

德州引黄灌区主要河流沉积物各形态磷分布研究

张 芳^{1,2}, 常春平², 李发东^{1*}, 李 静¹, 宋 帅^{1,3}, 赵广帅^{1,3}, 蔡文静^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2.河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050091; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:对河流沉积物中各形态磷(P)的研究有助于认识沉积物中 P 的行为特征、水-沉积物界面上 P 的迁移、转化、可利用性以及水体营养状态。以德州引黄灌区为例,采用改进的 Ruttenberg SEDEX 分级连续提取方法,分析了漳卫新河、马颊河和德惠新河表层沉积物中主要赋存形态磷的含量,以期为评价该地区水环境质量,探究水体污染源以及制定相应的治理措施提供科学依据。结果表明,河流表层沉积物中总磷(TP)的含量为 437.4~1 197.0 mg·kg⁻¹,无机磷(IP)的含量为 373.8~1 136.4 mg·kg⁻¹,占 TP 的 64.3%~98.5%。IP 又分为弱吸附态磷(Lsor-P)、铁结合态磷(Fe-P)、自生磷和碎屑磷(Au-P&De-P),含量分别为 26.4~415.2 mg·kg⁻¹、6.3~331.2 mg·kg⁻¹ 和 302.3~563.6 mg·kg⁻¹,分别占 TP 的 5.2%~54.3%、0.8%~31.5%、35.7%~80.9%。有机磷(OP)的含量为 9.0~413.4 mg·kg⁻¹,占 TP 含量的 1.55%~35.68%。三条河流沉积物中不同形态 P 含量的变化趋势不同,空间变异性大;从上游到下游,漳卫新河底泥中的 TP 呈下降趋势,马颊河底泥中 TP 变化幅度不大,德惠新河底泥中 TP 呈现出先增高后降低的趋势,变化幅度较大。相关分析表明黄河下游引黄灌区沉积物中部分形态 P 之间存在显著的相关性,表明这些形态的 P 可能来源相同或者在某些特定的条件下会相互转化。最后,提出了控制 P 排放来源、加强污水处理、提高农业 P 的利用效率以及加强相关的研究等建议。

关键词:黄河下游;引黄灌区;沉积物;磷含量;磷形态

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)11-2223-07

Phosphorus Fractions in Sediments Along Three Major Rivers of Irrigation Districts of Yellow River in Dezhou City

ZHANG Fang^{1,2}, CHANG Chun-ping², LI Fa-dong^{1*}, LI Jing¹, SONG Shuai^{1,3}, ZHAO Guang-shuai^{1,3}, CAI Wen-jing^{1,2}

(1.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2.College of Resource and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050091, China; 3.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Studies on phosphorus fractions in river sediments is helpful to recognize the behavioral character of P, to understand the migration, transformation, availability of P that on the water - sediment interface, and to master nutritional status of water bodies. As a case study in Dezhou irrigation district (115°45'~117°36'E, 36°24'~38°0'N) of the Yellow River in China, the concentrations of phosphorus fractions in the sediments along Zhangweixin River, Majia River, and Dehuixin River were determined by the modified sequential extraction method (Ruttenberg SEDEX). It is expected to provide a scientific basis for evaluating the water quality, exploring the phosphorus sources of water pollution, and finding appropriate management action in this area. The results showed that the concentrations of total phosphorus (TP), inorganic phosphorus (IP), and organic phosphorus (OP) ranged from 437.4 to 1197.0 mg·kg⁻¹, 373.8 to 1136.4 mg·kg⁻¹, and 9.0 to 413.4 mg·kg⁻¹, respectively. Sediment samples were characterized by a dominance of the inorganic fraction (64.32%~98.53%). For OP, however, it is 1.55%~35.68%. IP was also divided into three fractions: loosely adsorbed phosphorus (Lsor-P), iron-bound phosphorus (Fe-P), authigenic phosphorus and detrital phosphorus (Au-P&De-P) which were mainly associated Au-P&De-P (35.67%~80.89%), Lsor-P and Fe-P accounted for

收稿日期: 2012-04-27

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 张 芳(1987—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 水环境评价。E-mail: zhang870515@126.com

* 通信作者: 李发东 E-mail: lifadong@igsrr.ac.cn

5.21%~54.27% and 0.77%~31.54%, respectively. The distribution trends and large spatial variation of phosphorus fractions along three rivers were found. From up to down stream, the concentrations of TP in the Zhangweixin River, Majia River and Dehuixin River showed decreasing trend, smooth variation, and choppy change, respectively. The correlation between some kinds of phosphorus fractions along these rivers were significant, which suggested these fractions of phosphorus should derive from the same sources or transform into each other under certain conditions. Some advises, such as controlling phosphorus drainage sources, setting-up more sewage factories, improving the phosphorus use efficiency, and supporting more relative studies, were suggested.

