

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.003

淮河沉积物总磷和重金属沿程变化及污染评价

刘振宇^{1,2},唐洪武^{1,2},肖洋^{1,2},杨刚³,陈曦³,金光球^{1,2},李志伟²,袁赛瑜²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;3. 淮河流域水资源保护局,安徽 蚌埠 233001)

摘要: 为了探究淮河沉积物中污染物的分布规律、来源及污染程度,于2014年7月沿淮河中下游设置16个采样断面,现场采样并检测沉积物中总磷(TP)质量比和重金属(As、Cu、Pb、Cd、Zn)的质量比,分析沉积物中污染物的沿程分布及来源并对污染状况进行评价。研究表明,淮河中下游沿程各城市下游断面沉积物中污染物平均含量比上游断面高;污染物来源分析表明,所有污染物均受到点源污染的影响,其中TP和Cu受到点源污染和面源污染的共同影响;单因子标准指数法对沉积物磷污染评价结果表明,淮河干流沉积物环境质量受磷的污染相对较轻;对重金属潜在生态危害程度分析表明,无论是单个重金属的生态危害程度还是综合生态危害程度都为轻微。
关键词: 淮河;沉积物;总磷分布特征;重金属分布特征;主成分分析;标准指数法;潜在生态风险评价
中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0016-07

Variation and pollution evaluation of the total phosphorus and heavy metals in sediments of Huaihe River

LIU Zhenyu^{1,2}, TANG Hongwu^{1,2}, XIAO Yang^{1,2}, YANG Gang³, CHEN Xi³,
JIN Guangqiu^{1,2}, LI Zhiwei², YUAN Saiyu²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Huaihe River Water Resources Protection Bureau, Bengbu 233001, China)

Abstract: To explore the pollution distribution, source and degree of the Huaihe River sedimentary, 16 sections along the midstream and downstream of the Huaihe River were sampled in July 2014. Then, the total phosphorus (TP) and heavy metals (As, Cu, Pb, Cd, and Zn) in the sediments were analyzed to explore the distribution of contaminants, source and pollution status. The results showed that the average content of pollutants in the downstream sections of main cities was higher than that of the upstream. The analysis of pollutant sources showed that all pollutants were affected by the point source pollution, while TP and Cu were polluted by both the point source pollution and non-point source pollution. The standard index method of a single factor was applied to evaluate the phosphorus pollution in the sediments. The results indicated that the environmental quality of sediments in the Huaihe River was less polluted by the phosphorus. The analysis on the potential ecological risk of heavy metals showed that both the ecological risk of the single heavy metal and the comprehensive ecological risk were slight.

Key words: Huaihe River; sediment; distribution characteristics of the total phosphorus; distribution characteristics of heavy metals; principal component analysis; standard index method; potential ecological risk assessment

基金项目: 国家自然科学基金(51239003,5167090123);水利部公益性行业科研专项(201501007)
作者简介: 刘振宇(1992—),男,山东德州人,硕士研究生,主要从事水环境研究。E-mail:lzy20113954@163.com
通信作者: 唐洪武,教授。E-mail:hwtang@hhu.edu.cn
引用本文: 刘振宇,唐洪武,肖洋,等. 淮河沉积物总磷和重金属沿程变化及污染评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):16-22. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.003.

随着人口的迅速增长和社会经济的高速发展,淮河污染问题越来越成为制约流域内国民经济发展的的重要因素。自 20 世纪 80 年代开始,淮河水质呈逐渐恶化的趋势^[1]。90 年代后,由于进行了大规模的水质联防工作,淮河流域水质污染得到了一定的改善^[2]。但在 21 世纪后随着流域内入河污水量的增加,淮河流域的水质情况依然严峻^[1,3-6]。在自然水体中,沉积物作为水环境的重要组成部分,不仅是各种污染物的重要储存场所,更是水体的二次污染源^[7-9]。在一定环境或理化条件下,沉积物中的污染物会向水体释放,从而加剧河流的污染程度^[10-11]。因此,沉积物污染状况在很大程度上可以反映水体环境质量。近年来对淮河沉积环境的研究主要集中在污染物的赋存形态及时间变化上^[5,12-16],少有对污染物空间分布及来源的探究。本研究以淮河中下游开展的一系列野外实验为基础,以沉积物为研究对象,对其中的总磷(TP)和重金属元素(As、Cu、Pb、Cd、Zn)的分布状况及富集特征^[17-18]进行了研究,旨在了解淮河干流沉积物中污染物的空间分布特征及其来源,对淮河流域沉积物环境质量进行合理的综合评价。其结果为改善淮河生态环境质量以及有关部门的决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区及样品采集与处理

