

# 太湖北部沉积物金属和营养元素 的垂向变化及其影响因素\*

陆 敏<sup>1</sup> 张卫国<sup>2</sup> 师育新<sup>1</sup> 俞立中<sup>2</sup> 郑祥民<sup>1</sup>

(1: 华东师范大学地理系, 上海 200062; 2: 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

**提 要** 通过对太湖北部 2 个柱状沉积物进行了  $^{210}\text{Pb}$ 、粒度、金属元素、有机碳、总氮、总磷及磷的形态分析, 探讨了其垂向分布特征及其影响因素. 粒度分析表明, 沉积物呈现随深度变浅而变细的总体趋势.  $^{210}\text{Pb}$  分析显示该区域表层沉积物扰动较为强烈, 并存在侵蚀现象. Cu、Zn、Ni、Li、V、Fe、Al 垂向上的变化主要与粘土含量呈正相关, 其含量表明金属污染不显著. 沉积物 C/N 比值显示有机质主要为陆源性质, 磷以无机磷占绝对组分, 有机磷含量向表层明显升高, 反映了表层沉积物有机磷的输入较多或更好的保存条件.

**关键词** 金属 营养元素  $^{210}\text{Pb}$  粒度 太湖

**分类号** P595 P343.3

太湖是中国第三大淡水湖, 由于其所在的长江三角洲是我国人口密集、经济发达的地区, 人类活动对太湖的干扰较为严重, 其中最突出的表现便是太湖的富营养化问题<sup>[1]</sup>. 为了保护、治理太湖的水环境, 不少单位已开展了大量的研究. 但从研究内容看, 多集中在水体的营养元素研究方面, 对沉积物的研究相对较少, 且主要集中在氮、磷等营养元素上<sup>[2, 3]</sup>, 有关金属元素的报道, 也多限于表层沉积物<sup>[4]</sup>. 研究沉积物地球化学组成的垂向变化, 可以深入理解沉积物对水体污染的贡献, 并有可能提供污染变化的历史信息. 太湖北部由于邻近无锡、常州等工业经济发达城市地区, 是太湖污染较为严重的地区<sup>[3, 5]</sup>. 本文通过该区域柱样的地球化学和粒度分析, 结合  $^{210}\text{Pb}$  测年, 探讨了金属元素和营养元素 C、N、P 在沉积物中的垂向累积特征及其影响因素.

## 1 样品与方法

### 1.1 样品采集

2001 年 8 月在太湖北部采集了两个柱样 TH-1 (31°23'48" N, 120°08'55" E)、TH-2 (31°21'24" N, 120°08'45" E) (图 1), 长约 40 cm. 现场密封好后带回实验室, 按 1 cm 间隔分样, 所得样品于 40℃低温烘干后研磨备用.

### 1.2 样品分析方法

金属元素分析采用硝酸—氢氟酸—高氯酸全消化法处理<sup>[6]</sup>, 在 ICP-AES (Perkin-Elmer Plasma 2000)上测定 Zn, Cu, Li, Ni, V, Ti, Fe, Mn 和 Al .

\* 国家自然科学基金 (40001020)、上海市重点学科联合资助项目.

2001-12-02 收稿; 2003-03-24 收修改稿. 陆敏, 女, 1963 年生, 讲师, 硕士. Email: lumnn@online.sh.cn

