总有机碳和总氮含量

取出1 g 研磨后的样品,加入盐酸去除碳酸盐,用元素分析仪(PE2400 II型)测定总有机碳(TOC)、总氮(TN)含量,并且计算有机碳/总氮的比值(C/N)(表2).

### 1.2 有机碳、氮同位素组成

有机碳、氮同位素测量采用熔封石英高温燃烧法<sup>[15]</sup>,产生的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{N}_2$ ,通过气体质谱仪MAT-252测量(表2).有机碳、氮同位素分析的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 与 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 分别对应国际标准PDB与大气中的 $\text{N}_2$ ,以国际纤维素标准IAEA-C3( $\delta^{13}\text{C} = -24.91\text{‰}$ ),标准 $\text{KNO}_3$ ( $\delta^{15}\text{N} = 1.92\text{‰}$ )为参考标准,分析误差小于0.10‰.计算公式为:

$$\delta^{13}\text{C}, \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = (R_{\text{样品}} / R_{\text{标准}} - 1) \times 1000$$

其中, $R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $R = ^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ .

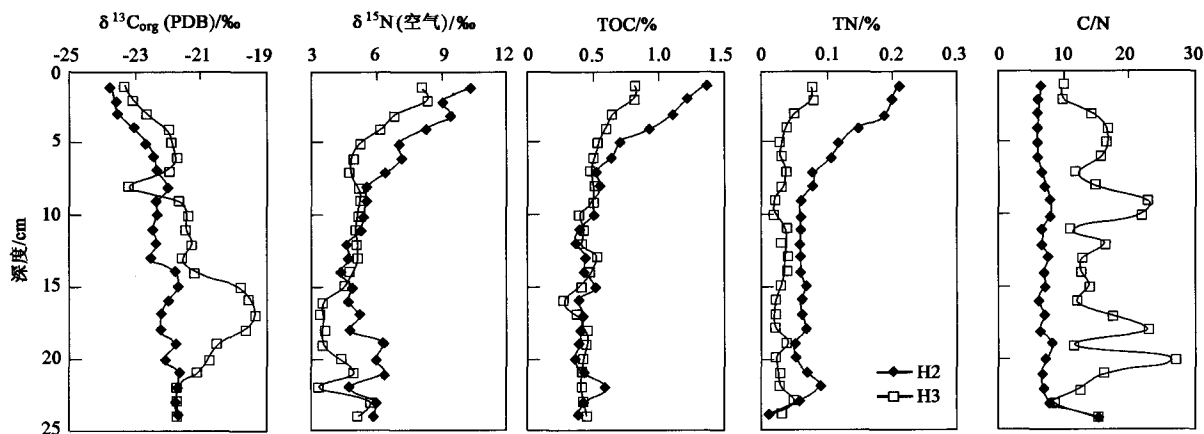
## 2 结果与分析

杜磊<sup>[1]</sup>于同一年中(2002年),在巢湖东、西、北3个湖心处,分别利用 $^{137}\text{Cs}$ 法测定沉积物的沉积年代,3个沉积物柱剖面在9~10 cm深度的沉积年代均指示为1963年,其中,东部采样点与本研究中H2点的位置接近,据此推测,巢湖沉积物柱在9~10 cm深度的沉积年代约为1963年.其测定的平均沉积速率为0.29 cm/a.姚书春<sup>[5]</sup>用同样的方法测定沉积速率的结果为0.27 cm/a,验证了上述结论.因此,本研究采集的24 cm样品柱,沉积年代是二十世纪初至今.