淮河发源于河南省桐柏山,流经河南、安徽、江苏,至扬州三江营入长江,全长约 1 000 km,平均比降为 0.02%。淮河两岸支流众多,一级支流流域面积大于 2 000 km² 的共有 15 条,大于 1 000 km² 的共有 21 条^[3]。2014 年 7 月沿淮河干流(正阳关-洪泽湖)布设 16 个采样断面(图 1),采样断面主要设置在支流交汇处、沿程主要城市上下游、农业灌溉区、工业排污口、水源地,以及倒比降等区域附近,使样品数据具有代表性,更能突出污染物沿程变化规律。

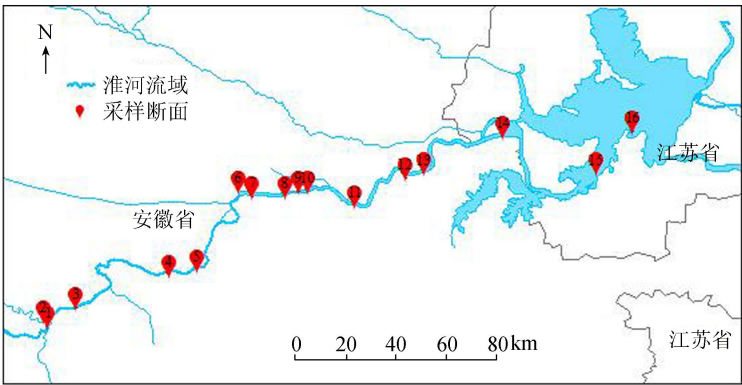


图 1 淮河采样断面布置示意图

Fig.1 Illustration of sampling sections along Huaihe River

采用彼得逊式底泥采样器于 16 个采样断面处在左、中、右 3 个位置分别采集表层 0~5 cm 沉积物,混合均匀后,用布袋采集需要风干的底泥样品,贴上编号标签,送往实验室进行分析。总磷和重金属分别采用 SMT 法^[19]及电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)^[20]进行测定。

1.2 数据处理与分析方法

1.2.1 污染物浓度标准化

为了探究不同污染物的沿程变化规律,将各个断面沉积物中的污染物浓度进行标准化,以消除单位以及数量级的影响。标准化的计算公式如下:

$$z_i = \frac{x_i - x_{i\min}}{x_{i\max} - x_{i\min}}$$

(1)

式中: z_i ——某断面第 i 种污染物标准化后的指标; x_i ——某断面第 i 种污染物的质量比,mg/kg; $x_{i\min}$ ——所有断面中第 i 种污染物的质量比最小值,mg/kg; $x_{i\max}$ ——所有断面中第 i 种污染物的质量比最大值,mg/kg。

1.2.2 单因子标准指数法

本次研究运用单因子标准指数法对沉积物的磷污染情况进行评价。单因子标准指数法的计算公式如下:

$$S_i = \frac{C_i}{C_s}$$

(2)

式中: S_i ——单项评价指数(S_i 大于 1 表示含量超过评价标准值); C_i ——评价因子 i (第 i 种污染物)的实测值,mg/kg; C_s ——评价因子 i 的评价标准值,mg/kg。

本次评价选用的总磷评价标准值为 600 mg/kg。这个标准是根据加拿大安大略省环境和能源部于 1992 年发布的指南^[21]中指出的沉积物中能引起最低级别生态风险效应的总磷浓度而选定的。

