

# 大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征

王世亮<sup>1,2</sup>, 王志刚<sup>1</sup>, 王萍<sup>1</sup>, 林春野<sup>1\*</sup>, 全向春<sup>1</sup>, 何孟常<sup>1</sup>, 杨志峰<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 2. 曲阜师范大学生命科学院, 曲阜 273165)

**摘要:** 用柱状采样器在大辽河水系采集 4 个沉积物柱, 利用选择性连续提取法研究了沉积物中磷的形态, 探讨了磷与铁、铝、钙和有机质含量之间的关系及磷的生物有效性。结果表明, 大辽河水系沉积物总磷(TP)含量在 323~ 2 619 mg·kg<sup>-1</sup>之间。除浑河剖面 25~ 47 cm 深度外, 钙结合态磷(Ca-P)含量最高, 约占 TP 的 40% 以上。其次为铁结合态磷(Fe-P)和残渣态磷(RES-P), 各占 TP 的 15%~ 25%。第三为闭蓄态磷(RS-P)和铝结合态(Al-P), 各占 TP 的 5%~ 10%。溶解与弱结合态磷(S/L-P)的含量仅占 TP 的 0.5% 以下。浑河剖面 25~ 47 cm 深度, P 的大量积累导致 Fe-P、Al-P 含量升高, 分别占 TP 的 19.6%~ 34.1% 和 6.2%~ 23.4%; 而 Ca-P 占 TP 的含量下降, 为 TP 的 14.6%~ 35.6%。河流下游(大辽河)沉积物较上游(浑河和太子河)沉积物含有较高的 S/L-P、Al-P 和 Fe-P, 因此有较高的释放风险和生物可用性。相关分析表明, 除浑河剖面 25~ 47 cm 深度外, 沉积物 Fe 结合 P (Fe-P+RS-P)、Ca-P 和 RES-P 分别与沉积物 Fe、Ca 和有机质含量正相关, 但 Al-P 与 Al 的含量不相关; 而且, TP 含量与 Fe、有机质含量正相关, 与 Al、Ca 含量不相关。大部分沉积物中 Fe 与 TP 的摩尔比为 20.9~ 33.9, 表明有进一步固定磷的能力。磷的生物有效性分析结果表明, 大辽河水系沉积物中潜在生物有效磷含量在 67.99~ 1 450.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 对水体富营养化构成潜在威胁。

**关键词:** 大辽河水系; 沉积物; 磷; 形态; 分布

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3494-08

## Chemical Forms and Distribution of Phosphorus in the Sediment Profiles of the Daliaohe River Systems

WANG Shi-liang<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-gang<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, LIN Chun-ye<sup>1</sup>, QUAN Xiang-chun<sup>1</sup>, HE Meng-chang<sup>1</sup>, YANG Zhi-feng<sup>1</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** The Daliaohe river system in China has been seriously affected by long-term intensive industrial, urban and agricultural activities. The objective of this study was to determine the total phosphorus (TP) content and forms of phosphate in the sediments and investigate geochemical relationships between P forms and mineral matrix elements and P bioavailability. Four sediment profiles were taken in the Daliaohe river systems. TP content in the sediment was measured by ICP-OES and chemical forms of phosphate were measured by sequential selective extraction method. Results indicated that TP ranged from 323 to 2 619 mg·kg<sup>-1</sup>. In the sediments except 25-47 cm depth of sediment profile in the Hun river, the content of Ca bound P (Ca-P) was the highest, with more than 40% of TP. The contents of Fe bound P (Fe-P) and residual P (RES-P) were 15% to 25% of TP, while the contents of reductant soluble P (RS-P) and Al bound P (Al-P) were generally 5% to 10% of TP. However, the content of soluble and loosely bound P (S/L-P) was only less than 0.5% of TP. Huge accumulation of P in the 25-47 cm depth of the sediment profile in the Hun river led to a bigger increase in the contents of Fe-P and Al-P than Ca-P, where Al-P, Fe-P and Ca-P contents were 6.2%-23.4%, 19.6%-34.1% and 14.6%-35.6% of TP, respectively. Correlation analysis showed that sum of Fe-P and RS-P, Ca-P, and RES-P were positively correlated to Fe, Ca, and sediment organic matter (SOM) contents, respectively in the sediments except the 25-47 cm depth of sediment profile in the Hun river. In addition, TP content was positively correlated to Fe and SOM contents. The molar ratios of Fe to TP generally ranged from 20.9 to 33.9, indicating that most of sediments have capability to further retain P. Potential bioavailable P (BAP) including S/L-P, Al-P and Fe-P in the sediments was 85.43 to 1 450.86 mg·kg<sup>-1</sup>, and this part of phosphorus might pose a potential risk to the eutrophication of the Daliaohe river system and its estuary.

