

北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征

李楠^{1,2}, 单保庆^{1*}, 张洪¹, 张景来²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 中国人民大学环境学院, 北京 100872)

摘要:采用 Bowman-Cole 有机磷分级修正体系, 分析了北运河下游典型灌渠泗村店干渠上游至下游 7 个采样区柱状沉积物中有机磷的赋存形态、分布及其垂向变化特征. 结果表明, 干渠沉积物总磷 (TP) 平均含量介于 $654.9 \sim 1285.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机磷 (TOP) 平均含量则为 $241.6 \sim 501.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的 34.08% ~ 41.86%, TOP/TP 较其他区域明显偏高. 垂直分布上看, 不同形态有机磷变化趋势迥异, 活性有机磷 (LOP) 随着深度的变化呈先递增后递减的趋势, 中活性有机磷 (MLOP) 则呈逐渐减少趋势, 而稳性有机磷 (NOP) 却变化不大. MLOP 是 TOP 的主要存在形态 (39.03% ~ 85.72%), 高于 LOP (7.73% ~ 24.13%) 和 NOP (10.14% ~ 35.64%). MLOP 是该区域沉积物 P 的重要储备, 其向 LOP 的转化过程及其对上覆水体富营养化效应值得关注.

关键词:沉积物; 磷; 活性有机磷; 中活性有机磷; 稳性有机磷; 北运河

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2010)12-2911-06

Organic Phosphorus Forms in the Sediments in the Downstream Channel of North Canal River Watershed

LI Nan^{1,2}, SHAN Bao-qing¹, ZHANG Hong¹, ZHANG Jing-lai²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Bowman-Cole modified organic phosphorus fractionation system was used for the analysis of the phosphorus (P) forms in the sediments in North Canal River. The results showed that the average concentrations variation of total phosphorus (TP), and total organic phosphorus (TOP) in the sediments were $654.9 \sim 1285.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $241.6 \sim 501.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. TOP accounted for 34.08% ~ 41.86% of TP which was much higher than other regions. The vertical distribution of OP forms changed greatly with the depth in the sediments. Labile organic P (LOP) increased at first (0-10 cm depth) but decreased gradually (10-40 cm). On the contrary, moderately labile organic P (MLOP) showed a degressive trend and nonlabile organic P (NOP) was no change with the depth. MLOP was the major part of TOP which was about 39.03% ~ 85.72% of TOP, and was much higher than LOP (7.73% ~ 24.13%) and NOP (10.14% ~ 35.64%). The dynamic of MLOP in the sediments should be attended because it's easy to transform to LOP resulting in a strong influence on the water quality.

Key words: sediment; phosphorus; labile organic P (LOP); moderately labile organic P (MLOP); nonlabile organic P (NOP); North Canal River

磷在水体营养元素循环中占有极重要的地位, 是水体富营养化的主要控制因子之一. 水体中磷的来源可分为外源性磷和内源性磷. 沉积物是水体中磷的重要蓄积库, 沉积物中的磷迁移转化过程直接影响着上覆水体富营养化过程.

磷在沉积物中的形态十分复杂, 磷形态转化是控制沉积物-水界面间磷循环的主要因子^[1-4]. 在已有沉积物磷形态研究中, 往往把磷分为交换态磷、铁铝态磷、钙镁态磷、有机态磷和残余态磷, 即把有机磷作为一个整体. 然而有越来越多的研究发现, 有机磷在沉积物中的含量可以占到总磷的 20% ~ 80%^[5,6], 其作用不可忽视. 沉积物释磷量大小不仅与沉积物有机磷含量有关^[7], 有机磷活性也是决定有机磷在沉积过程中矿化为无机磷的关键因素, 直

接影响上覆水质的营养状况, 在整个水域中起重要作用. 按照活性可将有机磷分为活性有机磷、中活性有机磷和稳性有机磷. 有机磷形态受到各种因素影响, 包括温度、pH 值、有机质等, 但是有机质是最重要的^[8,9]. 目前针对沉积物有机磷的研究较少, 尤其缺乏对有机磷活性方面的认识.

