

苏南典型村镇河网区沉积物重金属与营养盐污染评价

薄录吉^{1,2}, 王德建^{1*}, 张刚¹, 冉景^{1,2}, 郑继成^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:采集江苏省常熟市某镇 34 个河网表层沉积物样品, 分析了其中全氮(TN)、全磷(TP)、有机质(OM)以及重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn, 同时对沉积物重金属和营养盐的污染特征和来源进行了研究。结果表明: 杨园镇河网表层沉积物重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的平均含量分别为 15.7、6.11、162、124、0.55、86.3、72.5、370 mg·kg⁻¹, 分别是江苏省土壤背景值的 1.6、46.9、2.1、5.5、1.9、3.2、2.8、5.9 倍, TN、TP 平均含量分别为 2541、1299 mg·kg⁻¹, 河网区沉积物重金属 Cd、氮磷污染严重且空间分布差异明显。采用地累积指数和沉积物质量基准评价了河网表层沉积物重金属污染及相应生物毒性效应, 表明 Cd 的污染程度最强, 并且发生生物毒性效应的几率很高。采用有机指数和有机氮评价河网沉积物有机碳氮污染状况, 有机指数平均为 0.98, 处于 IV 级, 有机碳污染严重; 有机氮平均为 0.24%, 处于 IV 级, 有机氮污染严重。相关性分析和因子分析表明沉积物中重金属和营养盐主要来自工业废水和生活污水的排放, 建议通过优化产业布局、强化源头防治和深化污水处理以防控和削减该地区水体重金属危害。

关键词: 河网; 沉积物; 重金属; 营养盐; 污染评价

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)05-1033-08 doi:10.11654/jaes.2014.05.029

Assessment of Heavy Metal and Nutrient Pollution in Surface Sediments from Rural River Network in Southern Jiangsu Province, China

BO Lu-ji^{1,2}, WANG De-jian^{1*}, ZHANG Gang¹, RAN Jing^{1,2}, ZHENG Ji-cheng^{1,2}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: River sediments could accumulate heavy metals and nutrients from and then release into water, causing water pollution. An investigation was performed to assess the pollution status and sources of heavy metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn), and nutrients [total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and organic matter (OM)] in 34 surface sediment samples collected from rural rivers in Southern Jiangsu Province, China. The mean concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in surface sediments were 15.7, 6.11, 162, 124, 0.55, 86.3, 72.5 mg·kg⁻¹ and 370 mg·kg⁻¹, which were 1.6, 46.9, 2.1, 5.5, 1.9, 3.2, 2.8 times and 5.9 times higher than their background values in the soils of Jiangsu Province, respectively. TN and TP were averagely 2.54 g·kg⁻¹ and 1.30 g·kg⁻¹, respectively. The Index of Geoaccumulation showed that Cd was the most serious pollutant. Organic index and organic nitrogen of sediments were 0.98 and 0.24%, respectively, both falling into the level IV, implying their pollution. The discharges of domestic sewage and industrial wastewater were identified as major pollutant sources. The present results suggest that heavy metal and nutrient pollution have become an environmental issue in the studied area and immediate remediation measures should be implemented.

Keywords: river network; sediment; heavy metal; nutrient; pollution assessment

沉积物是水生生态系统的重要组成部分, 它蓄积水体中沉积下来的氮、磷和重金属等污染物^[1], 同时又

不断地向水体释放污染物, 充当污染物“源”和“汇”的双重角色^[2]。特别在当外源污染得到控制或者外界因素(气候、水动力、pH、盐度、氧化还原电位、水温等)发生变化的时候^[3], 沉积物中积累的营养盐(如氮、磷)和有毒物质(如重金属)会不断释放到水体中, 营养盐的释放会造成水体富营养化, 进而恶化水体环境; 重金属的释放则会影响水生动植物的生长, 并通过食物

收稿日期: 2013-11-13

基金项目: 十二五国家科技支撑资助项目(2012BAJ24B06)

作者简介: 薄录吉(1985—), 男, 山东临沂人, 博士研究生, 研究方向为村镇河道底泥污染评价及底泥资源化利用。

E-mail: ljbo@issas.ac.cn

* 通信作者: 王德建 E-mail: djwang@issas.ac.cn

链最终对人体健康造成威胁^[4]。此外,沉积物也是底栖动物重金属摄入的重要来源^[5],同样可以通过食物链危害人体健康。因此,沉积物中营养盐和重金属的污染一直以来都是国内外环境化学的研究热点。

苏南地区河网密布,河流与人们的日常生活息息相关。近几十年以来,苏南地区经济发展很快,农村城镇化进程也走在全国前列,形成了独具特色的“苏南模式”,但是在城镇化进程中,由于缺乏或者根本没有给水排水系统、垃圾收集与处理系统等基本市政设施,河网区水体污染日益严重,同时又通过灌溉对农田造成二次污染^[6]。因此,亟需解决苏南地区河网水体污染问题。为了明确苏南河网区重金属和营养盐污染状况以及由此带来的生态环境问题,本研究选取了具有代表性的常熟市杨园镇河网区,并对河道表层沉积物重金属和营养盐进行了分析,探讨了营养盐和重金属的分布特征及风险水平,为预防和治理苏南河网区水体污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点布设与样品采集

