

## 不同生态修复措施下太湖西五里湖沉积物氮磷形态的时空分布\*

俞海桥<sup>1,2</sup>, 方涛<sup>1\*\*</sup>, 夏世斌<sup>2</sup>, 敖鸿毅<sup>1</sup>

(1:中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

(2:武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

**摘要:**以太湖西五里湖为研究对象,研究了生态修复工程实施两年后,疏浚区、疏浚并水生植被重建示范区、退渔还湖区及对照区沉积物中氮、磷形态的季节变化及垂直分布特征,同时分析了各区上覆水的氮磷含量。结果表明:生态修复措施的实施对沉积物中氮磷形态分布及上覆水的氮磷含量影响显著。示范区和退渔还湖区水体中氮磷含量较低;沉积物中不同磷形态的垂直分布变化较复杂;疏浚基础上进行的水生植被重建对 Lab-P、Al-P、Fe-P 的吸收作用显著,对 Ca-P、Org-P 的影响较小;退渔还湖区沉积物磷形态以 Ca-P、Org-P 为主,Fe-P 所占比例较低,与疏浚区不同。生态修复措施对沉积物中 TN 的影响较小;示范区  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在秋季突增,可能与植物残体形成的有机质的分解有关。疏浚区水体中氮磷含量与对照区差别不大,沉积物中 TN 的平均含量还略高于对照区,因此单一的疏浚措施对水环境改善的长期作用需要进一步研究。而示范区水体及沉积物中的 TN、TP 含量均比较低,水生植被恢复较好,可见在减少外来污染的前提下,对湖区底泥进行疏浚并开展水生植被恢复工程应该是控制湖泊富营养化的有效途径。

**关键词:**生态修复;氮;磷;沉积物;季节性变化;垂直分布;五里湖;太湖

## Seasonal and vertical distribution of nitrogen and phosphorus in the sediment under different ecological restoration measures in the West Lake Wuli, Lake Taihu

YU Haiqiao<sup>1,2</sup>, FANG Tao<sup>1</sup>, XIA Shibin<sup>2</sup> & AO Hongyi<sup>1</sup>

(1: *Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

(2: *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P. R. China*)

**Abstract:** Dredging and aquatic macrophytes reestablishment were carried out in the West Lake Wuli of Lake Taihu. Total phosphorous and total nitrogen in the water, as well as different forms of phosphorus and nitrogen in the sediment cores of different areas were investigated in different seasons to examine the effects of different restoration measures. The results showed that, the distribution of nitrogen and phosphorus in the water and sediment under different ecological restoration were different. The content of nitrogen and phosphorus in the water in dredging only area and control area was lower than other areas. Vertical distribution of different forms of phosphorus in the sediment of West Lake Wuli varied with different ecological restoration measures. Macrophytes reestablishment after dredging affected Lab-P, Al-P, Fe-P observably, other than Ca-P and Org-P. In the former-fishery area, Ca-P and org-P took up the largest proportion in the total phosphorus, followed by Fe-P. However, Fe-P and Ca-P took up the largest proportion in the dredging only area. Compared with TP, the effects of ecological restoration measures on TN were not so obviously. In dredging only area, the contents of nitrogen and phosphorus in both the water and sediments were high, the long-term effects of dredging needed further study. In the area of dredging plus macrophytes reestablishment, the content of TN and TP was the lowest, with plenty of aquatic macrophytes. It was suggested that the effective way of eutrophicated lake control may be actualizing through reestablishment of aquatic

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2002CB412304)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2002AA601013)联合资助。2006-11-06 收稿;2006-12-30 收修改稿。俞海桥,男,1981 年生,硕士研究生。

\*\* 通讯作者; E-mail:fangt@ihb.ac.cn.

macrophytes in the dredging area by the precondition of reducing external source pollution.