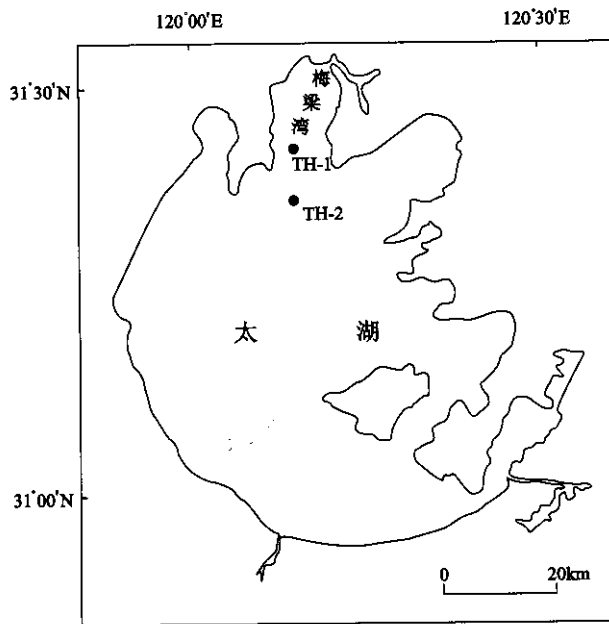


图1 研究区域及采样站位

Fig.1 Map of study area showing sampling sites

营养元素分析包括有机碳、总氮、总磷，并对部分样品作了磷的形态分析。有机碳用重铬酸钾—硫酸外加热法测定；总氮采用半微量开氏法分析；总磷采用高氯酸—硫酸消煮处理样品、钼锑抗显色比色法测定<sup>[7]</sup>。分级磷采用 Ruttenberg<sup>[8]</sup>、Anderson and Delaney<sup>[9]</sup> 的连续分级提取方案，并作一些修改，具体步骤为：a) 铁氧化物结合磷，用 0.1 mol/L 氢氧化钠—0.05 mol/L 碳酸钠提取 4 h；b) 自生钙结合磷，用 1 mol/L 醋酸钠提取 2 h；c) 碎屑磷，用 1 mol/L 盐酸提取 16 h；d) 有机磷，将上一步残渣在 550℃ 高温下灰化 6 h，再用 1 mol/L 盐酸提取 24 h。各步提取离心后的溶液用磷钼兰比色法测

定。

所有样品分析中均进行标样 GSD9 的分析，并作了空白和平行样的分析。对于所有元素，标样 GSD9 的测值均与推荐值的差值不超过 10%，样品的分析精度好于 10%。四步分级磷提取之和与总磷的差值在 10% 以内。

<sup>210</sup>Pb 测年采用  $\gamma$ 能谱法<sup>[10]</sup>。称取 3 g 左右样品，装入直径 1 cm 圆柱状样品管中，装样高度为 4 cm，密封 3 周后，使用 EG&G ORTEC 生产的井型探头 (GWL-120210-S) 测量，利用 46.5 keV、351.9 keV 特征峰作为总 <sup>210</sup>Pb 和补偿 <sup>210</sup>Pb 的比活度计算，二者的差值即为过剩 <sup>210</sup>Pb 的比活度。测量时间一般为 80000 s 左右。

粒度分析采用激光粒度分析仪 (Coulter LQ-100Q) 进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 粒度组成

两孔沉积物皆以粉砂为主，含量为 58.0%—79.4%；其次为粘土，含量 18.9%—41.7%；砂含量甚微，不足 1%。沉积物类型属粉砂、粘土质粉砂。平均而言，TH-1 孔粘土含量较高。垂向上，两孔沉积物自底部向表层，粘土含量呈上升趋势，但 TH-1 孔 3—5 cm 深度，粘土含量有一明显下降趋势。粉砂粒级的垂向变化正好呈相反的趋势 (图 2)。

### 2.2 <sup>210</sup>Pb 的垂直分布

表 1 显示，补偿 <sup>210</sup>Pb 比活度为 35.8—56.7 Bq/kg，与他人在本地区所报道的值非常吻合 (40.5—56.2 Bq/kg, Appleby, 私人通讯)。但总 <sup>210</sup>Pb 比活度仅为 29.9—53.6 Bq/kg，因此，过剩 <sup>210</sup>Pb 比活度很低，甚至为负值。TH-1 孔中，表层沉积物过剩 <sup>210</sup>Pb 比活度不存在，而

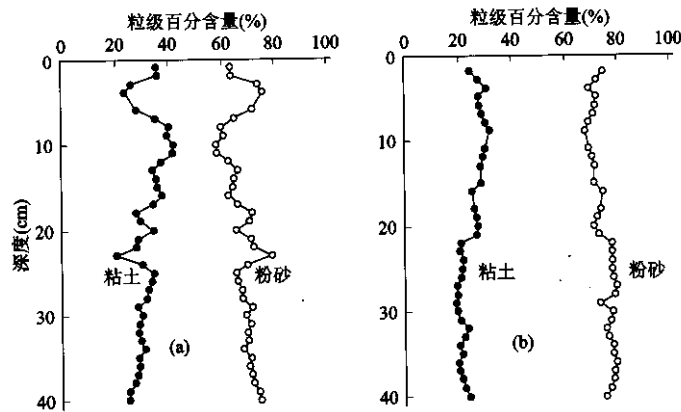


图 2 柱样 TH-1 (a)、TH-2 (b) 粒度组成的垂向变化

Fig.2 Vertical variations of particle size compositions for core TH-1 (a) and TH-2 (b)

