

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.003

长江镇扬河段不同时期河漫滩沉积物磁化率及其环境污染指示意义

王鑫¹,刘存丽¹,张振克¹,任航¹,何海涛²

(1. 南京大学地理与海洋科学学院,江苏 南京 210023; 2. 镇江市长江河道管理处,江苏 镇江 212003)

摘要:为探讨河漫滩沉积物磁化率对环境污染的指示,采用重力浅钻法采集了长江下游镇江—扬州河段3个100 cm的河漫滩沉积岩芯,对岩芯沉积物进行质量磁化率和微量元素的测定。研究发现:老河漫滩沉积柱SY7的磁化率在 $12.11\times10^{-8}\sim30.60\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$ 之间,平均值为 $20.79\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$;现代河漫滩沉积柱SY5和Z2的磁化率明显较高,是老的江心洲河漫滩沉积物磁化率的5~6倍,SY5的平均值最高,为 $123.20\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$ 。通过对研究区河漫滩沉积物重金属元素污染与长江流域水系沉积物背景值的对比研究发现,Cu、Ni、Cr的污染比较严重,新生成河漫滩明显比老河漫滩污染严重。简便、快速测定的磁化率分析可以作为河漫滩沉积物重金属污染诊断的重要手段之一。

关键词:河漫滩沉积物;岩芯;环境污染;磁化率;重金属污染;长江下游镇江—扬州河段

中图分类号:P343;X522 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)06-0499-08

Magnetic susceptibility of river floodplain sediments at Zhenjiang-Yangzhou reach of the Yangtze River and its significance as environmental pollution indicator

WANG Xin¹, LIU Cunli¹, ZHANG Zhenke¹, REN Hang¹, HE Haitao²

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Yangtze River Channel Administrative Bureau of Zhenjiang City, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In order to reveal the indicating significance of magnetic susceptibility of river floodplain sediments, the magnetic susceptibility has been determined by using 3 river floodplain sediment cores of 100 cm at the lower reaches of the Yangtze River between Zhenjiang and Yangzhou. It can be found that: the magnetic susceptibility of old river floodplain sediment core SY7 ranges from $12.11\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$ to $30.60\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, for the average in $20.79\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$; the magnetic susceptibilities of SY5 and Z2 in the modern river floodplain sediments are obviously larger, the highest average value of SY5 is $123.20\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$, and the modern river floodplain's magnetic susceptibility is 5~6 times of old river floodplain sediments. Heavy metal pollution in the river floodplain sediments of the study area was compared with the background values of stream sediments in the Yangtze River basin, and the heavy metal pollution in Cu, Ni and Cr was more serious. Meanwhile, the pollution of newly formed river floodplain was more severe than that of old river floodplain. Simple and rapid determination of magnetic susceptibility can be used as one of important means for diagnosing heavy metal pollution in floodplain sediments.

基金项目: 江苏省水利科技项目(2015081);国家自然科学基金(41371024)
作者简介: 王鑫(1993—),男,硕士研究生,主要从事长江镇扬河段河道变迁及环境研究。E-mail: wx1993410@163.com
通信作者: 张振克,教授。E-mail: zhangzk@nju.edu.cn
引用本文: 王鑫,刘存丽,张振克,等.长江镇扬河段不同时期河漫滩沉积物磁化率及其环境污染指示意义[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):499-506.
WANG Xin, LIU Cunli, ZHANG Zhenke, et al. Magnetic susceptibility of river floodplain sediments at Zhenjiang-Yangzhou reach of the Yangtze River and its significance as environmental pollution indicator [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47 (6): 499-506.

Key words: river floodplain; rock core; environmental pollution; magnetic susceptibility; heavy metal pollution; Zhenjiang-Yangzhou reach

长江下游地区河漫滩发育,不同时期形成的河漫滩沉积物,在追溯河流地貌沉积过程和流域人类活动影响下的污染变化方面具有十分重要的意义^[1-3]。磁化率是环境沉积物磁学性质中一个重要的参数,表示沉积物磁性矿物在地球磁场作用下被磁化的难易程度。国内外学者对不同环境下沉积物的重金属元素含量与沉积物磁化率参数进行对比,发现河口、潮滩、湖泊沉积物的磁化率与重金属含量有很好的相关性^[4-8],并以此为依据,认为沉积物环境磁学参数可以作为环境代用指标,用于进行污染历史重建以及环境变化等方面的研究。环境磁学研究已经成为河流、湖泊、近岸海域环境沉积学研究的一个十分活跃的领域^[1]。