**Keywords:** Ecological restoration; nitrogen; phosphorus; sediments; seasonal variation; vertical distribution; Lake Wuli; Lake Taihu

五里湖是太湖北部紧邻无锡市的一个湖湾,平均水深 1.60 m,容积  $824 \times 10^4 \text{ m}^3$ . 以宝界桥为界,五里湖又分为东五里湖和西五里湖. 五里湖由于深处腹地,相对封闭,水体流动慢,自净能力差,2001 年的水质监测为劣 V 类,为太湖中富营养化程度最严重的水域,底泥中 P、N 营养盐含量较高,其中西五里湖 TP 平均含量为 1470 mg/kg, TN 为 1000 mg/kg<sup>[1,2]</sup>. 为防止该湖区富营养化程度进一步加深,在西五里湖区开展了“重污染水体底泥疏浚与生态重建技术”工程,该工程为国家科学技术部 2002 年设立的“太湖水污染控制与水体修复”专项课题的一部分,从 2003 年开始分别在西五里湖的不同区域开展了退渔还湖、底泥疏浚、底泥疏浚并生态重建(以水生植被重建为主)示范工程.

湖泊水体富营养化是由外源污染和内源污染共同决定的,在外源污染得到一定程度控制后,沉积物作为内源负荷对水体的影响明显<sup>[3]</sup>. 近年来,国内外对沉积物中氮磷的季节性变化<sup>[4-6]</sup>及疏浚对沉积物的影响<sup>[7,8]</sup>已有一些研究,但是国内对疏浚措施的影响研究大都是短期的,对疏浚、植被重建等生态修复措施实施较长一段时间后,沉积物中不同氮磷形态的分布及季节性变化的研究较少. 本研究分析了太湖西五里湖不同季节的上覆水及柱状沉积物中氮、磷形态含量变化及分布特征,探讨了不同修复措施对湖泊内源氮磷营养负荷影响. 为进一步理解湖泊营养盐生物地球化学循环过程提供了参考,对于富营养化浅水型湖泊的治理具有重要意义.

1 样品采集与分析

1.1 研究区域概况及采样点

本研究所选湖区为太湖西五里湖,其中北部为退渔还湖区,原来有大量鱼塘,污染严重,2003 年夏在该区域进行了退渔还湖工程,采用“干湖清淤”的方式去除底泥,即把该湖区用人工堤围起,抽干湖水后清除大量淤泥,平均清淤厚度在 1 m 以上,当年 10 月打开堤坝,重新注入湖水. 在退渔还湖区部分区域进行了水生植被重建工程,但该湖区水面开阔,在 3 号点附近湖水较深,无大型水生植物存活. 西五里湖南部进行了疏浚,用机械直接从湖水中清除了沉积物表层的富含有机质的淤泥,疏浚深度在 0.2–0.7 m 左右. 疏浚工程结束后,2004 年 3 月在西五里湖南部紧邻鼋头渚风景区的 6.67 hm<sup>2</sup> 范围内(即湖滨带水生植被重建示范区)建立了大型围隔,在围隔内恢复了大型水生植物. 各区域概况和采样点分布如表 1 所示.

表 1 各区域概况  
Tab. 1 The situation of different areas

区域	编号	疏浚深度(m)	水深(m)	大型水生植被	沉积物特性
疏浚区	1	0.2–0.7	2.5	极少	灰色粘土
疏浚并植被重建示范区	2	0.2–0.7	2	大量	深灰色粘土,含部分植物残体
退渔还湖区	3	>1	4	少量	淡黄色坚硬土质,含少量贝类
对照区	4	0	3	无	灰色粘土

1.2 采样与测定

在生态修复措施实施两年后分别于 2005 年 7 月、10 月、12 月及 2006 年 3 月采集样品,沉积物用内径为 6 cm 的柱状采泥器采集,沉积物柱芯在现场进行分截,表层 10 cm 按 2 cm 间隔、往下按 5 cm 间隔分层,逐层装入洁净的密封袋中,排去袋中空气. 经过“干湖清淤”的退渔还湖区的底质很坚硬,柱状样难以采集,因此只取表层沉积物(0–2 cm)进行分析. 采集沉积物的同时采集各点上覆水样于聚乙烯瓶中,密封袋及聚乙烯瓶均放入便携式冰箱中,当天运回实验室,所采的沉积物于–20℃下冷冻,再经 ALPHA1–2LD 冷冻干燥机真空干燥,研磨、过筛(100 目)后装入密封袋,保存于–4℃冰箱中待用.

