

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.10

沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价

马培, 鲍锦磊

(河南工程学院资源与环境学院, 河南 郑州 450000)

摘要:为揭示沙颍河沉积物中氮及重金属的分布和污染特征,于2015年6—9月采集了沙颍河干支流主要站点的表层沉积物及上覆水样品,分析了其中氮的赋存形态和重金属的分布,探讨了水体—沉积物氮的转化机制及重金属的来源。结果表明:沙颍河表层沉积物中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、ON(有机氮)和TN的质量比分别为21.47~53.60 mg/kg、1.702 3~3.066 1 mg/kg、1 050~2 390 mg/kg和1 071~2 488 mg/kg, ON占TN的97.17%以上;表层沉积物中Cd、Cu、Zn和As质量比分别为1.583~3.533 mg/kg、21.98~64.60 mg/kg、148.5~165.5 mg/kg和1.527~2.416 mg/kg。Pearson相关性分析表明:表层沉积物中氮主要存在于有机物中,表层沉积物释放 NH_4^+ -N已经成为影响沙颍河水体 NH_4^+ -N浓度的一个重要因素;沙颍河大部分站点的表层沉积物有机指数和ON分别处于II、IV级,有机碳污染较轻,ON污染严重;潜在生态评价中重金属Cd已经达到了很强—极强的污染程度,其余重金属则处于轻微污染水平;重金属潜在生态风险指数 I_R 显示沙颍河表层沉积物重金属潜在风险已经到了很强—极强的水平,其中Cd对 I_R 的贡献达97.22%。

关键词:沙颍河;表沉积物;氮形态;重金属;污染评价

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)02-0061-07

Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River

MA Pei, BAO Jinlei

(College of Resources and Environment, Henan University of Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To assessment pollution of heavy metal and nitrogen in surface sediments of the Shaying River, sampling had been conducted during the period from June to September of 2015. The nitrogen occurrence characteristics and its transformation mechanism in surface sediments of the Shaying River were studied, as well as the distribution of heavy metal. Results showed that the contents of NO_3^- -N, NH_4^+ -N, organic nitrogen (ON) and total nitrogen (TN) in sediment were 21.47~53.60 mg/kg, 1.702 3~3.066 1 mg/kg, 1 050~2 390 mg/kg and 1 071~2 488 mg/kg, respectively, and ON accounted for 97.17% of TN. While the contents of Cd, Cu, Zn, and As were 1.583~3.533 mg/kg, 21.98~64.60 mg/kg, 148.5~165.5 mg/kg and 1.527~2.416 mg/kg, separately. Pearson correlation analysis showed nitrogen in surface sediments were mainly existed in organic matter, while sediment could be an important source to the NH_4^+ in the water body. Organic index and organic nitrogen of sediments, fell into the level II and the level IV, respectively, implying light organic carbon pollution but serious

基金项目:国家自然科学基金(41401549);河南工程学院博士基金(D2013015)

作者简介:马培(1983—),女,讲师,博士,从事水体富营养化及水污染治理技术研究。E-mail:map55912@163.com

nitrogen pollution in the sediments. The potential ecological risk (I_R) of heavy metals showed that potential ecological risk of heavy metals has reached very high potential ecological risks, in which the contribution of Cd to I_R was about 97.22%.

Key words: Shaying River; surface sediment; nitrogen form; heavy metal; pollution assessment

沉积物作为河流生态系统的重要组成部分,其进入水体的大部分物质沉积于底泥中,沉积物对污染物的累积作用远远大于水体,当环境条件(如DO、氧化还原电位等)发生改变时,沉积物有可能成为河流重金属和营养盐的重要内源,严重影响河流水质^[1-4]。因此研究河流沉积物中不同形态氮和重金属的分布及污染状况,对了解其对水体水质的影响具有重要的意义。

随着社会经济的发展,大量河流被拦截筑坝,极大地改变了河流原有的生态系统,势必会对河流沉积物及重金属等的迁移转化产生极大影响^[5-6]。淮河流域闸坝众多,人口密集,水污染严重^[7],全流域已修建闸坝11 000多座,总库容303亿m³,占多年平均径流量的51%^[8]。沙颍河作为淮河最大的支流,是淮河众多支流中闸坝分布最密集、污染最严重的支流^[9-10]。本文对沙颍河表层沉积物中氮的赋存形态及重金属的分布进行研究,探讨氮的主要转化机制及重金属的来源,并就氮、重金属的潜在生态风险进行评价,以期对闸坝型水体的综合治理提供依据。

1 研究区域概况及评价方法

1.1 研究区域概况

沙颍河是淮河第一大支流,发源于豫西伏牛山,跨河南、安徽两省,流经平顶山、漯河、许昌、周口、阜阳等40余市县,在安徽省颍上县汇入淮河,总长为624 km,流域面积约为4万km²^[11]。周口市以上为沙颍河上游,周口市至阜阳市为中游,阜阳市以下为下游。沙颍河上游支流众多,主要的一级支流有沙河、颍河、贾鲁河,中下游少有支流汇入^[12]。流域内有耕地212万hm²,人口2 400万人,有丰富的煤炭资源,是我国重要的能源基地。