2012年11月,对江苏省常熟市某镇周边河网进行了污染调查。根据该地区河网特点,将河网区分为东部、南部、西部和北部4个区,东部以工厂和居民区为主,南部以居民区为主,西部和北部以种植草坪为主。并采用GPS,在4个方位布设了34个采样点(1~6号和34号属于南部,7~18号属于东部,19~28号属于北部,29~33号属于西部),并用柱状采样器采集0~10 cm表层底泥,具体采样点分布如图1。

1.2 样品处理与分析

所采集样品经冷冻风干后,将样品压碎,剔除杂质,再用研钵将其研磨后过100目尼龙筛,装入塑料袋以供化学分析。

针对该地区河流重金属污染特征及营养盐污染特征,主要分析项目有As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、总氮(TN)、总磷(TP)和有机质(OM)。各指标及具体检测方法参照《土壤农业化学分析方法》^[7]及《土壤调查实验室分析方法》^[8]。沉积物重金属元素Cu、Pb、Zn、Cd、Ni、Cr采用HF-HClO₄-HNO₃消解,原子吸收光谱仪(日立Z-2000,日本)测定;As和Hg采用王水消解,原子荧光光谱仪(AFS-230E,北京科创海光仪器有限公司)测定;TN采用硒粉-硫酸铜-硫酸钾消化-蒸馏法,半微量凯氏定氮法测定;TP采用HF-HClO₄消解,钼锑抗比色法;有机质含量测定采用重铬酸钾

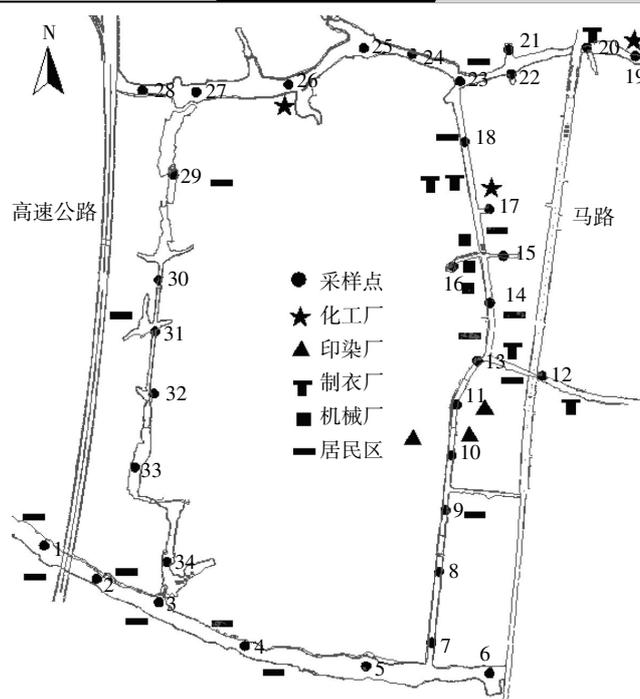


图1 常熟市某镇河网采样点示意图

Figure 1 Sampling sites in rural river network of Yangyuan Town in Changshu City, Jiangsu

容量法。

1.3 沉积物质量基准

沉积物质量基准(Sediment quality guidelines)是基于大量化学数据和相应的生物数据分析得到的,用来快速预测评价沉积物重金属污染的潜在生态危害^[9],通过该法将各重金属的浓度与相应的生物毒性效应低值ERL(Effects range low)和中值ERM(Effects range median)进行了比较。若其结果低于ERL值,表明沉积物未污染或轻度污染,基本无生物毒性效应;若其结果介于ERL与ERM之间时,沉积物属于中等污染水平,生物毒性效应偶尔发生;若其结果高于ERM值,表明沉积物受到严重污染,并呈现严重生物毒性效应。

1.4 地累积指数法

地累积指数法(Index of geoaccumulation, I_{geo})是从环境地球化学的角度出发评价沉积物中重金属的污染^[10],其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为重金属在沉积物中的实测含量; B_n 为沉积岩中所测元素的地球化学背景值,本研究选江苏省土壤重金属背景值^[12]作为地球化学背景值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,一般取值为1.5。

根据 I_{geo} 值大小(0~5)将污染等级分为7级,对应污染程度为无污染至极强污染(表1)。

表1 地积累指数与污染程度分级的关系

Table 1 Index of geoaccumulation and grade of contamination

I_{geo}	≤0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无·中	中	中·强	强	强·极强	极强