北运河下游水系是海河水系典型污灌区, 灌渠是水系注入和灌溉输出的交界面, 有机磷对其上覆

收稿日期: 2009-12-31; 修订日期: 2010-03-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07209-010); 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2006CB403306)

作者简介: 李楠 (1985 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为典型农业污灌区有机磷分布和矿化机制, E-mail: linan.2005@163.com

* 通讯联系人, E-mail: bqshan@cees.ac.cn

水水质及灌渠所在水域的影响有关键作用,通过对多年未经疏浚的灌渠沉积物中有机磷分布状况的研究,可以真实地反映在农业环境下有机磷的无扰动沉积过程,为区域磷循环的研究提供客观依据. 本实验选取北运河下游水系作为研究区域,针对沉积物有机磷不同活性形态,采用经过修正的 Bowman-Cole 有机磷分级修正体系^[10],将有机磷分为活性有机磷、中活性有机磷和稳性有机磷 3 种形态,着重分析了北运河水系下游典型灌渠泗村店干渠沉积物中不同活性形态有机磷含量及分布特征,就影响各形态有机磷的环境因素和人为因素进行了探讨.

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

本实验选取泗村店干渠作为研究区域,泗村店干渠是北运河水系下游典型污灌区之一. 北运河是海河九大水系之一,其下游区域位于天津武清区,属典型的农业污灌区. 农作物类型以小麦、玉米为主,部分地区种植水稻及蔬菜. 气候属大陆性季风气候,受季风影响,春季干旱多风,年降水量约 620 mm,其中 75% 集中在 7~8 月. 为保证农业生产用水,北运河下游地区在 20 世纪 60 年代创建了大量人工渠道,用于农业灌溉.

泗村店干渠总长约 14 km,起点始于北京排污河,途经泗村店村、泗后庄、小陈庄、齐庄、耿庄等村落,出水汇入龙凤河,最终进入北运河. 污灌农田分布于干渠两岸,具备了农田排水的完整的汇水特点.

1.2 样品采集与处理

根 B 村店干渠渠系网不同汇水特点,以干渠引水闸开始,到南宫排水闸结束,设置 7 个采样区,具体位置见图 1. 现场采样时间为 2008 年 12 月 14 日,采用自制柱状有机玻璃管采样器(中国科学院生态环境研究中心研制),从上游至下游共采集 7 个底泥柱状样,柱样长度 34~40 cm 不等. 同步采集表层水样 500 mL,分为 2 份,一份经 0.45 μm 滤膜过滤用于溶解性总磷(DTP)和溶解态活性磷测定(SRP),另一份加酸至 pH<2 保存,用于总磷(TP)测定.

样品采集后现场将底泥从柱样底部向上小心顶出,溢除上覆水. 用细薄切板分层(表层 10 cm 按每层 2 cm 分层,其余每层 5 cm),装入自封袋,密封. 带回实验室放置在阴凉处,于室温下自然阴干. 充分混匀后除去植物和贝类等残体,用木棒分散,研磨,过 10 目和 100 目筛,备用.

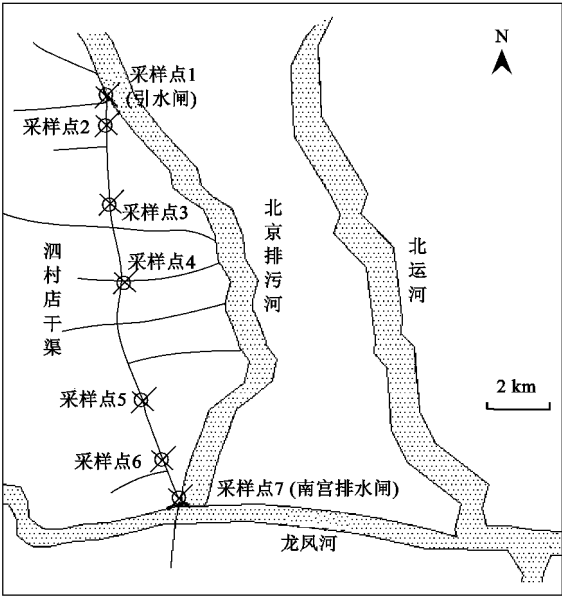


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Schematic graph of sampling sites in
mainstream of Sicundian

