

# 北运河(北京段)底泥磷含量及其对上覆水质的影响

龚艳伟, 李晓秀, 王晓燕, 任万平

(首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

**摘要:** 采用 SMT 和 Psenner 分级提取法分别测定了北运河(北京段)底泥总磷和各结合态磷的含量, 结果表明, 春季北运河底泥 TP 平均含量为 1 086.29 mg/kg, 含量偏高, 属严重污染; 各结合态磷平均含量顺序为  $Ca-P > Al-P > Fe-P > NH_4Cl-P > Res-P > Org-P$ , 相同结合态磷的含量在不同采样点存在明显差异。通过对各结合态磷与上覆水质的相关性分析发现, 北运河(北京段)底泥 TP 含量主要受  $NH_4Cl-P$ 、 $Fe-P$ 、 $Al-P$  和  $Res-P$  影响, 其中  $Al-P$  的影响最大;  $NH_4Cl-P$ 、 $Fe-P$ 、 $Al-P$  和  $Res-P$  均与上覆水含磷量显著相关, 其中 BAP( $BAP \approx NH_4Cl-P + Fe-P + Al-P$ ) 平均含量达到 TP 的 48.63%, 且与上覆水含磷量极显著相关, 说明底泥磷特别是 BAP 的转化释放是引起上覆水体富营养化的重要因素。

**关键词:** 北运河; 底泥; 磷含量; 磷形态; SMT; Psenner; 富营养化

**中图分类号:** X522    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0039-06

## Effects of Phosphorus Contents in Sediments on Overlying Water Quality of Beiyun River in Beijing

GONG Yan wei, LI Xiao xiu, WANG Xiao yan, REN Wan ping

(College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The contents of total phosphorus and phosphorus fractions in sediments of Beiyun River in Beijing were determined by the SMT and Psenner sequential fractionation method. The results showed that the average content of TP is 1 086.29 mg/kg, indicating heavy pollution in the river. The order of average content of phosphorus fractions was  $Ca-P > Al-P > Fe-P > NH_4Cl-P > Res-P > Org-P$ , and the contents of the same phosphorus fractions can vary significantly at different sampling locations. According to the correlation analysis between phosphorus fraction and overlying water quality, the TP content of Beiyun River was mainly affected by  $NH_4Cl-P$ ,  $Fe-P$ ,  $Al-P$ , and  $Res-P$ , and  $Al-P$  had the greatest effect.  $NH_4Cl-P$ ,  $Fe-P$ ,  $Al-P$ , and  $Res-P$  had significant correlations with the phosphorus content of the overlying water. The average content of BAP ( $BAP \approx NH_4Cl-P + Fe-P + Al-P$ ) accounted for 48.63% of TP. The contents of phosphorus, especially BAP, in sediments have significant impacts on the eutrophication of water quality in Beiyun River.

**Key words:** Beiyun River; sediments; phosphorus content; phosphorus forms; SMT; Psenner; eutrophication

在大部分水体富营养化治理过程中, 对外源磷的控制并没有达到立竿见影的效果, 因此近几年来针对上覆水体受底泥(内源磷)污染的研究越来越多。底泥是磷元素累积和再生的重要场所, 其中的磷可以通过物理、化学和生物反应等各种复杂的过程再次释放到上覆水中, 造成二次污染。

我国对于底泥磷的研究主要集中在大中型湖泊和城市浅水湖泊, 如黄清辉<sup>[1]</sup>、金相灿<sup>[2,3]</sup>、李宝<sup>[4]</sup>等众多学者先后对太湖、巢湖、滇池等典型富营养化湖泊的底泥磷做了大量研究, 为这些重度富营养化水体的有效治理提供了有力的理论支持; 北京<sup>[5]</sup>、南京<sup>[6]</sup>、上海<sup>[7]</sup>等城市也开展了针对湖泊底

泥磷的污染研究。

对于河流而言, 底泥含量较湖库等封闭性水体低, 其水体的动态性在一定程度上加快了水体循环自净能力, 但同时也增加了对底泥的扰动和营养物质在水泥界面的迁移转化, 增加了底泥二次污染的风险。特别对于城市内河来说, 除了来自流域的地表径流和降水的补给之外, 大部分水源来自城市工业废水和生活污水, 水体和底泥污染情况更加严重。Lin Chunye<sup>[8]</sup>曾采用选择性分步提取法对大辽河底泥磷进行了提取分析, 指出河水的长期污染会导致河流底泥对磷的吸附能力的下降, 释放风险增加; 黄建军<sup>[9]</sup>、李大鹏<sup>[10]</sup>等对

