郑洁,戴雪荣,师育新,等.浙江姚江平原特大洪水滞留沉积物中重金属特征及磁诊断探讨[J].农业环境科学学报,2016,35(2):364-371.

ZHENG Jie, DAI Xue-rong, SHI Yu-xin, et al. Characteristics and magnetic diagnosis of heavy metals in deposits by flooding slackwater in the Yaojiang River Valley, Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):364–371.

浙江姚江平原特大洪水滞留沉积物中 重金属特征及磁诊断探讨

郑 洁,戴雪荣*,师育新,吴紫阳,席雅娟

(华东师范大学地理科学学院,上海 200241)

摘 要:为探讨洪水滞留沉积物中重金属元素的含量、分布特征及其污染磁诊断有效性,以浙江姚江现代特大洪水滞留沉积物为例,洪水退去后及时沿平原段河岸自上游入城段到下游出城段系统采集 24 件表层沉积物样,开展了重金属元素实验分析和磁性参数测量。结果表明,8 种重金属元素 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni、Mn 和 Fe 平均含量分别为 175.23、400.74、145.32、0.83、43.71、32.12、564.35 mg · kg · l 和 4.37%,除 Fe 不与当地河流底泥沉积物重金属背景值进行比较外,其余各元素均不同程度超背景值,其中 Cu、Cd 和 Zn 最严重,分别是背景值的 10.88、6.75、6.32 倍;重金属元素含量沿入城段—城区段—出城段呈递增趋势,在城区汊流段含量最高接近严重污染,指示了重金属元素受城市工业化的深刻影响。上述重金属元素含量的空间变化在沉积物磁性参数上也有良好体现,其中频率磁化率(χ_{ii})和饱和等温剩磁的矫顽参数(S_{-l00ml})与 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 含量具有显著正相关关系,表明磁学方法同样可用来指示洪水滞留沉积物的重金属污染,但洪水期间复杂的沉积环境以及人类污染物质输移等因素影响,增加了利用磁学手段定量诊断重金属污染的复杂性。

关键词:重金属;磁性参数;洪水;滞留沉积物;姚江

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)02-0364-08 doi:10.11654/jaes.2016.02.022

Characteristics and magnetic diagnosis of heavy metals in deposits by flooding slackwater in the Yaojiang River Valley, Zhejiang Province, China

ZHENG Jie, DAI Xue-rong*, SHI Yu-xin, WU Zi-yang, XI Ya-juan

(School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract: Floodwater often leaves lots of soil in the lower area when it recedes. It is of significance to reveal the content, spatial distribution of heavy metals in the flood slack water deposits (SWD). Twenty-four deposits by an extra-ordinary floodwater were collected from the upper to the lower reach of the Yaojiang River in Yuyao city, Zhejiang province. The feasibility of magnetic diagnosis for heavy metal pollution was explored. Results indicated that the average content of Cu, Zn, Cr, Cd, Pb, Ni, Mn, and Fe in the SWD was 175.23, 400.74, 145.32, 0.83, 43.71, 32.12, 564.35 mg·kg⁻¹ and 4.37%, respectively, all higher than the local background values (Fe not considered pollutant here). Copper was the most serious pollutant with 10.88 times the background value, followed by Cd and Zn, which were 6.75 and 6.32 times the background values, respectively. In spatial distribution, heavy metals displayed increasing trend from the upper to the lower reach, with the highest values occurring in the tributaries flowing through the urban areas, implying industrial impact. The spatial distribution of heavy metals was also reflected in magnetic properties of the deposits. Frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{td}) and S_{-100mT} displayed significant positive correlations with content of Cu, Zn, Cr, Cd, Ni and Pb. It suggested that magnetic parameters might be used as an indicator of heavy metal pollution in flood SWD. However, due to the complicated hydrodynamic environment and pollutant transfer during flood events, it is necessary to further study the use of magnetic properties as quantitative indicators of heavy metal pollution.