1.3 样品分析方法

样品测定包括上覆水和沉积物的测定. 上覆水水质的测定采用国家标准方法^[11],过硫酸钾消解和钼锑抗分光光度法测定上覆水中的总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)和溶解态活性磷(SRP). 采样点上覆水水质状况如表 1 所示.

表 1 采样点水质状况/mg·L⁻¹

Table 1 Water quality of river at sampling sites/mg·L⁻¹

参数	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号
TP	4.42	1.11	0.81	1.35	1.64	1.95	3.77
DTP	3.62	0.27	0.11	0.50	1.01	1.21	3.29
SRP	1.87	0.48	0.16	0.41	0.60	0.94	2.54

由表 1 可知,泗村店干渠上覆水 TP 最低含量为 0.81 mg·L⁻¹,最高含量为 4.42 mg·L⁻¹,平均含量为 2.15 mg·L⁻¹,严重超出地表水 V 类水质标准(GB 3838-2002) 0.40 mg·L⁻¹. SRP 最低含量为 0.48 mg·L⁻¹,最高含量为 1.87 mg·L⁻¹,平均含量为 1.00 mg·L⁻¹,具有较高的生物可利用性.

沉积物的理化性质测定包括有机质和有机磷的测定. 有机质分析方法采用硫酸重铬酸钾稀释热法^[12]. 有机磷分析方法采用经过修正的 Bowman-Cole 的有机磷分级修正体系^[10]. 分级流程如图 2 所示. 该方法将有机磷分为活性有机磷,中活性有机磷和稳性有机磷 3 种形态. 活性有机磷(labile organic phosphorus, LOP)主要由核酸、磷酸类、磷酸

类化合物组成;中活性有机磷 (moderately labile organic phosphorus, MLOP) 包含植酸钙、镁等化合物;稳性有机磷 (nonlabile organic phosphorus, NOP) 主要由植酸铁、铝等化合物以及一些含 P 的螯合物组成. 不同活性有机磷的矿化速率和向上覆水释磷潜力不同.