收稿日期: 2013-05-19    修回日期: 2013-09-25    网络出版时间: 2013-10-10  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1027.007.html>  
基金项目: 国家重大水专项(2008ZX07209)  
作者简介: 龚艳伟(1988-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事水污染防控与治理方面研究。E-mail: vk1988@foxmail.com  
通讯作者: 王晓燕(1967-), 女, 甘肃人, 教授, 博士, 主要从事农业非点源污染及流域水质管理方面研究。E-mail: cnuwxy@sohu.com

城市河道底泥磷的吸附释放机理及影响因素等进行了研究,发现水力停留时间、环境温度和风速都对河流底泥磷的吸附释放有明显影响。

北运河作为北京市最大的排污河,是典型的重污染城市内河,一直是北京水环境治理的重点和难点。目前对于北运河底泥磷的研究非常少,仅有李楠等学者<sup>[11-12]</sup>曾采用 Bownar-Cole 有机磷分级修正体系,对北运河下游底泥中有机磷的形态分布特征和矿化机制进行了分析研究。本文拟采用化学连续提取法对北运河(北京段)的底泥磷进行了分级提取,测定北运河(北京段)春季底泥总磷和各结合态磷的含量,分析各结合态磷吸附释放特征和相关性,并结合生物有效磷和相关水质数据分析底泥磷对于上覆水体水质的影响,揭示了控制和消减底泥磷对于治理北运河水体富营养化的重要性,为北运河流域进一步合理有效地治理提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域及样品采集

北运河发源于北京市昌平区军都山南麓,先后流经北京市、河北省香河县和天津市武清区,直至天津市大红桥汇入海河,是海河水系的重要组成部分,承担着泄洪、引滦输水、调水等多重任务。北运河作为北京市流域面积最大、支流最多的重要水系,如今已成为北京市最大的排污河和污染最严重的河流。

本研究综合考虑支流汇入影响、采样点的均匀性以及采样易操作性,于 2012 年 4 月对北运河从沙河水库至杨洼闸河段的 9 个采样点进行春季采样,所有采样点均使用全球卫星定位仪(GPS)进行定位。各采样点分布和名称见图 1 和表 1。



图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling locations

采样时利用便携式沉积物采样器,采集表层约 10 cm 的底泥样品,将样品置于封口聚乙烯塑料袋中,与此同时还在各采样点用聚乙烯瓶采集了上覆水样。所有样品在采集完成后尽快转移至实验室, - 20 °C 冷冻保存直至处理分析。

### 1.2 样品分析

将部分底泥样品经高速离心获得间隙水样品,剩余样品经冷冻干燥后研磨过 100 目筛,密封冷藏保存待分析。

对上覆水和间隙水样分别测定了总磷 TP、总溶解态磷 DP 和溶解态活性磷 SRP。测定方法如下:未滤水样经过硫

酸钾消解,钼锑抗分光光度法测定 TP;过滤水样经过硫酸钾消化,钼锑抗分光光度法测定 DP;过滤水样直接采用钼锑抗分光光度法测定 SRP(国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会,2002)。相关数据见表 1, TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>、SRP<sub>0</sub>、TP<sub>1</sub>、DP<sub>1</sub>、SRP<sub>1</sub> 分别表示上覆水和间隙水 TP、DP 和 SRP 浓度。每个样品至少平行测定 3 次取平均值。

表 1 采样点上覆水和间隙水各形态磷及底泥有机质含量  
Table 1 Contents of all phosphorus forms in both overlying water and interstitial water and organic matter contents in sediments

编号	采样点	水质数据 / (mg · L <sup>-1</sup> )					
		TP <sub>0</sub>	DP <sub>0</sub>	SRP <sub>0</sub>	TP <sub>1</sub>	DP <sub>1</sub>	SRP <sub>1</sub>
1	沙河水库闸后	2.41	1.75	1.70	1.75	0.22	0.00
2	蔺沟桥	2.37	1.06	0.94	0.74	0.10	0.00
3	清河	3.26	2.57	2.52	3.27	1.31	1.31
4	温榆桥	2.53	1.81	1.68	3.32	1.95	1.82
5	坝河	1.17	0.69	0.68	1.52	0.12	0.00
6	运通大桥	2.17	1.60	1.54	3.74	1.60	1.05
7	沙古堆新桥	2.26	1.38	1.20	1.35	0.66	0.36
8	榆林庄闸	1.88	1.31	1.25	3.40	2.58	2.24
9	杨家洼闸	2.24	1.69	1.56	2.70	0.71	0.00