1.5 有机指数法

有机指数通常用作水体沉积物环境状况的指标;有机氮常用来作为衡量湖泊表层沉积物有否遭受氮污染的重要指标^[11]。计算方法如下:

有机指数=有机碳(%)×有机氮(%)

有机碳(%)=有机质(%)÷1.724

有机氮(%)=总氮(%)×0.95。

底泥有机指数和有机氮评价分级标准见表2。

1.6 数据统计

为了研究沉积物重金属和营养盐的来源,本文使用数据统计软件(SPSS 13.0)对所有数据进行了因子分析和相关分析^[12]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物污染特征

2.1.1 表层沉积物重金属含量及分布特征

重金属总量测定结果表明(图2),该地区周边河

流表层沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量范围分别为 6.72~21.3、0.05~28.1、71.7~621、23.2~443、0.05~2.62、31.3~274、21.6~310、43.5~934 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 8 种重金属平均含量大小顺序为: Zn ($370\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Cr ($162\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Cu ($124\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Ni ($86.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Pb ($72.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> As ($15.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Cd ($6.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)> Hg ($0.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别是江苏省土壤背景值^[13]的 1.6、46.9、2.1、5.5、1.9、3.2、2.8、5.9 倍,并且是土壤二级质量标准的 0.6、20.4、0.5、1.2、1.1、1.7、0.2 和 1.5 倍。该地区周边河流表层沉积物部分重金属含量高于国内外部分江河沉积物重金属含量(表3)。这一方面是因为苏南地区村镇经济较为发达,工厂较为密集,工业废水排放量大,加上没有完善的废水处理设施^[14],使得废水中绝大多数重金属等有害物质沉积到底泥中;另一方面,与国内外大江大河相比,村镇河流规模相对较小,河流流速慢,对外界污染物质的缓冲能力弱,也是加剧沉积物污染的重要原因之一。

此外,按照沉积物质量评价标准,在 34 个采样点中,分别有 97.1%(As)、94.1%(Cr)、79.4%(Cu)、70.6%(Pb)、61.8%(Hg)、44.1%(Cd)、44.1%(Zn) 和 29.4%(Ni) 的采样点重金属含量介于 ERL 和 ERM 之间, 64.7%(Ni)、32.4%(Zn)、23.5%(Hg) 和 20.6%(Cd) 的采样点重金属含量大于 ERM, 说明该地区河网沉积

表2 底泥有机指数及有机氮评价标准

Table 2 Assessment criterion of organic index and organic nitrogen in sediments

项目	有机指数				有机氮/%			
	<0.05	0.05~0.20	0.20~0.50	≥0.50	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.133	≥0.133
类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染	清洁	较清洁	尚清洁	有机氮污染
等级	I	II	III	IV	I	II	III	IV

表3 该地区河网区沉积物重金属含量与其他地区河流沉积物重金属含量的比较($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Comparison of average heavy metal concentrations in river sediments from Yangyuan Town with the published data of river sediments in different parts of the world($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

地点	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	参考文献
该地区河网区(苏南)	15.7	6.1	162	123	0.55	86.3	72.5	370	本研究
射阳县河网区(苏北)	—	2.85	68.7	22.3	—	39.8	56.8	102	赵盈 ^[15]
长江	15.0	1.0	107	61.4	0.26	41.6	50.0	231	杨志峰等 ^[16]
黄河口	6.50	—	17.4	16.5	0.04	—	16.0	21.0	吴斌等 ^[17]
松花江	5.56	0.22	46.3	20.7	0.26	17.4	22.7	83.1	林春野等 ^[18]
欣登河,印度	—	2.3	102	59.3	—	—	41.2	58.3	Suthar 等 ^[19]
波河,意大利	—	1.68	—	62.1	—	82.8	52.9	269	Farkas 等 ^[20]
拉恩河,德国	—	1.2	—	48.4	—	—	67.4	248	Martin ^[21]
底格里斯河,土耳其	4.6	1.8	84.8	345	—	146	265	203	Varol ^[22]
Kor River,伊朗	6.2	0.2	83.4	20.3	0.59	104	7.5	46.6	Sheykhi 等 ^[23]

物重金属尤其是 Ni、Zn、Hg 和 Cd 发生生物毒性效应的几率非常大。从重金属的空间分布来看,重金属含量高值多出现在工厂(化工厂、印染厂、机械厂和制衣

厂)和居民区周边,如 Cd、Zn 含量最高的 14 号采样点和 Pb 含量最高的 16 号采样点靠近机械厂,Cu 含量最高的 12 号采样点靠近制衣厂,Cr 和 Ni 含量最