9 cm 以下过剩  $^{210}\text{Pb}$  随深度递增而下降, 倘若采用恒定初始浓度 (constant initial concentration, CIC) 模式<sup>[11]</sup>, 可计算出该段沉积物平均沉积速率为 2.8 mm/a. 据报道, 西太湖梅梁湾 1931—1988 年间平均沉积速率为 1.8 mm/a<sup>[12]</sup>, Appleby 对梅梁湾一个柱样的测定计算出 24 cm 深度以下沉积速率为 3.1 mm/a<sup>①</sup>, 与本文的结果总体吻合. 需要指出, 本文得出的沉积速率只是推算值, 有待进一步的证据确认. 深度 TH-2 孔则整个深度内不存在过剩  $^{210}\text{Pb}$ , 因此, 无法利用  $^{210}\text{Pb}$  对该柱样进行年代确定.

造成表层沉积物过剩  $^{210}\text{Pb}$  不存在的原因, 很可能是采样点处表层沉积物遭受了侵蚀. 太湖是一大型的浅水湖泊, 水深仅 2 m 左右, 风浪对沉积物的扰动强烈. 对样芯的观测也表明, TH-1 孔上部 13 cm 无明显层理发育, 13 cm 以下沉积物变得密实, 并可见粉砂与粘土形成的水平层理, TH-2 孔同样在较深的深度 (32 cm) 以下才出现粉砂与粘土形成的水平层理. 此外, 据 Chang 等人<sup>[13]</sup>对邻近 TH-2 孔的 W1 孔测年数据, 该孔 33 cm 处的  $^{14}\text{C}$  测年 5020±75 a.B.P. 平均而言, 33 cm 以上

表 1 柱样 TH-1、TH-2 中  $^{210}\text{Pb}$  比活度的垂向变化Tab.1 Vertical variations of  $^{210}\text{Pb}$  activities in core TH-1 and TH-2

柱样	深度 (cm)	总 $^{210}\text{Pb}$ (Bq/kg)	补偿 $^{210}\text{Pb}$ (Bq/kg)	过剩 $^{210}\text{Pb}$ (Bq/kg)
TH-1	0-1	45.9±7.8	50.7±1.9	-4.8±8.0
	1-2	46.0±6.9	48.8±2.0	-2.8±7.2
	3-4	40.2±8.7	40.0±2.1	0.2±8.9
	9-10	53.5±7.7	42.7±2.6	10.9±8.1
	14-15	53.4±8.1	43.6±2.5	9.8±8.5
	19-20	45.2±8.1	40.6±2.1	4.6±8.4
	24-25	47.2±9.4	45.0±2.3	2.2±9.7
TH-2	39-40	29.9±6.5	35.8±2.2	-5.9±6.8
	0-1	48.3±8.3	48.8±2.5	-0.6±8.6
	9-10	53.6±9.6	56.7±3.3	-3.2±10.2
	17-18	44.9±6.2	46.8±2.3	-1.8±6.6
	23-24	31.7±6.9	37.8±2.6	-6.1±7.3
	28-29	38.1±4.8	50.9±1.7	-12.8±5.1
	38-39	42.9±7.4	43.3±2.4	-0.4±7.5

① 私人通讯 (Appleby).

aB.P. 平均而言, 33 cm 以上沉积物的平均沉积速率为 0.066 mm/a, 说明采样区域沉积速率极低.

### 2.3 金属元素

两个柱样金属元素的垂向变化范围如下: Cu, 15.8-35.6 mg/kg; Zn, 61.0-136.4 mg/kg; Ni, 26.6-46.2 mg/kg; Li, 36.7-69.0 mg/kg; V, 88.3-142.0 mg/kg; Ti, 3929.2-5508.9 mg/kg; Mn, 840.9-2369.8 mg/kg; Fe, 2.88%-6.24 %; Al, 5.17%-10.13 % (图 3). 平均而言, TH-1 孔金属含量较高(表 2), 但大多元素都未超出页岩的平均含量, 说明人类污染的影响较小. 有关太湖沉积物金属含量的报道较少, 张于平等<sup>[4]</sup>报道的西太湖湖心及东太湖表层沉积物 Cu 为 31.7-37.0 mg/kg, Zn 为 88.5-102 mg/kg, Ni 为 26.2-34.0 mg/kg, 与本文的研究较为吻合, 但梅梁湾沿岸入湖河口附近沉积物中金属含量要明显高于本文中报道的结果, 说明金属污染的影响范围有限.