1.2 样品的采集及测定

采样点设置在沙颍河、新郑、贾鲁河闸、周口、槐店、阜阳5个水文站点,采样点位置见图1,采样频

率为每月一次。2015年7—9月分别利用采水器采集表层30 cm处河水样100 mL,并利用重力采泥器采集河底0~10 cm的表层沉积物。水样装于100 mL塑料瓶内,冷藏保存。沉积物样品封装于干净塑封袋冷冻保存,每个沉积物样品质量均大于500 g。样品当日运至室内冷冻干燥后经过筛分,取粒径小于100目(0.25 mm)的备用。

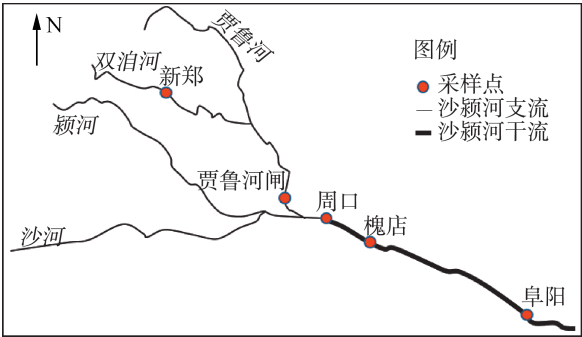


图1 沙颍河采样点示意图

沉积物中TN的测定采用半微量开氏法, NH₄⁺-N的测定采用靛酚蓝比色法, NO₃⁻-N的测定采用酚二磺酸比色法, ON(有机氮)由TN减去NH₄⁺-N和NO₃⁻-N计算得到,由于NO₂⁻-N极不稳定且含量很低,故可以忽略。有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化-滴定法测定,另外沉积物中Cd、Cu、Zn和As含量用HCl-HNO₃-HClO₄消解-原子吸收分光光度法测定,具体见文献[13]。水体中TN采用过硫酸钾-紫外分光光度法测定, NO₃⁻-N采用酚二磺酸光度法测定, NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定, NH₄⁺-N采用纳氏试剂光度法测定,具体参见文献[14]。

1.3 评价方法

1.3.1 营养盐评价方法

采用有机指数法评价沉积物的营养状况,采用ON来判断沉积物所受氮污染的程度,计算方法和评价方法如下(评价标准见表1)^[15]:

$$A_v = w(OC)w(ON) \tag{1}$$

表1 沉积物有机指数和ON评价标准

指数范围	$A_v < 0.05$	$0.05 \leq A_v < 0.2$	$0.2 \leq A_v < 0.5$	$A_v \geq 0.5$	$w(ON) < 0.033$	$0.033 \leq w(ON) < 0.066$	$0.066 \leq w(ON) < 0.133$	$w(ON) \geq 0.133$
等级	I级(清洁)	II级(较清洁)	III级(尚清洁)	IV级(有机污染)	I级(清洁)	II级(较清洁)	III级(尚清洁)	IV级(有机污染)

其中 $w(\text{OC}) = w(\text{OM})/1.724$
 $w(\text{ON}) = 0.95w(\text{TN})$
 式中: A_v 为有机指数; $w(\text{OC})$ 为有机碳质量比; $w(\text{ON})$ 为有机氮质量比; $w(\text{OM})$ 为有机质质量比。

1.3.2 重金属污染评价方法

采用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价沙颍河沉积物重金属的潜在生态危害,其表达式^[16]为

$$I_{\text{R}} = \sum_i^m E_{\text{ri}} \tag{2}$$

其中 $E_{\text{ri}} = \sum_i^m T_{\text{ri}} \frac{C_i}{C_{\text{ni}}}$

式中: I_{R} 为沉积物中重金属的潜在生态风险指数; E_{ri} 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数; C_i 为沉积物中第 i 种重金属的实测值; C_{ni} 是土壤中第 i 种重金属的背景值, 本文采用河南省土壤重金属背景值^[16]; T_{ri} 为第 i 种重金属的毒性系数; m 为重金属种类数。本文中 Cd、Cu、Zn 和 As 的毒性系数分别采用 30、5、1 和 10^[17-18], 沙颍河沉积物中重金属的潜在风险采用表 2 所列标准评价。

表 2 重金属潜在生态风险指数与污染程度的关系

E_{r}^i	I_{R}	污染程度
<40	<150	轻度
[40,80)	150~300	中度
[80,160)	300~600	强
[160,320)	≥600	很强
≥320		极强