图2表示了巢湖H2和H3点沉积物剖面各项指标随沉积深度的变化趋势,从图2可以看出,2个沉积物剖面的相关地球化学记录具有一定的可对比性.H2点沉积物的有机碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ),沿剖面从下层向上层逐步偏负,而H3点的有机碳同位素组成变化趋势却有所不同,从剖面底层向上到17 cm深度, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值逐步偏正,数值最大达-19.34‰(16~17 cm处),从17 cm深度到表层,H3点的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值重新偏负,尤其是9 cm以上,偏负趋势显著. $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 剖面整体呈现镜像相反趋势.H2和H3点沉积物的 $\delta^{15}\text{N}$ 剖面在10 cm以下的数值相类似,同样保持较稳定的低值,从9 cm开始迅速偏正,偏正趋势相近,到沉积物表层,H3点的 $\delta^{15}\text{N}$ 剖面从5.24‰增大到8.13‰,H2点 $\delta^{15}\text{N}$ 剖面从5.47‰增大

表2 巢湖H2、H3采样点沉积物柱的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、TOC、TN、C/N剖面测定值Table 2 Results of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values, TOC and TN contents, C/N ratios in site H2, H3 sediment cores in Chaohu Lake

深度/cm	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (PDB)/‰		$\delta^{15}\text{N}$ (空气)/‰		TOC/%		TN/%		C/N	
	H2	H3	H2	H3	H2	H3	H2	H3	H2	H3
0~1	-23.69	-23.28	10.43	8.13	1.36	0.82	0.21	0.08	6.50	9.98
1~2	-23.60	-23.03	9.04	8.31	1.22	0.81	0.20	0.08	6.11	9.88
2~3	-23.45	-22.66	9.38	6.71	1.11	0.65	0.19	0.05	5.98	14.13
3~4	-22.99	-22.00	8.28	6.15	0.93	0.59	0.15	0.04	6.11	16.77
4~5	-22.73	-21.91	7.01	5.19	0.70	0.53	0.12	0.03	5.93	16.47
5~6	-22.41	-21.77	7.12	4.85	0.64	0.51	0.11	0.03	6.02	15.84
6~7	-22.36	-21.95	6.40	4.73	0.51	0.48	0.08	0.04	6.58	11.90
7~8	-22.06	-23.22	5.56	5.17	0.55	0.50	0.08	0.03	7.00	14.65
8~9	-22.35	-21.71	5.47	5.24	0.50	0.50	0.06	0.02	8.00	22.82
9~10	-22.30	-21.39	5.37	5.14	0.50	0.40	0.06	0.02	7.84	21.94
10~11	-22.44	-21.45	5.27	5.03	0.39	0.42	0.06	0.04	6.69	10.92
11~12	-22.32	-21.26	4.67	5.08	0.38	0.42	0.06	0.03	6.84	16.15
12~13	-22.54	-21.60	4.77	5.13	0.44	0.53	0.06	0.04	7.62	12.95
13~14	-21.79	-21.19	4.38	4.73	0.43	0.47	0.06	0.04	6.97	12.62
14~15	-21.65	-19.81	4.94	4.60	0.51	0.41	0.07	0.03	7.04	14.00
15~16	-22.01	-19.56	4.63	3.46	0.37	0.27	0.06	0.02	6.08	11.87
16~17	-22.19	-19.34	5.19	3.41	0.43	0.36	0.06	0.02	7.15	17.24
17~18	-22.25	-19.64	4.68	3.66	0.42	0.45	0.07	0.02	6.41	22.65
18~19	-21.78	-20.49	6.29	3.50	0.40	0.45	0.05	0.04	8.27	11.44
19~20	-22.08	-20.76	5.89	4.36	0.35	0.43	0.05	0.02	7.06	27.00
20~21	-21.66	-21.07	6.34	4.91	0.43	0.42	0.07	0.03	6.57	16.15
21~22	-21.71	-21.73	4.70	3.34	0.60	0.41	0.09	0.03	6.78	12.69
22~23	-21.75	-21.69	5.90	5.64	0.44	0.43	0.06	0.05	7.84	8.52
23~24	-21.72	-21.74	5.80	5.09	0.39	0.45	0.01	0.03	—	15.13

图2 巢湖H2、H3采样点沉积物柱的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、TOC、TN、C/N随深度变化趋势Fig.2 Varied curves of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values, TOC and TN contents, C/N ratios in site H2, H3 sediment cores in Chaohu Lake