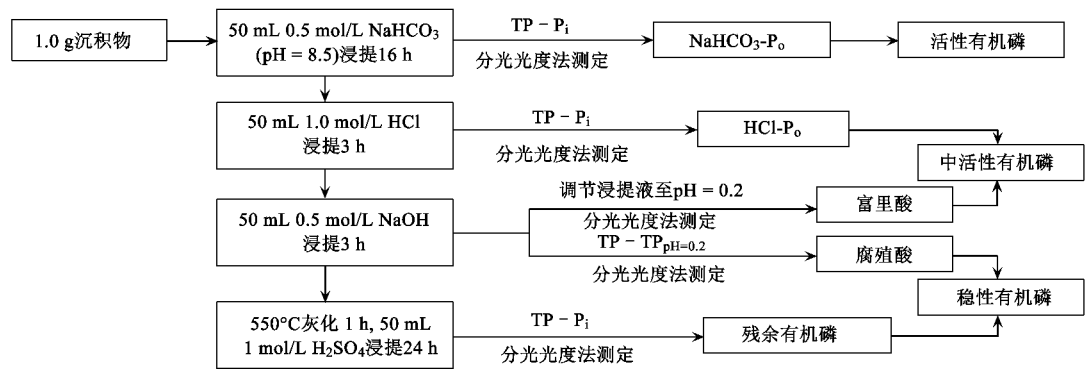


图2 有机磷分级流程

Fig. 2 Sequential fractionation scheme for organic P

2 结果与讨论

2.1 有机质和总磷分布特征

图3 是各采样点沉积物中总磷 (TP)、有机磷 (TOP)、无机磷 (TIP) 和有机质 (OM) 平均含量的趋势. 从图3 可以看出, 泗村店干渠上游至下游沉积物中有机质 (OM) 的平均含量为 $(1.16\% \pm 0.55\%) \sim (4.62\% \pm 3.00\%)$, 相对于海河干流地区偏低^[13-17]. 沉积物总磷 (TP) 平均含量表现出较大的空间差异性, 浓度变化范围介于 $(654.9 \pm 100.0) \sim (1\,285.4 \pm 302.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 从空间分布上看, 干渠引水段1号与排水段7号的磷和有机质含量较高, 干渠中段相对平稳, 这和它们所处的地理位置有关. 1号含量偏高可能是由于其位于泗村店干渠引灌处, 外来输入是影响沉积物中有机质和磷含量高低的重要因素, 在污染较重区含量较高^[18]. 7号位于南宫闸下游, 由于闸控阻断河流自然流动, 造成很多不利水文条件, 如河流缓流乃至滞流加剧水质恶化^[19]. 总无机磷 (TIP) 与 TP 趋势一致, 平均含量为 $(411.8 \pm 64.63) \sim (784.3 \pm 236.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的 56.58% ~ 65.92%. 总有机磷 (TOP) 平均含量为 $(241.6 \pm 85.06) \sim (501.1 \pm 82.83) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的 34.08% ~ 41.86%. 从 TOP 含量占 TP 的比重上看, TOP 明显较低; 相对于其他地区而言, 泗村店干渠 TOP 含量偏高^[20-22]. 分析有机质和 P 的空间变化趋势发现, 有机质和 TOP 趋势大致相同, 有机质可以作为螯合基与有机磷化合, 形成有机磷化合物与有机质能团联合体, 降低了沉积物中微生物可利

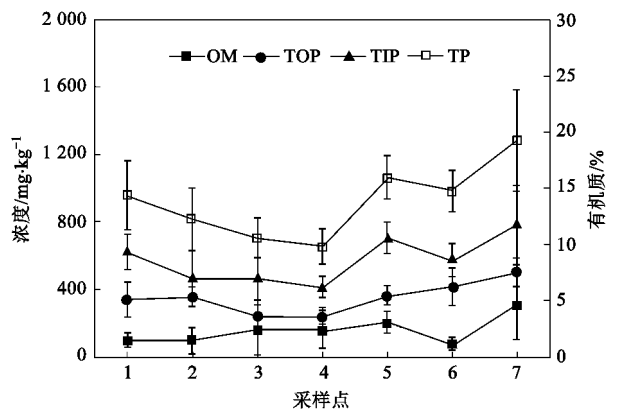


图3 物有机质与磷的空间变化

Fig. 3 Spatial variation of organic matter and P in sediment

用的磷含量,一方面促进了有机质在早期的成岩作用过程中被分解,同时有机磷在微生物作用下被矿化^[23].

从图4 可以看出,各采样点有机质的垂直分布基本呈随着深度增加而减少的趋势,含量变化范围介于 0.14% ~ 9.28% 之间,波动主要出现在 0 ~ 10 cm 范围内,含量变化范围介于 0.40% ~ 9.28% 之间,这与外源污染输入的有机质沉积及沉积后被逐渐矿化分解有关^[24],有机质在表层沉积后,随着时间的迁移,在沉积物和间隙水中的微生物产生的有机酸或者酶的作用下被矿化分解. 4号和7号表层 OM 较低,可能由于这2个采样点均位于有支渠处,4号下游有2个支渠,7号下游汇入北京排污河(见图1),风浪扰动较强烈,细颗粒悬浮物质和生物碎屑物质沉积机会相对较小. 各采样点 TP 和 TIP 在垂