Keywords: irrigation district of the Yellow River; sediment; concentration of phosphorus; phosphorus fractions

磷(P)是生态系统中必不可少的营养元素,而过量的P又会导致水体的富营养化,破坏生态平衡。国际上一般认为TP浓度为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 是水体富营养化发生的临界浓度^[1]。当水体中P的浓度超过临界浓度时,富营养化程度会明显加重^[2]。沉积物是内陆水体P循环的一个主要环节,是水体中P等营养元素的重要蓄积库,它既可以吸附上覆水体中的P,又可以作为内输入P源在一定条件下释放P。沉积物对P的吸附和释放可影响上覆水体中P的浓度,从而影响水体的营养平衡^[3]。P在不同的氧化还原条件下可以转化,与Fe、Al、Mn等结合,形成不同形态的P^[4]。沉积物中参与界面交换及生物可利用P的量由沉积物中P的赋存形态决定^[5-8]。

国内关于P的赋存形态的研究主要集中于海洋、湖泊、河口等区域^[9-10],黄河和长江的干流等,如王晓丽等^[11]对黄河中下游沉积物中P含量及P的赋存形态进行了研究,德州引黄灌区河流表层沉积物中P的赋存形态及其含量的研究还未见报道。

本文采用改进的Ruttenberg SEDEX 分级连续提取方法^[13]分析了流经德州地区的漳卫新河、马颊河和德惠新河表层沉积物中各形态P的含量,初步探讨了流域内P的分布特征、污染状况和来源,分析了导致不同形态P变化的可能因素,为区域P循环以及水质安全评价提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究的主要河流位于德州市境内。德州市位于黄河下游北岸,山东省西北部,东经 $115^{\circ}45' \sim 117^{\circ}36'$ 、北纬 $36^{\circ}24' \sim 38^{\circ}0'$ 之间。辖一区两市八县和两个经济开发区,总面积 1.03 万 km^2 ,人口560万^[12]。德州市为黄河冲积平原,地势西南高、东北低。流经该市的主要河流有黄河、卫运河、漳卫新河、徒骇河、德惠新河和马颊河。该区引黄始于1972年,引黄水占城市供水水源的33.7%,并成为该区主要水源。至2009

年底,有效灌溉面积为 $441\,600 \text{ hm}^2$,其中地表水供水总量达 $1.39 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

本研究的取样点主要集中在漳卫新河、马颊河和德惠新河。德州市工业发达,河流沿岸工厂多,漳卫新河和德惠新河污染严重,而马颊河受引黄水补给的范围较广,污染程度相对较低。现场调查发现,漳卫新河多处河段径流不明显且水质污黑恶臭。相关报道显示,漳卫新河上游卫运河段 NO_3^--N 及 NH_4^+-N 超标率均达100%^[14]。该地区是典型的农业区,化肥的大量使用也成为沉积物中P的主要来源之一。统计数据显示,德州地区一年使用的化肥折纯量为412 362 t,其中氮肥、磷肥、钾肥和复合肥的折纯量分别是186 924、64 366、441 32 t和116 940 t^[12]。化肥的使用将对河流表层沉积物中P的增加带来潜在威胁。

1.2 样品采集

2011年4月在研究区内选28个样点进行取样(图1)。所有样点均沿河采集,漳卫新河、马颊河各8个,德惠新河7个,黄河2个,禹城综合试验站附近的引黄渠5个。点14和点15位于马颊河和德惠新河交汇处。

1.3 样品分析方法

河泥样品采集后装入自封袋内,运回实验室后 40°C 烘干至恒重。研磨过100目筛,并装入棕色玻璃瓶内待分析。

本研究采用改进的Ruttenberg SEDEX 分级连续提取方法测定Lsor-P、Fe-P、Au-P&De-P(见图2),TP和IP的测定方法采用Aspila Method^[15],TP与IP的差作为OP的含量。