到10.43‰,在这一深度范围内H3点剖面 $\delta^{15}\text{N}$ 值一直低于H2点。

在沉积物剖面24 cm到10 cm之间,H2和H3点的总有机碳(TOC)含量保持稳定的一致性,但是从剖面9 cm深度向表层则呈现出迅速增大的趋势,H2点的剖面变化幅度要远大于H3点,在沉积物表层,H2点TOC含量达到1.36%,而H3点只有0.82%,相差近2倍。2处沉积物柱中,总氮的变化趋势与总有机碳的变化趋势类似,但是整体含量比有机碳含量低5~10倍。在10 cm以下的剖面中,H2和H3点TN剖面同样基本处在1个相对稳定的低值范围内,

从9 cm深度处开始总氮含量迅速升高,H2点剖面的增长趋势仍然高于H3点,到沉积物表层两者的TN相差近3倍。H2点有机碳与总氮比值(C/N)的变化范围在5.93~8.27之间,变化趋势平缓,但是H3点C/N比值剖面明显呈现波动变化,且波动范围较大,在8.52~27之间,数值远高于H2点剖面。

### 3 讨论

#### 3.1 同位素与有机物质来源

湖泊沉积物有机质主要有2种来源:①湖泊自身通过光合作用产生,埋藏,保存的有机质和细菌;

②通过扰动来自积水处的有机质,例如,通过沉降保存的叶子、草、土壤有机质,或直接进入湖泊的河流携带物<sup>[12]</sup>. 因为有机物的碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )能反映光合作用过程中,碳的同化作用及其来源<sup>[10,16]</sup>,氮同位素( $\delta^{15}\text{N}$ )组成在不同物质中可以具有不同的数值范围表征,所以有机碳、氮同位素组成经常用来区别沉积物有机质的水生或者陆生来源,同时  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  也可以鉴别源于不同类型陆生植物的有机物质<sup>[10]</sup>. 研究表明<sup>[17]</sup>, C/N 比值在典型藻类中的测量值为 4 ~ 10 之间,在脉管植物中却大于 20. 因此  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  和 C/N 比值的综合分析可以比较准确地判别沉积物有机质来源.

Meyers 等<sup>[18]</sup> 在湖泊有机地球化学研究中得出结论,沉积物的成岩作用不会引起氮素可检测到的同位素分馏. 一般来说,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和 C/N 在反映物源以及湖泊初始生产力的同时也受到早期成岩作用的影响. 在沉积物沉降保存过程中,早期成岩作用可以导致沉积物有机质  $^{13}\text{C}$  的亏损,使得  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  降低<sup>[19]</sup>. 也有研究表明<sup>[10,12]</sup>, 在早期成岩过程中 N 通常优先于 C 矿化,有机质的选择性降解可能改变了 C/N 比值,有机质沉降过程中藻类有机质的降解可以减少蛋白质的成分,致使 C/N 比值增高. 但是如图 2 所示的实验结果中,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和 C/N 趋势线均没有明显的上述走势, H2 点在 15 cm 以下的剖面中, TN 含量并不低于 10 ~ 15 cm 之间的剖面数值,且 C/N 比值在整个剖面中没有明显波动, H2 点的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  在 15 cm 以下剖面中的数值也是相对上部偏正的,显然早期成岩作用对于 H2 点 24 cm 以上的沉积过程没有影响. H3 点  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值在下部剖面偏正,但是在 C/N 比值的剖面上出现个别层位增大的现象,所以不能根据以上的推论简单判别是否存在成岩作用的影响. 因此绘制了 H3 点沉积物剖面上  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  与 TOC、C/N 的关系图(图 3). H3 点的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  与 TOC、C/N 没有相关性,说明  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  没有受到成岩作用的影响,或者影响较小,没有导致同位素发生明显变化<sup>[18,20]</sup>. 因此  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  和 C/N 等数据剖面完全可以指示沉积物有机质来源和初始生产力,也可以有效地指示湖泊环境演化过程.