沉积物中总磷(浓 HCl-P)及无机磷(IP)测定采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分离法<sup>[9,10]</sup>,有机磷(Org-P)含量通过总磷与无机磷的差值得到;磷的分级提取<sup>[11]</sup>过程为:称取约 0.5g 经处理好的泥样于 50 ml 离心管中,加入 1mol/L NH<sub>4</sub>Cl(pH = 7)提取液,振荡 2h 后离心,用移液管吸取上清液采用钼锑抗比色法测得不稳定性磷(Lab-P),剩余泥样用 0.5mol/L NH<sub>4</sub>F 浸提 1h 测得铝结合态磷(Al-P),0.1mol/L NaOH 浸提 17h 测得铁结合态磷(Fe-P),最后泥样用 0.5mol/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提 1h 测得钙结合态磷(Ca-P). 沉积物总氮(TN)用半微量开氏法进行测定,铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)的测定采用 KCl 浸提-蒸馏法,硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)采用酚二磺酸比色法<sup>[11]</sup>. 水样中的总磷采用钼锑抗分光光度法,总氮采用过硫酸钾紫外分光光度法<sup>[12]</sup>于采样当天测定. 样品测定时每 7 个样就做 2 个平行样,除 Al-P 的变异系数在 0.2 - 0.3 外,其余的都在 0.1 以下,分析精度较好.

2 结果与讨论

2.1 上覆水中氮、磷含量的季节性变化

西五里湖各区域上覆水中的氮、磷含量存在显著差别,从年均值来看,TN 及 TP 的含量均为 4 号点 > 1 号点 > 2 号点 > 3 号点. 2 号点所在区是示范区,3 号点所在区为退渔还湖区,这两个区域氮磷含量较低(图 1). 疏浚并水生植被重建有效地降低了水体中的营养盐含量;而退渔还湖区由于实施了“干湖清淤”,并筑有人工堤坝,仅留有数米宽的缺口,控制了外来污染,因此水体中氮磷含量也较低. 1 号点虽然也采取了疏浚措施,但是疏浚工程的实施距离本研究第一次采样时已有近两年时间,湖水污染程度已经回升. 值得注意的是,从夏季到秋季,各点的氮磷比均存在大幅下降,主要是氮含量降低所致,引起这种变化的原因,可能与微生物的作用有关,参加氮循环的各种微生物在夏季较为活跃,其所起的硝化作用和反硝化作用,将氮最终以气态的 N<sub>2</sub>或是 N<sub>2</sub>O 的形式释放到大气中.

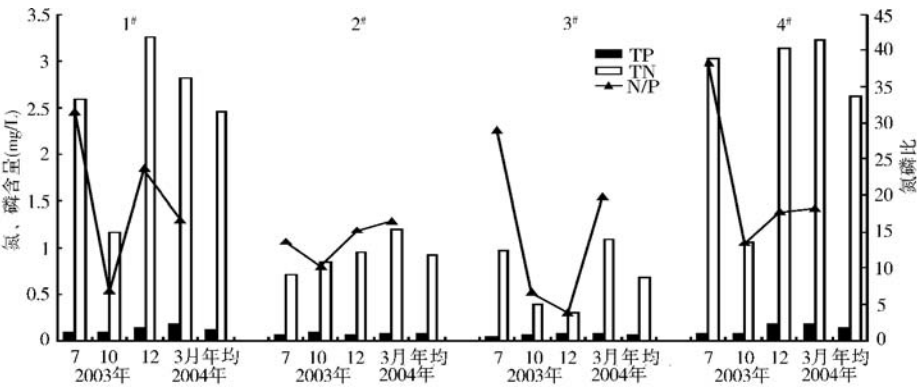


图 1 西五里湖各采样点上覆水中氮、磷含量的季节性变化

Fig.1 Seasonal variation of TN,TP in the overlying water of different sampling sites