底泥总磷(TP)采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT<sup>[13]</sup>方法提取测定:底泥样品经 450 °C 灼烧,并用 3.5 mol/L 的 HCl 在室温振荡 16 h,采用钼锑抗分光光度法测定提取液中 SRP 含量。各形态磷采用经 Rydin<sup>[14]</sup>和 Zhou A M<sup>[15]</sup>改进后的 Psenner 法进行分级提取。该方法可操作性强,提取效率高,可依次得到弱吸附态磷(NH<sub>4</sub>Cl-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、钙结合态磷(Ca-P)、有机磷(Org-P)和残渣磷(Res-P)。Psenner 提取分离步骤如图 2 所示,采用钼锑抗分光光度法分别测定各提取液中 SRP 的含量。每个样品至少平行测定 3 次取平均值。

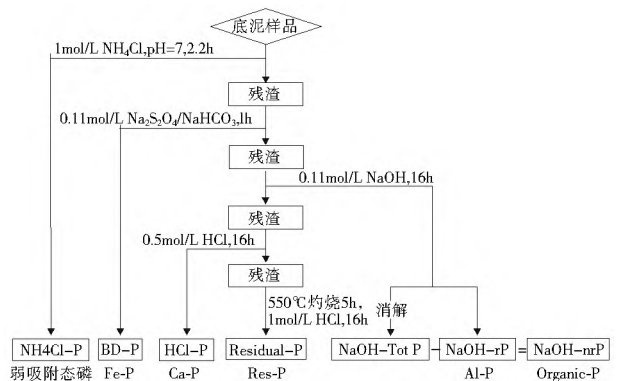


图 2 Psenner 分级提取步骤

Fig. 2 Sequential fractionation procedure of Psenner method

## 2 结果与讨论

北运河(北京段)各形态磷含量见表 2。在使用 SMT 法测定北运河底泥样品 TP 时,同步测定沉积物标准物质(GBW07423(GSS9))的 TP 含量,其回收提取率达到 94.32%,所以底泥样品 TP 的提取率可以达到分析研究要求。将 Psenner 分级提取的各结合态磷总和与 SMT 法提取测定的 TP 比较,以确定 Psenner 法的提取效率,详见表 2 中

P法提百分率。除采样点5的样品提取百分率偏低以外,其他采样点均达到80%以上,平均提取率为93.31%,可以达到分析研究要求。

### 2.1 各形态磷含量

北运河(北京段)各采样点春季底泥TP变化范围为518.48~2116.20 mg/kg,平均含量为1086.29 mg/kg。与黄河<sup>[16]</sup>、太湖<sup>[17]</sup>和巢湖<sup>[18]</sup>相比,北运河(北京段)春季底泥TP含量偏高,局部地区甚至高于太湖、巢湖等富营养化现象多发水体。Persaud等<sup>[19]</sup>提出湖泊底泥TP最低影响质量分数为600 mg/kg,当达到2000 mg/kg时,即视为遭到严重污染。而根据目前国内环境保护疏浚的一般要求,底泥TP含

量在500 mg/kg以上,就被认为污染严重,建议进行疏浚<sup>[20]</sup>。因此可以认为,北运河底泥已经严重污染,底泥磷很有可能被释放再次进入上覆水体,造成水体富营养化。

北运河各采样点间底泥TP含量分布存在明显的空间差异性,变异系数为44.69%。采样点1沙河水库闸后TP含量最低,为518.48 mg/kg;3号采样点清河汇入口的底泥TP含量最高,是沙河水库含量的近4倍,达到2116.20 mg/kg;4号采样点温榆桥底泥TP含量为1545.81 mg/kg,仅次于清河江汇入口,除了受沿线面源污染的影响外,很可能与上游来水的污染也有很大关系。下游其他各采样点底泥TP含量则较为平均。

表2 各采样点各形态磷含量及平均含量和提取效率

Table 2 Contents of all phosphorus forms and average content and extraction efficiencies at each sampling location

编号	TP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> ClP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	FeP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	AlP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	OrgP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	CaP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	ResP /(mg·kg <sup>-1</sup> )	P法提取 百分率(%)
1	518.48	33.03	181.66	76.55	—	255.91	20.70	109.52
2	1095.21	26.49	177.67	66.98	11.73	745.11	32.85	96.86
3	2116.20	165.80	323.41	1247.99	20.16	547.69	98.63	113.58
4	1545.81	147.41	219.75	577.76	47.86	435.14	53.89	95.86
5	756.65	24.45	126.41	93.41	18.50	183.60	32.55	63.29
6	1112.98	113.71	209.44	200.01	8.28	479.88	42.97	94.73
7	694.66	33.64	184.31	64.56	2.92	345.17	29.79	95.07
8	950.29	77.96	184.93	196.82	0.75	316.47	13.55	83.18
9	986.34	60.60	174.41	211.11	12.24	376.93	29.28	87.66
平均	1086.29	75.90	198.00	303.91	13.61	409.54	39.36	93.31

从表2可以看出,北运河(北京段)各结合态磷平均含量大小顺序为:CaP>AlP>FeP>NH<sub>4</sub>ClP>ResP>OrgP。对主要结合态磷的平均含量分析如下。