沉积物中氮同位素组成能反映有机物质来源<sup>[16]</sup>的直观参考是:藻类的  $\delta^{15}\text{N}$  约为 8‰,陆生物质约为 1‰<sup>[12]</sup>. 外源输入中氮负荷的增加也可以导致  $\delta^{15}\text{N}$  升高.  $\delta^{15}\text{N}$  的变化也可以反应农业化肥以及城市污染物的输入. 巢湖 2 点沉积物剖面的氮同位素

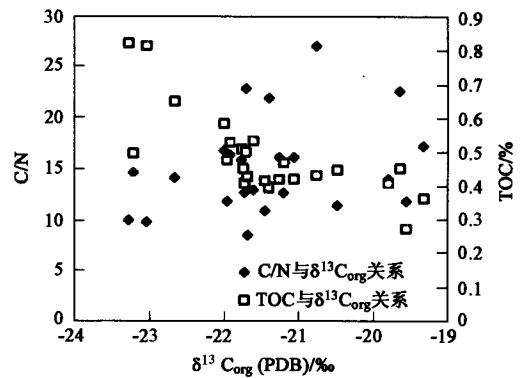
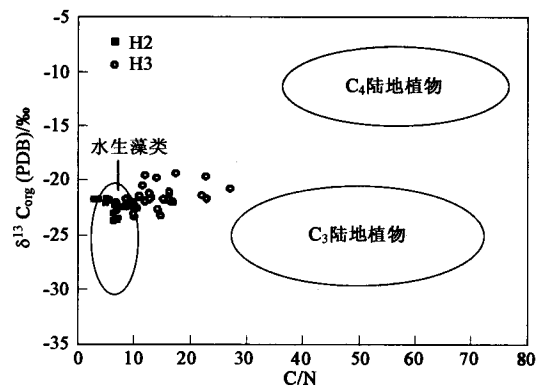


图 3 巢湖 H3 点沉积物剖面  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  与 C/N、TOC 的关系

Fig. 3 Relationship of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values and C/N ratios, TOC contents in site H3 sediment core in Chaohu Lake

组成非常接近,在 3.34‰ ~ 10.43‰ 的范围内,推测 H2 和 H3 点的沉积物有机质来源应该是以藻类为主,城市污染物以及农业面源污染物的输入都对巢湖沉积物的有机碳和氮记录产生影响,而且对 H2 和 H3 点的影响程度不同. 根据图 4 所示,不同物质来源的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  与 C/N 比值的变化关系显示, H3 点的数据值多位于水生藻类和陆生植物范围间,图 2 中 H3 点剖面的  $\delta^{15}\text{N}$  值相对较低, C/N 比值却较高,说明陆生物质的输入是不容忽视的, H3 点受到巢湖流域内农业面源污染比较严重. H2 点沉积物剖面的 C/N 比值分布在典型的藻类 C/N 比值(4 ~ 10)范围内,在图 4 中 H2 的剖面数值也完全在水生藻类的范围内,但是  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值却高于一般的湖泊沉积物数值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  低于  $-25\text{‰}$ <sup>[13]</sup>). H2 点处于受合肥市城市污染输入影响范围内. 目前,巢湖的主要污染物是



水生藻类、 $\text{C}_3$ 、 $\text{C}_4$  陆生植物的典型 C/N 比值与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值范围引自文献<sup>[10,17]</sup>

图 4 巢湖 H2、H3 点沉积物剖面 C/N 比值与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值关系分布范围

Fig. 4 Distinctive source combination of atomic C/N ratios and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values from site H2, H3 sediment cores in Chaohu Lake

$\text{NH}_4^+ \text{-N}^{[21]}$ , 非固氮浮游植物因为吸收富集  $^{15}\text{N}$  的  $\text{NH}_4^+$ , 可以使  $\delta^{15}\text{N}$  值远大于 0<sup>[12]</sup>. 城市污染物的输入也可以导致  $\delta^{15}\text{N}$  值的偏正, 但是综合  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值以及 C/N 比值剖面的表现, 可以判定 H2 点沉积物的物质来源主要是湖泊自身的产物.