2.2 沉积物中磷的分布

2.2.1 沉积物中各种磷形态的垂直分布 冬季各点沉积物不同磷形态含量的垂直分布图(图 2). 研究表明,一些未采取生态修复措施的湖湾如武汉东湖庙湖湾<sup>[5]</sup>、滇池马村湾和海东湾<sup>[13]</sup>沉积物中不同磷形态含量存在表层富集的现象,且在 0 - 10 cm 内随深度增加迅速下降,10 cm 后趋于稳定. 但是,西五里湖沉积物磷形态的表层富集并不明显,有些磷形态比如 Al - P 表层含量反而较低,这与样品所在的区域采取了疏浚、水生植被重建等生态修复措施有关(图 2).

TP 在 0 - 20 cm 深度范围的含量分布在 306.99 - 700.35 mg/kg 之间,1、2、4 号点柱状样平均含量分别为 462.38 mg/kg、334.32 mg/kg、530.47 mg/kg,从区域看为对照区 > 疏浚区 > 示范区;1 号点和 2 号点的垂直分布变化趋势相似,均在 4 - 6 cm 处出现一个极小值,这可能与这两个采样点所在区域都经过疏浚有关,由于疏浚去除了磷含量较高的表层淤泥,因此该层 TP 含量要低于其下层,而表层含量上升应该是疏浚工程

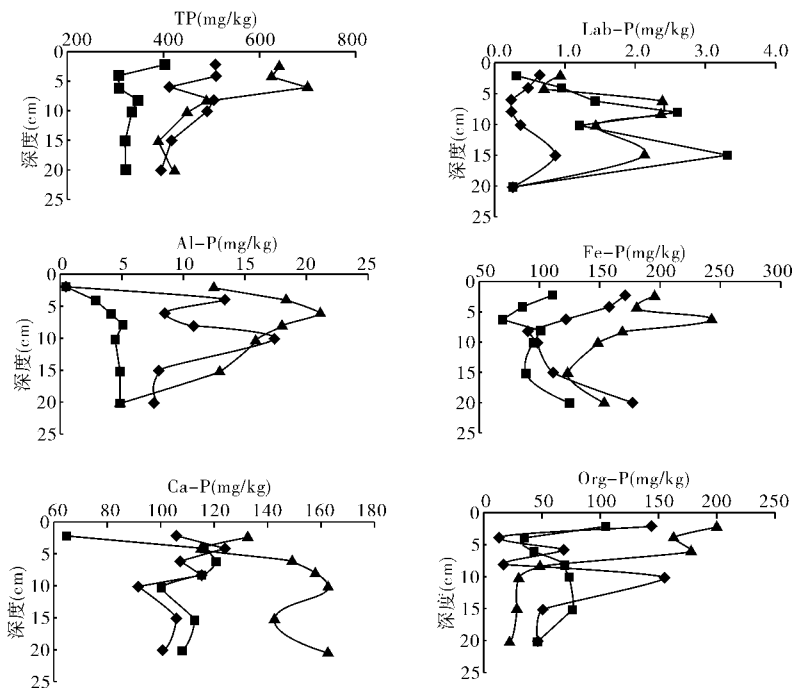


图2 沉积物中各种磷形态含量垂直分布  
(◆ 1号点(疏浚区), ■ 2号点(示范区), ▲ 4号点(对照区))