长江是世界第三长河,河流输沙量巨大,河流沉积物的环境沉积学研究十分活跃,环境磁学方法也被用于长江上游支流^[9]、长江中游^[10]、长江口水下三角洲^[11]、长江口潮滩^[5]等相关的水系沉积物及其环境指示意义研究中。前人对长江河口潮流界附近的镇江—扬州河段(以下简称镇扬河段)的河道变迁、江岸崩坍灾害及机理研究十分重视,取得了较多研究成果^[12-14];此外,我国东部地区的河流与湖泊沉积物污染研究也广泛受到重视^[15-19]。但很少有人开展长江下游河漫滩沉积环境的研究,镇扬河段位于长江潮流界附近,潮差大、受潮水的顶托作用明显,在高潮位期间的流速减缓,沉积过程加强,河漫滩地貌十分发育;同时,该河段受到海水和河水同时影响,因此,研究镇扬河段的河漫滩沉积环境具有特别的意义,可以为本河段的环境地质和环境污染提供基础资料。

河漫滩沉积物是河流水环境中重金属污染物的主要储存载体,前人对长江干流沉积物进行了大量的元素地球化学和污染研究,研究表明长江沉积物,特别是主要城市近岸水域沉积物均已受到不同程度的污染,主要污染元素为 Zn、Pb、Cu、Ni、Co 和 V 等^[12]。本文选择长江镇扬河段河漫滩沉积为研究对象,在 3 个已知形成年代的河漫滩上实施浅钻,对获得的岩芯沉积物进行分样和室内分析,重点分析沉积物磁化率和重金属元素含量,目的是借用现代测试手段,对比分析长江河道磁化率和沉积物元素地球化学特征的环境背景值,探讨不同时期河漫滩沉积物磁化率和重金属含量的时空差异,为认识长江流域沉积物环境污染、河漫滩沉积环境管理提供科学依据。

1 研究区域概况和样品采集

1.1 区域概况

河漫滩是指洪水泛滥在河岸以外形成的以垂向加积为主的细粒沉积物,是重要的河流地貌类型,是泛滥平原的重要组成部分^[12]。长江镇扬河段位于长江下游江苏省中部,北岸是扬州市,南岸是镇江市,上起三江口承南京河段,下迄五峰山接扬中河段,全长 73.7 km。本河段为江心洲河型,自上而下由仪征微弯水道、世业洲汉道、六圩弯道、和畅洲汉道、大港水道组成。河段属感潮河段,受潮流上溯影响,长江干流流速减缓,沉积过程加强,利于河漫滩的发育。镇扬河段高潮时纵向流速最小仅为半潮期间平均流速的 60% 左右,落潮时流速最大,相当于半潮期间平均流速的 130% 左右,镇扬河段最大流速约 3 m/s,多年平均潮位 2.67 m^[14]。镇扬河道河势演变复杂,冲淤变化显著,新、老河漫滩在研究河段均有发育,研究区河段特征和采样位置如图 1 所示。

1.2 样品采集

为对比研究新、老河漫滩沉积物的磁化率特征,在镇扬河段河漫滩有代表性的位置采用重力浅钻方法采集了 3 个柱状岩芯(如图 1 中 SY5、SY7 和 Z2 所示),3 个柱状岩芯长均为 1 m,按照 2 cm 间隔分样,样品数量 150 个。其中 SY5 位于世业洲的东南江堤外的滩地,接近枯水季节长江的高潮水边线位置,离岸距离不到 50 m,为世业洲新形成的河漫滩沉积物,洪水季节江水会淹没钻孔位置,沉积物受到长江洪水期的泥沙沉积影响明显。SY7 位于世业洲核心区,老堤坝内部,采样地点为农用田,主要种植水稻,离岸距离超过 800 m,为江心洲老河漫滩沉积物。Z2 位于征润洲东部的沙洲地区,采样地区生长着大量芦苇,是新形成的河漫滩沉积物,距离江岸大约 400 m。

SY5、SY7 和 Z2 所在的镇扬河段处于河流弯道发育的岸段,同时也在长江潮流界附近,受潮水的顶托作用,沉积速率较大。世业洲中心部位成陆时间早并有人居住,SY7 浅钻位于镇扬河段心滩形成时间最老的高