### 3.2 湖泊环境演化

沉积物有机质的碳和氮同位素可以有效的重建上覆水体营养盐的古生产力、营养化状态及其演化过程<sup>[12,13]</sup>. 在近百年的时间里, 随着工业化的建设发展, 巢湖流域的农业生产水平迅速提高, 人口高速增长, 生态平衡受到严重破坏, 生态环境发生巨大改变, 巢湖的富营养化程度也迅速加重.

巢湖的有机碳同位素组成在沉积剖面上由下向上层, 随初始生产力提高,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值呈现出如图 2 所示的趋势, 这是因为: ① 水体中  $\text{CO}_2$  和浮游植物间的碳同位素分馏会伴随生产力的增加而减弱, 同时浮游植物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值增高<sup>[12]</sup>, 会直接导致沉积物中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值高于一般湖泊沉积物的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值 (小于  $-25\%$ <sup>[13]</sup>). ② 藻类吸收的  $\text{CO}_2$  来源会因为受到湖泊环境制约而改变. 富营养化初级阶段湖泊的生产力得到提高, 藻类吸收的  $\text{CO}_2$  部分源于大气  $\text{CO}_2$  ( $-7\%$ <sup>[22]</sup>), 随着营养化加剧, 藻类发育, 水中溶解的  $\text{CO}_2$  与大气  $\text{CO}_2$  的交换平衡被打破, 水体中溶解的  $\text{CO}_2$  已经不能满足藻类的生长需要, 有机质分解作用产生的  $\text{CO}_2$  逐渐被藻类吸收, 导致有机碳同位素组成偏负. ③ 亏损  $^{13}\text{C}$  的碳来源占据重要地位也可能成为  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值出现图 2 所示趋势的原因. 沉积物中亏损  $^{13}\text{C}$  的有机碳可能源于富营养化过程中的化能自养和甲烷自养的微生物生物量的增多. 营养盐的增加为沉积物中的微生物提供了丰富的有机碳, 有利于化能自养细菌生物量的增多<sup>[11]</sup>. 巢湖有机碳同位素组成的变化范围在  $-23.69\% \sim -19.34\%$  之间, 比大部分湖泊沉积物中有机碳同位素组成 (低于  $-25\%$ ) 相对偏高, 所以在巢湖的富营养化演变过程中, 前 2 种原因更为重要.

沉积物氮同位素丰度的变化可以反映主控浮游植物种类的变化. 固氮浮游植物在溶解无机氮含量低的时候, 能固定空气中的氮, 导致浮游植物中的  $\delta^{15}\text{N}$  接近 0. 非固氮浮游植物因为富集  $^{15}\text{N}$  的  $\text{NO}_3^-$  或者  $\text{NH}_4^+$ , 使得浮游植物中  $\delta^{15}\text{N}$  远大于 0<sup>[12]</sup>. 过去 40a 的巢湖沉积物中  $^{15}\text{N}$  增加也揭示了非固氮浮游植物物种相对于固氮浮游植物的富集增加, 目前, 巢湖沉积物有机质是以非固氮物种占据主体的藻类为主.