**Key words:** Daliaohe river system; sediment; phosphorus; chemical forms; distribution

磷的地球化学具有重要的环境学意义。一方面, 磷是陆生和水生生物重要的营养元素; 另一方面, 过量的磷可能导致地表水体富营养化。在河湖水域中, 磷是最主要的限制性营养元素<sup>[1]</sup>。20 世纪 60 年代以来, 随着大量的磷排入水体, 磷的环境污染问题引起

了广泛关注。各种途径进入水体的磷, 通过在矿物表

收稿日期: 2009-04-11; 修订日期: 2009-03-13

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418502); 国家自然科学基金项目(40671002)

作者简介: 王世亮(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水土环境化学, E-mail: wshiliang@mail.bnu.edu.cn  
通讯联系人: E-mail: c\_li@bnu.edu.cn



浑河沉积物剖面: 该剖面 TP 浓度范围为 323~ 2 619 mg·kg<sup>-1</sup>; 其中, 0~ 25 cm 深度 TP 浓度为 323~ 456 mg·kg<sup>-1</sup>, 25 cm 深度以下 TP 浓度随深度急剧升高, 在 40~ 43 cm 处达到最大值 2 619 mg·kg<sup>-1</sup> (图 2). 各种形态磷与 TP 的变化相似, 但是 Al-P 和 Fe-P 升高幅度大于 RS-P 和 Ca-P 升高幅度, 导致 25 cm 深度以下 Al-P 和 Fe-P 占 TP 的百分比升高, 而 RS-P 和 Ca-P 占 TP 的百分比下降. 25cm 深度以上, S/L-P、Al-P、Fe-P、RS-P、Ca-P 和 RES-P 分别占 TP 含量的 0.13% ~ 0.86%、3.03% ~ 5.83%、13.95% ~

20.27%、8.17% ~ 13.26%、36.43% ~ 64.53% 和 6.47% ~ 33.04%; 而 25 cm 深度以下, 上述几种形态的 P 分别占 TP 含量的 0.23% ~ 0.85%、6.16% ~ 23.39%、19.67% ~ 34.06%、4.91% ~ 8.50%、14.57% ~ 35.63% 和 19.68% ~ 29.47%. 总体上, Ca-P、RES-P、Fe-P 为 P 的主要形态. 剖面底部较高的 TP、Al-P 和 Fe-P 含量可能为过去污水排放导致的 P 的积累. 有研究指出, 对于接纳污水较多的河流湖泊, 沉积物中 Fe-P 一般是 P 的主要形态<sup>[62]</sup>. 因此, 25 cm 深度以下的沉积年代, 浑河沈阳下游污染严重.