Keywords: heavy metal; magnetic parameters; flood; slack water deposits; Yaojiang River

收稿日期:2015-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41071134)

作者简介: 郑 洁(1991—),女,山西大同人,硕士研究生,主要研究地貌与环境。 E-mail: Jiezheng 2013 1027 @gmail.com

*通信作者:戴雪荣 E-mail:xrdai@geo.ecnu.edu.cn

2013年10月7日"菲特"台风登陆我国大陆。受 其影响,位于浙江东北部的甬江-姚江流域发生了超 历史最高水位的流域性大洪水,姚江多处水位站如余 姚、丈亭最高水位重现期达 100 年11,给余姚市造成巨 大经济损失。同时,洪水挟带的大量泥沙在高水位滞 留环境下沉积,形成典型洪水滞留沉积物[2-3]。随着城 市化和工业化进程的加快,工业生产、交通运输和大 气沉降使沉积物中包含越来越多的重金属門。重金属 污染具有强累积性、生物毒性和不可逆性等特点,对 生态系统以及人体健康构成严重的潜在威胁。目前, 河流沉积物中重金属的研究受到国内外广泛关注,研 究范畴主要包括:重金属的总量和分布特征[5-7],重金 属的质量控制基准和背景值图,重金属污染评价[9-10]以 及重金属污染的磁诊断[11-13]等。但这些研究中,样品采 集都是在河流水位平常年份进行的,对于2013年由 台风造成的特大洪水滞留沉积物中重金属元素的研 究,尚未有成果发表。国内外学者已揭示磁性参数可 以表征重金属污染[11-16],但研究对象主要集中在某些 环境系统中,如现代湖泊、河流及潮滩沉积物[11-12],交 通道路土壤和城市表土[13-15],大气悬浮物及降尘[16]等, 对现代特大洪水沉积物的磁学诊断研究较为薄弱。 本文在前人研究的基础上,进一步探讨特大洪水期 间滞留沉积物中重金属元素的空间分布特征, 并结 合沉积物的磁学特征对其进行磁诊断讨论, 既是一 次有益的探索,也将进一步充实这方面研究成果。

姚江作为甬江的一条主要支流,两岸人口居住密 度大且工农业生产发展迅猛,城市交通与工业生产污 染日益严重。洪水期间,洪峰水位高达 5.33 m(吴淞高 程,下同),持续超过警戒线 3.77 m,由于干支流排水

不畅,余姚市区近七成被淹。探讨这一特大洪水期间 滞留沉积物中重金属特征,将对姚江乃至甬江流域水 环境综合评价和生态功能的恢复提供理论依据,同时 对保护人体健康具有现实意义。

材料与方法

1.1 研究区概况

姚江年径流量 15.6×108 m3, 流域总面积 2440 km², 干流长 106 km, 起源于四明山脉, 沿途主要经过 余姚市和宁波市的江北区和海曙区,纳入甬江后出海 (图 1)。流域属亚热带季风气候,年均降水量达 1500 mm,降水季节差异明显,洪涝灾害频繁。姚江自西向 东穿过余姚市区,并在中心城区分为姚江干流、南汊 流的兰墅江和北汊流的候青江三段,随后又合并,经 蜀山闸向东出余姚市。姚江集生活饮用、农田灌溉、 水利泄洪、交通运输、渔业养殖、观光旅游、纳污沉降 等功能于一体,受人类活动影响强烈。近年来,沿江 两岸人口和工业规模发展迅猛,2014年余姚市第二 产业增值 467.55 亿元,占地区总产值 57.9%,其中电 器机械和器材制造业居各行业之首(余姚市统计 局),工业废水以及工业烟尘和汽车尾气排放量日益 增加,造成姚江水体及周边环境严重污染。

1.2 样品采集与处理

2013 年 10 月 13 日,根据姚江洪水消退情况,在 堆有新鲜滞留洪水沉积物的近岸地区采集具有代表 性的样品 24 件,分别为入城段 5 件(样品编号 1~5), 城区干流6件(样品编号6~11),城区汊流5件(南汊 流样品编号 12~14,北汊流样品编号 15~16),出城段 8件(样品编号17~24),采样点位置见图1。根据研究

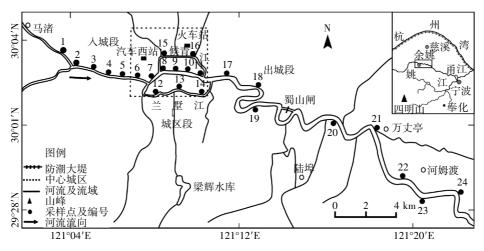


图 1 研究区及样点分布图

Figure 1 Map for study area and sampling sites

需要,清理采样点表层杂物,选取一处质地均匀的新 鲜浅灰色洪水沉积物加以采集。用于本项实验的样品 经低于 40 ℃环境下烘干后碾压分散,装袋备用。

1.3 样品分析与测定

1.3.1 重金属总量

采用电热板湿法进行预处理,称取研磨后过200 目筛的样品 0.1 g 左右, 经硝酸-氢氟酸-高氯酸高温 消解样品后用2%硝酸定容。采用原子吸收光谱仪 (AANALYST80, Perkin-Elmer)测定重金属元素 Cu、 Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、Fe 和 Mn 的总量, 其中 Cu、Zn、Fe、 Mn 和 Cr 用火焰原子吸收分光光度法检测,Cd、Ni 和 Pb 用石墨炉分光光度法检测。实验过程中使用 GBW07310(GSD-10)作为沉积物的质量控制,各元素 测定回收率在 90.4%~107.2%之间, 且在实验中做 3 个空白检测和3组平行。