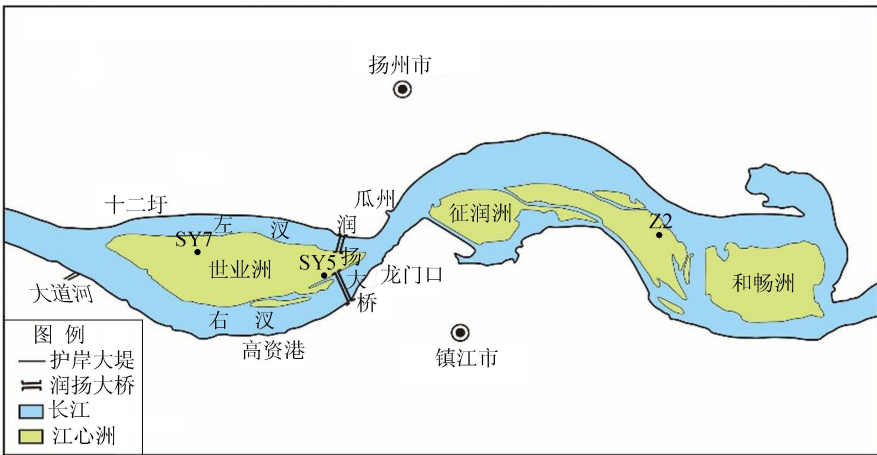


图 1 镇扬河段概况和采样位置

Fig.1 Sampling sites and the river channel in Zhenjiang-Yangzhou Reach

滩地,调查访问得知滩地在 20 世纪中期就已形成。河漫滩沉积中的粗颗粒物可视为河流洪水事件的沉积证据^[9]。观察 SY7 岩芯可知,SY7 柱样没有明显粒度变粗的砂层,且该地区在老堤坝内部,调查访问得知,没有受到 20 世纪后期大洪水(如 1998 年大洪水)的影响。SY5 钻孔在江堤之外,附近的河漫滩在洪水期接受沉积;Z2 浅钻为 2000 年之后征润州下游新的河漫滩沉积。3 个钻孔岩芯特征见表 1。

表 1 浅钻岩芯的岩性特征

Table 1 Lithological characteristics of core sediments

岩芯编号	采样位置	深度/cm	岩性描述
SY5	32. 212 641°N 119. 356 175°E	100	0 ~ 40 cm 棕褐色,含植物根系较多;40 ~ 66 cm 棕褐色,含少量植物根系;66 ~ 100 cm 浅棕灰色。形成于 1990 年代至今
SY7	32. 224 210°N 119. 288 990°E	100	0 ~ 10 cm 暗棕色,有机质较多;10 ~ 66 cm 棕褐色,含块状少量碎屑;66 ~ 100 cm 质地偏粗砂性;81 cm 和 88 cm 处有白色小螺。形成于 20 世纪初期
Z2	32. 232 328°N 119. 527 277°E	100	岩芯从棕灰色渐变至浅灰色黏土,其中,0 ~ 50 cm 含较多芦苇根;50 ~ 88 cm 水平层理明显,为粉砂质黏土;88 ~ 100 cm 由棕灰至浅灰色黏土。形成于 2000 年之后

2 试验方法与结果

2.1 试验方法

测定沉积物样品磁化率时称重 10 g,波动范围不超过 5%。使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率测量仪测试。将沉积物样品在小于 40℃低温下烘干研磨后,取研磨后的风干样品 10 g,在远离磁场干扰的情况下用磁化率测量仪的探头分别对每个样品进行低频测量 3 次,取平均值,其测量精度为 1%,并计算质量磁化率值,所有样品均在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室测试。

重金属元素分析的取样间隔为 4 cm,试验采用 Perkin Elmer Optima 4300DV 电感耦合等离子体原子发生光谱仪(ICP-OES)测量。先将试样经 10 mL 氢氟酸、5 mL 硝酸分解,低温加热 30 min,稍冷后加 2 mL 高氯酸分解,再加 10 mL 盐酸溶解,制成溶液,用等离子体质谱法(ICP-MS)进行测定。为了监控测试精度和准确度,对样品进行了重复分析与标样分析,最终分析元素的相对误差小于 10%。重金属元素的分析在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境国家重点实验室完成。

2.2 试验结果

2.2.1 磁化率

由图2可知,SY7岩芯沉积物磁化率明显低于SY5和Z2。

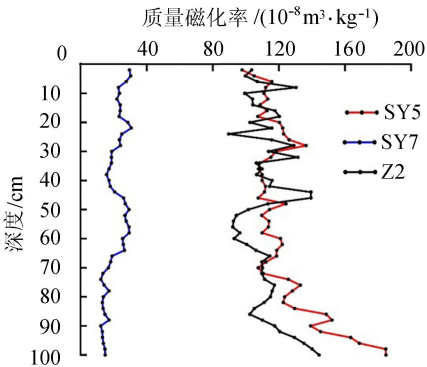


图 2 镇扬河段河漫滩岩芯 SY5、SY7 和 Z2 磁化率

Fig.2 Magnetic susceptibilities of SY5, SY7 and Z2

SY5 岩芯的磁化率最高,总体上磁化率随深度有增加的趋势,根据磁化率的变化趋势可分为 2 个阶段:Ⅰ阶段(72 ~ 100 cm),磁化率的变化范围在(110.54 ~ 184.84) × 10⁻⁸ m³/kg 之间,变化幅度较大,最高为 100 cm 处,达 184.84 × 10⁻⁸ m³/kg;最低为 72 cm 处,仅为 110.54 × 10⁻⁸ m³/kg;Ⅱ阶段(0 ~ 72 cm),磁化率较Ⅰ阶段明显降低,在(97.72 ~ 136.51) × 10⁻⁸ m³/kg 之间波动,波幅较小,平均值为 123.20 × 10⁻⁸ m³/kg。