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中氮的形态分布

图 2 为沙颍河表层沉积物中各种形态氮的空间分布情况, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、ON 和 TN 4 种形态氮质量比范围分别为 21.47 ~ 53.60 mg/kg、1.702 3 ~ 3.066 1 mg/kg、1 050 ~ 2 390 mg/kg 和 1 071 ~ 2 488 mg/kg, 均值分别为 35.43 mg/kg、2.143 mg/kg、1 813 mg/kg 和 1 871 mg/kg。4 种形态氮在沙颍河贾鲁河(新郑水文站、贾鲁河闸)质量比最高, 沙颍河中游阜阳水文站 TN 和 ON 的质量比最低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量比空间差异性不明显。ON 占 TN 的 97.17%, 是沙颍河沉积物中氮的主要存在形式; 无机氮中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是主要的存在形式, 占无机氮总量的 90.07%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在沙颍河沉积物中含量普遍较低。沙颍河表层沉积物中各个采样点有机质(OM)含量分布和 ON 含量分布状况一致, 波动范围是 1.604% ~ 2.805%, 平均值为 2.024%。

与国内主要河湖相比较, 沙颍河表层沉积物中 TN 的均值高于海河、辽河、鄱阳湖、太湖、巢湖、洪泽

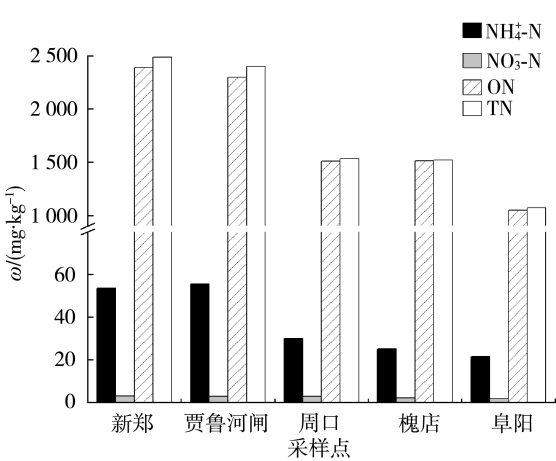


图 2 沙颍河表层沉积物氮的赋存形态

湖、天鹅湖、洞庭湖^[19-26], 仅低于长寿湖、天目湖^[27-28], 与乌梁素海、青海湖相当^[29-30], 由此可见, 沙颍河表层沉积物中 TN 含量处于较高水平。OM 的含量与巢湖、洞庭湖相当^[23,26], 处于中等水平, 故沙颍河 TN、OM 的内源负荷不容忽视。

2.2 水体中氮的污染特征

由图 3 可见, 沙颍河在采样期间上覆水中 TN 质量浓度空间差异明显, 波动范围是 3.126 ~ 6.142 mg/L, 各个采样点均在 2 mg/L 以上, 超过国家地表水 V 类水标准, 属于地表劣 V 类水。上覆水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度波动范围分别为 0.0644 ~ 1.349 mg/L 和 0.3012 ~ 1.099 mg/L, 两种形态的氮含量差异不显著 ($P=0.6931$), 分别占 TN 的 14.00% 和 15.21% 左右, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度较低, 波动范围是 0.143 8 ~ 0.155 1 mg/L, 占 TN 含量的 3.112%。由此可见 TN 中无机氮占的比例为 30% 左右, 水体中 TN 的存在形态主要是 ON。

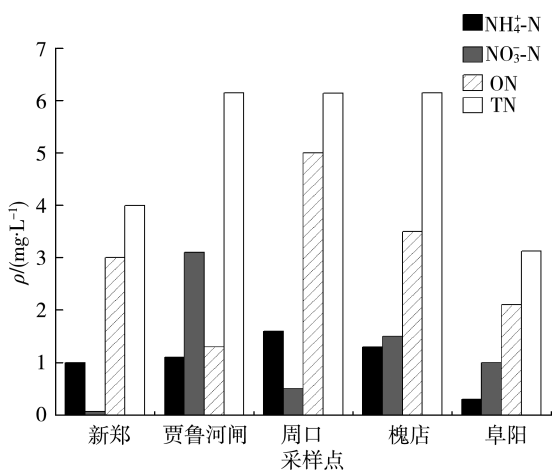


图 3 沙颍河水体中各种形态氮的分布

2.3 沉积物-水体氮的转化机制分析

Pearson 相关分析表明(表 3), 表层沉积物中 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、ON、OM 均显著相关, 相关系数分别为 0.918 4、0.999 9、0.823 2; ON 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著相

表3 水体、沉积物中不同形态氮、有机质 Pearson 相关性分析

相关指标	$w(\text{TN})$	$w(\text{NO}_3^- \text{-N})$	$w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$	$\rho(\text{ON})$	$\rho(\text{OM})$
$w(\text{TN})$	1							
$w(\text{NO}_3^- \text{-N})$	0.3847	1						
$w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$	0.014643	-0.2473	1					
$\rho(\text{TN})$	0.1698	-0.1757	0.8692**	1				
$\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$	-0.0566	0.0258	0.8354**	0.9184**	1			
$\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$	-0.1415	-0.6795	-0.0321	0.1669	0.1445	1		
$\rho(\text{ON})$	-0.0555	-0.1556	0.9012**	0.9999*	0.7943*	0.5866	1	
$\rho(\text{OM})$	-0.2931	-0.4071	0.5626	0.8232*	0.7543	0.6923	0.9587**	1