1.2.3 潜在生态危害指数法

采用瑞典学者 Hakanson^[22]提出的潜在生态危害指数法,对淮河中下游表层沉积物中重金属污染的潜在生态危害进行评价。该方法从各种重金属的毒性水平和生物对其污染的敏感程度来评价重金属的污染程度。根据这一方法,某地区沉积物中第*i*种金属的潜在生态危害系数 E_i 及沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 $R^{[23]}$ 可表示为

$$E_i = T_i C_i^*$$

(3)

$$R = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_i C_i^* = \sum_{i=1}^n T_i \frac{C_{is}}{C_{in}}$$

(4)

式中: T_i ——第*i*种重金属的毒性系数,反映毒性水平和生物对其污染的敏感程度^[24]; C_i^* ——重金属的富集系数; C_{is} ——表层沉积物中第*i*种重金属的实测值,mg/kg; C_{in} ——计算所需的参照值采用现代工业化以前正常颗粒沉积物中金属的最高背景值^[22],mg/kg。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中污染物的含量

2014 年 7 月各采样断面的沉积物中污染物的质量比见表 1。

表 1 淮河干流沉积物中污染物的质量比

Table 1 Contaminants in the sediments of Huaihe River							mg/kg
断面编号	采样断面	$w(TP)$	$w(As)$	$w(Cu)$	$w(Pb)$	$w(Cd)$	$w(Zn)$
1	正阳关	520.00	5.53	12.26	9.13	0.15	81.73
2	沙颍河口	402.43	6.76	9.42	10.39	0.16	72.46
3	鲁台子	500.00	6.44	11.88	10.64	0.19	79.21
4	淮南上	616.50	11.67	25.24	21.19	0.67	133.33
5	淮南下	685.00	8.29	16.10	12.20	0.28	92.68
6	涡河口	406.50	8.37	15.02	12.81	0.41	68.97
7	蚌埠闸上	390.78	5.20	9.16	9.41	0.15	66.83
8	吴家渡	612.75	4.95	38.12	10.64	0.17	69.31
9	高铁桥	412.26	5.25	9.00	8.50	0.12	52.50
10	沫河口	336.79	5.86	13.18	8.37	0.15	77.41
11	临淮关	281.86	6.25	9.75	10.00	0.16	55.00
12	安集	412.50	8.13	14.04	13.30	0.36	68.97
13	陈台子	487.26	10.00	15.68	12.73	0.36	72.73
14	小柳巷	514.29	7.25	11.25	9.00	0.18	60.00
15	盱眙淮河大桥	384.95	6.25	11.54	8.89	0.10	55.29
16	老子山	344.91	7.59	11.38	9.82	0.271	75.89

根据 1.2.1 中的标准化方法可计算出各断面不同污染物浓度标准化之后的结果,如图 2 所示。

2.1.1 总磷的空间分布规律

从图 2 可以看出,2 号断面和 6 号断面总磷相对浓度较其上游断面降低,这可能是受支流入流的影响。在较大支流汇入处,不仅有支流沉积物混合的影响,水流混合后环境条件(pH、溶解氧和流速等)的变化同样可能会影响沉积物中磷元素的含量^[25]。2 号断面下游河段沉积物中总磷含量沿程升高,并在 5 号断面达到最高,这可能是由于该断面位于淮南市下游,接纳了沿程排污口排放的大量生活和工业废水所导致。在蚌埠闸附近存在着蚌埠市城市饮用水水源地,各污染排放口受到严格限制,同时由于蚌埠闸蓄水作用,使集水面积增大,水质净化作用增强,故 7 号断面的水质较好。之后由于蚌埠市工业和生活污水以及农业化肥使用的影响^[26],故 8 号断面沉积