Z2 岩芯磁化率总体较高,随深度成增大趋势,磁化率介于(89.51 ~ 144.32) × 10⁻⁸ m³/kg 之间,平均值为 113.03 × 10⁻⁸ m³/kg。可分为 2 个阶段:Ⅰ阶段(60 ~ 100 cm),磁化率波动幅度较大,最大值为 100 cm 处,可达 144.32 × 10⁻⁸ m³/kg,最小为 60 cm 处,仅为 92.89 × 10⁻⁸ m³/kg;Ⅱ阶段(0 ~ 60 cm),磁化率在(89.51 ~ 139.39) × 10⁻⁸ m³/kg 之间变化,围绕 115 × 10⁻⁸ m³/kg 上下波动,波幅较大,显示沉积环境复杂多变。

SY7 岩芯沉积物磁化率很低,位于(12.11 ~ 30.60) × 10⁻⁸ m³/kg 之间,波动幅度小,平均值仅为 20.79 × 10⁻⁸ m³/kg,总体而言,SY7 磁化率在(0 ~ 100 cm)呈现波动变大的趋势。综上分析,根据各岩芯磁化率平均值有 SY5>Z2>SY7。

2.2.2 重金属元素

前人研究发现河漫滩沉积物中重金属 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V、Zn 等与磁化率的垂向变化特征极为相似^[1,12],而沉积物的磁化率主要受铁磁性物质如 Fe、Mn 等元素的影响,因此在 SY5、SY7 和 Z2 岩芯沉积物中选取了这 9 种重金属元素进行测试,结果如图 3 所示。SY5 岩芯中 9 种元素的变化特征基本一致,总体而言,自下而上各元素的含量呈现下降-上升-下降-上升-下降的波动。SY7 岩芯中 Co、Cr、Ni、Pb、V、Zn 和 Fe 这 7 种元素变化趋势大致相同,72 ~ 100 cm 段这 6 种元素含量有波动上升的趋势,波动幅度较小;68 ~ 76 cm 段 7 种元素含量有明显下降并迅速回升的变化,0 ~ 68 cm 段元素含量波动上升,不同元素之间波动状况略有不同,但总体含量相对稳定。SY7 岩芯中 Cu 含量基本上保持稳定,波动范围很小,而 Mn 元素的含量在 24 cm、64 cm 和 96 cm 处有明显波峰,波动幅度较大。Z2 岩芯中 9 种元素含量 12 ~ 100 cm 段变化趋势相同,仅表层 0 ~ 12 cm 段略有不同;其中 72 ~ 100 cm 段 9 种元素含量小幅度变化;32 ~ 72 cm 波动剧烈;12 ~ 32 cm 段含量略微波动上升,变化不大;0 ~ 12 cm 段自下往上 Co、Cr、Ni、V、Fe、Mn 有下降趋势,而 Cu、Pb 和 Zn 这 3 种元素为上升趋势。

3 分析与讨论

3.1 不同时期河漫滩沉积物的磁化率具有污染指示意义

河流沉积物中的磁性矿物大致有 3 个来源:水流对河底基岩冲刷和河岸剥蚀产生的颗粒,河流及其支流系统所提供的地表土壤侵蚀的产物,大气降水及降尘中的磁性颗粒^[20-21]。由于物源和沉积环境的差别,河流沉积物中磁性矿物在不同粒径组分颗粒中富集,导致沉积物磁化率值有所不同,即使是同一条河流,在不同的时间段,由于沉积环境的不同,新老沉积物样品的磁化率也存在差异。