1.3.2 磁性测量

采用常规磁测方法测量,称取5g左右样品用保 鲜膜包裹后置于 10 mL 圆柱状聚乙烯样品盒中,压 实、固定后进行测量。分别选用英国 Bartington MS2 磁化率仪和英国 Molspin 公司生产的交变退磁仪、脉 冲磁化仪和旋转磁力仪,具体步骤为:①低频和高频 弱磁场中的磁化率;②交变磁场峰值为100 mT,直流 磁场为 0.04 mT 的非滞后剩磁; ③样品经强度为 300 mT 的磁场磁化后所带的剩磁; ④磁场强变为 1 T 的 饱和等温剩磁。根据测量结果,计算出单位质量磁化 率(X_{II})、饱和等温剩磁(SIRM)、硬剩磁(HIRM)、非滞 后剩磁(x_{ARM})及其他比值参数,如磁化率频率系数 (Xfd)、XARM/X、XARM/SIRM、S-100mT 等。具体计算方法、单位 参考 Oldfield 等[17]的研究。

1.4 污染评价与方法

利用地质累积指数(Igo)法对研究区沉积物污染 现状进行评价,选用浙江土壤地球化学基准统计参数 中河流相背景值作为评价方法的参比值, 其中 Fe 没 有总量背景值在此不予讨论也不进行污染评价,Cu、 Zn、Cr、Cd、Ni、Pb、Mn 背景值分别为 16.1、63.4、42.4、 $0.123\14.3\28.4\491\ mg \cdot kg^{-1[18]}$

Iso 是德国 Muller[19]提出的一种研究水环境沉积 物重金属污染的定量指标,其计算公式为:

 $I_{\text{geo}} = \log_2[C_i/(K \times B_i)]$

式中: C_i 为沉积物中重金属 i 实测浓度值, $mg \cdot kg^{-1}$; B_i 为重金属 i 参比值, mg·kg⁻¹; K 为修正系数, 一般取 1.5。

该法充分考虑到环境重金属污染因子、环境重金 属背景值以及导致背景值变化的地球化学作用,在沉 积物重金属污染评价领域被广泛采用,Förstner等[20] 将其分为7个等级,评价标准见表1。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征

姚江洪水滞留沉积物中8种重金属元素的全量 分析(表2)显示,不同河段上重金属含量存在一定差 异,尤其在城区汊流处,表现出明显的增高趋势。其 中: Cu 最大值 827.74 mg·kg⁻¹, 最小值 59.42 mg·kg⁻¹, 平均值 175.23 mg·kg-1, 是背景值的 10.88 倍, 变异系

表 1 地质累积指数(Igo)污染等级

Table 1 Pollution degrees of geo-accumulation index

污染程度	无	无-中度	中度	中度-严重	严重	严重-极严重	极严重
级别	0	1	2	3	4	5	6
$I_{ m geo}$	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5

表 2 样品重金属含量

Table 2 Content of heavy metals in deposit samples

重金属	范围	均值	变异系数(无量钢)	入城段均值	城区干流均值	城区汊流均值	出城段均值	背景值
Cu/mg·kg ⁻¹	59.42~827.74	175.23	0.86	139.73	127.66	296.08	157.54	16.1
$Zn/mg \cdot kg^{-1}$	187.98~1 193.34	400.74	0.51	318.90	315.14	629.24	373.01	63.4
$Cr/mg \cdot kg^{-1}$	80.23~450.33	145.32	0.51	122.27	109.58	224.11	137.21	42.4
$Cd/mg \cdot kg^{-1}$	0.24~4.93	0.83	1.20	0.29	0.41	1.96	0.79	0.123
$Pb/mg \cdot kg^{-1}$	25.73~106.12	43.71	0.40	39.80	32.71	70.88	37.45	28.4
$Ni/mg \cdot kg^{-1}$	14.52~71.14	32.12	0.49	25.77	31.72	42.32	30.22	14.3
$Mn/mg \cdot kg^{-1}$	485.32~685.98	564.35	0.11	582.90	590.72	554.31	539.25	491.0
Fe/%	3.48~5.05	4.37	0.12	4.44	4.61	4.16	4.28	_