Fig. 2 Vertical distribution of different forms of phosphorus in the sediment

实施两年来水体中含磷物质的沉积所致,4号点所在区域未曾进行疏浚,因此其表层含量较高,而10 cm后基本上呈逐渐下降的趋势。

Lab-P 和 Al-P 的含量很低,Lab-P 含量在 4 mg/kg 以下,Al-P 也不高于 25 mg/kg,但是 Lab-P 是沉积物首先释放的部分,而 Al-P 也较易释放而为生物所利用<sup>[14]</sup>,所以对这两种形态磷的研究也很重要。Lab-P 含量随深度的变化起伏较大,其中位于示范区的 2 号点表层含量极低,与大量水生植物的吸收利用有关。柱状样品 Al-P 的平均含量和 TP 一致,也是对照区 > 疏浚区 > 示范区。Fe-P 含量的垂直分布规律与 TP 相似,各区域表层含量相差较大,但 10 cm 往下含量逐渐接近。Fe-P 含量的变化范围在 67.99 – 243.15 mg/kg 之间,1、2、4 号点柱状样平均含量分别为 132.55 mg/kg、96.08 mg/kg、173.48 mg/kg,对照区最高而示范区最低。Fe-P 含量分布受沉降速率、氧化还原环境、温度等条件所影响,它随着氧化还原环境的变化而变化,在氧化还原电位(Eh)降低时容易释放到水体中<sup>[15]</sup>。各采样点所在区域采取了不同修复措施,且风浪的扰动不一样,从而形成不同的氧化还原环境和沉降速率,所以含量差别较大。

从 Ca-P 含量的垂向分布来看,疏浚区与示范区的趋势基本一致,示范区表层含量很低。Ca-P 含量的变幅为 64.13 – 162.18mg/kg,1、2、4 号点柱状样平均含量分别为 106.51mg/kg、104.88 mg/kg、145.46 mg/kg,对照区最高,约是其他两个区域的 1.5 倍,而疏浚区和示范区含量接近。Org-P 含量的垂向分布比较复杂,总体来看,0 – 2 cm 表层含量较高,可能与冬季有机物质的大量沉降有关,对照区含量随深度增加而逐渐上升。Org-P 含量变幅在 13.33 – 198.58 mg/kg,1、2、4 号点柱状样平均含量分别为 63.10 mg/kg、63.32 mg/kg、95.50 mg/kg,与 Ca-P 含量一样,对照区最高,其他两个区含量接近,说明西五里湖区沉积物中 Ca-P、Org-P 含量主要受疏浚措施的影响。

沉积物柱状样 TP、Al-P、Fe-P 的平均含量均为对照区 > 疏浚区 > 示范区,说明生态修复措施的实施一定程度上降低了沉积物中的磷负荷。水生植物在生长期时直接吸收沉积物中的磷作为营养,从而有效地降低了沉积物中的磷含量,但是水生植物对沉积物中不同形态磷的影响不同<sup>[16]</sup>,从疏浚区与疏浚并水生植被

重建区的对比分析可以看出,水生植被的修复对沉积物中的 Lab-P、Al-P、Fe-P 含量吸收利用显著,这进一步验证了沉积物中 Lab-P、Al-P、Fe-P 易于释放到水体为生物所利用,但是水生植被对 Ca-P、Org-P 含量的影响较小,这可能与 Ca-P、Org-P 较难释放有关。

2.2.2 沉积物中各种磷形态的季节性变化 不同季节 1 号点及 3 号点沉积物中各种磷形态比例的分布(图 3),其中 1 号点分季节描述了比例随深度的变化,3 号点为表层沉积物的季节变化,2 号点、4 号点的变化规律与 1 号点类似。从 1 号点的分布图来看,各种形态磷的比例为:Fe-P、Ca-P 比例较大,Org-P 次之,Al-P 所占比例较小,而 Lab-P 只占极小一部分。夏季这两种形态的磷含量很低,两者之和所占比例不到 1%,秋、冬两季 Al-P 的比例有所增加,但到春季又减小,可能与温度等条件变化对水体中微生物及高等植物摄取吸收磷的影响有关。Fe-P 所占比例较大,秋季时比例最高,冬、春季较低,在垂向分布上随着深度增加有所起伏,总体来看变化不大。Ca-P 也占较大比例,其比例随着季节改变有所变化,夏、秋两季比例较小,冬、春两季比例较大。Org-P 在垂向上的分布比例除冬季波动较大外,其余季节存在随着深度的增加而减少的趋势。