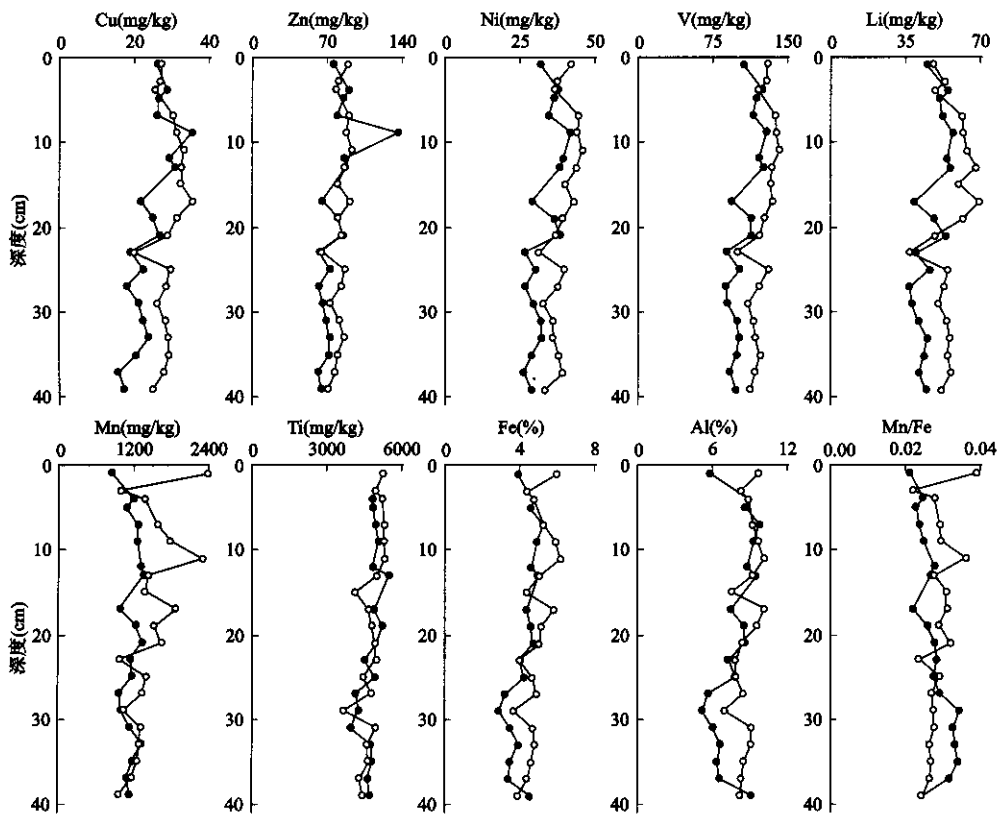


图 3 柱样 TH-1 (空心圈)、TH-2 (实心圈)金属元素含量的垂向变化

Fig.3 Profiles of metal concentrations for core TH-1 (open circle) and TH-2 (closed circle)

总体而言, 自底部至 10 cm 深度, 随着深度的变浅, Cu、Zn、Ni、Li、V、Fe、Al 含量略呈上升趋势, 自 10 cm 至表层, 其含量又呈下降趋势. 沉积物粒度组成是影响金属含量的一个重要因素<sup>[6]</sup>. 相关分析表明, Cu、Zn、Ni、Li、V、Fe、Al 与粘土 (<4 μm)