注：*表示在0.05水平(双尾检测)上显著相关，**表示在0.01水平(双尾检测)上极显著相关。

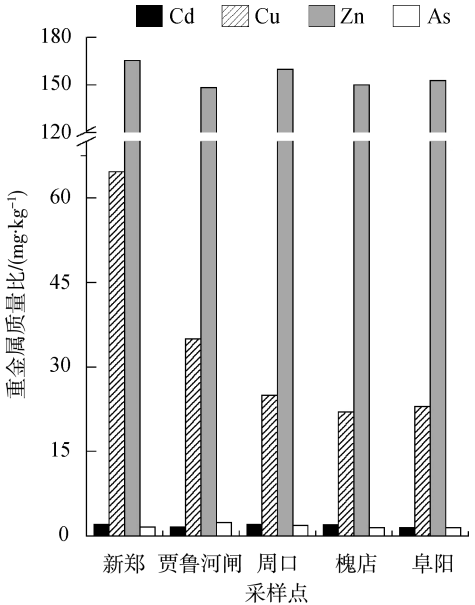
关,相关系数为0.7943;OM和ON之间显著相关,相关系数为0.9581。表层沉积物中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与水体中TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、ON显著相关,相关系数分别为0.8692、0.8354和0.9012;水体中各种形态的氮之间均不存在显著相关性。

沉积物中OM与TN、ON显著相关,表明沉积物中的氮主要存在于有机质中^[31];水体中TN与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 显著相关,沉积物中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与水体中TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、ON显著相关,这说明沉积物释放 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 已经成为影响沙颍河水体 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的一个重要因素。沙颍河闸坝众多,闸坝的建立大大改变的河流的水力条件,当闸坝处于关闭状态时,河流水流速度减缓,有利于悬浮颗粒物的沉积作用,此时沉积物成为上覆水体污染物的一个重要的临时“汇”;而当闸坝开启时,水流速度增加,此时沉积物中的污染物在水流冲刷的作用下,会成为上覆水体污染物的“源”,故沙颍河沉积物与河流水体之间存在着频繁的物质交换。已有研究表明沉积物向上覆水体释放 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是沉积物中氮对上覆水的营养供给机制,且沉积物中无机氮向水体迁移中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 占大部分, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 比例较小^[31-32],因此,沙颍河沉积物氮的内负荷可能会成为导致沙颍河富营养化的潜在威胁。

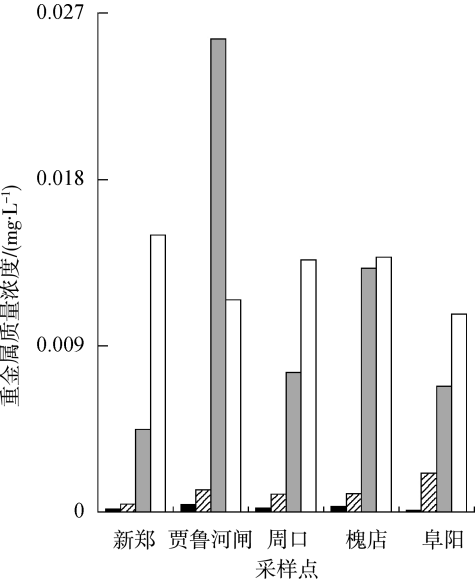
2.4 重金属的空间分布

沙颍河各个采样点中表层沉积物Zn质量比最高,变化范围148.5~165.5 mg/kg,平均质量比为156.4 mg/kg,沉积物中(Zn)空间变化较小,具体见图4(a)。4种重金属中Cu的质量比仅次于Zn,波动范围是21.98~64.60 mg/kg,平均值为34.23 mg/kg,质量比较Zn低了很多。Cd和As的质量比分别为1.583~2.133 mg/kg(均值2.179 mg/kg)、1.527~2.416(均值1.907 mg/kg)。河南省土壤Cd、Cu、Zn和As的背景值分别是0.15 mg/kg、22 mg/kg、61.5 mg/kg和10 mg/kg^[17],可以看出沙颍河沉积物

中Cd、Cu和Zn的质量比均超过了土壤背景值,特别是Cd,质量比是背景值的10.56~19.78倍,仅有As的质量比均小于土壤背景值。



(a) 表层沉积物



(b) 水体

图4 沙颍河表层沉积物及水体中4种重金属的分布

沙颍河水体中重金属的分布见图 4(b),从图 4(b)可知,4 种重金属中 As 的质量浓度最高,波动范围为 0.010 7~0.015 0 mg/L,均值为 0.012 9 mg/L,其次是 Zn 的质量浓度,波动范围是 0.004 5~0.025 6 mg/L,均值为 0.011 5 mg/L。Cu 和 Cd 的质量浓度较低,波动范围分别为 0.000 4~0.002 1 mg/L 和 0.000 1~0.000 4 mg/L,均值分别为 0.001 1 mg/L 和 0.000 2 mg/L,4 种重金属的平均质量浓度低于地表水环境质量标准。