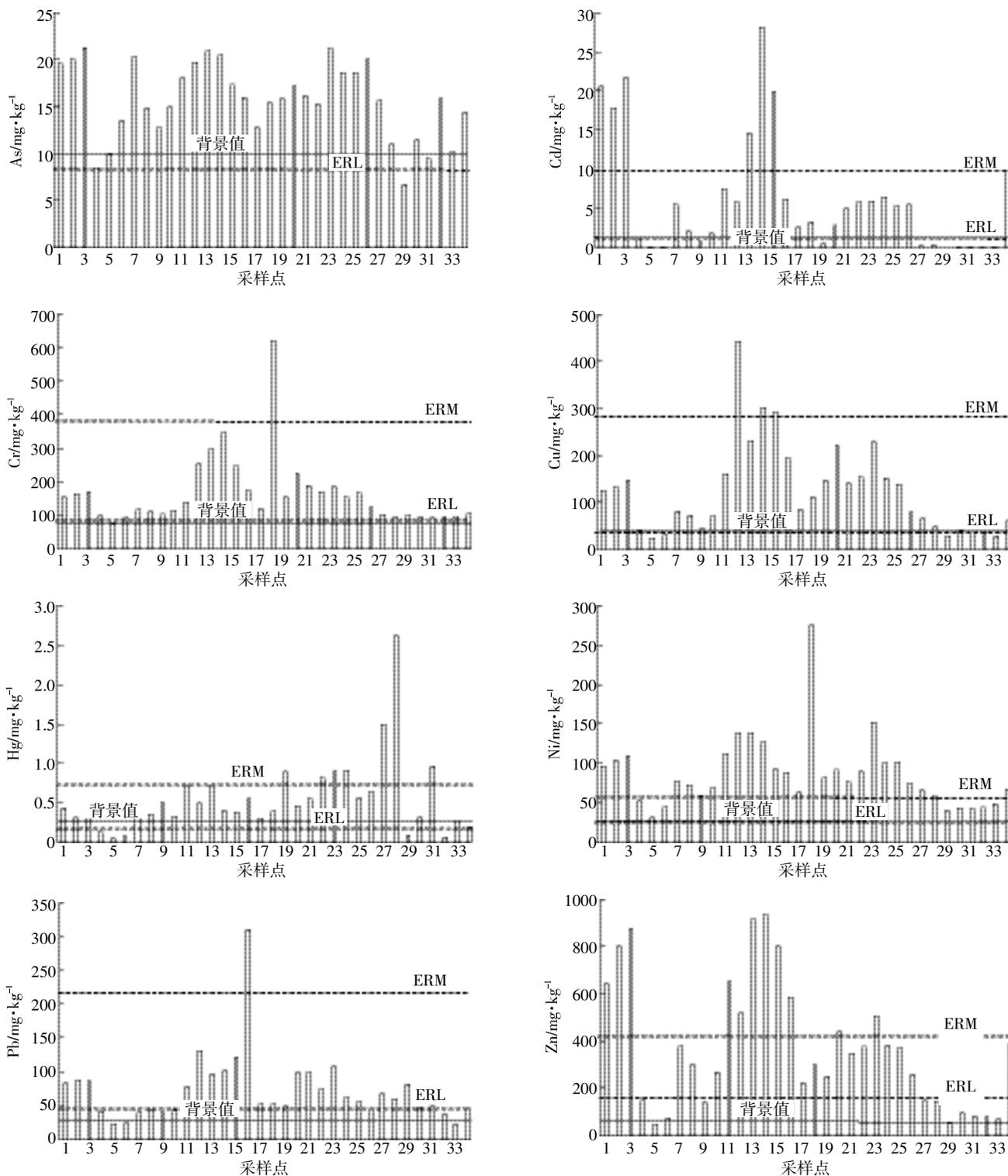


图2 该地区河网表层沉积物重金属含量、江苏省土壤背景值及沉积物质量基准

Figure 2 Concentrations of heavy metals in surface river sediments from Yangyuan Town and their soil background values of Jiangsu Province and the Sediment Quality Guidelines