在各采样点中CaP平均含量最高,为409.54 mg/kg,其最高含量和最低含量分别出现在2号蔺沟桥和5号坝河采样点,两者相差4倍。CaP在整个研究流域变化范围小,各采样点间含量较为平均。这种含量高但变化小的CaP含量特征可能与我国北方的石灰性土壤成分有关<sup>[21]</sup>。

AlP和FeP平均含量较高,分别为303.91 mg/kg和198.00 mg/kg。AlP平均含量高主要是受各别采样点含量过高影响,如采样点3和采样点4,特别是采样点3处底泥磷中AlP含量达到1247.99 mg/kg,占TP的51.92%,是该采样点底泥磷最主要的贡献者。采样点3的FeP含量也是最高,其他各采样点之间FeP含量相差不大(变异系数为15.17%)。AlP和FeP一般被认为是生物可利用的磷,其含量与人类活动有关,主要来源于生活污水和工业废水<sup>[22]</sup>。清河是北运河(北京段)的最大支流,水污染严重,3号采样点清河支流入口底泥中AlP和FeP含量可能与清河生产和生活污水的大量汇入有很大关系。

NH<sub>4</sub>ClP是底泥中最具活性的一类磷形态,其含量一般较低。一些研究表明弱吸附态磷的含量在各种磷形态中是最少的<sup>[4,23,24]</sup>。本研究中弱吸附态磷含量也较低,但略高于残渣磷和有机磷,平均含量为75.90 mg/kg,这可能与提取方法的不同有关。北运河各采样点NH<sub>4</sub>ClP含量相差较大,空间变异系数达到71.52%,最大值和最小值分别出现在

3号采样点和5号采样点。

各形态磷中平均含量最低的是ResP和OrgP,分别为39.36 mg/kg,13.61 mg/kg。3号清河采样点ResP含量最高,达到98.63 mg/kg,其他各采样点含量较为平均;8号榆林庄闸含量最低,为13.55 mg/kg;4号温榆桥采样点OrgP含量最高,为47.86 mg/kg;1号采样点沙河水库闸后含量低于检出限,未测出。

从上述实验结果来看,春季北运河(北京段)各采样点不同形态磷的含量存在明显差异,总体来看1号采样点沙河水库闸后和5号坝河采样点各形态磷含量都较低,而3号清河采样点TP含量最高,其他各结合态磷特别是NH<sub>4</sub>ClP、AlP和FeP等活性态磷含量明显高于其他采样点,这可能与各采样点的污染程度有关系。

### 2.2 各形态磷的相关性分析

底泥中各结合态磷在一定条件可以互相转化,改变其赋存形态,从而改变其对于上覆水体的影响效果,分析不同结合态磷之间的相互关系,有助于了解底泥磷对于上覆水质的影响。北运河(北京段)各形态磷之间的相关性分析如表3所示。

由表3可以看出,底泥TP含量与NH<sub>4</sub>ClP、FeP、AlP和ResP均在0.01水平上极显著相关,其中与AlP相关性最好,相关性系数达到了0.934;而与CaP和有机磷OrgP含量相关性则不太明显。说明北运河底泥TP含量主要受NH<sub>4</sub>ClP、FeP、AlP和ResP影响,其中AlP的影响最大。

从各结合态磷之间的相关性可以看出,NH<sub>4</sub>ClP与FeP、

表 3 底泥 TP 与各形态磷之间的相关性

Table 3 Correlation between total phosphorus and phosphorus fractions in sediments

	TP	NH <sub>4</sub> ClP	FeP	AlP	CaP	OrgP	ResP
TP	1.000						
NH <sub>4</sub> ClP	0.878**	1.000					
FeP	0.871**	0.839**	1.000				
AlP	0.934**	0.855**	0.921**	1.000			
CaP	0.603	0.579	0.278	0.495	1.000		
OrgP	0.554	0.296	0.463	0.309	0.186	1.000	
ResP	0.912**	0.779*	0.875**	0.934**	0.523	0.427	1.000

注: \* 为在 0.05 的显著水平下, 显著相关(双侧近似 P 值)。\*\* 为在 0.01 的显著水平下, 显著相关(双侧近似 P 值)。

AlP 均呈极显著相关关系, FeP 与 AlP 之间也极显著相关。NH<sub>4</sub>ClP 和 FeP、AlP 是底泥磷中含量较高、活性较大的三种磷形态, 它们之间的相互转化、相互影响必将在很大程度上影响上覆水体中活性磷的含量。CaP 与 TP 和其他结合磷均无明显相关性, 说明北运河(北京段) CaP 来源与其他结合态磷可能有所不同, 其含量高但比较稳定, 较少发生转化释放, 对 TP 和其他结合态磷含量变化无明显影响。