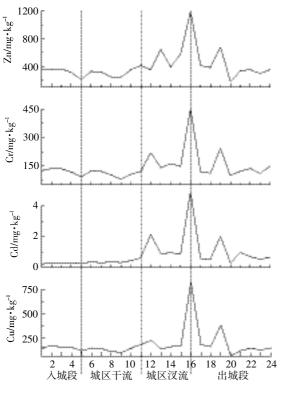
数为 0.86, 属强变异, 可见研究区 Cu 已经受到人类 活动强烈影响。Cd 最大值为 4.93 mg·kg⁻¹,最小值 0.24 mg·kg⁻¹, 平均值 0.83 mg·kg⁻¹, 是背景值的 6.75 倍,变异系数达 1.20,为各种元素中最大值,反映研究 区 Cd 受到人类活动强烈影响。Zn 最大值 1 193.34 mg·kg⁻¹, 最小值 187.98 mg·kg⁻¹, 平均值 400.74 mg· kg-1,是背景值的 6.32 倍,说明研究区 Zn 也受到人类 活动影响。Cr 最大值 450.33 mg·kg⁻¹, 最小值 80.23 mg·kg-1,平均值 145.32 mg·kg-1,是背景值 3.43 倍,说 明研究区 Cr 受人类活动影响较小。Pb 最大值 106.12 mg·kg⁻¹,最小值 25.73 mg·kg⁻¹,平均值 43.71 mg·kg⁻¹, 是背景值的 1.54 倍。Ni 最大值 71.14 mg·kg-1,最小值 14.52 mg·kg⁻¹,平均值 32.12 mg·kg⁻¹,是背景值的 2.25 倍。Mn 最大值 685.98 mg·kg⁻¹,最小值 485.32 mg·kg⁻¹, 平均值 564.35 mg·kg⁻¹, 是背景值的 1.15 倍, 变异系 数为 0.11, 说明研究区 Mn 受人类活动影响不强烈。 Fe 最大值 5.05%, 最小值 3.48%, 平均值 4.37%, 变异 系数为 0.12, 空间分布较为均匀。

从所有样点重金属元素超背景值比例来看,5种 重金属元素 Cu、Cd、Zn、Cr、Ni 都 100%超背景值,有 95.83%的样点 Pb 超背景值,有 91.67%的样点 Mn 超 背景值,表明沉积物中重金属呈复合累积。Zn、Cr、Pb 和 Ni 的变异系数较为相近,均在 0.5 左右,结合不同 河段上此4种元素含量平均值可以看出,入城段、城 区干流以及出城段上含量较为相近,而城区汊流上的 含量明显高出其他河段。这可能是导致其含量整体存 在差异性的主要原因,也表明城区汊流存在增强此类 重金属元素的人类活动或者地表物质。

相关研究表明,河流底泥是重要的重金属污染 源[21],在还原环境中,硫化物会加强重金属在沉积物 中的沉积和固定[2]。姚江清淤工作滞后,底泥淤积严 重,暴雨后泄洪排水过程中,水中溶解氧下降且水体 交换量大,可能使大量含重金属污染物的底泥掀起, 形成"新鲜"沉积物,从而加重洪水滞留沉积物中重金 属累积程度。同时,城市雨水径流对河流污染的贡献 率极高[23],洪水期间,大气沉降、工业区排放的粉尘、 道路交通造成的扬尘和汽车尾气等地表污染颗粒物 受到台风暴雨冲刷,在地表迁移,使洪水沉积物中重 金属元素复合累积明显。

2.2 重金属空间分布特征

由图 2 可知,Cu、Cd、Cr、Zn 和 Pb 表现出较为相 近的空间变化特征,即入城段和城区干流含量变化较 为稳定且相对较低,在城区汊流处含量显著增加且高 于其他河段,出城后变幅较大存在个别高值点。Ni 与



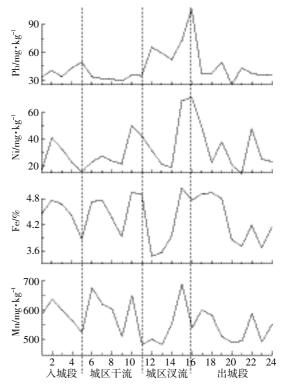


图 2 样品重金属含量的空间变化

Figure 2 Spatial variation of heavy metals in deposit samples

Fe 和 Mn 的变化规律较为相似,呈多峰值分布的特点,其中南汊流处含量明显下降,与其他元素分布特征显著不同。以上结果说明,重金属 Cu、Cd、Cr、Zn 以及 Pb 可能存在相似的污染源,而 Ni、Fe、Mn 则与其他 5 种元素有所不同,可能受多种因素影响。