3 号点表层沉积物中各种磷形态的比例分布与 1 号点不同,磷的赋存形态以 Ca-P 和 Org-P 为主,Fe-P 所占比例较小,而 Al-P 及 Lab-P 只占极小一部分,在退渔还湖区实施的“干湖清淤”工程显著改变了湖泊表层沉积物磷形态的比例构成,进一步说明生态修复措施对沉积物磷形态分布具有重要影响。清除较厚的淤泥降低了易释放到水体的 Lab-P、Al-P 及 Fe-P 含量,与图 1 所示该区域上覆水较低的磷含量相对应。从季节变化上看,与 1 号点一样,Fe-P 比例的最大值也是出现在秋季,对东湖庙湖区沉积物的研究<sup>[5]</sup>也存在类似情况,其具体原因有待进一步探究。

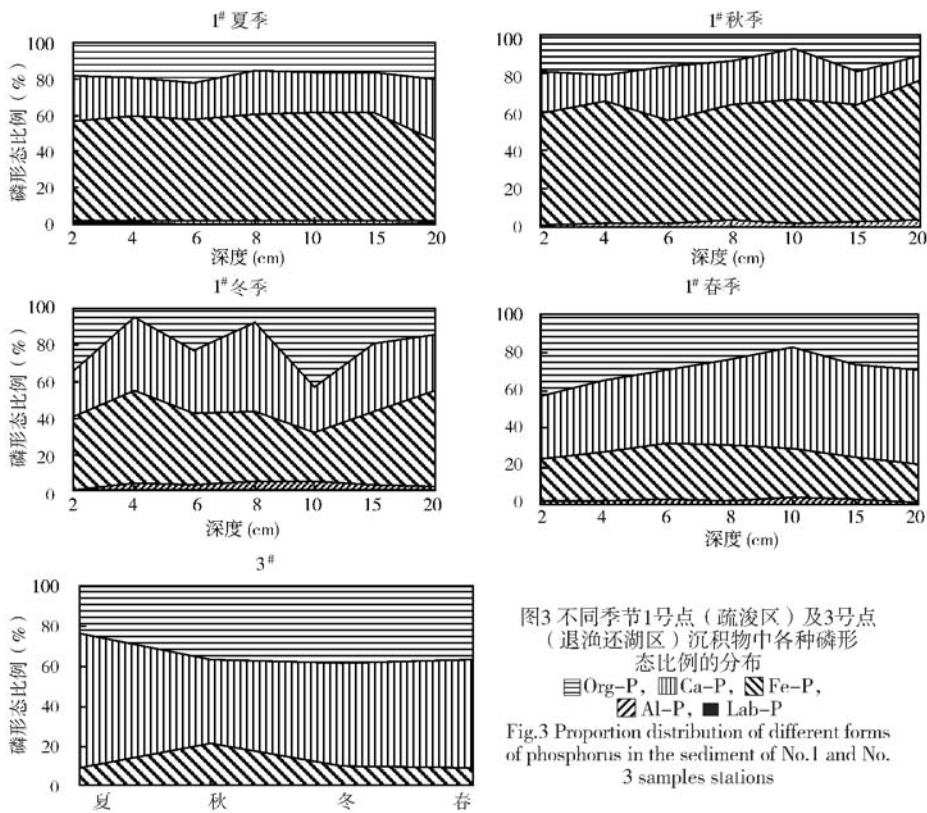


图3 不同季节1号点(疏浚区)及3号点(退渔还湖区)沉积物中各种磷形态比例的分布  
Org-P, Ca-P, Fe-P, Al-P, Lab-P  
Fig.3 Proportion distribution of different forms of phosphorus in the sediment of No.1 and No.3 sample stations