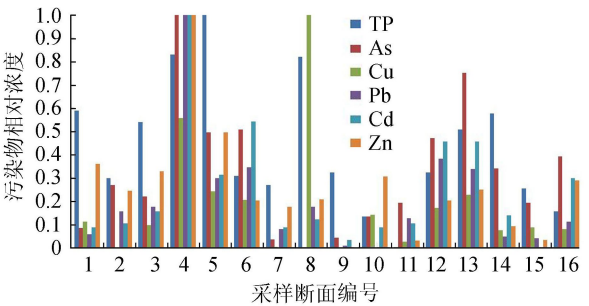


图 2 不同污染物相对浓度沿程分布
Fig.2 Distribution of pollutant concentrations
along the river

物中总磷含量较高。11 号断面附近存在蚌埠市龙子湖生态园景区,水环境相对较好,因此沉积物中总磷含量最低。此后下游断面由于沿程接纳了怀远县和五河县排污口排放的污水,以及五河县农田区面源污染的影响,沉积物中总磷浓度逐渐升高。总体来说,各城镇下游断面沉积物中总磷含量高于上游断面。

2.1.2 重金属元素的空间分布规律

从图 2 可以看出,淮河中下游沉积物中重金属元素总体变化规律相似:在城市及工业发达的地区,重金属含量偏高,且上游高于下游。各金属元素在 3 号和 4 号断面含量明显偏高,这主要是由于淮南蔡家岗为主要采煤区,随着煤矿的开采,大量煤矸石堆放在地表,地表土壤受到煤矸石等采矿固体废弃物的污染^[27-28];同时,由于这 2 个断面位于淮南市的主要城区,淮南市每天向淮河排放大量未经处理的工业废水和生活污水,这也导致了 3 号和 4 号断面沉积物重金属含量偏高^[3,29]。5 号断面重金属含量明显降低,这主要是由于此断面所在河道河床较窄,水流较快,沉积物中细小颗粒含量相对较少,而重金属元素主要吸附在粒径较小的黏土颗粒上,因此含量较低^[27]。在蚌埠河段,除 Cu 元素外,沉积物中重金属含量没有出现明显的增高现象,可能是由于蚌埠市污水处理措施比较好,污水中所含有害元素少,对沉积物中重金属影响很小。但由于蚌埠市农田化肥过量施用,而化肥中含有铜元素,因此该河段沉积物中 Cu 元素含量较多^[3,26]。由于 9 号断面远离城区以及河床变窄,故沉积物中重金属含量下降。之后由于河道变宽,水流流速变缓,因此大部分悬移质沉积在河床上,故下游沉积物中重金属含量偏高。怀远县和五河县由于没有重工业,故 14 号和 15 号断面沉积物中重金属含量明显下降。16 号断面由于盱眙县工业污水的排放,沉积物中重金属含量略微升高^[30]。总体来说,淮河中下游沉积物中重金属含量明显受到工业污染源及城镇布局的影响。

2.2 淮河中下游沉积物中污染物的来源分析

2.2.1 相关性分析

河流沉积物中污染物的地球化学行为往往表现出一定的元素组合,利用相关性分析可以反映这些元素的组合特征。6 种污染物的相关性分析结果见表 2。从表 2 可以看出,As、Pb、Cd、Zn 之间呈显著正相关性水平,TP、Cu 之间有较强的相关性。污染物的空间分布(图 2)与相关性分析的结果相符。

2.2.2 主成分分析

主成分分析作为一种重要的统计方法,在确定污染源及人为因素对污染物的贡献等方面已得到广泛的应用。通过对淮河中下游表层沉积物中污染物进行主成分分析,可以确定各种污染物的来源及其含量变化的控制因素。

K 统计量是度量数据是否适合做因子分析的主要变量。 K 取值在 0 和 1 之间。 K 越接近 1,意味着变量间的相关性越强,原有变量越适合作因子分析; K 越接近 0,意味着变量间的相关性越弱,原有变量越不适合作因子分析。本文利用 SPSS22.0 对淮河中下游沉积物中污染物含量进行主成分分析,可得 K 的检验统计量为 0.731,大于 0.7,说明比较适合做因子分析。主成分分析结果表明,前 2 个主成分累积贡献率达到 86.64%,基本反映了全部数据的信息。