高的18号采样点靠近服装厂和居民区。这说明沉积物中重金属含量受人类活动影响大。

2.1.2 表层沉积物 TN、TP、OM 含量及分布特征

该地区河网表层沉积物 TN、TP 和 OM 含量及空间分布见图 3。TN、TP 和 OM 含量变化范围分别为 720~5435、307~2409 mg·kg⁻¹ 和 16.8~175 g·kg⁻¹, 平均含量分别为 2541、1299 mg·kg⁻¹ 和 54.7 g·kg⁻¹。太湖地区的城郊河流系统沉积物 TN 和 TP 含量范围分别为 1.89~4.75、0.72~3.35 g·kg^{-1[24]}, 土耳其底格里斯河沉积物 TN 和 TP 含量范围分别为 0.70~2.66、0.99~2.05 g·kg^{-1[25]}, 福建莆田市外度水库沉积物 TN 和 TP 含量范围分别为 0.43~1.49、0.22~0.61 g·kg^{-1[26]}, 内蒙古大型湖泊乌梁素海沉积物 TN 和 TP 含量范围分别为 0.73~3.47、0.18~1.21 g·kg^{-1[27]}。这些河流、水库或者湖泊沉积物的氮、磷含量与该地区河网沉积物的氮、磷含量有差异也有相似之处, 主要是因为这些水体所处位置不同, 氮、磷来源不同, 从而导致水体氮、磷含量呈现差异。例如, 在本研究中, TN 含量最高点出现在 15 号采样点, TP 含量最高点出现在 2 号采样点, TN 和 TP 含量最低点均出现在 29 号采样点, 可以看出, TN 和 TP 含量高值均在工厂和居民区附近, 而低值多出现在农田区。这是因为工厂和居民区排放的污水中含有较高浓度的氮、磷及有机物, 该地区农田种植以草坪为主, 草坪拦截氮磷效果较高, 营养盐排放量相对较少, 说明人类活动的密集程度影响着河流底泥的氮磷含量。按照加拿大安大略省环境和能源部发布的沉积物氮、磷含量指南^[28], 当沉积物 TN 和 TP 的浓度分别达到 550 mg·kg⁻¹ 和 600 mg·kg⁻¹, 会引起低级别生态毒性效应; 而当沉积物 TN 和 TP 的浓度分别达到 4800 mg·kg⁻¹ 和 2000 mg·kg⁻¹, 则会引起严重级别生态毒性效应。该地区河流沉积物 TN 浓度均超过

550 mg·kg⁻¹, 并且有 2 处超过 4800 mg·kg⁻¹; 有 88.2% 采样点的 TP 浓度超过 600 mg·kg⁻¹, 并有 6 处 (17.6%) 超过 2000 mg·kg⁻¹。可见, 该地区河流沉积物氮、磷环境污染已达到非常严重的地步, 如不及时治理, 可能会造成该地区河流的生态危害。

2.2 表层沉积物污染状况评价

2.2.1 沉积物重金属污染评价

图 4 为该地区河流各采样点底泥地累积指数, 从图中可以看出:

(1) Cd 是该地区周边河流沉积物重金属中主要污染物。有 50% 采样点 Cd 地累积指数大于 3, 属于强、强-极强、极强污染水平; 有 17.6% 采样点 Cd 地累积指数介于 1~3 之间, 属于中、中-强污染水平; 有 32.4% 采样点 Cd 地累积指数小于 1, 属于无、无-中污染水平。

(2) Zn 的地累积指数多数介于 1~3 之间, 占总采样点的 55.9%, 达到中、中-强污染程度; 有 44.1% 采样点 Zn 地累积指数小于 1, 属于无、无-中污染水平。

(3) Cu 和 Pb 的地累积指数多数小于 1, 分别占总采样点的 58.8% 和 52.9%, 属于无、无-中污染水平; 有 41.2% 采样点 Cu 和 44.1% 采样点 Pb 地累积指数介于 1~3 之间, 达到中、中-强污染程度; 此外, 还有 16 号采样点 Pb 地累积指数为 3.4, 达到强污染水平。

(4) Ni 和 Cr 的地累积指数绝大多数小于 1, 分别占总采样点的 97.1% 和 91.2%, 属于无、无-中污染水平; 18 号采样点的 Ni、13 和 14 号采样点的 Cr 地累积指数介于 1~2 之间, 属于中污染水平; 18 号采样点的 Cr 地累积指数为 2.2, 属于中-强污染水平。

(5) As 和 Hg 的地累积指数绝大多数小于 0, 分别占总采样点的 76.5% 和 70.6%, 没有达到污染水平; 有 23.5% 采样点 As 和 23.5% 采样点 Hg 地累积指