(1)称取0.5 g样品用30 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgCl}_2$ 浸提2遍,然后再分别用蒸馏水30 mL浸提2遍,每次浸提后需 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心30 min,提取出来的是水溶性磷即Lsor-P,本提取方法解决了提取率和Lsor-P重吸附的问题。

(2)剩余部分再用30 mL CDB(柠檬酸钠-碳酸氢钠-连二硫酸钠)主要提取Fe-P,振荡8 h并离心,

再加 30 mL 1 mol·L⁻¹ MgCl₂ 振荡离心,再用 30 mL 蒸馏水洗一遍,原理是通过连二硫酸钠把 Fe³⁺还原,然后再通过柠檬酸的螯合作用把 P 提取出来,用 MgCl₂ 可以防止再吸附。

(3)第三级用 30 mL 1 mol·L⁻¹ HCl 酸化浸提,提取出来的为 Au-P&De-P(图 2)。

将(1)、(3)步骤的提取液混合后,通过钼锑抗分光光度法(日本岛津紫外可见分光光度计 UV-1750)进行测定。

2 结果与讨论

2.1 各形态磷含量分析

本地区 28 个采样点,TP 的平均含量为 825.4 mg·kg⁻¹,IP 的平均含量为 713.64 mg·kg⁻¹。在各形态 P 中,以 IP 为主,其含量占 TP 含量的 64.32%~98.53%,与宋智香^[16]、李北罡^[17]等关于黄河中下游沉积物 P 形态研究的结果相符。