2.5 沉积物中重金属来源分析

从表 4 的 Pearson 相关性分析可以看出,水体中 Cd 和 As 极显著相关,Cu 和 Zn 极显著相关;并且沉积物中 Cu 和 Zn 极显著相关,Cd 和 As 也呈极显著相关,在土壤中这些元素也常常伴生,沉积物中重金属的显著相关性也一定程度上反映元素污染程度相近或者是同一污染源,这说明 Cu 和 Zn,Cd 和 As 可能有着相同的来源或者地化性质^[33-35]。

水体和沉积物之间, $w(Cd)$ 和 $\rho(Cd)$ 极显著相关; $w(Cu)$ 和 $\rho(Cu)$ 、 $\rho(Zn)$ 极显著相关, $w(Zn)$ 和 $\rho(Cu)$ 、 $\rho(TN)$ 极显著相关, $w(As)$ 和 $\rho(Cd)$ 、 $\rho(As)$ 极显著相关。沉积物与水体之间中重金属的显著相关性,表明沙颍河水体和沉积物之间物质交换频繁。两者中 Cd 极显著相关,表明沉积物中 Cd 的一个重要来源是上覆水体 Cd 的沉积;沉积物中 Zn 和 TN 显著相关,表明沙颍河水体在受到 Zn 污染的过程中伴随着氮污染的发生。

2.6 表层沉积物污染现状评价

图 5 展示了沙颍河沉积物的有机指数和 ON 质量百分数。有机指数波动范围是 0.096 0~0.387 2,均值是 0.242 1,可以看出沙颍河沉积物有机碳污染水平大部分采样点处于Ⅱ级,新郑污染水平则属于Ⅲ级水平,有机质污染处于尚清洁的程度。ON 质量百分数波动范围是 0.103 1%~0.236 4%,均值为 0.177 8%,除了阜阳外,其余采样点的表层沉积物

中 ON 污染水平处于Ⅳ级水平,污染较重。故沙颍河沉积物内源氮对河流水质存在潜在危害,控制沙颍河氮污染不仅要注意控制外源的输入,内源释放也不容忽视。

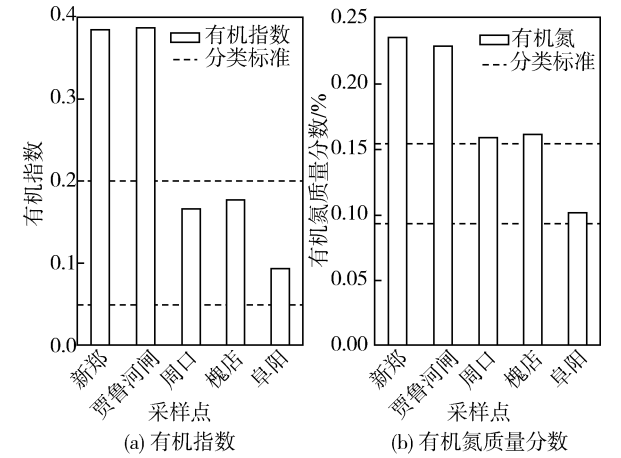


图 5 沙颍河表层沉积物有机污染评价

表 5 给出了沙颍河表层沉积物 4 种重金属潜在危害评价结果。由表 5 可见,沙颍河表层沉积物中 Cd 的污染最重, E_{ri} 大部分采样点大于 320,属于极强污染,只有阜阳处于 160~320,属于很强污染。4 个采样点的 Cu、Zn 和 As 的 E_{ri} 均小于 40,属于轻度污染的水平,各种金属的生态风险由大至小依次为 Cd、Cu、Zn、As。从生态风险指数 I_R 来看,沙颍河 4 个采样点的沉积物重金属都处于强污染水平。其中周口水文站的 I_R 大于 600,属于很强污染,其他站点的 I_R 均大于 300,属于强污染。综合来看,沙颍河表

表 5 沙颍河表层沉积物重金属潜在危害评价

采样点	E_{ri}				I_R
	Cd	Cu	Zn	As	
新郑	426.7 **	14.68	2.691	1.691	445.7 *
周口	593.3 **	5.939	2.624	1.917	603.8 **
槐店	406.7 **	4.604	2.414	1.527	415.2 *
阜阳	316.7 *	5.890	2.442	1.652	326.6 *

注: * 强污染; ** 极强污染。

表 4 重金属及沉积物中 OM、TN 的 Pearson 相关性分析

指标	$w(Cd)$	$w(Cu)$	$w(Zn)$	$w(As)$	$\rho(Cd)$	$\rho(Cu)$	$\rho(Zn)$	$\rho(As)$	$w(OM)$	$w(TN)$
$w(Cd)$	1									
$w(Cu)$	-0.262	1								
$w(Zn)$	-0.064	0.7046 **	1							
$w(As)$	0.7740 **	-0.0420	0.401	1						
$\rho(Cd)$	0.9998 **	-0.262	-0.064	0.77401 **	1					
$\rho(Cu)$	-0.262	0.9637 **	0.7046 **	-0.04217	-0.26203	1				
$\rho(Zn)$	-0.064	0.7046 **	1.000	0.40098	-0.06391	0.7046 **	1			
$\rho(As)$	7.740	-0.042	0.401	0.9979 **	0.77401 **	-0.0421	0.4009	1		
$w(OM)$	0.0469	-0.8647	0.859	0.623	0.0585	0.9445	0.721	-0.0514	1	
$w(TN)$	0.3309	-0.9293	0.9581 *	0.8209	0.3419	0.8788	0.8392	0.1737	0.9581 *	1