直方向上都表现出随着深度增加含量降低的趋势,0~10 cm 范围变化幅度较大. TP 含量变化范围介于 510.7~1 542.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,0~10cm 的含量变化范围也处于此区间;TIP 含量变化范围介于 252.6~1 156.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,0~10 cm 的含量变化范围介于 290.2~1 156.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. TP 和 TIP 呈逐渐降低的趋势,说明采样区域富营养化现状还在不

断加剧,排入水体的农田废水和农村生活污水中的磷不断向沉积物迁移,造成沉积物磷含量不断增加. 总体上看, TOP 垂直梯度上 0~10 cm 的变化范围介于 220.6~675.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,11~40 cm 相对稳定,其转化形式是在逐渐矿化后才能被微生物分解利用,所以在各采样点垂向分布上 TOP 相对稳定.

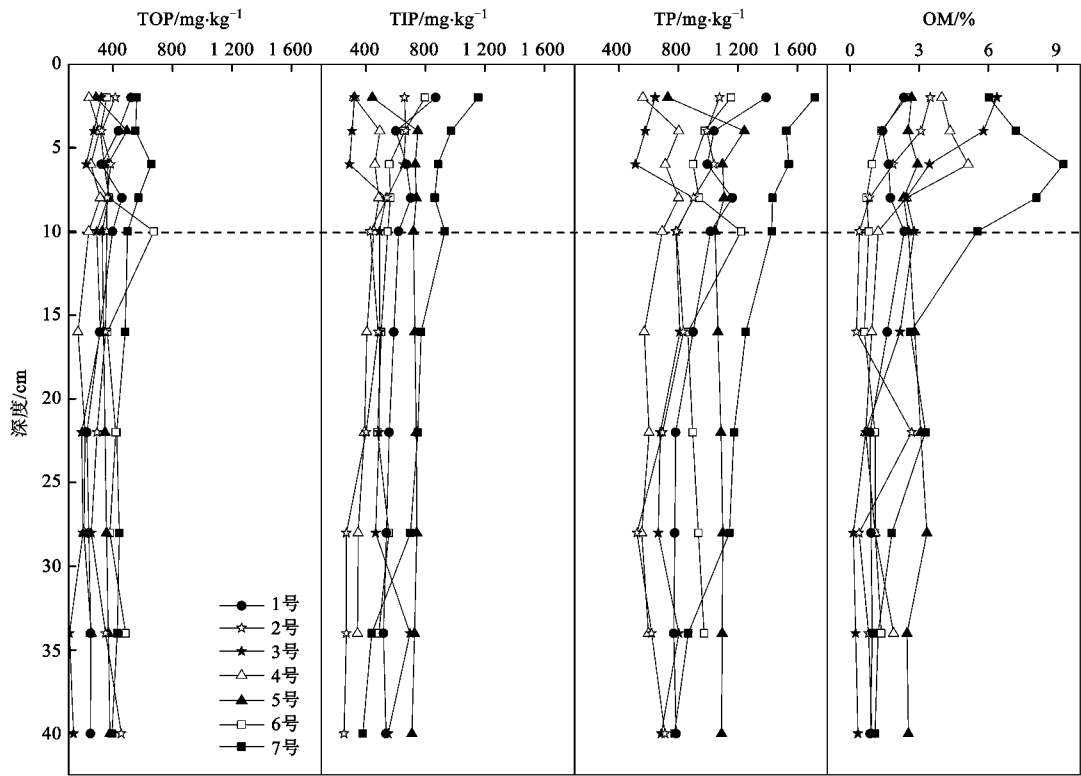


图 4 沉积物有机质与磷的垂直梯度变化

Fig. 4 Vertical variation of organic matter and P in sediment

2.2 3 种形态有机磷空间分布

从图 5 可以看出,沉积物活性有机磷(LOP) 的平均含量存在较大空间差异,为 $(30.99 \pm 21.08) \sim (71.36 \pm 35.39) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TOP 的 7.73%~24.13% 和 TP 的 1.35%~9.30%,是 3 种有机磷形态中含量最低的. 中活性有机磷(MLOP) 的平均含量变化较大,为 $(153.0 \pm 68.10) \sim (355.8 \pm 89.32) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TOP 的 39.03%~85.72% 和 TP 的 16.71%~41.85%. 稳性有机磷(NOP) 的平均含量为 $(43.09 \pm 16.55) \sim (109.1 \pm 34.39) \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占 TOP 的 10.14%~35.64% 和 TP 的 2.40%~17.60%. 在各采样点中, MLOP 在 3 种形态有机磷中的相对含量最高,是因为有机质能明显提高活性和中活性有机磷含量,特别是中活性有机磷含量^[25]. 有机质在提高有机磷含量的同时,为微生物

提供了丰富的碳源和矿物质,提高了微生物和磷酸酶活性,促进有机磷形态间的转化,尤其是向活性、中等活性有机磷的转化^[26]. 7 号 3 种形态有机磷含量相对其他 6 个采样区均较高,可能是因为 7 号位于南官闸下游,该采样点水流缓慢,周围农田的农作物根系对表层土壤中的磷具有富集作用.

2.3 3 种形态有机磷垂直分布

从图 6 可以看出,垂直方向上 0~10 cm 有机磷变化波动较大,说明此部分有机磷矿化过程强烈. 在 0~10 cm, LOP 的浓度变化范围介于 18.39~162.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, MLOP 的浓度变化范围介于 149.6~480.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, NOP 的浓度变化范围介于 4.37~160.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