通过计算可知第 1 主成分对 As、Cu、Pb、Cd、Zn、TP 的影响得分分别为 0.853、0.562、0.957、0.931、0.882、0.649,第 2 主成分对 As、Cu、Pb、Cd、Zn、TP 的影响得分分别为-0.427、0.704、-0.169、-0.296、0.009、0.614。由相关性分析可知:As、Pb、Cd、Zn 之间呈显著相关性水平,且空间分布规律相似,故这几种重金属应受到相同因素的影响;TP 和 Cu 的相关系数大,说明这 2 种污染物受到相同因素的影响。结合上文对不同污染物沿程分布规律的探究,可以推断,第 1 主成分代表工业点源污染的影响,第 2 主成分主要反映农业面源污染的影响。由此说明所有的污染物均来自工业点源污染,而 Cu 和 TP 还受到农业面源污染的影响。该结果与皮尔森相关系数及各污染物沿程分布特征一致。

各个断面主成分得分的高低表示 2 种污染源对各断面污染影响的强弱,主成分得分越高,说明此成分对

表 2 淮河中下游沉积物中污染物含量的皮尔森系数矩阵
Table 2 Pearson coefficient matrix of the contaminant content in sediments of the middle and lower reaches of Huaihe River

元素	As	Cu	Pb	Cd	Zn	TP
As	1					
Cu	0.181	1				
Pb	0.856	0.458	1			
Cd	0.914	0.369	0.952	1		
Zn	0.667	0.408	0.814	0.760	1	
TP	0.340	0.623	0.471	0.381	0.589	1

断面污染程度的影响越大。各个断面的主成分得分见表3。从表3可以看出,受点源污染影响最大的是4号断面,而受面源污染影响最大的是8号断面。该结果与各污染物空间分布规律的分析结果一致。

2.3 淮河干流中下游沉积物污染评价

2.3.1 沉积物磷污染评价

沉积物磷污染状况,是判断水体营养状态、了解其富营养化进程及预测其发展趋势、制定水体水质管理办法及富营养化防治策略的重要科学依据^[20,31]。根据1.2.2节中的单因子标准指数法,可计算出各个断面总磷的标准指数(表4)

从表4可知TP的标准指数变化范围为0.47~1.14,除4号、5号和8号主要城市断面以外,其余采样断面沉积物中TP含量均低于评价标准。与之前的研究相比^[32-34],淮河干流中下游表层沉积物总磷含量及生态风险效应大幅度降低。该结果说明经过近年来国家政策的调整和有关部门的大力整治,淮河干流生源物质含量有所减少,富营养化程度降低。总体而言,淮河干流中下游沉积环境受磷的污染较轻,基本不具有生态风险效应。

2.3.2 沉积物重金属潜在生态危害评价

以1.2.3节中的潜在生态危害指数法为依据计算出的重金属潜在生态危害系数如表5所示。从表5可以看出,淮河中下游表层沉积物中重金属的潜在生态危害程度除4号断面Cd的 $E_i>40$ (属于中等生态危害程度)之外,其他采样点所有重金属的 E_i 均小于40(R 均小于150),潜在生态危害程度为轻微^[21]。从 E_i 均值可以看出,淮河中下游表层沉积物中主要重金属的潜在生态危害程度由高到低依次为Cd、As、Cu、Pb、Zn。

淮河中下游各采样断面的综合潜在生态危害指数 $R=14.56\sim58.1$,均值为24.81,总体潜在生态危害程度为轻微^[21]。同时,与以前的相关研究进行比较^[7, 24-25],可以看出近年来淮河干流重金属潜在生态危害程度并没有增加。由此可知,淮河中下游沿岸人类的生产生活未对沉积物中重金属污染构成严重的影响,重金属污染程度较轻。