注: * 表示在 0.05 水平(双尾检测)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双尾检测)上极显著相关。

层沉积物重金属潜在生态风险主要是由于 Cd 污染严重造成的,Cd 对 I_R 的贡献率平均为 97.22%。

3 结 论

a. 沙颍河沉积物中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、ON 和 TN 等 4 种形态氮质量比范围分别是 21.47 ~ 53.60 mg/kg, 1.7023 ~ 3.0661 mg/kg, 1050 ~ 2390 mg/kg 和 1071 ~ 2488 mg/kg, 均值分别为 35.43 mg/kg, 2.143 mg/kg, 1813 mg/kg 和 1871 mg/kg。ON 占 TN 含量的 97.17% 以上, 无机氮中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 是主要的存在形式, 占无机氮总量的 90.07%; 上覆水体中各采样点 TN 均超过国家地表水 V 类水标准, ON 占 TN 的 80% 以上。

b. 沉积物中 Cd、Cu、Zn 和 As 质量比分别为 1.583 ~ 3.533 mg/kg, 21.98 ~ 64.60 mg/kg, 148.5 ~ 165.5 mg/kg 和 1.527 ~ 2.416 mg/kg, 除 As 外, Cd、Cu 和 Zn 的质量比均超过了背景值, 特别是 Cd, 质量比是背景值的 10.56 ~ 19.78 倍。

c. Perason 相关性分析表明: 沉积物中的氮主要存在于有机质中, 沉积物释放 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 已经成为影响沙颍河水体 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度的一个重要因素。

d. 沙颍河有机指数波动范围是 0.0960 ~ 0.3872, 大部分采样点处于 II 级, 有机质污染较轻。有机氮波动范围是 0.1031% ~ 0.2364%, 大部分站点沉积物中 ON 污染水平处于 IV 级水平, 有机氮的污染较重。

e. 潜在生态评价中重金属 Cd 已经达到了很强到极强的污染程度, 其余重金属污染较轻, 重金属潜在生态风险指数 (I_R) 表明沙颍河沉积物重金属潜在风险已经到了很强到极强的水平, 其中 Cd 对 I_R 的贡献最大, 贡献率达 97.22%。

参考文献:

[1] TING D S, APPAN A. General characteristics and fractions of phosphorus in aquatic sediments of two tropical reservoirs[J]. Water Science and Technology, 1996, 34 (7/8):53-59.

[2] 汤红亮, 王超, 李勇, 等. 里运河底泥重金属空间分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 18-20. (TANG Hongliang, WANG Chao, LI Yong, et al. Spatial distribution of heavy metals in sediments of Liyun River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(1):18-20. (in Chinese))

[3] 林曼利, 彭位华. 宿州市农村地下水重金属含量与健康风险评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6):110-116. (LIN Manli, PENG Weihua. Concentrations and health risk assessment of heavy metals in groundwater in rural areas of Suzhou City[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (6):110-116. (in Chinese))

[4] 刘静玲, 李毅, 史璇, 等. 海河流域典型河流沉积物粒度特征及分布规律[J]. 水资源保护, 2017, 33(6):9-19. (LIU Jingling, LI Yi, SHI Xuan, et al. Grain size characteristics and distribution regularities of typical river sediments in Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):9-19. (in Chinese))

[5] 钱慧君, 高洋, 操满, 等. 水坝拦截对新安江沉积物中磷、氮形态的影响[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2015, 21(1):72-80. (QIAN Huijun, GAO Yang, CAO Man, et al. Impacts on geochemical phases of nitrogen and phosphorus in sediments of Xinanjiang River by river impounding[J]. Journal of Shanghai University (Natural Sciences), 2015, 21(1):72-80. (in Chinese))

[6] 轩晓博, 逢勇, 李一平, 等. 金属矿区重金属迁移对水体影响的数值模拟[J]. 水资源保护, 2015, 31(2):30-35. (XUAN Xiaobo, PANG Yong, LI Yiping, et al. Numerical simulation of influence of heavy metal migration on water in metallic mining areas[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(2):30-35. (in Chinese))

[7] 顾洪. 淮河流域经济发展态势及综合治理[J]. 治淮, 2013(8):8-11. (GU Hong. Development of economic trend and its comprehensive control [J]. Harnessing the Huaihe River, 2013(8):8-11. (in Chinese))

[8] 夏军, 赵长森, 刘敏, 等. 淮河闸坝对河流生态影响评价研究:以蚌埠闸为例[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1):48-60 (XIA Jun, ZHAO Changsen, LIU Min, et al. Impact assessment of dams & flood gates projects of Huaihe River on river ecosystem; a case study of the Bengbu Site [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23 (1):48-60. (in Chinese))