有研究表明,重金属污染主要在工业区和交通繁 忙区较严重,而居民区污染较轻[4];汽车尾气颗粒物 中含有较高的 Ni 和 Pb, 而 Zn 是汽车轮胎硬度添加 剂,汽车轮胎磨损会产生含 Zn 粉尘[5]。铁路和公路两 旁的沉积物中重金属含量能反映交通污染状况,研究 区沉积物中 15 号样点靠近汽车西站,交通几近饱和, 汽车怠速状态久,Zn含量为572.7 mg·kg-1,Pb含量为 72.3 mg·kg⁻¹, Ni 含量为 68.8 mg·kg⁻¹; 16 号样点靠近 余姚火车站,Zn 含量为 1 193.3 mg·kg⁻¹,Pb 含量为 106.3 mg·kg⁻¹, Ni 含量为 71.1 mg·kg⁻¹, 分别为所有样 点中各重金属的最大值。此外,机械材料、塑料和建筑 材料以及涂料中各重金属也含有较多高浓度重金属, 南汊流附近以及出城段分布一些机械电机企业和塑 料厂以及医院卫生站等,造成 Cu、Zn、Cr、Cd 和 Pb 在 13、14、19号样点处显著富集。城区干流处主要分布 一些住宅区、Cu、Zn、Cr、Cd和Pb含量普遍较低,但是 Ni、Fe、Mn 含量较高,可能与城市居民所产生的生活 垃圾有关。不同河段重金属累积分异与姚江沿岸不同 工业类型、发达程度以及交通和城镇化水平有关。

2.3 重金属污染评价

由表 3 可知,研究区受到多种重金属元素复合污染,其中 Cu、Zn 污染最为严重,其次为 Cd 和 Cr。地质累积指数评价结果显示,Cu 在多数地区达中度-严重污染,城区汊流达中度-严重污染;Zn 基本为中度污染,城区汊流达中度-严重污染;Cr 和 Cd 在人城段与城区干流属无-中度污染,Cd 在城区汊流为中度-严重污染,Cr 在城区汊流和出城段均为中度污染;Pb 除了城区汊流为无-中度污染外整体清洁;Ni 基本属无-中度污染。该评价结果与重金属含量分布特征一致,表明姚江洪水沉积物中重金属污染程度高、范围广。洪水期间,姚江多条支流及干流来水量大,泥沙含量也

表 3 样品地质累积指数 I_{sco}

Table 3 Geo-accumulation index (I_{em}) of deposit samples

采样区	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb	Ni
人城段	2.52	1.72	0.93	0.51	-0.11	0.16
城区干流	2.37	1.70	0.77	0.99	-0.38	0.47
城区汊流	3.33	2.58	1.67	2.92	0.69	0.75
出城段	2.52	1.89	1.06	1.79	-0.21	0.38

大,可能导致表层沉积物重金属含量得到稀释,洪水沉积物的重金属含量可能是面污染最低值,但就整个姚江而言,重金属总量会增加,应引起高度关注。

2.4 重金属污染的磁学诊断

对比沉积物样品磁性参数沿程分布特征(图 3)和 重金属含量沿程分布特征(图 2),发现某些磁参量与 重金属元素之间存在相似的变化趋势,如:χ_{ABM} 与Zn、 Pb; χ_{ARM} /SIRM 与 Fe、Mn; S_{-100mT} 和 χ_{fd} 与 Cu、Zn、Cr、 Pb、Ni。其中χ_{ARM} 是磁性矿物单畴(SD)颗粒,尤其是 稳定单畴(SSD)颗粒的敏感指标;比值参数XARMX和 χ_{ARM} /SIRM 可指示亚铁磁性矿物颗粒大小,前者比值 越高则 SSD 颗粒越多, 比值越低则显示较多的多畴 (MD)颗粒和超顺磁(SP)颗粒,后者与前者类似但不 受 SP 颗粒影响,比值越低则 MD 颗粒越多^[26]。 $\chi_{\rm ff}$ 和 SIRM 可以指示亚铁磁性矿物的含量;HIRM 反应不 完整反铁磁性矿物含量。 S_{-100mT} 和 S_{-300mT} 是剩磁与饱和 等温剩磁的比值,反应亚铁磁性矿物与不完整反铁磁 性矿物的组成比例,磁性随不完整反铁磁性矿物贡献 而下降,当 S_{-100mT} 大于70%时,说明磁性由亚铁磁性 矿物主导^[11]。χ_{ti} 常被用于鉴别沉积物中磁性矿物的粒 径和来源,反映 SP 颗粒对磁化率的贡献。