3 结 论

a. 淮河干流中下游河段不同位置采样断面处的沉积物中各类污染物含量水平各异,在平面分布上,主要受城镇位置和布局以及沿岸居民活动的影响。

表3 各个断面的主成分得分
Table 3 Scores for the main components of each section

断面编号	主成分1得分	主成分2得分	断面编号	主成分1得分	主成分2得分
1	-0.32	0.66	9	-1.01	0.03
2	-0.41	-0.43	10	-0.66	-0.13
3	-0.12	0.23	11	-0.88	-0.84
4	3.07	-0.46	12	0.34	-0.75
5	0.86	0.85	13	0.69	-0.62
6	0.42	-0.82	14	-0.38	0.17
7	-0.76	-0.14	15	-0.86	-0.07
8	0.22	3.20	16	-0.19	-0.86

表4 淮河干流沉积物TP标准指数
Table 4 Standard index of the phosphorus in the mainstream sediment of Huaihe River

断面编号	标准指数	断面编号	标准指数	断面编号	标准指数	断面编号	标准指数
1	0.87	5	1.14	9	0.69	13	0.81
2	0.67	6	0.68	10	0.56	14	0.86
3	0.83	7	0.65	11	0.47	15	0.64
4	1.03	8	1.02	12	0.69	16	0.57

表5 淮河中下游沉积物中重金属潜在生态危害指数
Table 5 Potential coefficient of the ecological risk for heavy metals in sediments of the middle and lower reaches of Huaihe River

断面编号	采样断面	E_i					R
		As	Cu	Pb	Cd	Zn	
1	正阳关	3.69	2.04	1.82	9.00	1.02	17.57
2	沙颍河口	4.51	1.57	2.08	9.60	0.91	18.67
3	鲁台子	4.29	1.98	2.13	11.40	0.99	20.79
4	淮南上	7.78	4.21	4.24	40.20	1.67	58.10
5	淮南下	5.53	2.68	2.44	16.80	1.16	28.61
6	涡河口	5.58	2.50	2.56	24.60	0.86	36.10
7	蚌埠闸上	3.47	1.53	1.88	9.00	0.84	16.72
8	吴家渡	3.30	6.35	2.13	10.20	0.87	22.85
9	高铁桥	3.50	1.50	1.70	7.20	0.66	14.56
10	沫河口	3.91	2.20	1.67	9.00	0.97	17.75
11	临淮关	4.17	1.63	2.00	9.60	0.69	18.09
12	安集	5.42	2.34	2.66	21.60	0.86	32.88
13	陈台子	6.67	2.61	2.55	21.60	0.91	34.34
14	小柳巷	4.83	1.88	1.80	10.80	0.75	20.06
15	盱眙淮河大桥	4.17	1.92	1.78	6.00	0.69	14.56
16	老子山	5.06	1.90	1.96	16.26	0.95	26.13

b. 各种污染物的皮尔森相关系数表明,As、Pb、Cd、Zn 之间具有较强的相关性,而 Cu 和 TP 之间具有较强的相关性;对其进行主成分分析可知,这 2 组污染物分别受不同来源的影响,其中所有污染物均来自于工业点源污染,而 TP 和 Cu 还受到农业面源污染的影响。

c. 根据单因子标准指数法可知,淮河干流中下游沉积物环境质量受磷污染较轻,基本不具有生态风险效应;重金属潜在生态危害评价结果表明:淮河中下游沉积物中重金属综合生态危害水平为轻微,重金属单项潜在生态危害程度排序为 Cd>As>Cu>Pb>Zn。

参考文献:

[1] 谭炳卿,吴培任,宋国君. 论淮河流域水污染及其防治[J]. 水资源保护,2005,21(6):4-10. (TAN Bingqing, WU Peiren, SONG Guojun. Water pollution in Huaihe River Basin and its control[J]. Water Resources Protection, 2005, 21(6):4-10. (in Chinese))

[2] 蒋艳,彭期冬,骆辉煌,等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报,2011,42(11):1283-1288. (JIANG Yan, PENG Qidong, LUO Huihuang, et al. Spatio-temporal variation of water pollution in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11):1283-1288. (in Chinese))

[3] 唐洪武,肖洋,袁赛瑜,等. 平原河流水沙动力学若干研究进展与工程治理实践[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):414-423. (TANG Hongwu, XIAO Yang, YUAN Saiyu, et al. Advances in research on hydrodynamics and sediment transport of plain rivers and its application in river treatment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(5):414-423. (in Chinese))

[4] 马静. 淮河流域面源污染特征分析与控制策略研究[D]. 北京:清华大学,2013.