IP 又分为 Lsor-P、Fe-P、Au-P&De-P^[18-19]。本研究

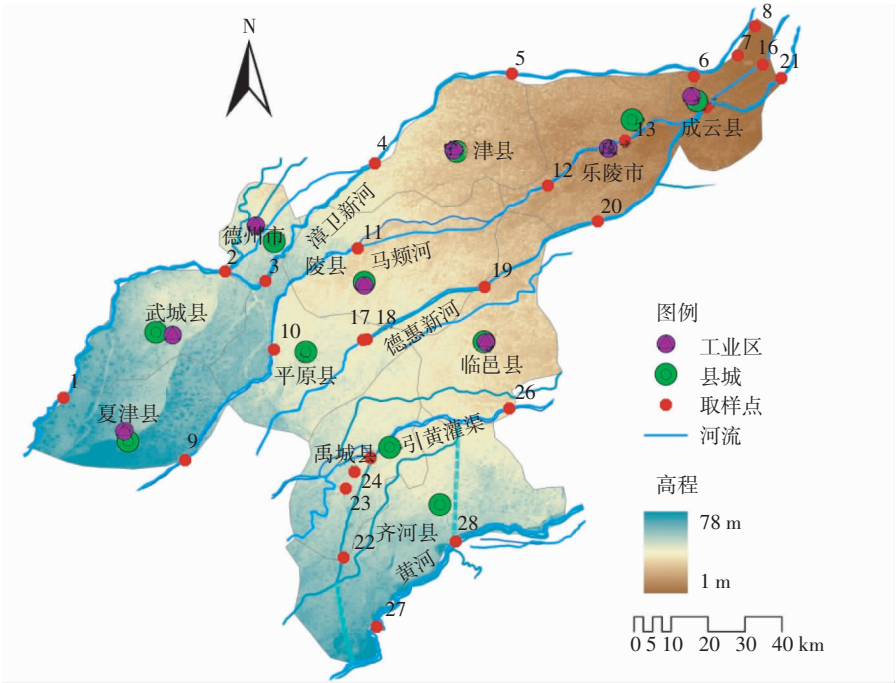


图 1 河泥取样点分布
Figure 1 Sampling sites of sediment

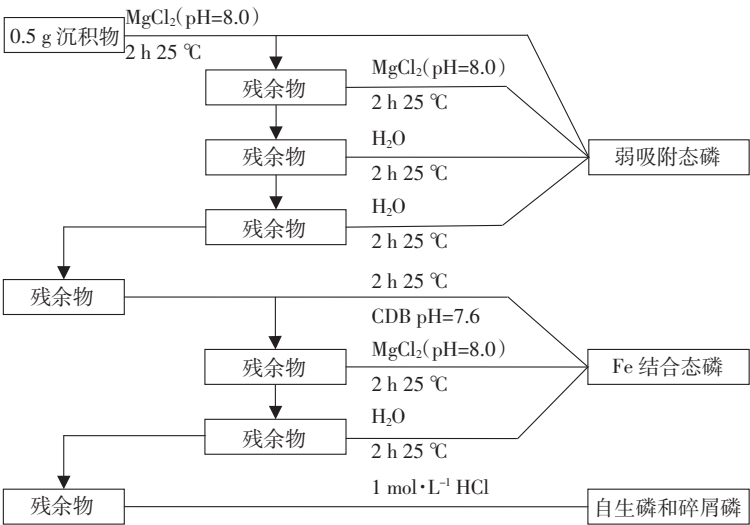


图 2 沉积物中各形态磷连续提取
Figure 2 Sequential extraction method of phosphorus fractions in sediments

中,Lsor-P 的含量范围为 26.4~415.2 mg·kg⁻¹,占 IP 含量的 5.2%~54.3%,比宋智香、李北罡等关于黄河中下游沉积物中 P 形态的研究得出的 Lsor-P 的含量要高几倍甚至几十倍。

Fe-P 的含量为 6.3~331.2 mg·kg⁻¹,变化幅度较大,尤其是漳卫新河最大值达到了 331.2 mg·kg⁻¹。分析结果表明,离污染源越近,Fe-P 的含量越高,这与刘敏^[20]、许金树^[21]等的研究结果一致。除此之外,沉积物中 Fe-P 的含量与水体的氧化还原电位有关,当水体的氧化还原电位较高时,沉积物中 Fe-P 的含量就会增高。黄河中下游水体的氧化还原电位均较高,所以表层沉积物中 Fe-P 含量较高。

Au-P&De-P 的含量较高(302.3~545.7 mg·kg⁻¹),是 IP 中最主要的存在形态。Au-P&De-P 在水体中通常是难溶的^[8],很难被生物利用,这也可以说明,在黄河下游引黄灌区,可以被生物利用的 P 含量较少。

本研究中 OP 含量较低(9.0~413.4 mg·kg⁻¹),占 TP 含量的 1.55%~35.68%。Jensen^[22]指出 OP 主要来源于陆源输入和食物链等生物过程,可分成难降解和可降解两类,它可以用来粗略估计有机质的生成和降解,是一种优于 TP 指示富营养化程度的指标^[19,23-24]。

2.2 各形态磷沿河流分布状况

2.2.1 漳卫新河各形态磷含量分布

漳卫新河属漳卫南运河水系,整个流域工业排污口 158 个,年污水排放量 317 亿 t·a⁻¹^[25]。漳卫新河四女寺至辛集河段水质均劣于 V 类,COD、NH₃-N 和 FN 严重超标。河流水体的污染必然影响沉积物中 P 的含量。各形态 P 中,除了 Au-P&De-P,漳卫新河的其他形态 P 都高于另外两条河流。

漳卫新河沉积物中 TP 含量最大值为 1 254.6 mg·kg⁻¹,最小值为 619.5 mg·kg⁻¹,平均值为 966.81 mg·kg⁻¹(表 1),明显高于其他两条河流。TP 和 IP 的标准差都较大,分别达到了 257.1、232.85 mg·kg⁻¹,这说明沿漳卫新河 TP 和 IP 含量的变化幅度较大。

如图 3 所示,沿漳卫新河自上游向下游 TP 的含量呈逐渐下降的趋势,而且变化幅度很大。Neal 指出,平原河流中 P 的主要来源是污水^[26],漳卫新河沉积物中 P 的来源主要是上游的工业废水^[25],在向下游流经的过程中不断被稀释、沉积,TP 的含量也呈现出逐渐下降的趋势。因为 IP 占 TP 含量的比例高,所以 IP 呈现出和 TP 相似的变化趋势。Au-P&De-P 占 IP 的大部分,含量较高,沿漳卫新河呈现出逐渐增长的趋势,但是增长幅度不大。Lsor-P 是可交换 P,被认为是最具生物有效性的 P。当上覆水体中磷酸盐含量较低时,Lsor-P 通过离子交换会很容易释放到上覆水体中,进而被浮游生物利用或随水流向下游。黄河中下游表层沉积物中 Lsor-P 的含量并不高,但作为生物可利用 P,其含量会影响水体的营养状态和初级生产力^[16]。图 3 显示,漳卫新河沉积物中 Lsor-P 含量不高,呈 M 型变化规律,但从整体上讲,从上游到下游 Lsor-P 含量略有降低。Fe-P 呈现出与 TP 和 IP 相似的变化趋势。OP 主要是指沉积物中各种动植物残体、腐殖质中各种有机质中含有的 P,部分可被生物利用,它的含量与人类活动有关,主要来源于农业面源污染^[18]。沿漳卫新河分布的取样点的 OP 的含量变化呈现出先增高后