含量存在显著的正相关 (表 3), 说明这些元素的垂向变化主要由粘土含量控制. Ti 与粘土含量的相关程度较低, 但与  $<32 \mu\text{m}$  粒级的相关程度更高 ( $r=0.59$ ), 反映了 Ti 在粉砂粒级中的富集. Mn 是所有元素中与粘土含量相关性最弱的元素, 这与 Mn 是氧化还原敏感性的元素有关. Mn 在氧化环境下形成稳定的氧化物, 而在还原条件下沉积物中的 Mn 发生还原, 可从沉积物中迁出, 直至在氧化环境中重新沉淀<sup>[15]</sup>. Fe 尽管也是氧化还原敏感性的元素, 但其沉积后再迁移能力要弱于 Mn<sup>[15]</sup>, 故其与粘土含量的相关性较为显著. 因而 Mn/Fe 比值越高, 则指示环境氧化性越强, 反之, 则环境还原性越强. TH-1 孔中 Mn 向表层有明显的增加趋势, Mn/Fe 比值也呈现类似的趋势, 反映了 TH-1 孔表层相对氧化的环境, 而 TH-2 孔上, Mn 及 Mn/Fe 比值向表层却呈下降趋势, 反映了 TH-2 孔沉积物更为还原, 导致 Mn 从沉积物中迁出.

表 2 TH-1 和 TH-2 孔沉积物金属平均含量比较 (除 Fe、Al 单位为%外, 其余为 mg/kg)

Tab. 2 A comparison of mean metal contents in core TH-1 and TH-2 (All in mg/kg except % for Fe and Al)

柱样	Cu	Zn	Ni	V	Li	Ti	Mn	Fe	Al
TH-1	29.1±3.4	81.8±7.5	39.1±4.2	125.0±10.8	55.6±7.5	4839.2±364.4	1618.2±787.2	4.96±0.6	8.83±0.7
TH-2	24.2±5.0	77.2±17.3	33.1±4.9	106.7±13.4	46.9±6.5	4800.2±388.4	1153.8±140.5	4.21±0.6	7.66±1.4
页岩 <sup>[14]</sup>	45	95	50	130	66	4600	850	4.72	8.8

表 3 TH-1、TH-2 孔沉积物金属元素、营养元素与粒度的相关系数 (样品数 n=40)

Tab.3 Correlation coefficients between metals, nutrients and particle size in sediments of core TH-1 and TH-2 (n=40)

	OC	P	N	Cu	Zn	Ni	V	Li	Ti	Mn	Fe	Al	<4 $\mu\text{m}$
OC	1.00												
P	-0.25	1.00											
N	0.62	-0.13	1.00										
Cu	0.52	0.04	0.70	1.00									
Zn	0.44	-0.20	0.62	0.81	1.00								
Ni	0.58	0.09	0.71	0.91	0.76	1.00							
V	0.52	0.07	0.73	0.91	0.74	0.97	1.00						
Li	0.39	0.22	0.58	0.90	0.66	0.89	0.90	1.00					
Ti	0.39	-0.28	0.39	0.34	0.44	0.43	0.45	0.30	1.00				
Mn	0.22	0.05	0.12	0.28	0.16	0.28	0.30	0.28	0.11	1.00			
Fe	0.56	0.01	0.60	0.74	0.63	0.83	0.84	0.76	0.61	0.43	1.00		
Al	0.34	0.04	0.42	0.67	0.59	0.73	0.76	0.75	0.55	0.38	0.91	1.00	
<4 $\mu\text{m}$	0.45	0.22	0.81	0.86	0.68	0.92	0.93	0.85	0.41	0.40	0.86	0.73	1.00

#### 2.4 营养元素

图 4 显示, 底泥有机碳 (OC) 含量在 0.43%—0.81% 之间, 平均值为 0.69%. 底泥 N 含量在 0.043%—0.093% 之间, 平均值为 0.064%. 底泥 P 含量在 440—628 mg/kg 之间,

平均值为 533 mg/kg. OC、N 的剖面变化特征较为相似, 总体而言向表层呈上升趋势, 而 P 与 OC、N 剖面变化差异较大. 与粒度的相关分析表明, OC、N 与粘土含量呈正相关, 而 P 则与细颗粒沉积物含量无明显相关性 (表 3). 因此, OC、N 向表层含量的增加主要是由于沉积物粒度变细所致.