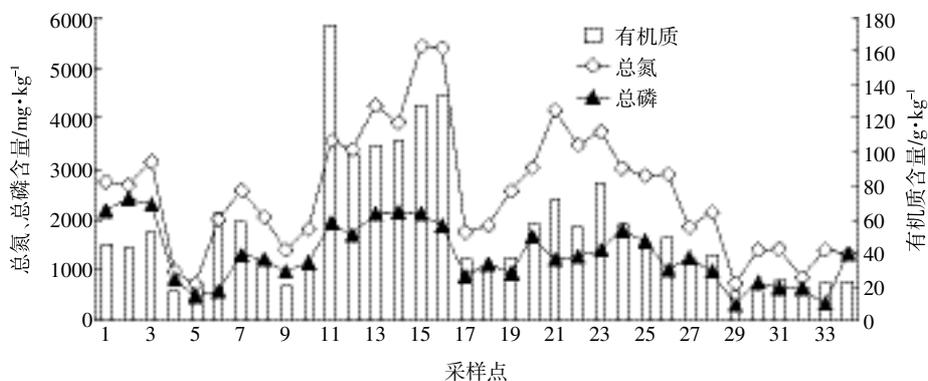


图 3 表层沉积物中总氮、总磷和有机质含量

Figure 3 Concentrations of TN, TP and OM in surface sediments

数介于 0~1 之间,属于无-中污染水平;此外,27 号和 28 号采样点地累积指数分别为 1.3 和 2.1, 分别达到中、中-强污染水平。

综合各重金属的地累积分级指数及其对应污染程度,总体评价结果是: Cd 的污染程度最强,其次是 Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Hg 和 As。这与珠江沉积物重金属的地累积指数顺序(Cu>Zn>Pb>Cr>Cd)^[29]、意大利波河沉积物重金属的地累积指数顺序(Cd>Pb>Zn>Cu>Ni)^[20]和土耳其底格里斯河沉积物重金属的地累积指数顺序(Pb>Zn>Cd>Ni>Cu>As>Cr)^[21]均不同,并且重金属种类和污染程度也有非常大的差异,主要是由于重金属的来源、种类和污染强度不同所致。

2.2.2 沉积物有机碳、氮污染评价

该地区河流底泥有机指数及有机氮含量见图 5。根据表 2 和图 5 可以看出,河流底泥有机指数范围介于 0.07~3.99,平均 0.98,其中有 55.9%的采样点有机指数处于 IV 级,有机污染严重,与巢湖等污染相似^[30]。从有机氮指标看,底泥变化范围为 0.07%~0.52%,平均 0.24%,其中有 79.4%的采样点有机氮污染达到 IV 级,沉积物氮污染严重,与有机指数一致。这与该地区

大量的生活污水和工业废水的输入有关。

2.3 表层沉积物污染物来源解析

用数据统计软件(SPSS 13.0)对该地区河流沉积物 8 种重金属和 TN、TP 及 OM 的含量分别进行了相关性分析和因子分析,结果显示(图 6),TN、TP 和 OM 与除 Hg 之外的 7 种重金属元素均达到显著或者极显著相关水平(表 4),表明沉积物在受到重金属的污染过程中可能伴随着氮、磷污染;Cu 和 Zn 分别与 As、Cd、Cr、Ni 和 Pb 均达到极显著相关水平,Ni 与 Cr 达到极显著相关水平(0.917, $P<0.01$),表明重金属污染具有一定的同源性,并且 Ni 和 Cr 可能来自同一污染源;Hg 与其他重金属元素均没有达到显著水平。

因子 1 在 As、Cd、Cu、Pb、Zn、TN、TP 和 OM 上载荷较高,结合它们的空间分布特征来看(图 2 和图 3),这些重金属元素和营养盐高值多位于河网区东部和南部,这两部分主要以工厂和居民区为主,工业废水和生活污水直接排放到河流,并且工厂类型繁多,污染物种类来源复杂,以复合污染为主。因子 2 在 Ni 和 Cr 上载荷较高,这两种元素高值均出现在服装厂附近 18 号点,它们的来源可能主要来自服装厂。因子