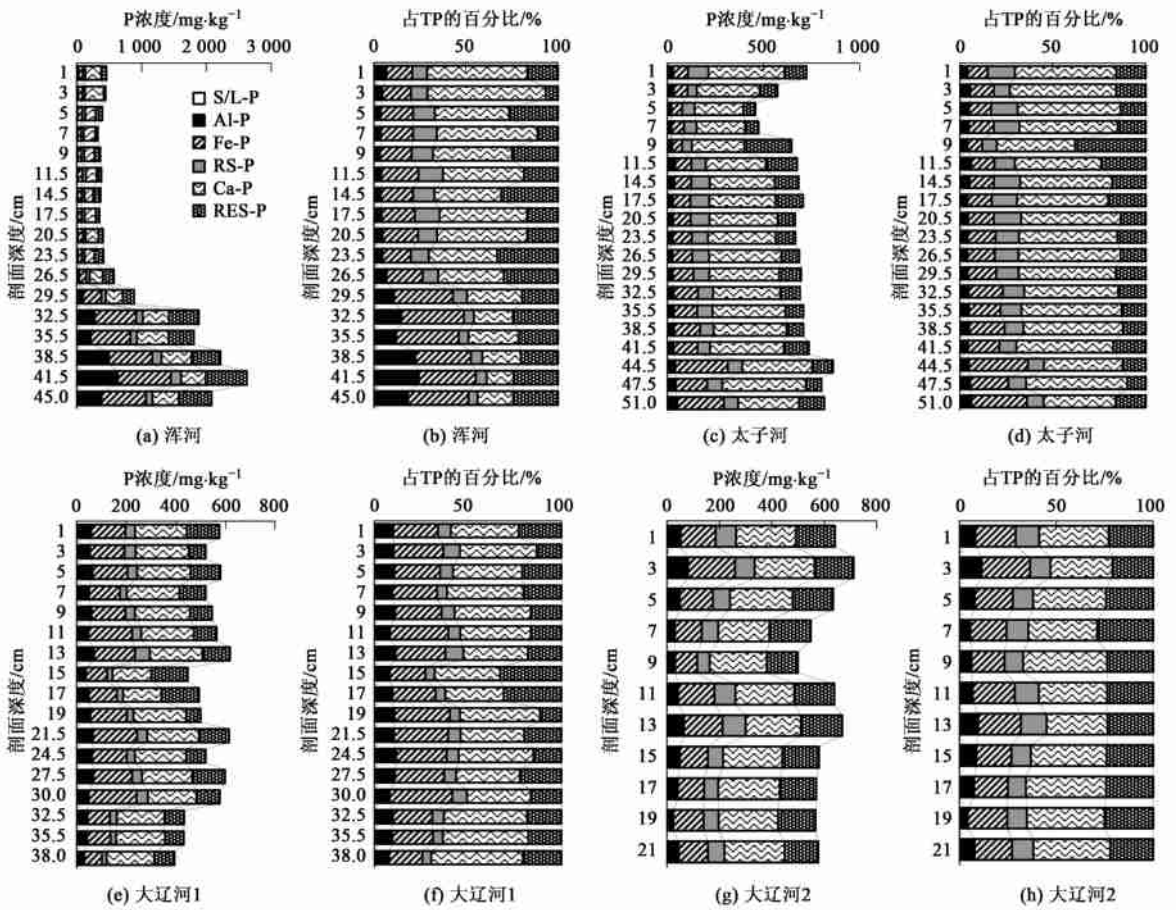


图 2 沉积物剖面中各形态磷浓度及所占总磷(TP)的百分比

Fig. 2 Concentrations of various chemical forms of phosphorus and their percentages out of total phosphorus (TP) in the sediment profiles

太子河沉积物剖面: 该剖面 TP 浓度在 458~ 862 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 在 4~ 6 cm 深度含量最低, 为 458 mg·kg<sup>-1</sup>. 8 cm 深度以下, TP 浓度随深度缓慢升高, 从 646 mg·kg<sup>-1</sup> 升高到约 800 mg·kg<sup>-1</sup> (图 2). S/L-P、Al-P、Fe-P、RS-P、Ca-P、RES-P 平均占 TP 的 0.25% (0.15% ~ 0.35%)、4.63% (3.81% ~ 6.10%)、16.17% (8.06% ~ 31.71%)、11.53% (7.81% ~ 14.73%)、50.81% (38.76% ~ 57.18%) 和

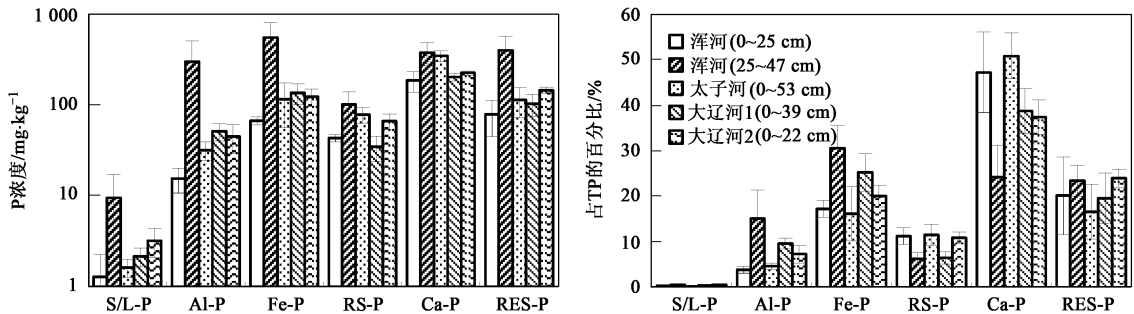
16.61% (10.04% ~ 37.89%). 总体上, Ca-P > Fe-P、RES-P > RS-P > Al-P > S/L-P. 而且, 8 cm 深度以下, Fe-P 的比例表现出随深度升高的趋势; 而 RES-P 的比例表现出随深度下降的趋势; 其它各种形态磷所占的比例相对稳定.