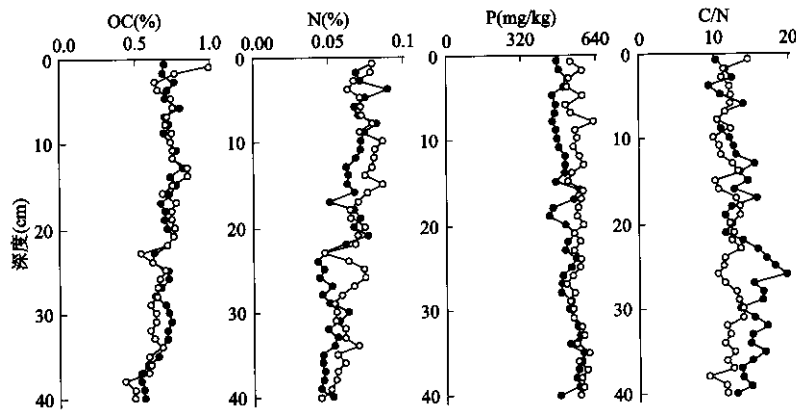


图 4 柱样 TH-1 (空心圈)、TH-2 (实心圈) 营养元素的垂向变化

Fig.4 Profiles of nutrients for core TH-1 (open circle) and TH-2 (closed circle)

有机碳与总氮的比值 (C/N) 可以反映沉积物中有机质的来源, 一般含纤维素的维管陆生植物 C/N > 20, 而非维管植物如浮游植物 C/N 介于 4-10 之间<sup>[16]</sup>. 而太湖底泥 C/N 比值 (图 3) 在 9-20 之间, 大多数在 10-15 变幅范围内, 太湖底泥高 C/N 比值反映陆生植物有机质来源占较高的比例. TH-1 孔 C/N 垂向变化不大, 但 TH-2 孔 20 cm 深度以下 C/N 比值较上层沉积物增加, 可能指示了有机质来源的变化.

对部分样品进行的磷的分级提取表明, 碎屑磷为最主要组分, 占总磷的 60%—73%, 其次为有机磷 (OP), 占 15%—26%, 其它形态磷较低 (表 4). 值得注意的是, 两个柱样表层 (0—1 cm) 沉积物有机磷含量较高, 向下递减, 其与总磷的比值 (OP/P) 也是如此, 这可能是现代沉积物接受了更多的有机磷输入, 或有机磷的保存较好. 两孔相比, 尽管 TH-1 孔表层沉积物粒度更细, 有机碳含量较高, 但 TH-2 孔表层沉积物有机磷含量要高于 TH-1 孔, 袁旭音等人的研究也表明梅梁湾北部沉积物有机磷含量较低<sup>[3]</sup>. 如前所述, TH-1 孔表层沉积物具有明显的 Mn 富集, 而 TH-2 孔表层沉积物 Mn 含量却较低, 这一氧化还原特征的差异是否与两孔表层沉积物有机磷含量的差异具有内在的联系, 有待进一步的研究.

### 3 结论

(1) 太湖北部沉积物中过剩  $^{210}\text{Pb}$  比活度极低, 反映了采样站位沉积速率极低, 或表层沉积物遭受了侵蚀. 两孔尽管空间位置较为邻近, 但粒度组成和  $^{210}\text{Pb}$  垂向分布都存在较大差异, 指示了两孔所在位置沉积动力的差异.

(2) 太湖北部沉积物中金属含量与页岩成分平均含量接近, 表明沉积物金属污染不显著. 沉积物粒度组成对金属含量有显著影响, Cu、Zn、Ni、Li、V、Fe、Al 主要在粘土

中富集, Ti 则在粉砂中富集, 而 Mn 由于是氧化还原敏感性元素, 沉积后再迁移能力强, 与粒度的关系不显著.

表 4 TH-1、TH-2 孔各级形态磷的垂向变化

Tab.4 Vertical variations of phosphorous fractions in core TH-1 and TH-2

柱样	深度 (cm)	铁氧化物结 合磷(mg/kg)	自生钙结合 磷(mg/kg)	碎屑磷 (mg/kg)	有机磷 (mg/kg)	总磷 (mg/kg)	OP/P
TH-1	0—1	23.9	42.7	330.7	105.3	502.5	0.21
	9—10	21.9	51.9	317.1	96.6	487.4	0.20
	19—20	38.4	66.8	364.1	95.7	565.0	0.17
	29—30	40.3	58.4	327.9	91.2	517.7	0.18
	39—40	28.7	45.3	345.2	68.7	473.0	0.15
TH-2	0—1	23.9	38.0	304.7	128.4	503.2	0.26
	9—10	23.5	40.7	307.3	73.2	444.6	0.16
	19—20	31.1	51.6	321.7	102.4	506.8	0.20
	29—30	26.1	38.6	351.7	78.7	495.1	0.16
	39—40	27.6	43.1	357.8	72.9	501.4	0.15

(3) 太湖北部沉积物中有机碳和总氮含量与粘土含量呈正相关, 而总磷与粒度无明显相关. 无机磷是沉积物总磷的主要组分, 有机磷在表层沉积物中含量明显上升, 反映了近期有机磷输入的增加或较好的保存条件.