各采样点沉积物中 LOP 含量垂向分布呈现相似的规律,即随着沉积深度增加, LOP 含量在垂直剖

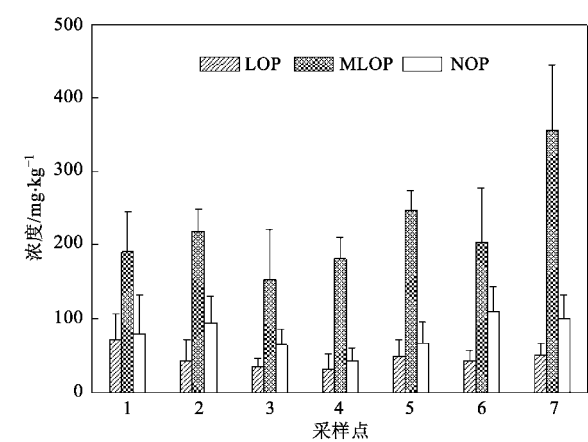


图5 沉积物中有机磷形态的空间变化
Fig.5 Spatial variation of OP forms in sediment

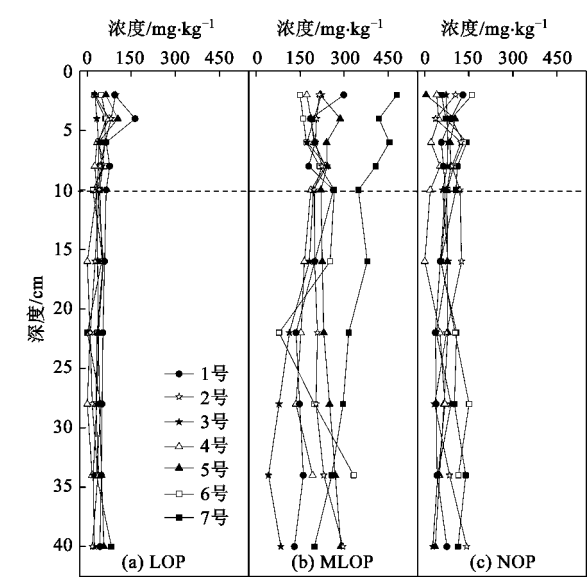


图6 沉积物中有机磷形态的垂直梯度变化
Fig.6 Vertical variation of OP forms in sediment

面上表现出先增加再减少的趋势,在表层 2~4 cm 处浓度达到最高 162.8 mg·kg⁻¹. LOP 的这种变化规律与沉积环境及微生物作用有关.在表层 0~2 cm LOP 的含量较低,是由于与上覆水之间的扩散、吸附-解析及底栖生物扰动等作用扩散到上覆水中.微生物的分解作用也是一个方面^[27],LOP 被微生物产生的有机酸溶解,然后被水解矿化.酶对 LOP 的矿化也起了一定作用.酶的活性受到其所在环境的影响,在水环境中,植物根部的酸性和碱性磷酸酶的活性通常有所增加^[28].另外有机质的补充也促进了 LOP 的矿化^[29].随着深度的增加,沉积物逐渐处于无氧环境中,LOP 在厌氧环境中被迅速矿化为无机

磷释放到间隙水中^[30],所以 LOP 含量逐渐较少. 各采样点沉积物中 MLOP 含量垂向分布呈现相似的规律,即 MLOP 含量随着沉积深度增加而减少.相对于 TOP 来说,MLOP/TOP 最高值出现在 7 号的 0~2 cm 处.相对于 TP 来说,MLOP/TP 最高值出现在 2 号的 38~40 cm.这是由于随着深度的增加,温度降低,矿化有机磷的酶活性和微生物新陈代谢活动降低,导致 MLOP 矿化量减少,同时,LOP 的迅速矿化和无机磷向间隙水中的迁移又造成 TP 减少,所以 MLOP 相对于 TP 的含量最高值出现在 2 号的 38~40 cm 处.