[9] 褚金庭. 沙颍河流量和水质对淮河污染的影响[J]. 水资源保护, 2001 (3):4-7. (CHU Jinting. Influence of flow rate and water quality of Shayinghe River on water quality in Huaihe River [J]. Water Resources of Protection, 2001(3):4-7. (in Chinese))

[10] 赵娟, 李冬锋, 左其亭. 颍上闸汛前泄流量对淮河干流水质影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4):21-23. (ZHAO Juan, LI Dongfeng, ZUO Qiting. Analysis of the effects of discharge volume from Yingshang dams before flood on water quality in mainstream of Huaihe River [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4):21-23. (in Chinese))

[11] 于刚. 沙颍河周口段水质现状分析与研究[J]. 治淮, 2014 (10):9-10. (YU Gang. Analysis and study on water quality in Zhoukou reach of Shayinghe River [J]. Harnessing the Huaihe River, 2014(10):9-10. (in Chinese))

[12] 郝守宁, 彭文启, 吴文强, 等. 沙颍河流域面源污染负荷空间分布特征研究[J]. 人民长江, 2014, 45(17):6-9. (HAO Shouning, PENG Wenqi, WU Wenqiang, et al. Discussion on water quality of river system in ancient city of Suzhou based on dimensionless method [J]. Yangtze River, 2014, 45(17):6-9. (in Chinese))

- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 319-324. (SUI Guirong. The contents and assessment of organic matter, total nitrogen and total phosphor in surface sediments from Tai lake[J]. Journal of Lake Sciences, 1996, 8(4): 319-324. (in Chinese))
- [16] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [17] 钟明, 万云, 万安, 等. 沙颍河流域沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1857-1864. (ZHONG Ming, WAN Jun, WAN An, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Shaying River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1857-1864. (in Chinese))
- [18] 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 等. 巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 925-934. (XIONG Chunhui, ZHANG Ruilei, WU Xiaodong, et al. Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Lake Gehu in southern Jiangsu Province, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(3): 925-934. (in Chinese))
- [19] 程生, 孙然好, 孔佩儒, 等. 海河流域水体沉积物碳、氮、磷分布与污染评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2679-2686. (CHENG Sheng, SUN Ranhao, KONG Peiru, et al. Spatial distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorous and pollution status evaluation of sediments in the Haihe River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2679-2686. (in Chinese))
- [20] 陈会霖, 花修艺, 陈思, 等. 辽河吉林省段干支流沉积物中氮和磷的形态与释放特征[J]. 吉林大学学报(理学版), 2014, 52(1): 137-143. (CHEN Huilin, HUA Xiuyi, CHEN Si, et al. Species and release characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of Liaohe River and its main tributaries in Jilin Province[J]. Journal of Jilin University(Science Edition), 2014, 52(1): 137-143. (in Chinese))
- [21] 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 23-28. (WANG Shengrui, NI Dong, JIAO Lixin, et al. Space-time variety of organic matter and nutrient in surface sediments from Poyang Lake[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(1): 23-28. (in Chinese))
- [22] 刘芸, 易齐涛, 陈求稳, 等. 太湖西部河网中沉积物氮的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3890-3897. (LIU Yun, YI Qitao, CHEN Qiuwen, et al. The spatial distribution of nitrogen species in surface sediments in the west river networks of the Taihu Lake Basin, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 3890-3897. (in Chinese))
- [23] 王永华, 刘振宇, 刘伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(4): 501-506. (WANG Yonghua, LIU Zhenyu, LIU Wei, et al. Distribution and correlation characteristics between pollutants in sediment in Chaohu Lake, China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2003, 39(4): 501-506. (in Chinese))
- [24] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 961-968. (YU Hui, ZHANG Wenbin, LU Shaoyong, et al. Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Hongze Lake and their status evaluation[J]. Environmental Science, 2010, 4(31): 961-968. (in Chinese))
- [25] 高丽, 宋鹏鹏, 史衍玺, 等. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 99-107. (GAO Li, SONG Pengpeng, SHI Yanxi, et al. Distribution characteristics of nutrients and heavy metal in sediments from Swan Lake[J]. Journal of Soil and Water Preservation, 2010, 24(4): 99-107. (in Chinese))
- [26] 张光贵. 洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2015, 36(2): 25-31. (ZHANG Guanggui. Characterization and ecological risk assessment of nutrients and heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(2): 25-31. (in Chinese))
- [27] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 393-398. (LU Shaoyong, XU Mengshuang, JIN Xiangcan, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Lake Changshouhu in Chongqing, China[J]. Environmental Science, 2012, 33(2): 393-398. (in Chinese))
- [28] 贺冉冉, 高永霞, 王芳, 等. 天目湖水体与沉积物中营养盐时空分布及成因[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 353-360. (HE Ranran, GAO Yongxia, WANG Fang, et al. Spatial-temporal distribution of nutrients and its causation in Tianmu Lake, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(2): 353-360. (in Chinese))
- [29] 李青芹, 霍守亮, 咎逢宇, 等. 我国湖泊沉积物营养盐和粒度分布及其关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2390-2397. (LI Qingqin, HUO Shouliang, JIU Fengyu, et al. The distribution of nutrients and particle size, their correlations in surface sediments of different lakes, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2390-2397. (in Chinese))

(下转第 87 页)

[J]. Chemosphere,2006,63 (3):387-402.