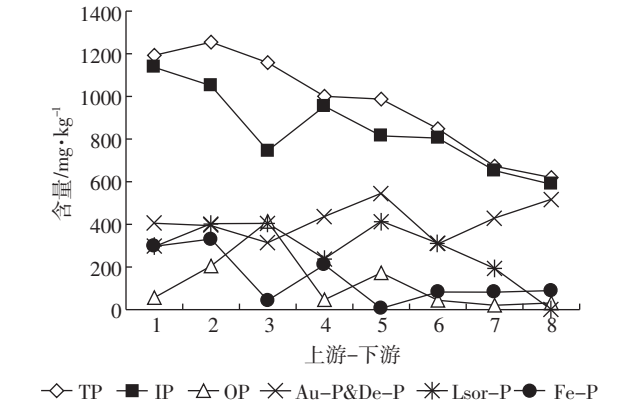


图 3 漳卫新河各形态磷含量变化趋势
Figure 3 Trends of concentrations of phosphorus fractions along the Zhangweixin River

表 1 各形态磷含量分布(mg·kg⁻¹)
Table 1 Concentrations of phosphorus fractions(mg·kg⁻¹)

	整体	漳卫新河	马颊河	德惠新河
TP	825.38±210.62	966.8±237.1	753.0±74.1	809.9±211.4
IP	713.64±171.94	843.2±190.7	655.6±61.9	693.5±181.6
OP	111.73±91.17	138.9±135.7	97.4±65.8	116.4±52.0
Au-P&De-P	448.50±70.10	418.9±84.7	457.6±70.4	451.0±42.4
Lsor-P	183.68±134.35	282.7±140. 3	135.1±44. 5	183.0±135.2
Fe-P	114.92±72.02	142.8±121.1	97.8±30.9	24.3±57.0

降低又逐渐趋于平稳的趋势。

2.2.2 马颊河各形态磷含量分布

由表 1 可知,马颊河沉积物中的 TP、IP、OP 的平均含量均小于漳卫新河和德惠新河,而且除 OP 外,各形态 P 的标准差都小于漳卫新河和德惠新河。这说明,马颊河沉积物中各形态 P 的含量变化不大。

由图 4 可知,马颊河从上游到下游沉积物中 TP 的含量呈现出先降低后增高的趋势,与水体的污染状况相符,但是增减幅度不大,IP 与 TP 的变化趋势相同。马颊河沉积物中 OP 含量呈现出波浪式的变化趋势,但是变化幅度不大。Lsor-P、Fe-P、Au-P&De-P 的变化幅度不大,都趋于平稳。

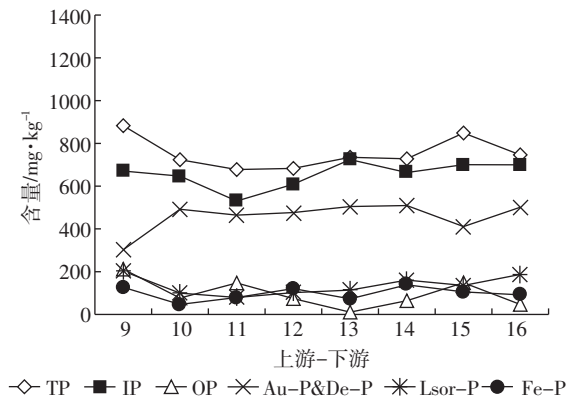


图 4 马颊河各形态磷含量变化趋势
Figure 4 Trends of concentrations of phosphorus fractions along the Majia River

马颊河地表水体污染开始于 20 世纪 70 年代末 80 年代初期,1985 年左右开始变重。据调查,向马颊河排放污水的支流有 8 处之多,排污单位主要是造纸厂和印刷厂;通过对马颊河干渠(德州段)近五年的水质调查分析看出^[27],马颊河水质为超 V 类水,主要污染项目为 COD_{Cr}、BOD₅,其次是阴离子表面活性剂、NH₃-N、TP、氟化物。水环境的恶化也造成了河流沉积物的严重污染。