大辽河沉积物剖面: 在大辽河采集了 2 个沉积物剖面 D1 和 D2. D1 沉积物剖面 TP 浓度在 394~ 618 mg·kg<sup>-1</sup> 之间, 没有表现出明显的升高或降低趋

势(图 2). S/L-P、Al-P、Fe-P、RSE-P、Ca-P、RES-P 平均占 TP 的 0.41% (0.29% ~ 0.56%)、9.62% (7.60% ~ 11.21%)、25.25% (17.74% ~ 33.37%)、6.74% (4.84% ~ 9.61%)、38.71% (31.10% ~ 48.87%) 和 19.54% (11.35% ~ 32.69%). D2 沉积物剖面 TP 浓度在 499~712  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为 603  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . S/L-P、Al-P、Fe-P、RS-P、Ca-P、RES-P 平均占 TP 的 0.53% (0.43% ~ 1.01%)、7.28% (4.05% ~ 11.04%)、19.99% (17.00% ~ 25.03%)、10.88% (9.29% ~ 13.19%)、37.88% (31.52% ~ 43.43%) 和 23.94% (20.97% ~ 28.81%), 见图 2. 对于大辽河沉积物剖面, TP 及各形态 P 没有随深度变化呈现出明显的变化趋势.

总体而言, 除浑河剖面 25~47cm 深度外, Ca-P 的含量最高, 约占 TP 的 40% 以上. 其次为 Fe-P 和 RES-P, 约占 TP 的 15%~25%. 第三为 RS-P 和 Al-P, 约占 TP 的 5%~10%. S/L-P 的含量仅占 TP 的 0.5% 以下(图 3). 浑河剖面 25~47cm 深度, P 的大量积累导致 Fe-P、Al-P 含量升高, 甚至超过了 Ca-P 的含量. 空间分布上, 河流下游(大辽河)沉积物较上游(浑河和太子河)沉积物含有较高的 S/L-P、Al-P 和 Fe-P, 因此有较高的释放风险和生物可用性. 有研究

表明: 太湖东北部表层沉积物中(0~10 cm) S/L-P 的含量一般低于 TP 的 5%, NaOH 提取的 P(包括 Al-P 和 Fe-P)约占 TP 的 10%~45%, 有机 P(Olsen-P)约占 TP 的 5%~10%<sup>[47]</sup>. 武汉东湖沉积物中溶解活性 P(SRP)仅为 TP 的 0.2% 以下, 而 Fe-P 的含量高达 TP 的 35%~55%<sup>[52,53]</sup>. 南京玄武湖和莫愁湖 Fe-P 含量占 TP 的 30%~50%<sup>[63]</sup>. 山东半岛桑沟湾海湾 S/L-P 占 TP 的 9.9%, 而 Fe-P 仅占 TP 的 4.7%<sup>[64]</sup>. 因此, 大辽河水系沉积物铁铝结合态磷的含量与太湖东北部表层沉积物相似, 但是铁结合态磷的含量低于武汉东湖和南京玄武湖和莫愁湖. 另一方面, 大辽河水系沉积物 S/L-P 的含量远远低于山东半岛桑沟湾海湾沉积物, 但是 Fe-P 的含量远远高于桑沟湾海湾沉积物. 另有研究表明沉积物中 Fe-P 的百分含量与湖泊水质污染程度相一致, 富营养化越严重的区域 Fe-P 的含量越高<sup>[7,46,63]</sup>. 因此, 通过与上述水域的对比, 大辽河沉积物剖面以及浑河沉积物剖面 25~47 cm 深度较高的 Fe-P 含量表明了该区域较高的外源 P 的输入及对水体富营养化较大的潜在威胁. 尽管难溶性的磷酸钙矿物是沉积物早期成岩的最终产物之一<sup>[30]</sup>, 但是本研究中 Ca-P 占 TP 的百分比并未随深度增加而升高. 这可能表明向