总体来说,MLOP 的矿化过程一直在进行,所以随着深度的增加,MLOP 仍然呈减少趋势.沉积物中 MLOP 占 TOP 大部分,含量较高,微生物、磷酸酶和有机质促进了 MLOP 向 LOP 转化,LOP 矿化分解很快,作为一种有效磷源,是沉积物间隙水和上覆水中磷迁移转化的重要部分,因此,MLOP 是磷的一个重要储备,向上覆水体释放磷的潜力很大.

沉积物的稳性有机磷(NOP)在不同采样区含量的垂向分布变化并不明显.NOP 很难被矿化,在沉积物中是相对最稳定的,所以其含量与外部人为磷输入量密切相关.实际上,NOP 也是水生生态系统中必不可少的营养成分之一,可以在有机质生物矿化过程中重新进入磷循环.比如,NOP 中的肌醇六磷酸(IP₆)在湖泊沉积物中普遍存在.

3 结论

- (1)泗村店干渠上覆水 P 严重超标,处于富营养化状态. TOP 平均含量占 TP 的 34.08%~41.86%,相对于其他地区 TOP 占 TP 的比例偏高, TOP 是沉积物中重要的潜在磷源.
- (2)空间分布上各采样点 LOP、MLOP、NOP 含量存在较大差异,从相对含量上来看,都是 MLOP>NOP>LOP.垂直梯度上,不同有机磷形态有一定的变化规律,0~10 cm 矿化过程强烈. LOP 呈先增加后减少的趋势, MLOP 逐渐减少, NOP 则变化不大. 这是由 3 种磷形态本身的活性和微生物、酶活性、有机质等的差异所致.
- (3)MLOP 在 3 种形态有机磷中的相对含量最高,为 (153.0±68.10)~(355.8±89.32) mg·kg⁻¹,占 TOP 的 39.03%~85.72%. 有机质提高了 MLOP 含量,并和微生物、磷酸酶共同作用促进 MLOP 向 LOP 转化. MLOP 是磷的一个重要储备,向上覆水体释放磷的潜力很大.