从磁化率的垂直变化趋势上看(图 3),SY7 的磁化率自下而上有减小的趋势,即 20 世纪 50 年代之前,沉积物磁化率值很低,但是随着时间推移有逐渐增大的趋势,表明污染正在形成。SY5 和 Z2 同为现代河漫滩沉积,磁化率总体自下而上均表现为减小的趋势,结合岩芯的形成时间,即自 20 世纪 80 年代至今,现代河漫滩磁化率值虽然很高,但是有逐渐下降的趋势,表明污染逐渐减缓。结合 SY7 和 SY5、Z2 浅钻岩芯沉积物的磁化率发现,老河漫滩沉积物 SY7 磁化率很低,而现代河漫滩沉积物 SY5、Z2 磁化率总体较高,约为 SY7 磁化率值的 5 ~ 6 倍,与近 20 多年来人为磁性矿物的大量输入有关。长江中下游边滩现代沉积物的磁化率变化范围为(105 ~ 247) × 10⁻⁸ m³/kg,平均值 240 × 10⁻⁸ m³/kg,磁性矿物含量总体较高^[22],与本研究 SY5、Z2 现代河漫滩沉积物样品磁化率的值具有可比性。研究区位于长江河口段,受到长江流域的影响显著,新老河漫滩沉积记录了不同时期的流域环境状况。SY7 岩芯位置的河漫滩沉积物重金属含量不高、磁化率也不高,而 SY5 和 Z2 岩芯揭示的河漫滩沉积物中重金属含量显著上升,磁化率显著增高,反映镇扬河段河漫滩过去 20 a 受到流域人类活动,尤其是工业快速发展带来的磁性物质和重金属元素增加。

3.2 镇扬河段的河漫滩沉积物污染

将 3 个岩芯沉积物重金属元素与长江流域水系的背景值^[24-24]进行对比(表 2),可以明显发现,SY5、SY7 和 Z2 柱的 7 种元素平均值均大于长江流域水系沉积物背景值,与《中国土壤元素背景值》中江苏地区的背景值比较也有同样的结论,间接地说明长江流域下游的污染对镇扬河段河漫滩沉积物贡献更大。前人对长

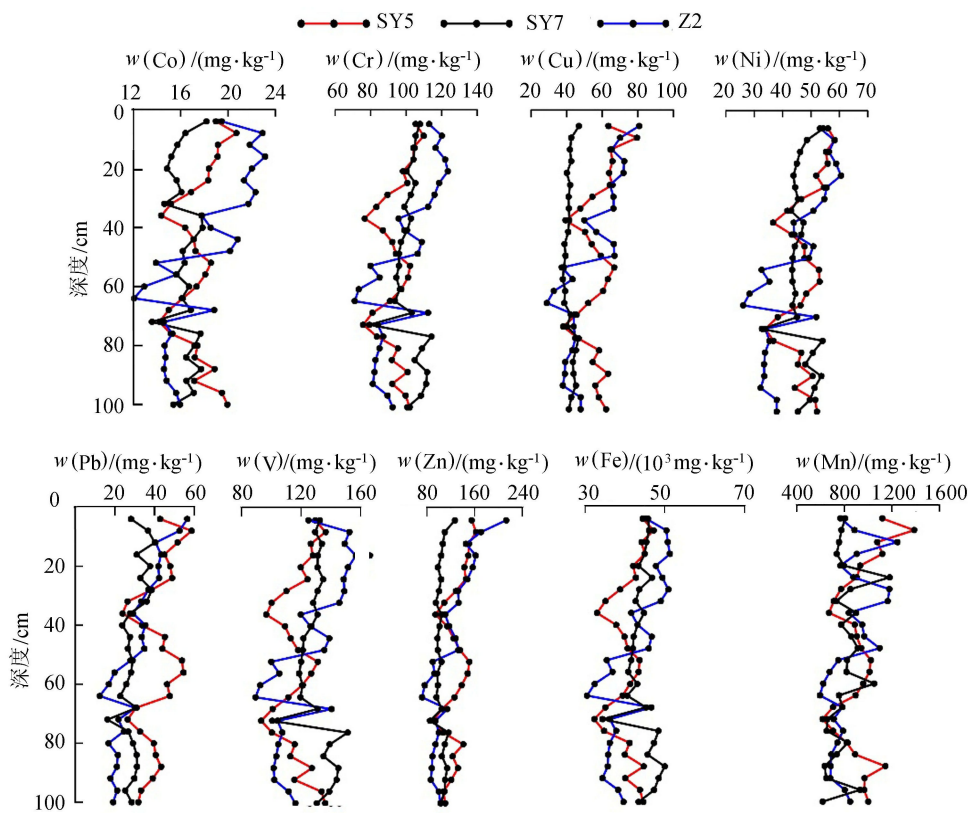


图 3 SY5、SY7 与 Z2 中部分重金属元素含量垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of some metal elements of SY5, SY7 and Z2