浑河剖面分成 0~25 cm 和 25~47 cm 深度两段统计

图 3 浑河、太子河、大辽河沉积物剖面各形态 P 的平均含量及占总磷 (TP) 的百分比

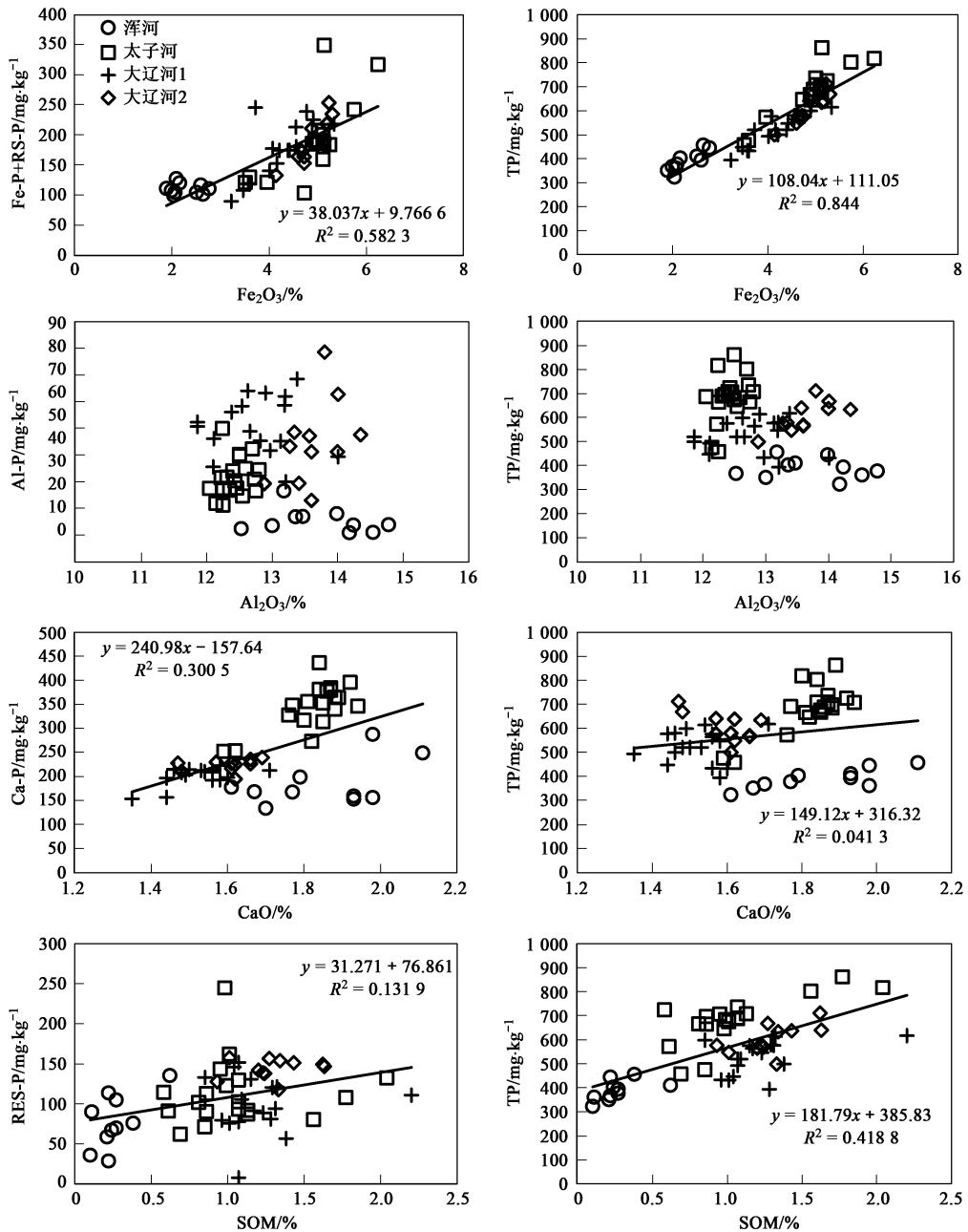
Fig. 3 Average concentrations of various chemical forms of phosphorus and their average percentages out of total phosphorus (TP) in the profile sediment profiles of the Hun river, Taizi river, and Daliaohe river

Ca-P 的转化是极为缓慢的地球化学过程.

## 2.2 磷的形态与 Fe、Al、Ca、有机质含量的地球化学关系

沉积物中 P 的化学形态分布取决于沉积物的矿物组成. 浑河剖面 25~47 cm 深度除外, 其余沉积物剖面 Fe 结合 P(Fe-P+RS-P)、Ca-P 和 RES-P 分别与沉积物 Fe、Ca 和有机质(SOM)含量正相关, 但 Al-P 与 Al 的含量不相关(图 4). 国外大量研究也表明: 在河湖沉积物中 Fe-P 与 Fe 含量具有较好的相关性,

如丹麦湖泊<sup>[14,17]</sup>, 地中海沿海环礁湖<sup>[65]</sup>, 法国沿海地区<sup>[66]</sup>等. Fe-P 与 Fe 含量, Ca-P 与 Ca 含量的正相关性可能是由于磷酸根在铁氧化物和碳酸盐矿物表面上的吸附与沉淀所致. 在粘土含量较低的沉积物中, 铝主要存在于原生铝硅酸盐矿物, 与磷的结合性很低, 导致沉积物中 Al-P 与 Al 的含量不相关. 而且, 沉积物 TP 的含量与 Fe、SOM 含量正相关, 与 Al、Ca 含量不相关(图 4). 沉积物 TP 与 Fe 的相关系数高于 Fe 结合 P(Fe-P+RS-P)与 Fe 的相关系数, 表明