2.2.3 德惠新河各形态磷含量分布

德惠新河沉积物中的 TP、IP 和 OP 的平均含量小于漳卫新河但是大于马颊河,其标准差也较大,分别达到了 211.40、181.63、51.98 mg·kg⁻¹,Lsor-P 的标准差也达到了 135.15 mg·kg⁻¹,这说明,德惠新河沉积物中,TP、IP、OP 和 Lsor-P 含量变化幅度均较大(表 1),河流的污染源可能主要来自点源污染。

与漳卫新河和马颊河不同,除 Au-P&De-P 外,德惠新河沉积物中 TP、IP、OP、Lsor-P 以及 Fe-P 的含

量变化基本一致,从上游到下游均呈现出先增高后降低的趋势(图 5),而且在点 19(临邑县林子镇引黄灌溉北)和点 20(乐陵市郑店大桥)处含量急剧增高,可能是因为本段流域内不仅铸造、印刷业发达,而且农业以奶牛、肉鸭、生猪、肉鸡养殖为主,尤其是养殖业产生的废水及废渣流入河内,会导致河泥中 P 含量明显增高^[28]。Au-P&De-P 的变化趋势同前两条河流基本一致,变化幅度不大。

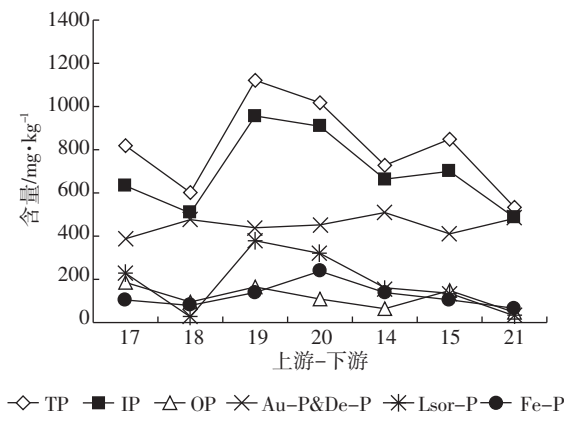


图 5 德惠新河各形态磷含量变化趋势
Fig.5Trends of concentrations of phosphorus fractions along the Dehuixin River

德惠新河是横贯德州市且污染严重的河流,河水 COD、氨氮浓度均长期超标,严重影响了沿岸群众的生产和生活,且影响了下游以及海洋水质。

2.3 各形态磷的相关性分析

通过计算德州市 28 个取样点各形态 P 之间的相关系数,计算结果见表 2。

在相关系数矩阵中可以看出,黄河下游引黄灌区德州段沉积物中,TP 和 IP 具有显著地正相关性,在某些河段相关系数高达 0.976,这是因为在各形态 P 中,IP 对 TP 的贡献最大。由表 2 可知,Lsor-P 和 Fe-

表 2 各形态磷之间的相关系数矩阵						
Table 2 Correlation coefficient matrix between different fractions of P						
	TP	IP	OP	Au-P&De-P	Lsor-P	Fe-P
TP	1	0.906**	0.602**	-0.283	0.886**	0.603**
IP		1	0.207	-0.114	0.801**	0.705**
OP			1	-0.438*	0.536**	0.064
AU-P&De-P				1	-0.329	-0.236
Lsor-P					1	0.423*
Fe-P						1

*. Correlation is significant at 0.05 level (2-tailed); **.Correlation is significant at 0.01 level(2-tailed)

P之间存在显著的正相关性($P=0.05$),说明两者在某些特定的条件下可能会相互转化^[29],即在好氧的沉积环境中 Lsor-P 可能会向 Fe-P 转化,相反在厌氧的沉积环境中 Fe-P 可能会发生还原释放出磷酸盐,进而转化为 Lsor-P。此外,OP 和 Lsor-P 的也呈现出极显著的正相关性($P=0.01$),这说明 OP 的矿化可能会增加 Lsor-P 的含量,本研究反映了 OP 的矿化释磷对 Lsor-P 的贡献较大。一般而言,OP 主要来源于外源输入,Au-P&De-P 主要是早期岩石风化的产物,本研究中,OP 和 Au-P&De-P 呈现出显著的负相关性(表 2),这说明,Au-P&De-P 在沉积物中的分布可能与有机质的累积和降解有关。

2.4 水环境管理建议

针对该地区河流表层沉积物中 P 含量过高,提出以下治理措施:

(1)严格控制河流沿岸工业废水的达标排放,尤其是造纸厂,应加大管理和制裁力度。

(2)指导并组织农业面源污染治理、生态农业建设,摸清农业面源污染底数,进一步推广科学施肥和安全用药技术。

(3)建立城镇污水处理厂,集中处理生活污水,以减少城镇生活污水的排放。

(4)发展水生态文化,建设城市人工湿地生态系统以自然吸收过量 P,全面提升公众的水环境意识,研究探索如何科学准确地将水资源纳入绿色 GDP 核算,建立经济与资源环境一体化核算体系,实现可持续发展。

3 结论

(1)德州地区主要河流沿岸沉积物的 TP 含量范围为 289.8~1 197 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量为 764.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中 IP 的含量范围为 259.7~1 136.4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的 64.32%~98%,OP 占 TP 含量的 1.55%~35.68%。IP 中含量最高的是 Au-P&De-P,其含量范围是 188.46~398.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 IP 含量的 21.40%~80.89%。IP 中含量最低的是 Fe-P,其含量范围为 1.4~73.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 IP 的 0.07%~4.50%。

(2)德州地区漳卫新河沿岸沉积物中 TP 含量呈逐渐下降趋势,这可能是因为漳卫新河上游污染严重,在向下游流经的过程中,各形态 P 不断被稀释、沉积。马颊河沿岸沉积物 TP 含量呈现出先降低后增高的趋势,IP 的变化趋势同 TP 的变化趋势基本一致。德惠新河沿岸的沉积物 TP 含量相对于前两条河流

较低,但是变化幅度很大,TP、IP 和 Lsor-P 均呈现出了先增高后降低的趋势。德州地区各主要河流沿岸沉积物中的 Au-P&De-P、Fe-P 的变化趋势都相对平缓,变化幅度不大。

(3)黄河下游引黄灌区沉积物中部分形态 P 之间具有显著的相关性,这可能是因为它们的来源一致,或者是它们之间在某种特定的条件会相互转化。沉积物中 P 的生物地球化学循环过程十分复杂,有关各形态 P 之间的相互转化过程及影响机制还有待于进一步研究。

(4)对于未来水环境的管理,提出了控制排放来源、加强污水处理、提高农业 P 的利用效率以及加强相关的研究等建议。

参考文献:

- [1] 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(2):97-104.
HUANG Qing-hui, WANG Zi-jian, WANG Dong-hong, et al. Phosphorus sorption capacity of the surface sediment in the lake Taihu and risk assessment of phosphorus release[J]. *Journal of Lake Science*, 2004(2): 97-104.
- [2] 郭红岩,王晓蓉,朱建国.太湖一级保护区非点源磷污染的定量化研究[J].应用生态学报,2004(1):136-140.
GUO Hong-yan, WANG Xiao-rong, ZHU Jian-guo. Quantification of non-point sources phosphorus pollution in key protection area of Taihu Lake[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(1): 136-140.
- [3] 马钦.黄河中下游沉积物中磷形态分布及其对磷的吸附特征研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2010.
MA Qin. The Researches on distributions of phosphorus forms and adsorption characteristics of phosphorus on sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River[D]. Inner Mongolia Normal University, 2010.
- [4] Van Hullebusch E, Auvray F, Deluchat V, et al. Phosphorus fractionation and short-term mobility in the surface sediment of a polymictic shallow lake treated with a low dose of alum (Courtill Lake, France)[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2003, 146(1-4): 75-91.
- [5] 张琳,毕永红,胡征宇,等.三峡水库湖北段沉积物磷形态及其分布特征[J].环境科学与技术,2011(6):6-9, 27.
ZHANG Lin, BI Yong-hong, HU Zheng-yu, et al. Phosphorus forms and its distribution character in sediment of three gorges reservoir in Hubei [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011(6): 6-9, 27.
- [6] Coelho J P, Flindt M R, Jensen H S, et al. Phosphorus speciation and availability in intertidal sediments of a temperate estuary: Relation to eutrophication and annual P-fluxes[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(4): 583-590.
- [7] Ashraf M, Edwin L, Meenakumari B. Studies on the seasonal changes of phosphorus in the marine environments off Cochin[J]. *Environment International*, 2006, 32(2): 159-164.
- [8] Prasad M B K, Ramanathan A L. Characterization of phosphorus frac-