沉积剖面从 24cm 深度初始, H2 和 H3 点沉积环境类似, 湖泊整体沉积环境没有区别, 但是在 21 ~ 15 cm 之间 H2 和 H3 点剖面的各项指标出现差异表征, 最明显的是 H3 点剖面  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值增大, 一度达到  $-21.07\% \sim -19.34\%$  的范围, 这就不能简单的解释为湖泊生产力的提高导致浮游植物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值的增高, 藻类与大型水生植物交互生长吸收了部分源于大气的  $\text{CO}_2$  也是原因之一,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值的偏正应该是上述各种原因共同作用的结果, 同时 H3 点的  $\delta^{15}\text{N}$  值在  $3.41\% \sim 4.91\%$  范围内, 可以推测湖泊内的生物物种是固氮植物和非固氮植物共存. C/N 比值的高值, 除了表明陆源物质输入的影响, 也有多物种交互生长的因素存在. H2 点  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  剖面在 21 ~ 15 cm 之间, 是相对平稳减弱的趋势变化, 推测 H2 点已经开始出现湖泊富营养化的趋势, 且合肥市污染物输入也对  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值剖面产生影响.  $\delta^{15}\text{N}$  和 C/N 比值指示 H2 点湖泊环境是以藻类繁育为主. 综上所述, 由于合肥市污染的输入以及周围农业面源污染等多方面人为因素的影响不相同, 巢湖内进行着不均匀的富营养化进程. 在 2 个沉积剖面上, 除了  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值的巨大差异, 在 21 ~ 15 cm 之间, H2 点 TN 和  $\delta^{15}\text{N}$  值也是高于 H3 点的数值, 这是 2 个沉积物采样点受污染程度不同的 1 个表现. 随着湖泊环境演化进程的发展, 湖水的流动及混合交换, 最终导致 2 个采样点的湖泊环境趋近相似表征. 湖泊中溶解的  $\text{CO}_2$  与大气中  $\text{CO}_2$  的交换平衡逐渐被藻类的大量繁育所打破, 有机质分解作用产生的  $\text{CO}_2$  也开始被藻类吸收利用, 碳同位素组成逐渐偏负. 但是 H3 点陆源物质输入仍然在 C/N 比值剖面上有所体现.

在沉积物剖面 10 cm 以下, 湖泊沉积环境发生一定变化, 这应归结为自然环境演化进程中的变化, 受人为污染影响相对较少. 1962 年巢湖市西南出口处巢湖闸的建成, 使得巢湖成为受人工调节的半封闭水体, 湖内水生植物逐渐减少, 湖水的浑浊度增加, 水的自净能力大大降低, 同时, 巢湖闸的建成加速了湖泊自然演化进程, 使得巢湖的富营养化程度日趋严重. 1963 ~ 2002 年间, 巢湖沉积物中 TOC、TN 含量和  $\delta^{15}\text{N}$  值的迅速增大, 这是湖泊生产力提高, 富营养化程度加深的表征. 高生产力时期, 浮游植物被迫利用  $\text{NO}_3^-$ , 富集  $^{15}\text{N}$ , 而营养物质可利用性的降低会导致同位素差异的减小.  $\delta^{15}\text{N}$  值的增加可以指示生产力的增加, 也可以反映湖体中 DIN 输入量的增加. 同时  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值的减小说明 C 和 N 循环在 1963 年后发

生分离,碳的来源改变,  $\text{NO}_x$  需求量增加,富营养化刺激了藻类生产力的提高,随着有机质分解作用的增强,产出更多的  $\text{CO}_2$  被湖泊藻类吸收利用,以湖泊自生水生植物来源为主的有机物  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  值明显偏负. H3 点 C/N 比值剖面相对 H2 点波动大,数值高,就是巢湖流域的农业面源污染的输入对湖泊沉积物影响的体现. H2 点在 TOC、TN 含量和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  值方面的变化比 H3 点显著, C/N 比值却小于 H3 点. 说明 H2 点受到巢湖闸建成的影响较大,这与湖水流动减弱,城市污染输入量增加密不可分.

#### 4 结论

(1) 在近百年的时间里,巢湖经历了湖泊自然演化,以及受人类活动影响的生产力变化和富营养化的过程. 2 个沉积物剖面的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$  和 C/N 比值的综合分析,表明沉积物有机质的来源主要是水生藻类,而陆生物质的输入量较少. 陆地来源的污染主要有流域的农业面源污染以及合肥市污染物的排放. H2 点沉积物的物质来源主要是湖泊自身的产物,也受城市污染输入的影响. H3 点则受到巢湖流域农业面源污染的输入影响.