江干流水域沉积物的研究也发现,水系沉积物及河漫滩沉积受到明显的污染^[1,25]。对比发现镇扬河段河漫滩沉积物重金属污染程度以 Cu 污染最为严重,Cu 主要来源于流域工业生产(冶炼、金属加工、机械制造等)和化石燃料燃烧(煤、石油等)。国家统计局统计资料显示 1949—2017 年我国钢铁产量不断上升,从 1949 年的 16 万 t 增加到 2017 年的 83 173 万 t,增长了 5 197 倍,尤其是 20 世纪 90 年代之后的钢铁产量增加迅猛。实地调研发现研究区上游附近分布着大量沿江工业,马鞍山钢铁基地距离研究区仅约 140 km,这些工业发展导致了严重 Cu 污染;其次是 Ni 和 Cr 污染,Zhang 等^[1]在对南京附近河漫滩重金属污染的研究中也有类似的发现,表明长江下游河漫滩沉积物的重金属污染具有一致性。

表 2 镇扬河段河漫滩岩芯重金属元素含量与长江水系沉积物背景值比较

Table 2 Comparison of heavy metal elements of Zhenjiang-Yangzhou reaches with background values of the Yangtze River Basin							mg/kg
地区	w(Co)	w(Cr)	w(Cu)	w(Ni)	w(Pb)	w(V)	w(Zn)
长江水系沉积物背景值 ^[20]	12. 1	52. 3	21. 5	26. 4	21. 4		73. 6
江苏土壤元素背景值 ^[21]	12. 6	77. 8	22. 3	26. 7	26. 2	83. 4	62. 6
SY5	平均值	17. 5	94. 4	57. 3	47. 8	41. 0	117. 5
	最小值	14. 2	75. 9	38. 0	33. 9	23. 9	93. 2
	最大值	20. 7	109. 9	79. 6	58. 4	58. 7	136. 4
SY7	平均值	16. 4	102. 0	41. 7	46. 3	29. 6	129. 9
	最小值	13. 6	79. 4	37. 8	32. 8	16. 2	100. 6
	最大值	18. 2	114. 2	47. 0	54. 4	40. 1	151. 2
Z2	平均值	17. 8	98. 3	53. 1	43. 6	30. 0	123. 1
	最小值	12. 1	71. 0	28. 9	26. 1	12. 3	89. 4
	最大值	23. 1	123. 5	80. 7	60. 6	56. 5	156. 8

平均值反映的仅仅是重金属元素含量的集中趋势,因此引入变异系数表示离散程度的大小,数据越离散说明人类活动的影响越明显,计算结果见表 3。对比 3 个柱样可以看出,除 V 元素外,SY7 柱其他元素的变异系数均为同种元素中最小,介于 5. 96% ~ 18. 17% 之间。从图 3 中可知,SY7 柱的 Cu 元素垂向分布基本

没有变化,其他元素的垂直变化范围也相对很小,说明老河漫滩沉积物中重金属含量受到工业生产影响较小。与此相对的Z2柱中各金属元素的变异系数均为3个柱样中最大,介于17.12%~38.89%之间,与图3中Z2柱样各元素的波动最大相吻合;其中Pb元素的变异系数最大,一般认为Pb主要来源于汽车尾气和燃煤,也说明了新形成的现代河漫滩沉积物中重金属主要来源于人类活动。对比新老河漫滩的平均值可发现,SY7的Cr和V元素的平均值(表2)明显高于SY5和Z2,且Cr和V元素的变异系数也较小。主要原因包括2个方面:一是受到Cr、V元素背景值的影响;二是SY7的老河漫滩沉积物形成时代早,尚未受到大规模工业污染的影响,而新形成的河漫滩沉积物中含有大量重金属污染,这些污染元素含量的上升导致单位质量的新河漫滩沉积物中Cr、V的含量相对下降,造成了一定的稀释作用。

3.3 磁化率与金属元素的关系

河漫滩沉积物是重金属污染物的主要载体,重金属含量与磁化率值存在一定的相关性,为了验证磁化率与重金属元素的相关关系,本研究选取了磁化率值和各微量元素值进行相关分析。除Z2柱样的磁化率与金属元素V、Zn之间的相关关系未通过 $P<0.01$ 的t-检验外,其他均存在极显著性差异。相关系数结果见表4。

由表4可知,新、老河漫滩磁化率与9种重金属元素含量的相关系数 R 较小,最大仅为0.44;同时发现SY7与SY5、Z2间又有很大区别。其中老河漫滩沉积物SY7中磁化率与元素相关系数除V、Pb和Mn外均为负值,Zn元素的相关系数的绝对值位于0~0.09之间,没有相关性;Co、Cr、Ni、Pb、Fe元素与磁化率的相关系数的绝对值位于0.1~0.3,为弱相关关系;Cu、V、Mn元素与磁化率的相关系数的绝对值介于0.3~0.5,为中等相关关系。新河漫滩沉积物SY5中磁化率与金属元素的相关性系数除Pb、Zn外均为正,相关系数绝对值绝大多位于0.1~0.3,为弱相关关系。最新形成的河漫滩沉积物Z2的磁化率与Pb、Zn元素的相关性系数的绝对值小于0.09,表示没有相关性,其余元素与金属元素的相关系数均为正值。由于磁化率和重金属元素还受到粒度的影响和制约^[20,26],本文研究中没有消除粒度大小的影响,后续将给予进一步的研究。同在镇扬河段潮流界附近的沉积环境,均为细颗粒的沉积物,流域泥沙磁性矿物供给变化不大,不同岩芯沉积物磁化率和地球化学元素的差异原因应该是不同时期的磁性物质输入的变化。本文研究发现:磁化率显示的差异更为明显,所以,河漫滩沉积物磁化率指标可以作为河流沉积环境污染、环境地质背景研究的代用指标。