- tions in the sediments of a tropical intertidal mangrove ecosystem[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2010, 18(2): 165–175.
- [9] 林荣根, 吴景阳. 黄河口沉积物对磷酸盐的吸附与释放[J]. 海洋学报, 1994(4): 82–90.
- LIN Rong-gen, WU Jing-yang. The adsorption and desorption on phosphate in sediments from Yellow River estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994(4): 82–90.
- [10] 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(2): 18–23.
- DONG Fang, LIU Su-mei, ZHANG Jing. Phosphorus speciation in the sediments of the Bohai Sea and North Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2001(2): 18–23.
- [11] 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(5): 904–907.
- WANG Xiao-li, ZHANG Li-kun. Character of phosphorus forms in surface sediments from middle and lower reaches of Yellow River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011(5): 904–907.
- [12] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- Statistics Bureau of Shandong Province; National Bureau of Statistics, Shandong Survey Corps. Shandong statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010.
- [13] Ruttenberg, K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992: 1460–1482.
- [14] 吴向东, 李发东, 郭建青, 等. 黄河下游引黄灌区主要河系硝态氮及铵态氮安全评价[J]. 水资源与水工程学报, 2011(4): 114–117.
- WU Xiang-dong, LI Fa-dong, GUO Jian-qing, et al. Security evaluation of nitrate and ammonium nitrogen in main river reaches of irrigation districts in downstream of Yellow River[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011(4): 114–117.
- [15] Aspila K, Agemian H, Chau A. A semi-automated method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments[J]. *Analyst*, 1976, 101: 187–197.
- [16] 宋智香, 周润清, 马晓宇, 等. 黄河中下游表层沉积物各形态磷的研究[J]. 人民黄河, 2009(11): 62–63.
- SONG Zhi-xiang, ZHOU Run-qing, MA Xiao-yu, et al. The research of various forms phosphorus in surface sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2009(11): 62–63.
- [17] 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.
- LI Bei-gang, GUO Bo-shu. Chemical forms of inorganic phosphorus in sediments in the middle of the Yellow River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1607–1610.
- [18] Ruban V, Lopez-Sanchez 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[J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, 370(2–3): 224–228.
- [19] Filippelli G M, Delaney M L. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(9): 1479–1495.
- [20] 刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布特征[J]. 海洋通报, 2001(5): 10–17.
- LIU Min, XU Shi-yuan, HOU Li-jun, et al. Phosphorous species in sediments and their distribution in the Yangtze Estuary and coastal areas[J]. *Marine Science Bulletin*, 2001(5): 10–17.
- [21] 许金树, 李亮歌. 台湾海峡中、北部沉积物中磷的存在形态[J]. 海洋与湖沼, 1990(1): 62–69.
- XU Jin-shu, LI Liang-ge. Existing forms of phosphorus in sediment from middle and northern TAIWAN strait [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1990(1): 62–69.
- [22] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F O, et al. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus bay, Denmark[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(5): 908–917.
- [23] Ruttenberg K C, Berner R A. Authigenic apatite formation and burial in sediments from non-upwelling, continental-margin environment[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(5): 991–1007.
- [24] Brinkman A G. A double-layer model for ion adsorption onto metal oxides, applied to experimental data and to natural sediments of Lake Veluwe, The Netherlands[J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253(1): 31–45.
- [25] 于伟东. 漳卫南运河流域水污染趋势与控制[J]. 水资源保护, 2008(4): 83–86.
- YU Wei-dong. Water pollution and control in Zhangweinan River basin[J]. *Water Resources Protection*, 2008(4): 83–86.
- [26] Neal C, Jarvie H P, Howarth S M, et al. The water quality of the River Kennet: Initial observations on a lowland chalk stream impacted by sewage inputs and phosphorus remediation[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 251–252: 477–495.
- [27] 崔玉静. 马颊河水环境现状及对策研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- CUI Yu-jing. Majia River water environment present situation and countermeasure research[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [28] Simon N S, Bricker O P, Newell W, et al. The distribution of phosphorus in Popes Creek, VA, and in the Pocomoke River, MD: Two watersheds with different land management practices in the Chesapeake Bay Basin[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2005, 164(1–4): 189–204.
- [29] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. 环境科学学报, 2006(3): 488–494.
- HOU Li-jun, LU Jian-jian, LIU Min, et al. Species and bioavailability of phosphorus in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006(3): 488–494.