相关性分析结果(表 4)表明: S_{-100mT} 和 χ_{fd} 与 Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni 含量以及污染指数呈显著正相关,反映此 6 种重金属元素可能与沉积物中部分亚铁磁性矿物有相同的来源;HIRM 与 Ni 相关性较高,说明洪水沉积物中 Ni 可能与不完整反铁磁性矿有共生性; χ_{ARM} 与 Zn、Pb 显著正相关,表明细晶粒亚铁磁性矿物洪水沉积物中,富集较多的 Zn 和 Pb; $\chi_{ARM}/SIRM$ 与 Fe、Mn 的相关性较高,表明 Fe、Mn 含量与亚铁磁性矿物存在同源性或者有相似的地球化学循环过程。以上结果表明,磁性特征对重金属含量及污染具有指示作用,可用来诊断洪水沉积物重金属污染。

有研究表明,沉积物中氧化铁与重金属元素关系密切,能够吸附重金属并与其发生共沉淀或结合现象¹¹¹。细晶粒亚铁磁性矿物是氧化铁的一种,具有巨大比表面积能强烈吸附重金属元素。χ₁₆通常是成土过程中形成的,主要在细颗粒沉积物中富集。本研究 χ₁₆与重金属元素存在正相关性,与张卫国等¹¹¹在长江口潮滩沉积物重金属磁诊断的研究一致,表明细晶粒磁性矿物对重金属具有吸附性,或二者共存于细颗粒沉积物中。同时,χ₁₆与重金属元素相关性不显著的样点主要分布在城区汊流以及出城段上,这些样点 I₈₀ 较高,说明受人为污染严重。通过野外调查发现,姚江城

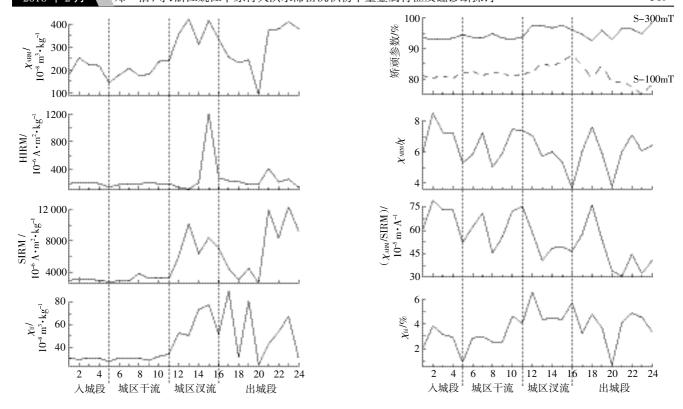


图 3 样品磁性特征的空间变化

Figure 3 Spatial variation of magnetic properties in deposit samples

表 4 样品磁性参数与重金属含量的相关性

Table 4 Correlation between magnetic susceptibility and heavy metal content in deposit samples

重金属	$\chi_{ m lf}$	$\chi_{ m fd}$	$\chi_{ m ARM}$	HIRM	SIRM	$\chi_{ m ARM} \chi$	$\chi_{ ext{ARM}}/ ext{SIRM}$	$S_{-100\mathrm{mT}}$	SIRM/x
Cu	0.28	0.43b	0.20	0.03	0.09	-0.35	-0.03	0.54a	-0.32
Zn	0.22	0.51b	0.41b	0.21	0.27	-0.35	-0.10	0.64a	-0.22
Cr	0.24	0.52a	0.32	0.05	0.20	-0.36	-0.13	0.52a	-0.21
Cd	0.28	0.57a	0.36	0.06	0.28	-0.41b	-0.22	0.49a	-0.13
Pb	0.26	0.56a	$0.49 \mathrm{b}$	0.35	0.34	-0.38	-0.19	0.62a	-0.16
Ni	0.07	0.48a	0.32	0.51b	0.08	-0.06	0.14	0.48b	-0.29
Fe	-0.21	0.03	-0.25	0.29	-0.48b	0.25	0.64a	0.37	-0.61a
Mn	-0.32	-0.03	-0.13	0.39	-0.32	0.26	0.45b	0.21	-0.38
PI	0.26	0.52a	0.32	0.10	0.20	-0.38	-0.11	0.56a	-0.24

注:a 和 b 别分别表示 P≤0.01 和 P≤0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: "a" and "b" indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 level (2-tailed), respectively.