4 结 语

长江镇扬河段3个岩芯沉积物磁化率的研究表明,老河漫滩沉积物(SY7)的磁化率较低,平均值仅为 $20.79\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$;而新河漫滩沉积物(SY5、Z2)的磁化率明显较高,平均值最高的是SY5,为 $123.20\times10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$,约为SY7磁化率平均值的近6倍。如此大的原因主要是不同时期流域人类活动的环境影响强度,20世纪中期(SY7岩芯)形成的河漫滩,工业污染的贡献很小;而新河漫滩沉积物(岩芯SY5和Z2)是最近20a的沉积,流域工业化快速发展的影响显著,磁化率对不同时期的流域环境污染的反映更加明显。尽管沉积物的粒度、矿物含量可以影响沉积物的磁化率,但3个岩芯沉积物同在镇扬河段潮流界的河漫滩沉积环境,总体上均为细颗粒的沉积物,自然背景下的流域泥沙磁性矿物供给变化不大,不同时期磁化率的巨大差异的原因应该是人类活动造成的磁性物质输入的变化,所以,河漫滩沉积物磁化率指标可以作为河流环境变化的代用指标。

对比长江下游水系沉积物重金属元素的背景值,发现SY5、SY7和Z2岩芯沉积物中重金属元素的含量

表3 SY5、SY7和Z2岩芯重金属元素的变异系数
Table 3 Variation coefficient of heavy metals of SY5, SY7 and Z2

元素	变异系数/%		
	SY5柱	SY7柱	Z2柱
Co	10.06	6.87	19.70
Cr	9.75	7.16	17.12
Cu	16.39	5.96	27.57
Ni	13.96	9.77	24.99
Pb	22.91	18.17	38.89
V	7.94	10.75	17.70
Zn	15.53	7.97	28.86

表4 沉积物磁化率与重金属元素相关系数
Table 4 Correlation coefficient of magnetic susceptibility and metal elements

元素	相关系数		
	SY5磁化率	SY7磁化率	Z2磁化率
Co	0.34	-0.12	0.24
Cr	0.18	-0.26	0.18
Cu	0.10	-0.43	0.21
Ni	0.10	-0.17	0.15
Pb	-0.23	0.25	-0.01
V	0.44	0.37	0.24
Zn	-0.27	-0.07	0.06
Fe	0.26	-0.26	0.24
Mn	0.10	0.42	0.39

远大于背景值,说明长江口潮流界附件的长江河漫滩细颗粒沉积物对重金属有富集作用,同时,海水影响下容易造成沉积物中吸附态和交换态的重金属释放出来,提升孔隙水中的重金属元素的含量。回归分析发现镇扬河段河漫滩沉积物种磁化率大小与重金属含量之间存在弱正相关关系。河漫滩沉积物磁化率分析可以作为河漫滩沉积物重金属污染诊断的替代手段之一。

参考文献:

[1] ZHANG Linghua, ZHANG Zhenke, CHEN Yingying, et al. Sediment characteristics, floods, and heavy metal pollution recorded in an overbank core from the lower reaches of the Yangtze River[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(11):7451-7465.

[2] 张凌华, 张振克. 河漫滩沉积与环境研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5):153-163. (ZHANG Linghua, ZHANG Zhenke. Research progress of river overbank deposits and implications for environment [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5):153-163. (in Chinese))

[3] 王宏涛,董哲仁,赵进勇,等. 蜿蜒型河流地貌异质性及生态学意义研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(6):81-85. (WANG Hongtao, DONG Zheren, ZHAO Jinyong, et al. Review on geomorphological heterogeneity of meandering river and its ecological significance[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):81-85. (in Chinese))

[4] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 环境磁学在监测城市河流沉积物污染中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9):1979-1991. (WANG Bo, XIA Dunsheng, YU Ye, et al. Use of environmental magnetism to monitor pollution in the river sediment of an urban area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9):1979-1991. (in Chinese))