北运河底泥 OrgP 与 TP 及其他结合态磷的含量均无明显相关性, 这与其他学者的研究有所不同。Xiang Sulin<sup>[25]</sup>在对鄱阳湖沉积物磷的研究中发现, 有机磷含量分布与铁/铝结合态磷呈显著正相关; 滑丽萍<sup>[26]</sup>也在对白洋淀底泥磷形态分析中指出可降解有机磷部分, 可以在早期成岩过程中随有机质的降解而释放, 甚至向其他结合态磷转化。对这一差异的原因分析如下。

底泥中的 OrgP 是由陆源性排放物质组成的难降解性部分和水生生物尸体组成的可降解性部分组成的。北运河作为北京市最大的排污河, 其水源大部分来自流域工业废水和生活污水, 陆源性排放物质带入大量难降解性有机磷; 而水质严重污染, 水生生物稀少, 可降解性有机磷含量较低。Zhang Runyu<sup>[27]</sup>曾通过对长江下流和西南高原不同污染程度的 6 个湖泊的底泥有机磷进行的分析研究, 指出污染越严重, 底泥中稳定性有机磷含量越大。因此北运河底泥中稳定性有机磷含量可能远远大于活性有机磷。在本研究中发现

难提取有机磷的残渣磷比可提取的有机磷含量更高, 也印证了这一点。因此底泥 OrgP 中可参与形态转化和降解释放的部分较少, 因而与其他形态之间的相关性也较低。

ResP 与 TP、NH<sub>4</sub>ClP、FeP 和 AlP 含量呈现出很好的相关性, 说明通过化学方法难提取的 ResP 仍然很有可能通过其他物理和生物化学反应与其他结合态磷之间相互转化, 并发生吸附或释放, 影响底泥中 TP 含量的变化。

### 2.3 各形态磷含量对上覆水质影响

底泥中不同赋存形态磷的释放特征、生物有效性是控制磷在水泥界面的迁移转化、影响上覆水质的主要因素, 而间隙水是磷水泥界面交换的重要界质。

通过表 4 的相关性分析可以看出 NH<sub>4</sub>ClP 与 TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>、SRP<sub>0</sub> 和 TP<sub>1</sub>、DP<sub>1</sub>、SRP<sub>1</sub> 都显著相关, 其中与 TP<sub>1</sub> 在 0.01 水平上极显著相关。NH<sub>4</sub>ClP 极易通过间隙水的渗透、水泥界面的物质交换和再悬浮被带到上覆水体中, 直接参与生态系统循环, 被水生生物吸收利用<sup>[28]</sup>, 因此虽然其含量较小, 对于水体富营养化的影响却至关重要。

FeP 与 TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>、SRP<sub>0</sub> 含量均在 0.01 水平上呈极显著性相关。FeP 对水泥界面的氧化还原电位极为敏感, 由于水泥界面氧化还原电位变化所引起的 FeP 的吸附和释放是影响上覆水磷含量的主要因素; 而 FeP 的分布在一定程度上与人类干扰相关<sup>[22]</sup>, 北运河作为北京市的排污河, 大量生活和生产污水汇入上覆水体必然在很大程度上也影响着底泥中 FeP 的含量和分布。

表 4 不同形态底泥磷与上覆水和间隙水磷相关性

Table 4 Correlations between phosphorus fractions and TP, DP, and SRP in overlying water and interstitial water

	TP <sub>0</sub>	DP <sub>0</sub>	SRP <sub>0</sub>	TP <sub>1</sub>	DP <sub>1</sub>	SRP <sub>1</sub>
NH <sub>4</sub> ClP	0.624*	0.762*	0.777*	0.826**	0.687*	0.726*
FeP	0.880**	0.890**	0.908**	0.525	0.398	0.481
AlP	0.721*	0.783*	0.837**	0.524	0.366	0.476
OrgP	0.210	0.211	0.211	0.277	0.222	0.314
CaP	0.583	0.270	0.221	-0.038	0.008	0.059
ResP	0.690*	0.686*	0.738*	0.366	0.146	0.264

注: \* 为在 0.05 的显著水平下, 显著相关(双侧近似 P 值)。\*\* 为在 0.01 的显著水平下, 显著相关(双侧近似 P 值)。

AlP 也与 TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>、SRP<sub>0</sub> 含量均呈显著性相关。一般情况下铝氧化物对磷是长久性吸附<sup>[29]</sup>, 较为稳定, 但由于铝氢氧化物属于两性氢氧化物, 且 Al<sup>3+</sup> 很容易水解<sup>[30]</sup>, AlP 的稳定性在一定程度上会受到 pH 值影响。根据本课题组多年的水质监测数据分析发现, 北运河水体 pH 值变化范围为 7.24~9.04, 平均值为 8.02, 时空变异很小(变异系数为