(2) 巢湖的历史演化进程受巢湖闸建成的影响,可以明显划分为 2 个阶段:二十世纪初到 1963 年前,湖泊以藻类发育为主,湖泊内的生物物种是固氮植物和非固氮植物共存, H2 和 H3 点具有不同的营养化进程;1962 年巢湖闸的建成使得湖水交流量降低,湖水滞留时间增长,在 H2 和 H3 这 2 个沉积物剖面上的表现是  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  迅速减小,  $\delta^{15}\text{N}$ 、TOC 和 TN 则是显著增大,说明湖泊内源营养物质的快速积累,初始生产力水平迅速增大,富营养化加剧.

#### 参考文献:

- [1] 杜磊,易朝路,潘少明. 长江中下游巢湖湖泊沉积物的粒度特征与沉积环境[J]. 安徽师范大学学报, 2004, 27(1): 101~104.
- [2] 李素菊,吴倩,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228~234.
- [3] 陈慧,王进. 巢湖富营养化危害及控制对策[J]. 合肥工业大学学报, 1999, 22(S1): 63~66.
- [4] 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): 22~26.
- [5] 姚书春,李世杰. 巢湖富营养化过程的沉积记录[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 343~347.
- [6] 张崇岱,潘宝林. 巢湖湖盆及其变迁研究[J]. 安徽师范大学学报, 1990, 13(1): 48~56.
- [7] Wu J L, Michael K, Gagan, *et al.* Sedimentary geochemical evidence for recent eutrophication of Lake Chenghai, Yunnan, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2004, 32: 85~94.
- [8] 张之源,王培华,张崇岱. 巢湖营养化状况评价及水质恢复探讨[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5): 45~48.
- [9] Yamamuro M, Kanai Y. A 200-year record of natural and anthropogenic changes in water quality from coastal lagoon sediments of Lake Shinji, Japan [J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 51~61.
- [10] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213~250.
- [11] Hollander D J, Smith M A. Microbially mediated carbon cycling as a control on the  $\delta^{13}\text{C}$  of sedimentary carbon in eutrophic Lake Mendota (USA): New models for interpreting isotopic excursions in the sedimentary record [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(23): 4321~4337.
- [12] Herczeg A L, Smith A K, Dighton J C. A 120 year record of changes in nitrogen and carbon cycling in Lake Alexandrina, South Australia: C, N,  $\delta^{15}\text{N}$ , and  $\delta^{13}\text{C}$  in sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 73~84.
- [13] Andreas L, Gerhard H S, Bernd Z, *et al.* A Lateglacial and Holocene organic carbon isotope record of lacustrine palaeoproductivity and climatic change derived from varved lake sediments of Lake Holzmaar, Germany [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 569~580.
- [14] 顾成军,戴雪荣,张海林. 巢湖沉积物粒度特征与沉积环境 [J]. 海洋地质动态, 2004, 20(10): 10~13.
- [15] Buchanon D L, Corcoran B J. Sealed tube combustions for the determination of carbon-14 and total carbon [J]. *Analytical Chemistry*, 1959, 31: 1635~1638.
- [16] Freudenthal T, Neuer S, Meggers H, *et al.* Influence of lateral particle advection and organic matter degradation on sediment accumulation and stable nitrogen isotope ratios along a productivity gradient in the Canary Islands region [J]. *Marine Geology*, 2001, 177: 93~109.
- [17] Meyers P A. Preservation of elemental and isotope source identification of sedimentary organic matter [J]. *Chemical Geology*, 1994, 114: 289~302.
- [18] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20: 867~900.
- [19] Spiker E C, Hatcher P G. Carbon isotope fractionation of sapropelic organic matter during early diagenesis [J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 5(4): 283~290.
- [20] Talbot M R, Johannessen T. A high resolution palaeoclimatic record for the last 27,500 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotope composition of lacustrine organic matter [J]. *Earth Planet Sci Letters*, 1992, 110: 23~37.
- [21] 王苏民,龚鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998. 80~113.
- [22] Maren V, Birger L, Mirja L, *et al.* Stable isotope signals of eutrophication in Baltic Sea sediments [J]. *Journal of Marine Systems*, 2000, 25: 287~298.