2.3 沉积物中氮的分布

2.3.1 TN 含量垂直分布的季节性变化 TN 是铵态氮、硝态氮、氨基酸、酰胺和易水解的蛋白质氮等的总和。图 4 所示为西五里湖各采样点沉积物中 TN 含量的垂直分布及季节性变化,与 TP 的变化一样,沉积物

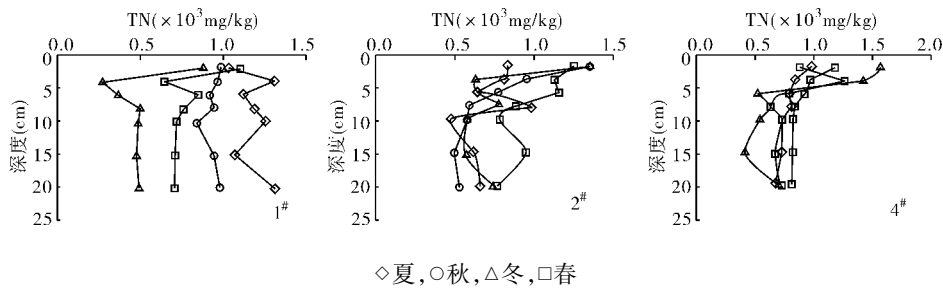


图 4 沉积物中 TN 含量垂直分布的季节性变化  
Fig. 4 Seasonal variation of vertical distribution of TN in the sediment

中 TN 的垂直分布及季节变化规律不明显,不同区域的变化趋势不同. 1 号点 TN 在垂直方向上的平均含量夏季最高为 1180 mg/kg,冬季最低为 530 mg/kg,受季节变化的影响较大;垂直分布的变化趋势冬春两季相似,从上往下含量先下降后升高,10 cm 往下趋于稳定,夏季含量在垂向上波动较大. 2 号点的平均含量春季最高为 990 mg/kg,夏季最低为 720 mg/kg;在该点 TN 含量在垂直分布上起伏较大,总体来看,上层(0-10 cm)含量要高于下层(10-20 cm). 4 号点平均含量秋季最高为 900 mg/kg,夏季最低为 790 mg/kg,含量受季节变化的影响较小;从垂直分布来看,其含量随深度增加而降低,10 cm 往下趋于稳定.

1、2、4 号点柱状沉积物全年 TN 含量的平均值分别为 840 mg/kg、750 mg/kg、820 mg/kg,疏浚区略高于对照区,示范区最低,与 TP 相比,生态修复措施对沉积物中 TN 的影响较小.

2.3.2 表层沉积物中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  及  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的分布 西五里湖表层沉积物  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量分布如图 5 所示. 从全年来看, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量的变化范围 6.74-115.34 mg/kg 之间,差别较大,各采样点的平均含量分别为:1 号 38.62 mg/kg、2 号 57.52 mg/kg、3 号 12.39 mg/kg、4 号 29.15 mg/kg,从各采样点所在区域来看为示范区 > 疏浚区 > 对照区 > 退渔还湖区. 沉积物-水界面氮的转化<sup>[17]</sup>存在如下形式:有机质 $\rightarrow \text{NH}_4^+ \text{-N} \rightarrow \text{NO}_3^- \text{-N} \rightarrow \text{N}_2\text{O}(\text{N}_2)$ . 沉积物早期成岩过程中有机质在分解和矿化作用下首先形成大量的  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,而 2 号点所在的示范区种植了大量的水生植物,植物残体形成的有机质的分解可能是造成该湖区  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量较高且在秋季陡然上升的原因之一.

$\text{NO}_3^- \text{-N}$  在沉积物中的含量较低,西五里湖表层沉积物的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量的变化范围在 2.89-62.55 mg/kg 之间,平均含量 16.53 mg/kg,只占 TN 中很小的一部分. 除 3 号点外,各点  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量均在春季增加,可能与  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  等其他形态的氮向  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  转化有关. 3 号点全年 TN 的平均含量为 670 mg/kg,含量较低,并且  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  及  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的含量也是最低,说明退渔还湖工程的实施一定程度上降低了湖泊的内源氮负荷.