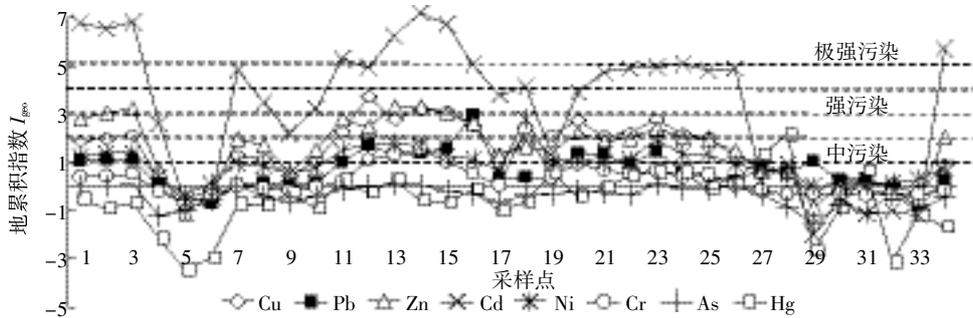


图 4 表层沉积物重金属地累积指数

Figure 4 Index of geoaccumulation of heavy metals in surface sediments

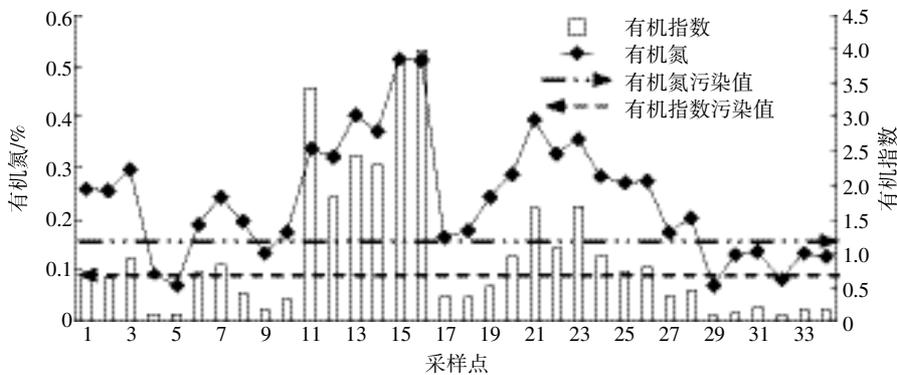


图 5 表层沉积物有机指数和有机氮含量

Figure 5 Organic index and organic nitrogen in surface sediments

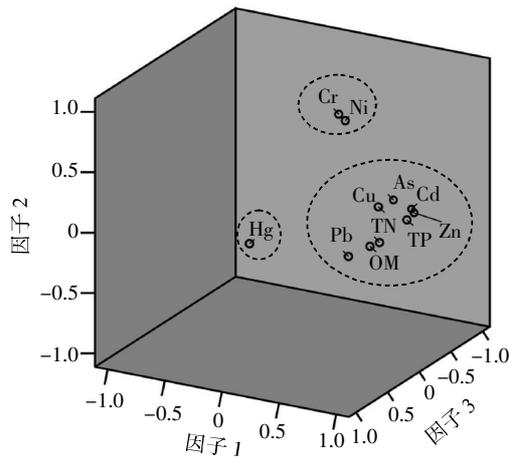


图6 旋转因子空间成分图

Figure 6 Component plot in rotated space

表4 沉积物 TN、TP 及 OM 与重金属之间的相关性

Table 4 Correlation matrix of TN, TP, OM and heavy metals in sediments

	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	As	Hg
Pb	0.583**							
Zn	0.729**	0.524**						
Cd	0.551**	0.335	0.903**					
Ni	0.559**	0.264	0.531**	0.379*				
Cr	0.527**	0.252	0.459**	0.374*	0.917**			
As	0.651**	0.315	0.776**	0.654**	0.562**	0.391*		
Hg	0.055	0.088	-0.029	-0.120	0.057	-0.040	0.050	
TN	0.771**	0.732**	0.769**	0.580**	0.434*	0.391*	0.678**	0.184
TP	0.688**	0.531**	0.944**	0.835**	0.505**	0.390*	0.803**	0.080
OM	0.707**	0.644**	0.688**	0.470**	0.380*	0.312	0.546**	0.106

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

3 在 Hg 上载荷较高, 与其他重金属元素的空间分布差异性较大(图 2), 没有明显的分布规律, 并且绝大多数采样点没有达到污染水平(图 4), 说明 Hg 可能来自岩石的自然风化过程以及地表径流和大气沉降的共同作用^[31]。这与相关性分析的结果一致。

沉积物污染物来源的确定为该地区下一步河流污染防治工作提供了决策依据, 如优化产业布局、强化源头控制, 深化污水处理等。

3 结论

(1) 该地区河网表层沉积物中重金属浓度差异显著, 8 种重金属平均含量大小顺序为 $Zn > Cr > Cu > Ni > Pb > As > Cd > Hg$, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别是江苏省土壤背景值的 1.6、46.9、2.1、5.5、1.9、3.2、2.8、5.9 倍。

(2) 采用地累积指数法评价, 沉积物重金属 Cd 污染程度最强, 其次是 Zn、Pb、Cu、Cr、Ni、Hg 和 As; 将重金属浓度与沉积物质量标准对比发现, Ni、Zn、Hg 和 Cd 发生生物毒性效应的几率非常高。

(3) 多数采样点沉积物氮、磷浓度超过加拿大沉积物质量指南规定的生态毒性效应低值并有部分超过生态毒性效应高值, 氮、磷污染严重。按有机指数和有机氮评价标准, 55.9% 采样点沉积物的有机指数污染级别为 IV 级, 79.4% 采样点沉积物的有机氮污染级别为 IV 级, 表明该地区河流底泥有机碳、氮污染严重。

(4) 采用相关性分析和因子分析对污染物源头进行解析, 重金属及营养盐污染主要来自工业废水和生活污水的排放, 建议通过优化产业布局、强化源头防治和深化污水处理以防控和削减该地区水体重金属危害。

参考文献:

- [1] Singh M, Ansari A A, Muller G, et al. Heavy metals in freshly deposited sediments of the Gomati River (a tributary of the Ganga River): Effects of human activities[J]. *Environmental Geology*, 1997, 29(3-4): 246-252.
- [2] Passos E D, Alves J C, Dos Santos, et al. Assessment of trace metals contamination in estuarine sediments using a sequential extraction technique and principal component analysis[J]. *Microchemical Journal*, 2010, 96(1): 50-57.
- [3] 崔毅, 幸福言, 马绍赛, 等. 乳山湾沉积物重金属污染及其生态危害评价[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 83-90.
CUI Yi, XIN Fu-yan, MA Shao-sai, et al. Pollution of heavy metals in sediments and its evaluation of potential ecological harm in Rushan Bay, Shandong Peninsula[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(1): 83-90.
- [4] Förstner U, Wittmann G T. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Springer, Verlag Berlin, 1979.
- [5] Wang W X, Stupakoff I, Fisher N S. Bioavailability of dissolved and sediment-bound metals to a marine deposit-feeding polychaete[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 178: 281-293.
- [6] 王艳锦, 郑正, 彭晓成, 等. 城镇化进程中的径流污染问题: 以苏南河网地区为例[J]. *环境保护*, 2007(2): 69-71.
WANG Yan-jin, ZHENG Zheng, PENG Xiao-cheng, et al. Runoff pollution problems in urbanization process: River network in southern Jiangsu Province as an example[J]. *Environmental Protection*, 2007(2): 69-71.
- [7] 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, 1999.
LU Ru-kun. Methods of soil and agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [8] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