参考文献:

- [1] 付永清,周易勇. 沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义[J]. 湖泊科学,1999,11(4): 376-381.
- [2] 刘素美,张经. 沉积物中磷的化学提取分析方法[J]. 海洋科学,2001,25(1): 22-25.
- [3] 朱广伟,高光,秦伯强,等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展,2003,14(6): 714-719.
- [4] 李悦,薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学,1998,17(1): 15-20.
- [5] 扈传显,潘建明. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. 海洋环境科学,2001,20(4): 21-25.
- [6] 夏学惠,张灼. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境的影响[J]. 沉积学报,2002,20(3): 416-420.
- [7] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [8] Stewart A J, Wetzel R G. Influence of dissolved humic materials on carbon assimilation and alkaline phosphatase activity in natural algal-bacterial assemblages[J]. Freshwater Biology, 1982, 12: 369-380.
- [9] Shaw P J. The effect of pH, dissolved humic substances, and ionic composition on the transfer of iron and phosphate to particulate size fractions in epilimnetic lake water[J]. Limnology and Oceanography, 1994, 39: 1734-1743.
- [10] Pierzynski G. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters[M]. North Carolina State University, 2000. 54-59.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 244-248.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 30-34.
- [13] 孟凡德,姜霞,金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. 环境科学研究,2004,17(增刊): 24-30.
- [14] Zhou A, Tang H, Wang D. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. Water Research, 2005, 39(7): 1245-1254.
- [15] 杨洪,易朝路,谢平,等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. 地球化学,2004,33(5): 507-514.
- [16] 薛联青,吕锡武,吴磊. 湖水-沉积物界面内源物质交换动态复水模拟研究[J]. 水科学进展, 2004,15(2): 189-192.
- [17] 安敏,黄岁樑. 海河干流表层沉积物总磷,总铁和有机质的含量及相关性分析[J]. 环境科学研究, 2007,20(3): 63-67.
- [18] 李江,金相灿,姜霞,等. 太湖不同营养水平湖区沉积物理化性质和磷的垂向变化[J]. 环境科学研究,2007,20(4): 64-69.
- [19] 孙娟,阮晓红. 调清水改善南京城市内河水环境效应研究[J]. 中国农村水利水电, 2008,(3): 29-31.
- [20] 章婷曦,王晓蓉,金相灿. 太湖不同营养水平湖区沉积物中磷形态的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007,26(4): 1207-1213.
- [21] 金相灿,庞燕,王圣瑞,等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报,2008,27(1): 279-285.
- [22] 潘成荣,汪家权,郑志侠,等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究[J]. 生态与农村环境学报,2007,23(1): 43-47.
- [23] Ruiz-Fernández A, Hillaire-Marcel C, Ghaleb B, *et al.* Recent sedimentary history of anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, northwestern Mexico: geochemical evidence from organic matter and nutrients[J]. Environmental Pollution, 2002, 118(3): 365-377.
- [24] 袁旭音,郑祥民. 太湖底泥的空间分布和富营养化特征[J]. 资源调查与环境, 2003, 24(1): 20-28.
- [25] 张亚丽,沈其荣. 有机肥料对土壤有机磷组分及生物有效性的影响[J]. 南京农业大学学报,1998,21(3): 59-63.
- [26] 徐阳春,沈其荣,茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响[J]. 土壤学报,2003,40(4): 593-598.
- [27] 王强,耿金菊,金红梅,等. 太湖沉积物中微生物和磷化氢的时空分布及关系[J]. 中国环境科学,2006,26(3): 350-354.
- [28] Tarafdar J, Jungk A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus[J]. Biology and Fertility of Soils, 1987, 3(4): 199-204.
- [29] Mafongoya P, Barak P, Reed J. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of tree leaves and manure[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 30(4): 298-305.
- [30] Khoshmanesh A, Hart B T, Duncan A, *et al.* Luxury uptake of phosphorus by sediment bacteria[J]. Water Research, 2002, 36(3): 774-778.