Fe、Al、Ca的含量以其氧化物的形式表示；图中数据点不包括浑河剖面25~47 cm深度

图4 P的形态及TP与沉积物Fe、Al、Ca、SOM含量之间的关系

Fig. 4 Relationships between concentrations of phosphorous forms and total phosphorus and contents of Fe, Al, Ca and SOM in the sediments

Fe 氧化物不仅能结合 P, 而且在一定条件下可根据沉积物 Fe 含量推测沉积物中 TP 的含量。

Jensen 等<sup>[17]</sup> 研究发现, 当淡水沉积物 Fe 与 TP 的摩尔比高于 8.5 时, 该沉积物具有进一步积累 P 的能力; 当低于 8.5 时, 该沉积物具有极高的释放 P 的风险。对于大辽河水系沉积物, 除浑河沉积物剖面底部外, 其余沉积物剖面 Fe 与 TP 的摩尔比的平均值为 27.0 (20.9~33.9); 因此, 具有进一步积累 P

的能力。但是浑河沉积物剖面底部 Fe 与 TP 的摩尔比值接近 8.5; 因此, 具有很高的释放 P 的风险。

### 2.3 辽河流域沉积物中生物有效态磷

大辽河流域曾是我国重要的重工业基地之一, 钢铁、煤炭等重工业发达。辽河流域经济的迅速发展导致工农业和生活污水排放量急剧增加, 使大辽河流域水体中营养盐含量水平显著增加, 水质污染严重。因此, 沉积物中磷的污染评价及释放风险评价对

于该地区水域管理和环境保护具有积极作用。磷的生物可利用性一直是国内外学者关注的焦点<sup>[30,67]</sup>, 用生物可利用磷(BAP)含量表征沉积物中潜在可供生物利用的活性磷含量, BAP可通过化学和生物的作用转化为溶解态活性磷进入水体被藻类吸收利用, 并影响磷酸盐在水土界面间的释放速率。因此, 生物可利用磷(BAP)在预测河口潜在生态环境风险时具有重要的指导意义<sup>[40]</sup>, 不同形态特征的磷生物可利用程度不同, 溶解和弱吸附态磷易进入水体被生物所利用, 铁结合态磷和铝结合态磷是潜在的活性磷, 在一定条件下能进入水体被生物利用<sup>[27,68]</sup>。朱广伟等<sup>[33]</sup>、刘晓端等<sup>[55]</sup>很多研究者也把溶解和弱吸附态磷、铁结合态磷和铝结合态磷这3种形态磷的总和定义为生物可利用磷。综合以上考虑, 本研究将S/L-P、A+P和Fe-P之和作为BAP。结果表明浑河、太子河、大辽河沉积物剖面BAP含量分别为67.99~1450.86、76.98~315.20、101.21~260.12 mg·kg<sup>-1</sup>, 各占TP的19.89%~55.40%、12.10%~36.57%和23.45%~41.70%。

### 3 结论

(1) 浑河、太子河、大辽河沉积物剖面TP含量分别为323~2619、458~862、394~712 mg·kg<sup>-1</sup>。从次表层(5~7 cm深度)开始, 浑河和太子河沉积物剖面TP和Fe-P含量随深度呈现出升高趋势, 而大辽河沉积物剖面各形态P及TP含量未随深度发生明显变化, 这可能与河流污染和沉积历史有关。

(2) 除严重污染的浑河剖面25~47 cm深度外, 沉积物中Ca-P含量最高, 约占TP的40%以上; 其次为Fe-P和RES-P, 约占TP的15%~25%; 第三为RS-P和A+P, 约占TP的5%~10%; S/L-P的含量仅占TP的0.5%以下。浑河剖面25~47 cm深度, P的大量积累导致Fe-P、A+P含量升高, Ca-P相对含量降低。河流下游(大辽河)沉积物较上游(浑河和太子河)沉积物含有较高的S/L-P、A+P和Fe-P, 因此有较高的二次释放风险和生物可用性。

(3) 除严重污染的沉积物外, 沉积物剖面Fe结合P(Fe-P+RS-P)、Ca-P和RES-P分别与沉积物Fe、Ca和有机质(SOM)含量正相关, 但A+P与Al的含量不相关。而且, 沉积物TP的含量与Fe、SOM含量正相关, 与Al、Ca含量不相关。Fe与TP的摩尔比值表明大部分沉积物有进一步固定P的能力, 而污染严重的沉积物(浑河沉积物剖面底部)已经达到了P的最大吸持容量, 具有很高的释放P的风险。

(4) 大辽河水系沉积物剖面BAP含量为67.99~1450.86 mg·kg<sup>-1</sup>, 占TP的12.10%~55.40%, 对水体富营养化构成潜在威胁。