- ZHANG Gan-lin, GONG Zi-tong. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [9] Long E R, Macdonald D D, Smith S L, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19(1):81-97.
- [10] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3):108-118.
- [11] 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 Gui-rong. Statement and evaluation of organic mater, total nitrogen and total phosphorus in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, 8(4):319-324.
- [12] Ashley R, Lloyd J. An example of the use of factor analysis and cluster analysis groundwater chemistry interpretation[J]. *Journal of Hydrology*, 1978, 39(3-4):355-364.
- [13] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- WEI Fu-sheng, CHEN Jing-sheng, WU Yan-yu. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [14] Wang M, Webber M, Finlayson B, et al. Rural industries and water pollution in China[J]. *Journal Environment Management*, 2008, 86:648-659.
- [15] 赵盈. 苏北平原典型河网区河流底泥污染物赋存特征研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2012.
- ZHAO Ying. Pollutant characteristics of sediment in the northern part of Jiangsu plat plain[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012.
- [16] Yang Z F, Wang Y, Shen Z Y, et al. Distribution and speciation of heavy metals in sediments from the mainstream, tributaries, and lakes of the Yangtze River catchment of Wuhan, China[J]. *Journal of Hazard Materials*, 2009, 166:1186-1194.
- [17] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4):1324-1332.
- WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe Estuary[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4):1324-1332.
- [18] 林春野, 何孟常, 李艳霞, 等. 松花江沉积物金属元素含量、污染及地球化学特征[J]. 环境科学, 2008, 29(8):2123-2130.
- LIN Chun-ye, HE Meng-chang, LI Yan-xia, et al. Contents, contamination and geochemical characteristics of metals in the sediment from Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2123-2130.
- [19] Suthar S, Nema A K, Chabukdhara M, et al. Assessment of metals in water and sediments of Hindon River, India: Impact of industrial and urban discharges[J]. *Journal of Hazard Materials*, 2009, 171:1088-1095.
- [20] Farkas A, Erratico C, Viganò L. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po [J]. *Chemosphere*, 2007, 68:761-768.
- [21] Martin C W. Heavy metal storage in near channel sediments of the Lahn River, Germany[J]. *Geomorphology*, 2004, 61:275-285.
- [22] Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River(Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques[J]. *Journal of Hazard Materials*, 2011, 195:355-364.
- [23] Sheykhi V, Moore F. Evaluation of potentially toxic metals pollution in the sediments of the Kor River, Southwest Iran[J]. *Environment Monitor Assessment*, 2013, 185:3219-3232.
- [24] Huang B, Zhao Y F, Shi X Z, et al. Source identification and spatial variability of nitrogen, phosphorus, and selected heavy metals in surface water and sediment in the riverine systems of a periurban interface [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2007, 42(3):371-380.
- [25] Varol M, Sen B. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey[J]. *Catena*, 2012, 92:1-10.
- [26] 郑金通, 郑小明, 陈文庆, 等. 福建莆田市外度水库底泥中营养盐的分析及评价[J]. 资源调查与环境, 2013, 34(1):58-62.
- ZHENG Jin-tong, ZHENG Xiao-ming, CHEN Wen-qing, et al. Analysis and evaluation of nutrients in the bed mud of Waidu Reservoir, Putian City, Fujian Province[J]. *Resources Survey & Environment*, 2013, 34(1):58-62.
- [27] 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 Xiao-jing, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Distribution analysis of nutrient salt in the sediment of lake Wulangsuhai with respect to its effects on the environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1770-1776.
- [28] Mudroch A, Azcue J. Manual of aquatic sediment sampling[M]. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1995.
- [29] Niu H Y, Deng W J, Wu Q H, et al. Potential toxic risk of heavy metals from sediment of the Pearl River in South China[J]. *Journal Environ Science China*, 2009, 21:1053-1058.
- [30] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6):22-26.
- WANG Yong-hua, QIAN Shao-meng, XU Nan-ni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(6):22-26.
- [31] 王文华, 刘俊华, 彭安. 降水引起的地表径流中汞来源的研究[J]. 农业环境保护, 2001, 20(5):297-301.
- WANG Wen-hua, LIU Jun-hua, PENG An. Mercury origin in surface runoff caused by precipitation[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(5):297-301.