4.47%), 因此底泥中 AlP 应该处于相对稳定状态。AlP 与上覆水中各形态磷含量显著相关性可能与 AlP 高含量及其复杂的环境影响因素<sup>[31]</sup>有关。

OrgP 和 CaP 含量与上覆水和间隙水中各形态磷含量均无明显相关性。基于 2.2 中分析的北运河(北京段)OrgP 形态相对稳定, 较少发生转化和释放。CaP 本身也是比较

稳定的磷,可视为永久性吸附,对水体富营养化贡献很小。

从表3可知,Res P与TP、NH<sub>4</sub>ClP、FeP和AlP含量都有很好的相关性,说明底泥Res P在一定条件可以其他形态磷转化,并发生释放,对上覆水质产生影响。

表4中,FeP、AlP和Res P均与TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>、SRP<sub>0</sub>含量呈显著相关,而与间隙水中各形态磷含量相关性不明显,这可能是因为间隙水中各形态磷浓度受到底泥和上覆水中磷浓度的共同影响,一直处于两者吸收释放的动态平衡中,浓度变化不大。不过要探究其根本原因,还需要从底泥磷在水泥界面的迁移转化方式,或者从间隙水(水泥界面物质和交换介质)的作用方式入手,进行深入研究。

基于NH<sub>4</sub>ClP、FeP和AlP三者的活性,很多研究者将NH<sub>4</sub>ClP、FeP和AlP三者的和作为底泥中生物有效磷(BAP)的含量,即 $BAP \approx NH_4ClP + FeP + AlP^{[32,33]}$ 。本文中的相关性分析也显示,NH<sub>4</sub>ClP、FeP和AlP三者含量均与上覆水体磷含量密切相关,BAP含量与TP<sub>0</sub>、DP<sub>0</sub>和SRP<sub>0</sub>含量也在0.01水平上达到极显著相关,Pearson相关性系数分别为0.743、0.810和0.855。而且北运河(北京段)BAP含量可观,平均含量为577.81 mg/kg,达到TP的48.63%。因此控制和削减底泥磷特别是BAP的含量,对于控制北运河水体的富营养化至关重要。

### 3 结论

(1) 北运河(北京段)春季底泥TP平均含量为1 086.29 mg/kg,其含量偏高,属于严重污染;各结合态磷平均含量大小顺序为:CaP> AlP> FeP> NH<sub>4</sub>ClP> Res P> Org P。各采样点不同形态磷的含量存在明显差异,清河支流汇入口处TP和其他各结合态磷含量都较高,支流污水的汇入在污染北运河上覆水体的同时,也对底泥产生了严重污染。

(2) 北运河(北京段)底泥TP含量主要受NH<sub>4</sub>ClP、FeP、AlP和Res P影响,其中AlP的影响最大。NH<sub>4</sub>ClP、FeP与AlP三者具有良好的相关性,它们之间的相互转化、相互影响必将在很大程度上影响上覆水体中活性磷的含量。CaP含量虽然最高但比较稳定,可能与河床背景值有关。Org P与TP及其它结合态磷含量均无明显相关性,该结果可能与北运河Org P中可降解部分含量较低有关。

(3) 北运河(北京段)底泥NH<sub>4</sub>ClP、FeP、AlP和Res P均与上覆水体含磷量显著相关,其中NH<sub>4</sub>ClP、FeP和AlP三者之间的转化释放是引起上覆水体富营养化的决定性因素;北运河(北京段)底泥BAP平均含量百分比达到TP的48.63%。底泥很可能是北运河(北京段)的“磷源”,若要彻底有效的治理其水体富营养化,在降低外源污染输入的同时还必须对底泥磷(特别是BAP的含量)进行控制和削减。

#### 参考文献(References):

[1] 黄清辉,王东红,王春霞,等.太湖梅梁湾和五里湖沉积物磷形态的垂向变化[J].中国环境科学,2004,24(2):147-150. (HUANG Qinghui, WANG Donghong, WANG Chunxia, et al. Vertical Variation of the Phosphorus form in the Sediments of Meiliang Bay and Wuli Lake of Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 147-150. (in Chinese))

[2] 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. (JIN Xiangcan, PANG Yan, WANG Shengrui, et al. Phosphorus Forms and Its Distribution Character in Sediment of Shallow Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Agricultural Environment Science, 2008, 27(1): 279-285. (in Chinese))

[3] 金相灿,王圣瑞,庞燕.太湖沉积物磷形态及pH值对磷释放的影响[J].中国环境科学,2004,24(6):707-711. (JIN Xiangcan, WANG Shengrui, PANG Yan. The Influence of Phosphorus Forms and pH on Release of Phosphorus from Sediments in Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2004, 24(6): 707-711. (in Chinese))