致谢: 感谢原北京师范大学学生郭伟、王浩正、周豫湘、范英宏、门彬参与野外采样工作。

### 参考文献:

- [1] Alexander R B, Smith R A. Trends in the nutrient enrichment of US rivers during the late 20th century and their relation to changes in probable stream trophic conditions [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1): 639-654.
- [2] House W A, Denison F H. Phosphorus dynamics in a lowland river [J]. *Water Research*, 1998, **32**(6): 1819-1830.
- [3] Bedore P D, David M B, Stucki J W. Mechanisms of phosphorus control in urban streams receiving sewage effluent [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2008, **191**(1-4): 217-229.
- [4] Fox I, Makti M A, Perry R. The adsorption and release of phosphate from sediments of a river receiving sewage effluent [J]. *Water Research*, 1989, **23**(6): 725-732.
- [5] Fu C Y, Fang T, Deng N S. The research of phosphorus of Xiangxi River nearby the Three Gorges, China [J]. *Environ Geol*, 2006, **49**(6): 923-928.
- [6] Haggard B E, Smith D R, Brie K R. Variation in stream water and sediment phosphorus among select Ozark catchments [J]. *Environ Qual*, 2007, **36**(6): 1725-1734.
- [7] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积物磷形态分布研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 423-432.
- [8] 孙小静, 秦伯强, 朱广伟, 等. 持续水动力作用下湖泊底泥胶体态氮、磷的释放[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1223-1229.
- [9] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥再悬浮状态下生物有效磷形成机制研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1824-1830.
- [10] 逢勇, 颜润润, 余钟波, 等. 风浪作用下的底泥悬浮沉降及内源磷释放量研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2456-2469.
- [11] Song J M, Luo Y X, L X X, *et al.* Forms of phosphorus and silicon in the natural grain size surface sediments of the southern Bohai Sea, China [J]. *Oceanol Limnol*, 2003, **21**(3): 286-292.
- [12] House W A, Denison F H. Exchange of inorganic phosphate between river water and bed sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(20): 4295-4301.
- [13] Taylor A W, Kunishi H M. Phosphate equilibria on stream sediment and soil in watershed draining an agricultural region [J]. *J Agr Food Chem*, 1971, **19**(5): 827-831.
- [14] Sindergaard M, Windolf J, Jeppesen E. Phosphorus fractions and profile in the sediment of shallow Danish lakes as related to phosphorus load, sediment composition and lake chemistry [J]. *Water Research*, 1996, **30**(4): 992-1002.
- [15] Klapwijk S P, Kroon J M W, Meijer M L. Available phosphorus in lake sediments in the Netherlands [J]. *Hydrobiologia*, 1982, **92**(1): 491-500.
- [16] Herodek S, Istv novics V. Mobility of phosphorus fractions in the sediments of Lake Balaton [J]. *Hydrobiologia*, 1986, **135**(1-2): 149-154.