区汊流商业发达,汽车、火车交通繁忙,而出城段机械、电子、量具配制厂较多,汽车尾气排放以及燃料燃烧等会产生大量较粗磁性颗粒物质,落入沉积物中会导致重金属污染,且伴随 S_{-100mT} 增加,说明 S_{-100mT} 对重金属含量能作出较好的响应。

此外,在受人类活动影响的环境中, χ_i 和 SIRM 通常能够较好地指示重金属污染状况^[27], 但本研究区 此两种磁参量与各元素以及污染指数均不存在相关

性,说明重金属污染与沉积物磁性的增强不是简单的 线性关系。洪水期间,沉积物中磁性矿物和污染物质 来源复杂,加上大量有机污染物质汇入姚江,水体溶 解氧下降,排水不畅导致沉积物长期滞留,复杂的沉 积作用造成影响重金属、磁性矿物等的因素纷繁复 杂。因此,利用磁性特征指示洪水沉积物重金属污染, 需充分考虑沉积环境的复杂性和人类活动对沉积物 磁性特征和重金属污染的影响,并加强磁性特征对污 染指示的机制研究。

3 结论

- (1)姚江洪水滞留沉积物中8种重金属元素Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni、Mn和Fe,除不考虑Fe外,其余各元素依次是当地河流底泥沉积物重金属元素背景值的10.88、6.32、3.43、6.75、1.54、2.25、1.15倍,所有样点中Cu、Cd、Zn、Cr和Ni均100%超背景值,有95.83%样点中Pb超背景值,有91.67%样点中Mn超背景值,重金属复合累积显著。
- (2)姚江洪水滞留沉积物中重金属元素含量沿入城段-城区段-出城段呈现增加趋势,城区段汊流处含量最大。重金属污染程度高、范围广,Cu和Zn污染最严重,不同河段重金属污染累积状况与姚江两岸工业类型、发达程度以及城市交通等有关。
- (3)姚江洪水滞留沉积物部分磁性特征与重金属空间变化存在相似性,磁学方法可以定性诊断洪水沉积物重金属污染,但洪水期间复杂的沉积作用、人类活动等诸多因素,增加了重金属污染磁诊断的复杂性。

致谢:沈铭能高级实验师指导完成重金属实验测定,河口海岸学国家重点实验室张卫国研究员给予磁测相关指导。

参考文献:

- [1] 王 颖, 许 洁, 赵立锋. 甬江流域"菲特"台风暴雨洪水分析[J]. 中国防汛抗旱, 2015(1):57-61.
 - WANG Ying, XU Jie, ZHAO Li-feng. Analysis of rain-storm flood induced by typhoon "Fitow" in Yongjiang Basin[J]. Flood Management and Emergency Response, 2015(1):57-61.
- [2] Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. Extraordinary hydro-climatic events during the period AD 200–300 recorded by slackwater deposits in the upper Hanjiang River valley, China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2013, 374(433):274–283.
- [3] Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. Sedimentary records of extraordinary floods at the ending of the mid-Holocene climatic optimum along the Upper Weihe River, China[J]. Holocene, 2012, 22(6):675-686.
- [4] 谢文平, 王少冰, 朱新平, 等. 珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1808-1815.
 - XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, et al. Residues and potential ecological risk assessment of metal in sediments from lower reaches and estuary of Pearl River[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(6):1808–1815.
- [5] 何 江, 王新伟, 李朝生, 等. 黄河包头段水-沉积物系统中重金属的污染特征[J]. 环境科学学报, 2003, 23:53-57.
 - HE Jiang, WANG Xin-wei, LI Chao-sheng, et al. Pollution Character of

- heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23:53-57.
- [6] 张朝生, 章 申, 何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法[J]. 地理学报, 1997, 52(2):184–192. ZHANG Chao-sheng, ZHANG Shen, HE Jian-bang. Spatial distribution of characteristics of heavy metals in the sediment of Changjiang River system: Geostatistics method[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52 (2):184–192.
- [7] Dar M A. Distribution patterns of some heavy metals in the surface sediment fractions at northern Safaga Bay, Red Sea, Egypt[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(1):55–67.
- [8] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 河流沉积物重金属污染质量控制基准的研究 II. 相平衡分配方法(EqP)[J]. 环境科学学报, 1999, 19(3):230-235.
 - LIU Wen-xin, LUAN Zhao-kun, TANG Hong-xiao. Sediment quality criteria for heavy metal pollution in the Lean River II. Equilibrium partitioning approach [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3): 230–235.
- [9] Krishnakumar P, Lakshumanan C, Jonathan M P, et al. Trace metal in beach sediments of Velanganni Coast, South India; Application of autoclave leach method[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 7(7):1– 11.
- [10] 许桂苹, 王晓飞, 付 洁. 土壤重金属污染评价方法研究综述[J]. 农村经济与科技, 2014(1):71-74.