[4] 李宝,范成新,丁士明.滇池福保湾沉积物磷的形态及其与间隙水磷的关系[J].湖泊科学,2008,20(1):27-32. (LI Bao, FAN Chengxin, DING Shiming. Phosphorus Species in Sediments and Their Relationships with Soluble Phosphorus Concentrations in Interstitial Waters of Fubao Bay in Lake Dianchi[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(1): 27-32. (in Chinese))

[5] 卢少勇,王佩,王殿武,等.北京六湖表层底泥磷吸附容量及潜在释放风险[J].中国环境科学,2011,31(11):1836-1841. (LU Shaoyong, WANG Pei, WANG Dianwu, et al. Phosphorus Sorption Capacity of the Sediment in Six Lakes of Beijing and Risk of Potential Phosphorus Release[J]. China Environmental Science, 2011, 31(11): 1836-1841. (in Chinese))

[6] 王超,邹丽敏,王沛芳,等.典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J].环境科学,2008,29(5):1303-1307. (WANG Chao, ZOU Limin, WANG Peifang, et al. Relation Between Distribution of Phosphorus Form in the Sediment of Typical Urban Shallow Lakes and Eutrophication[J]. Environmental Science, 2008, 29(5) 1303-1307. (in Chinese))

[7] 康丽娟,孙从军,李小平.淀山湖沉积物磷分布特征[J].环境科学学报,2012,32(1):190-196. (KANG Lijuan, SUN Congjun, LI Xiaoping. Forms and Distribution of Phosphorus in Sediments of Dianshan Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1): 190-196. (in Chinese))

[8] Chunye Lin, Zhigang Wang, Mengchang He, et al. Phosphorus Sorption and Fraction Characteristics in the Upper, Middle and Low Reach Sediments of the Daliao River Systems, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 170: 278-285.

[9] 黄建军,赵新华,孙井梅,等.城市河道底泥释磷的影响因素研究[J].中国给排水,2010,26(5):93-95. (HUANG Jianjun, ZHAO Xinhua, SUN Jingmei, et al. Study on Influence Factors of Phosphorus Release from Sediment in Urban Riverway[J]. China Water & Waste Water, 2010, 26(5): 93-95. (in Chinese))

[10] 李大鹏,黄勇,袁砚,等.城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J].环境科学,2011,32(1):96-101. (LI Dapeng, HUANG Yong, YUAN Yan, et al. Mechanism of Phosphorus Adsorption and Imobility by Sediments in Inner City Heavily Polluted Canal[J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 96-101. (in Chinese))

[11] 李楠,单保庆,张洪,等.北运河下游典型灌溉沉积物有机磷形态分布特征[J].环境科学,2010,31(12):2911-2916. (LI Nan, SHAN Baoping, ZHANG Hong, et al. Organic Phos-