[5] ZHAI Xiaoyan, XIA Jun, ZHANG Yongyong. Water quality variation in the highly disturbed Huaihe River Basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses[J]. Science of the Total Environment, 2014, 496:594-606.

[6] ZHANG Yongyong, XIA Jun, SHAO Quanxi, et al. Water quantity and quality simulation by improved SWAT in highly regulated Huai River Basin of China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(1):11-27.

[7] 朱兰保,盛蒂,周开胜,等. 淮河安徽段沉积物中重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境与健康杂志,2007,24(10):784-786. (ZHU Lanbao, SHENG Di, ZHOU Kaisheng, et al. Heavy metal pollution in the sediments of the Huaihe River in Anhui Province and its potential ecological risk assessment[J]. Journal of Environment and Health, 2007, 24(10):784-786. (in Chinese))

[8] 燕文明,麻林,向龙,等. 沉积物-水界面中可交换态氮对不同菹草密度的响应[J]. 水资源保护,2016,32(2):119-122. (YAN Wenming, MA Lin, XIANG Long, et al. Effects of different densities of *Potamogeton crispus* L. on exchangeable nitrogen at sediment-water interface[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):119-122. (in Chinese))

[9] 王汗,燕文明,宋兰兰,等. 摇蚊幼虫扰动对沉积物-水界面结构特征的影响[J]. 水资源保护,2017,33(5):177-182. (WANG Han, YAN Wenming, SONG Lanlan, et al. Bioturbation effects of *Chironomus plumosus* on structural characteristics of sediment-water interface[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):177-182. (in Chinese))

[10] WANG Jie, LIU Guijian, LU Lanlan, et al. Geochemical normalization and assessment of heavy metals (Cu, Pb, Zn, and Ni) in sediments from the Huaihe River, Anhui, China[J]. Catena, 2015, 129:30-38.

[11] FU Jie, ZHAO Changpo, LUO Yupeng, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 270:102-109.

[12] 刘梦琳,冯精兰,刘群,等. 淮河上游表层沉积物中重金属的赋存形态及其生态风险[J]. 环境化学,2014,33(7):1235-1236. (LIU Menglin, FENG Jinglan, LIU Qun, et al. Occurrence and ecological risk of heavy metals in surface sediments of Huaihe River[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(7):1235-1236. (in Chinese))

[13] 赵大勇,马婷,曾巾,等. 南京玄武湖富营养化及重金属污染现状[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):83-87. (ZHAO Dayong, MA Ting, ZENG Jin, et al. Eutrophication and heavy metal pollution in Xuanwu Lake, Nanjing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2012, 40(1):83-87. (in Chinese))

[14] 肖洋,余维维,成浩科,等. 淮河中游泥沙对磷吸附/解吸规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):307-312. (XIAO Yang, YU Weiwei, CHENG Haoke, et al. Phosphorus adsorption and desorption behavior of sediments in dstream of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2015, 43(4):307-312. (in Chinese))

[15] 吉飞,李志伟,赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):56-62. (JI Fei, LI Zhiwei, ZHAO Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(1):56-62. (in Chinese))