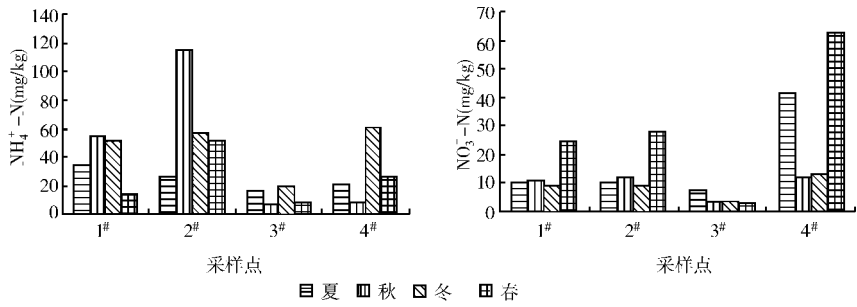


图 5 各采样点表层沉积物  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量分布  
Fig. 5 Distribution of  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in the surficial sediment

3 结论

总体来看,不同生态修复措施下的湖区水体及沉积物中的氮磷含量不同,其季节变化规律也不相同.

疏浚工程结束两年后,疏浚区水体中氮磷含量上升,与对照区的差别不大;柱状沉积物中 TN 的平均含量甚至略高于对照区,因此单一的疏浚措施对水环境改善的长期作用需要进一步研究。采取了“干湖清淤”措施的退渔还湖区水体及沉积物中的氮磷含量较低,但是该湖区湖水较深,底质坚硬,水生植物较难存活,不利于生态系统的恢复。而在疏浚的基础上进行水生植被重建的示范区内,水体及沉积物中的 TN、TP 含量均比较低,易释放到水体的 Al-P、Fe-P、Ca-P 均较其他区域低,水生植被恢复较好。可见在减少外来污染的前提下,对重富营养化湖区底泥进行疏浚并开展水生植被恢复工程是控制湖泊富营养化的有效途径。

#### 4 参考文献

- [1] 顾 岗,陆根法. 太湖五里湖水环境综合整治的设想. 湖泊科学,2004,**16**(1):56-60.
- [2] 罗清吉,石浚哲. 五里湖淤泥现状及生态清淤. 环境监测管理与技术,2003,**15**(1):27-29.
- [3] Pedersen F, Bjørnstad E, Andersen H V *et al.* Characterization of sediments from Copenhagen harbor by use of biotests. *Wat Sci Tech*, 1998, **37**(6-7):233-240.
- [4] Juris Aigars. Seasonal variations in phosphorus species in the surface sediments of the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Chemosphere*, 2001, (45):827-834.
- [5] Liu Jiantong, Chen Pengyu, Fang Tao *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in sediment cores and overlying water of Donghu lake. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, **15**(7):603-608.
- [6] 金相灿,姜 霞,徐玉慧等. 太湖东北部沉积物可溶性氮、磷的季节性变化. 中国环境科学,2006,**26**(4):409-413.
- [7] 王 栋,孔繁翔,刘爱菊等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响. 湖泊科学,2005,**17**(3):263-268.
- [8] 李文红,陈英旭,孙建平. 疏浚对影响底泥向上覆水释放污染物的研究. 农业生态环境科学学报,2003,**22**(4):446-448.
- [9] Ruban V, Brigault S, Demare D *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(4):403-407.
- [10] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments: A synthesis of recent works. *Fresenius J Anal Chem*, 2001, **370**:224-228.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社,1999:90-93;46-54.
- [12] 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(第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002:246-248;255-257.
- [13] 吴永红,胡 俊,金向东等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特征及疏浚层推算. 环境科学,2005,**26**(4):77-82.
- [14] 朱广伟,秦伯强,高 光等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系. 环境科学学报,2004,**24**(3):381-388.
- [15] 刘 浏,刘晓端,徐 清等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征. 盐矿测试,2003,**22**(2):81-85.
- [16] 胡 俊,丰民义,吴永红等. 沉水植物对沉积物中磷赋存形态影响的初步研究. 环境化学,2006,**25**(1):28-31.
- [17] 吴丰昌,万国江,黄荣贵. 湖泊沉积物-水界面营养元素的生物地球化学作用和环境效应. 矿物学报,1996,**16**(4):403-409.