### 参 考 文 献

- 1 王苏民, 龚鸿身主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 90-96.
- 2 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359-366
- 3 袁旭音, 陈 骏, 陶于祥等. 太湖北部底泥中氮、磷的空间变化和环境意义. 地球化学, 2002, 31(4): 321-328
- 4 张于平, 瞿文川. 太湖沉积物中重金属的测定及环境意义. 岩矿测试, 2001, 20(1): 34-36
- 5 许 刚, 朱振国, 黄建光等. 无锡市社会经济发展对水环境的影响. 湖泊科学, 2002, 14 (2): 166-172
- 6 Loring D H, Rantala T T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. Earth-Science Reviews, 1992, 32: 235-283
- 7 劳家桢主编. 土壤农化分析手册. 北京: 农业出版社, 1988: 229-273
- 8 Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482
- 9 Anderson L D, Delaney M L. Sequential extraction and analysis of phosphorus in marine sediments: streamlining of the SEDEX procedure. Limnology and Oceanography, 2000, 45(2): 509-515
- 10 Appleby P G, Nolan P J, Gifford D W et al. <sup>210</sup>Pb dating by low background gamma counting. Hydrobiologia, 1986, 143: 21-27
- 11 Appleby P G, Oldfield F. Application of lead-210 to sedimentation studies. In: Ivanovich M, Harmon R S, eds. Uranium-series Disequilibrium: Application to Earth, Marine, and Environmental Sciences. Oxford: Clarendon Press, 1992: 731-778
- 12 孙顺才, 黄漪平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993: 129-130

- 13 Chang W Y B, 刘金陵. 11000 年以来太湖的形成与演变. 古生物学报, 1996, 35(2): 129-133
- 14 Turekian K K, Wedepohl K H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. Geological Society of American Bulletin, 1961, 72: 175-192
- 15 Burdige D J. The biogeochemistry of manganese and iron reduction in marine sediments. Earth-Science Reviews, 1993, 35: 249-284
- 16 Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. Chemical Geology, 1994, 114(3-4): 289-302

## Vertical Variations of Metals and Nutrients in Sediments from northern Taihu Lake and the Influencing Factors

LU Min<sup>1</sup>, ZHANG Weiguo<sup>2</sup>, SHI Yuxin<sup>1</sup>, YU Lizhong<sup>2</sup> & ZHENG Xiangmin<sup>1</sup>

(1: Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, P.R.China;

2: State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, P.R.China)

### Abstract

Concentrations of metals, organic carbon (OC), total nitrogen (N), total phosphorus(P) and forms of phosphorus as well as activities of <sup>210</sup>Pb and particle size were determined on two cores from northern Taihu Lake, China. The sediments are dominated by silts and clayey silts, which become finer upward. Results of <sup>210</sup>Pb analysis indicate strong disturbance and erosion at the sampling sites. Concentrations of metals are: Cu, 15.8-35.6 mg/kg; Zn, 61.0-136.4 mg/kg; Ni, 26.6-46.2 mg/kg; Li, 36.7-69.0 mg/kg; V, 88.3-142.0 mg/kg; Ti, 3929.2-5508.9 mg/kg; Mn, 840.9-2369.8 mg/kg; Fe, 2.88-6.24 %; Al, 5.17-10.13 %. Levels of Cu, Zn, Ni, Li, V, Fe and Al show significant positive relationships with the fraction of clay and their down-core variations are therefore caused mainly by particle size. When compared to the mean contents of shale, these metals show no significant anthropogenic pollution. The ratio of OC to N (C/N) range from 9 to 20, suggesting a dominance of detrital input of organic matter. The dominant pool of phosphorus is the detrital form. In both cores, organic phosphorus increases toward the surface layer, implying either higher organic phosphorus input in recent years or its better preservation.

**Keywords:** Metals; nutrients; <sup>210</sup>Pb; particle size; Taihu Lake