- [16] 徐骏,朱伟. 污水处理厂脱水污泥中重金属的分布规律[J]. 水资源保护,2014,30(2):62-66. (XU Jun,ZHU Wei. Distribution of heavy metals in dehydrated sludge from sewage treatment plant[J]. Water Resources Protection,2014,30(2):62-66. (in Chinese))
- [17] 赵海萍,陈旺,李清雪,等. 漳河上游水质时空分异特征及污染源识别[J]. 水资源保护,2017,33(4):47-54. (ZHAO Haiping,CHEN Wang,LI Qingxue, et al. Spatio-temporal variation of water quality and pollutant source identification in upper reaches of Zhanghe River[J]. Water Resources Protection, 2017,33(4):47-54. (in Chinese))
- [18] 马牧源,崔丽娟,张曼胤,等. 白洋淀养鸭废水水质组成及其扩散和消减特征[J]. 水资源保护,2017,33(5):145-153. (MA Muyuan,CUI Lijuan,ZHANG Manyin, et al. Water quality composition of duck farm wastewater in Baiyangdian Lake and its diffusion and reduction characteristics[J]. Water Resources Protection, 2017,33(5):145-153. (in Chinese))
- [19] GONZ L, MEDEIROS J, REZ C B, et al. Analytical phosphorus fractionation in sewage sludge and sediment samples[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry,2005,381(4):873-878.
- [20] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1997.
- [21] LDVUORI M, NIEMISTO L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia[J]. Chemosphere,1995,31(8):3839-3856.
- [22] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.
- [23] 吕文英,周树杰,黄强南. 珠江长州断面底泥重金属污染潜在生态危害评价[J]. 水资源保护,2009,25(3):22-24. (LYU Wenying, ZHOU Shujie, HUANG Qiangnan. Assessment of potential ecological risk from heavy metals in sediment in the Changzhou section of the Pearl River[J]. Water Resources Protection, 2009,25(3):22-24. (in Chinese))
- [24] 陈静生. 中国水环境重金属研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992.
- [25] NAKAMURA Y. Effect of flow velocity on phosphate release from sediment[J]. Water Science and Technology,1994,30(10):263-272.
- [26] 刘钦普. 安徽省化肥面源污染环境风险分析[J]. 生态与农村环境学报,2015,31(6):876-881. (LIU Qinqu. Environmental pollution risk analysis of non-point source pollution of chemical fertilizer in Anhui province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2015,31(06):876-881. (in Chinese))
- [27] 王婕,刘桂建,方婷,等. 基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J]. 中国科学技术大学学报,2013,43(2):97-103. (WANG Jie,LIU Guijian,FANG Ting, et al. Evaluation of heavy metal pollution in sediments of Huaihe River(Anhui section) based on pollution load index[J]. Journal of University of Science and Technology of China,2013,43(2):97-103. (in Chinese))
- [28] 贺勇,黄河,严家平. 淮河中下游底泥中的重金属与有机质研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版),2005,13(6):79-82. (HE Yong,HUANG He,YAN Jiaping. Heavy metals and organic matter in sediments of the middle and lower reaches of the Huaihe River[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry (Natural Science), 2005,13(6):79-82. (in Chinese))
- [29] 罗斌,刘玲,张金良,等. 淮河干流沉积物中重金属含量及分布特征[J]. 环境与健康杂志,2010,27(12):1122-1127. (LUO Bin,LIU Ling,ZHANG Jinliang, et al. Concentrations and distribution of heavy metals in the sediments of the Huaihe River[J]. Journal of Environment and Health,2010,27(12):1122-1127. (in Chinese))
- [30] 黄河. 淮河中下游河道沉积物重金属元素分布特征研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2005.
- [31] WANG Qingren,LI Yuncong. Phosphorus adsorption and desorption behavior on sediments of different origins[J]. Journal of Soils and Sediments,2010,10(6):1159-1173.
- [32] 赵小敏. 淮河淮南段底泥的污染特征研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2005.
- [33] 高磊. 淮河流域典型污染物多介质累积特征与生态风险评价[D]. 上海:华东师范大学,2008.
- [34] 陈军,徐俊,陈永红,等. 淮河淮南段底泥氮磷垂直分布研究[J]. 人民长江,2008,39(2):73-75. (CHEN Jun,XUN Jun, CHEN Yonghong, et al. Vertical distribution of nitrogen and phosphorus in Huainan section of Huaihe River[J]. Yangtze River, 2008,39(2):73-75. (in Chinese))

(收稿日期:2017-01-14 编辑:高建群)