- [17] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, *et al.* Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 1992, **235/236**(1): 731-743.
- [18] Liu Z Y, Jin Z H, Li Y W, *et al.* Sediment phosphorus fractions and profile distribution at different vegetation growth zones in a macrophyte dominated shallow Wuliangshai Lake, China [J]. *Environ Geol*, 2007, **52**(5): 997-1005.
- [19] Gao L, Zhou J M, Yang H, *et al.* Phosphorus fractions in sediment profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake [J]. *Environ Geol*, 2006, **49**(5): 835-844.
- [20] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions [J]. *J Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1551-1559.
- [21] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Effects of organic matter on phosphorus release kinetics in different trophic lake sediments and application of transition state theory [J]. *J Environmental Management*, 2008, **88**(4): 845-852.
- [22] Liu S M, Zhang J, Li D J. Phosphorus cycling in sediments of Bohai and Yellow Seas [J]. *Estuarine, Coastal Shelf Science*, 2004, **59**(2): 209-218.
- [23] Wang S R, Jin X C, Pang Y, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. *J Colloid & Interface Science*, 2005, **289**(2): 339-346.
- [24] Tian J R, Zhou P J. Phosphorus fractions and adsorption characteristics of floodplain sediments in the lower reaches of the Hanjiang River, China [J]. *Environ Monit Assess*, 2008, **137**(1-3): 233-241.
- [25] 刘敏, 陆敏, 许世远, 等. 长江口及其上海岸带水体沉积物中磷的存在形态[J]. *地学前缘*, 2000, **7**(8): 94-98.
- [26] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(2): 7-12.
- [27] 高效江, 陈振楼, 许世远, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(11): 711-715.
- [28] 钱嫦萍, 陈振楼, 胡玲珍, 等. 崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J]. *环境科学*, 2003, **24**(5): 114-119.
- [29] 张斌亮, 张昱, 杨敏, 等. 长江中下游平原三个湖泊表层沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 595-600.
- [30] 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[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381-388.
- [31] 李敏, 韦鹤平, 王光谦, 等. 长江口、杭州湾水域沉积物中磷的化学形态分布特征[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(2): 125-130.
- [32] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 38-43.
- [33] 朱广伟, 秦伯强, 张路. 长江中下游湖泊沉积物中磷的形态及藻类可利用量[J]. *中国科学(D辑)地球科学*, 2005, **35**增刊 II): 24-32.
- [34] 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.
- [35] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义[J]. *热带海洋学报*, 2005, **24**(1): 21-27.
- [36] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, **38**(2): 111-116.
- [37] 林荣根, 吴景阳. 黄河口沉积物中无机磷酸盐的存在形态[J]. *海洋与湖沼*, 1992, **23**(4): 387-395.
- [38] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷[J]. *海洋科学*, 2000, **24**(7): 42-45.
- [39] 李北罡, 郭博书. 黄河中游表层沉积物中无机磷的化学形态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(6): 1607-1610.
- [40] 张宪伟, 潘纲, 王晓丽, 等. 内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 172-177.
- [41] 冯强, 刘素美, 张经. 黄、渤海区沉积物中磷的分布[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(2): 24-27.
- [42] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义[J]. *环境科学*, 2006, **27**(10): 1953-1962.
- [43] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. *海洋与湖泊*, 2006, **37**(4): 370-376.
- [44] 董方, 刘素美, 张经. 北黄海与渤海沉积物中磷形态的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(2): 18-23.
- [45] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 太湖表层沉积物磷的吸附容量及其释放风险评估[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(2): 97-104.
- [46] 金相灿, 孟凡德, 姜霞, 等. 太湖东北部沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(3): 388-396.
- [47] 徐玉慧, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. *环境科学*, 2006, **27**(5): 869-873.
- [48] 张路, 范成新, 王建军, 等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1537-1543.
- [49] 余源盛. 滇池沉积物中磷的分布和迁移特征[J]. *海洋与湖沼*, 1988, **19**(3): 149-156.
- [50] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(5): 776-781.
- [51] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总磷的时空分布特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(1): 51-57.
- [52] 冯峰, 方涛, 刘剑彤. 武汉东湖沉积物氮磷形态垂向分布研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1078-1082.
- [53] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1831-1837.
- [54] 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[J]. *岩矿测试*, 2003, **22**(2): 81-85.
- [55] 刘晓端, 徐清, 刘浏, 等. 密云水库沉积物水界面磷的地球化学作用[J]. *岩矿测试*, 2004, **23**(4): 246-250.
- [56] 徐清, 刘晓端, 王辉锋, 等. 密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J]. *中国科学(D辑)地球科学*, 2005, **35**(增刊 I): 281-287.
- [57] 安敏, 黄岁. 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.

- [58] 黄清辉, 王东红, 马梅, 等. 沉积物和土壤中磷的生物有效性评估新方法[J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 206-208.
- [59] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2421-2425.
- [60] Zhang H. Phosphorus Fractionation. In: Piezyński GM (Ed). Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters. North Carolina State University[EB/OL]. [http://www.soil.ncsu.edu/seral7/publications/seral7-2/pm\\_cover.htm](http://www.soil.ncsu.edu/seral7/publications/seral7-2/pm_cover.htm), 2000, 50-59.
- [61] Rao A S, Reddy K S, Takkar P N. Malachite green method compared to ascorbic acid for estimating small amounts of phosphorus in water, 0.01 M calcium chloride, and Olsen soil extracts [J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1997, **28**(6-8): 589-601.
- [62] 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.
- [63] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物中磷与铁的形态分布及相关关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3400-3404.
- [64] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物中磷的赋存形态及生物有效性[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2783-2788.
- [65] Moutin T, Picot B, Ximenes M C, *et al.* Seasonal variations of P compounds and their concentrations in two coastal lagoons (Herault, France) [J]. Hydrobiologia, 1993, **253**(1-3): 45-59.
- [66] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas [J]. Estuarine, Coastal Shelf Science, 2001, **52**(5): 617-629.
- [67] Reynolds C S, Davies P S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective[J]. Biological Reviews, 2001, **76**(1): 27-64.
- [68] 黄小平, 黄良民. 河口营养盐动力学过程研究的若干进展[J]. 黄渤海海洋, 2001, **19**(4): 86-92.