[11] CHU W H, GAO N, YIN D, et al. Formation and speciation of nine haloacetamides, an emerging class of nitrogenous DBPs, during chlorination or chloramination [J]. Journal of Hazardous Materials,2013,260(6):806-812.

[12] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science and Technology, 2003, 37: 5701-5710.

[13] 张永吉,武道吉,周玲玲,等. 腐殖酸特性及其对三卤甲烷形成的影响[J]. 中国给水排水,2005,21(1):14-17. (ZHANG Yongji, WU Daoji, ZHOU Lingling, et al. Characteristics of humic acid and its influence on trihalomethane formation[J]. China Water & Wastewater, 2005,21(1). 14-17. (in Chinese))

[14] CHU W H, LI D M, GAO N Y, et al. The control of emerging haloacetamide DBP precursors with UV/persulfate treatment[J]. Water Research,2015,72:340-348.

[15] YU S L, LIN T, CHEN W, et al. The toxicity of a new disinfection by-product, 2, 2-dichloroacetamide (DCAcAm), on adult zebrafish (Danio rerio) and its occurrence in the chlorinated drinking water [J]. Chemosphere,2015,139:40-46.

[16] CHU W H, GAO N Y, DENG Y, et al. Formation of nitrogenous disinfection by-products from pre-chloramination [J]. Chemosphere, 2011, 85 (7): 1187-1191.

[17] CHU W H, GAO N, YIN D, et al. Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products[J]. Chemosphere,2012,86(11):1087-1091.

(收稿日期:2017-05-04 编辑:徐 娟)

(上接第 67 页)

[30] 张晓晶,李畅游,张生,等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义[J]. 农业环境科学学报,2010,29(9):1770-1776. (ZHANG Xiaojing, LI Changyou, ZHANG Sheng, et al. Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of Wulangsu Lake respect to its effects on the environment [J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(9):1770-1776. (in Chinese))

[31] 焦立新. 浅水湖泊表层沉积物氮形态特征及在生物地球化学循环中的功能[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.

[32] HERBERT R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1999, 23 (5):563-590.

[33] 方明,吴友军,刘红,等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报,2013,33(2):563-569. (FANG Ming, WU Youjun, LIU Hong, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River estuary [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,33(2):563-569 (in Chinese))

[34] 薄录吉,王德建,张刚,等. 苏南典型村镇河网区沉积物重金属与营养盐污染评价[J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):1033-1040. (BO Luji, WANG Dejian, ZHANG Gang, et al. Assessment of heavy metal and nutrient pollution in surface sediments from rural river network in Southern Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2014,33(5):1033-1040(in Chinese))

[35] 高丽,宋鹏鹏,史衍玺,等. 天鹅湖沉积物中营养盐和重金属的分布特征[J]. 水土保持学报,2010,24(4):99-102. (GAO Li, SONG Pengpeng, SHI Yanxi, et al. Distribution characteristics of nutrients and heavy metal in sediments from Swan Lake[J]. Journal of Soil and Water Preservation,2010,24(4):99-102. (in Chinese))

(收稿日期:2017-05-03 编辑:徐 娟)

(上接第 82 页)

[79] 胡冠九,陈素兰,穆肃,等. 江苏省某市典型饮用水水源中抗生素质量浓度特征 [J]. 水资源保护,2016,32(3):84-88. (HU Guanjiu, CHEN Sulan, MU Su, et al. Characteristics of concentrations of antibiotics in typical drinking water sources in a city in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (3): 84-88. (in Chinese))

[80] 姚晶晶,吴东海,陆光华,等. 水环境中 PPCPS 检测技术及风险评价研究进展 [J]. 水资源保护,2017,33(6):76-81. (YAO Jingjing, WU Donghai, LU Guanghua, et al. Advances in aquatic PPCPs analysis technology and risk assessment [J]. Water Resources Protection,2017,33(6):76-81. (in Chinese))

[81] 杨勇. 药物管理的现状及应对措施 [J]. 生物技术世界,2016,43:193-194. (YANG Yong. Present situation and countermeasures of drug management [J]. A World of Biotechnology,2016,43:193-194. (in Chinese))

[82] 王明明,许娜,唐云,等. 食品中硝基咪唑类药物残留检测方法的研究进展 [J]. 中国畜牧兽医,2016,43(8):2202-2207. (WANG Mingming, XU Na, TANG Yun, et al. Advance on detection methods for residues of nitrofurans in food [J]. China Animal Husbandry and Veterinary Medicine,2016,43(8):2202-2207. (in Chinese))

(收稿日期:2017-05-04 编辑:徐 娟)