- phorus Forms in the Sediments in the Downstream Channel of North Canal River Watershed [ J ]. Environmental Science, 2010, 31(12): 2911-2916. (in Chinese)
- [ 12 ] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 沉积物中有机磷在 pH 和温度影响下的矿化机制 [ J ]. 环境科学, 2011, 32(4): 1008-1014. ( LI Nan, SHAN Baoqing, ZHANG Hong, et al. Organic Phosphorus Mineralization in the Sediments under the Impact of pH and Temperature [ J ]. Environmental Science, 2011, 32(4): 1008-1014. (in Chinese) )
- [ 13 ] 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 [ J ]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(4): 403-407.
- [ 14 ] Rydin E. Potentially Mobile Phosphorus in Lake Erken Sediment [ J ]. Water Research, 2000, 34(7): 2037-2042.
- [ 15 ] Zhou A M, Wang D S, Tang H X. Phosphorus Fractionation and Bioavailability in Taihu Lake (China) Sediments [ J ]. Journal of Environmental Science, 2005, 17(3): 384-388.
- [ 16 ] 王晓丽, 张丽坤. 黄河中下游表层沉积物磷的赋存形态特征 [ J ]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 904-907. ( WANG Xiaoli, ZHANG Likun. Character of Phosphorus Forms in Surface Sediments from Middle and Lower Reaches of Yellow River [ J ]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(5): 904-907. (in Chinese) )
- [ 17 ] 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. ( LI Jiang, JIN Xiangcan, JIANG Xia, et al. Vertical Changes of Physiochemical Characteristics and Phosphorus Concentrations of Sediments from Different Trophic Regions of Taihu Lake [ J ]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(4): 64-69. (in Chinese) )
- [ 18 ] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究 [ J ]. 环境科学, 2012, 33(7): 2322-2329. ( WEN Shengfang, SHAN Baoqing, ZHANG Hong. Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake [ J ]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2322-2329. (in Chinese) )
- [ 19 ] Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the Protection and Management of Aquatic Sediment Quality in Ontario [ M ]. Ontario: Queens Printer for Ontario, 1993.
- [ 20 ] 刘鸿亮, 金相灿, 荆一风. 湖泊底泥环境疏浚工程技术 [ J ]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 81-84. ( LIU Hongliang, JIN Xiangcan, JIN Yifeng. Environmental Dredging Technology of Lake's Sediment [ J ]. China Engineering Science, 1999, 1(1): 81-84. (in Chinese) )
- [ 21 ] 安文超, 张书武, 和慧等. 南四湖及主要入湖河口区表层沉积物磷的形态与分布特征研究 [ J ]. 环境科学学报, 2012, 32(4): 895-901. ( AN Wenchao, ZHANG Shuwu, HE Hui, et al. Phosphorus Fractions and Distribution Characteristics in Sediments of Nansi Lake, China, and Its Main Inflow Rivers [ J ]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(4): 895-901. (in Chinese) )
- [ 22 ] Ruban V, et al. Harmonized Protocol and Certified Reference Material for the Determination of Extractable Contents of Phosphorus in Freshwater Sediments: A Synthesis of Recent Works [ J ]. Fresenius J Anal Chem, 2001, 370: 224-228.
- [ 23 ] 夏学惠, 东野脉兴, 周建民. 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. ( XIA Xuehui, DONG Yemai, ZHOU Jianming. Geochemistry and Influence to Environment Phosphorus in Modern Sediments in Dianchi Lake [ J ]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(3): 416-420. (in Chinese) )
- [ 24 ] 张路, 范成新, 池悄悄. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究 [ J ]. 地球化学, 2004, 33(4): 423-432. ( ZHANG Lu, FAN Chengxin, CHI Qiaoqiao. Phosphorus Species Distribution of Sediments in Lake Taihu and Its Main Inflow Rivers [ J ]. Geochimica, 2004, 33(4): 423-432. (in Chinese) )
- [ 25 ] Sulin Xiang, Wenbin Zhou. Phosphorus Forms and Distribution in the Sediments of Poyang Lake, China [ J ]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26: 230-238.
- [ 26 ] 滑丽萍, 李贵宝, 华路, 等. 不同芦苇生境下白洋淀底泥磷形态分析研究 [ J ]. 南水北调与水利科技, 2005, 3(2): 29-32. ( HUA Liping, LI Guibao, HUA Luo, et al. Study on Phosphorus Forms in Sediments of Baiyangdian Lake in Reed's Biosphere [ J ]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2005, 3(2): 29-32. (in Chinese) )
- [ 27 ] Runyu Zhang, Fengchang Wu, Congqiang Liu, et al. Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in Different Trophic Sediments of Lakes from the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Region and Southwestern Plateau, China [ J ]. Environmental Pollution, 2008, 152: 366-372.
- [ 28 ] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus Fractionation in Lake Sediments Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [ J ]. Chemosphere, 2002, 46: 1147-1155.
- [ 29 ] Dapeng Li, Yong Huang, Chengxin Fan, et al. Contributions of Phosphorus on Sedimentary Phosphorus Bioavailability under Sediment Resuspension Conditions [ J ]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168: 1049-1054.
- [ 30 ] Qingman LI, Wen Zhang, Xingxiang Wang, et al. Phosphorus in Interstitial Water Induced by Redox Potential in Sediment of Dianchi Lake, China [ J ]. Soil Science Society of China, 2007, 17(6): 739-746.
- [ 31 ] 苏玉萍, 郑达贤, 庄一廷, 等. 南方内陆富营养化湖泊沉积物磷形态特征研究 [ J ]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 362-365. ( SU Yuping, ZHENG Daxian, ZHUANG Yiting. Phosphorus Fractionations in Sediments from Eutrophicated Lakes in Fujian Province [ J ]. Journal of Agroenvironment Science, 2005, 24(2): 362-365. (in Chinese) )
- [ 32 ] 俞林伟, 谭镇, 钟萍, 等. 广州市流花湖表层底泥磷的形态与生物可利用性 [ J ]. 城市环境与城市生态, 2006, 19(2): 14-16. ( LU Linwei, TAN Zhen, ZHONG Ping, et al. Characteristics And Fractionation of Phosphorus in the Sediments of Lake Liuhua in Guangzhou [ J ]. Urban Environment & Urban Ecology, 2006, 19(2): 14-16. (in Chinese) )
- [ 33 ] Xiaoli Wang. Phosphorus Fractionation and Bioavailability in Surface Sediments from the Middle and Lower Reaches of the Yellow River [ J ]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 12: 379-386.