 XU Gui-ping, WANG Xiao-fei, FU Jie. Summary of evaluation method of soil heavy metal pollution[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2014(1):71-74.
- [11] 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法[J]. 海洋与湖沼, 2000,31(6):616-623.

 ZHANG Wei-guo, YU Li-zhong, Hutchinson S M. Magnetic diagnosis of heavy metal pollution record in coastal sediments on the southern bank of the Changjiang River Estuary[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2000, 31(6):616-623.
- [12] Chen Y D, Zhang W G, Ma H L, et al. A magnetic record of heavy metal pollution in the Yangtze River subaqueous delta[J]. Science of the Total Environment, 2014, 476–477; 368–377.
- [13] 陈秀端, 卢新卫, 杨 光. 城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3):1086–1093.

 CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang. Correlativity study of the distribution of soil magnetic susceptibility and the heavy metal contents in Xi'an City [J]. Environmental Science, 2013, 34 (3):1086–1093.
- [14] Wang X S. Magnetic properties and heavy metal pollution of soils in the vicinity of a cement plant, Xuzhou (China) [J]. *Journal of Applied Geo*physics, 2013, 98:73–78.
- [15] 王 博, 夏敦胜, 余 晔, 等. 兰州城市表层土壤重金属污染的环境 磁学记录[J]. 科学通报, 2012, 57(32):3078-3089.

 WANG Bo, XIA Dun-sheng, YU Ye, et al. Magnetic record of heavy metal pollution in the surface soil of Lanzhou[J]. Science Bulletin, 2012, 57(32):3078-3089.
- [16] Qiao Q Q, Huang B C, Zhuang Chun-xia, et al. Assessment of heavy

- metal contamination of dustfall in Northern China from integrated chemical and magnetic investigation[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74:182–193.
- [17] Oldfield F. Environmental magnetism: A personal perspective[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(1):73–85.
- [18] 汪庆华, 董岩翔, 周国华, 等. 浙江省土壤地球化学基准值与环境背景值[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2):81-88. WANG Qing-hua, DONG Yan-xiang, ZHOU Guo-hua, et al. Soil geochemical baseline and environmental background values of agricultural regions in Zhejiang Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(2):81-88.
- [19] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3):108–118.
- [20] Förstner U, Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development: Contributions from environmental geochemistry to water quality management[M]//Heling D, Rothe P, Förstner U, et al. Sediments and environmental geochemistry: Selected aspects and case histories. Berlin: Springer-verlag, 1990: 311–338.
- [21] 宋宪强, 雷恒毅, 余光伟, 等. 重污染感潮河道底泥重金属污染评价及释放规律研究[J]. 环境科学学报, 2008, 28;2258-2268. SONG Xian-qiang, LEI Heng-yi, YU Guang-wei, et al. Evaluation of heavy metal pollution and release from sediment in a heavily polluted tidal river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28;2258-2268.
- [22]任 平, 王小庆. 沉积物中重金属元素的来源及其含量的影响因素[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2005(3):16-17.
 REN Ping, WANG Xiao-qing. The source of the heavy metal in the

- sediment and the factors effecting its content[J]. *Journal of Luoyang Institute of Science and Technology*, 2005(3):16–17.
- [23] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. *Journal of Environmental Engineer*ing, 1998, 124(9):869–879.
- [24] 段雪梅, 蔡焕兴, 巢文军. 南京市表层土壤重金属污染特征及污染来源[J]. 环境科学与管理, 2010, 35:31-34.

 DUAN Xue-mei, CAI Huan-xing, CAO Wen-jun. Study on the characteristics and the origin of heavy metal pollution in different functional regions of Nanjing[J]. Environmental Science and Management,
- [25] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. 中国公共卫生, 2001, 17:623-624.

2010, 35:31-34.

- ZHANG Zhi-hong, YANG Wen-min. Analysis on chemical components in particulates of gasoline-fueled engine exhaust[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2001, 17:623–624.
- [26] Xia D S, Wang B, Yu Y, et al. Combination of magnetic parameters and heavy metals to discriminate soil-contamination sources in Yinchuan: A typical oasis city of Northwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485-486(3):83-92.
- [27]董 艳, 张卫国, 钱 鵬, 等. 南通市任港河底泥重金属污染的磁学 诊断[J]. 环境科学学报, 2012, 32(3):696-705.
 - DONG Yan, ZHANG Wei-guo, QIAN Peng, et al. Magnetic analysis of heavy metal pollution in Rengang River sediments, Nantong, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(3):696–705.