[5] 张卫国, 俞立中. 长江口潮流沉积物的磁学性质及其与粒度的关系[J]. 中国科学:地球科学, 2002, 32(9):783-792. (ZHANG Weiguo, YU Lizhong. Magnetic properties of tidal flat sediments and their relationship with grain size in the Yangtze Estuary[J]. Science China: Earth Science, 2002, 32(9):783-792. (in Chinese))

[6] 张振克, 吴瑞金, 朱育新, 等. 云南洱海流域人类活动的湖泊沉积记录分析[J]. 地理学报, 2000, 55(1):66-74. (ZHANG Zhenke, WU Ruijin, ZHU Yuxin, et al. Lacustrine records of human activities in the catchment of Erhai Lake, Yunnan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1):66-74. (in Chinese))

[7] 马培, 鲍锦磊. 沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价[J]. 水资源保护, 2018, 34(2):61-67. (MA Pei, BAO Jinlei. Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):61-67. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 罗艺, 张卫国, 刘莹, 等. 嘉陵江三大水系边滩沉积物磁性特征及其物源指示意义[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, 31(2):99-107. (LUO Yi, ZNANG Weiguo, LIU Ying, et al. Magnetic properties of sediments from the major tributaries of the Jialing River and their implications for provenance identification[J]. Journal of East China Normal University (Natural Sciences), 2011, 31(2):99-107. (in Chinese))

[10] 张玉芬, 李长安. 长江中游现代河流沉积物磁组构参数值特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(4):370-376. (ZHANG Yufen, LI Chang'an. Magnetic fabric parameter character of modern fluvial deposit in the middle reaches of Yangtze River[J]. Resources & Environment in the Yangtze Basin, 2003, 12(4):370-376. (in Chinese))

[11] 张卫国, 贾铁飞, 陆敏, 等. 长江口水下三角洲 Y7 柱样磁性特征及其影响因素[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6):1063-1071. (ZHANG Weiguo, JIA Tiefei, LU Min, et al. Magnetic properties of core Y7 from subaqueous delta of the Changjiang estuary and their influencing factors[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6):1063-1071. (in Chinese))

[12] 张凌华. 长江南京—镇江段现代河漫滩沉积特征与环境意义[D]. 南京:南京大学, 2015.

[13] 余文畴. 长江中下游河道崩岸机理中的河床边界条件[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1):8-11. (YU Wenchou. River boundary conditions of mechanism of bank failure in middle and lower reaches of Changjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(1):8-11. (in Chinese))

[14] 张增发, 杭建国, 窦臻. 长江镇扬河段世业洲汊道近期演变与整治对策[J]. 中国水利, 2011(4):32-34. (ZHANG Zengfa, HANG Jianguo, DOU Zhen. The recent evolution and management of Shiyezhou channel in Zhenyang reach of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2011(4):32-34. (in Chinese))

[15] 华祖林, 王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2):95-105. (HUA Zulin, WANG Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2):95-105. (in Chinese))

[16] 燕文明,刘凌,钱宝,等. 浅水湖泊表层沉积物粒度垂向分布及其水动力表征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):345-349. (YAN Wenming, LIU Ling, QIAN Bao, et al. Vertical distribution of particle size and hydrodynamic characterization of surface sediments in shallow lakes[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4):345-349. (in Chinese))

[17] 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. (LIU Zhenyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Variation and pollution evaluation of the total phosphorus and heavy metals in sediments of Huaihe River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1):16-22. (in Chinese))

[18] 邹民虎,连斌,王晓昌,等. 宜兴三汊沉积物氮形态分布及其影响因素[J]. 水资源保护,2019,35(2):54-59. (ZOU Minhu, LIAN Bin, WANG Xiaochang, et al. Nitrogen forms in sediments and their influence factors of Sanjiu Lakes in Yixing City[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):54-59. (in Chinese))

[19] 马培,鲍锦磊. 沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价[J]. 水资源保护,2018,34(2):61-67. (MA Pei, BAO Jinlei. Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):61-67. (in Chinese))

[20] 王建,刘泽纯,姜文英,等. 磁化率与粒度、矿物的关系及其古环境意义[J]. 地理学报,1996,51(2):155-163. (WANG Jian, LIU Zhechun, JIANG Wenying, et al. Relationship between magnetic susceptibility and grain size and minerals and their paleoenvironmental significance[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(2):155-163. (in Chinese))

[21] THOMPSON R, OLDFIELD F. Environmental Magnetism[M]. London:Allen and Unwin, 1986.

[22] 王辉. 长江中下游干流沉积物磁学及重金属地球化学研究[D]. 上海:华东师范大学,2008.

[23] 张朝生,章申,张立成,等. 长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究[J]. 环境科学报,1995,15(3):258-264. (ZHANG Chaosheng, ZHANG Shen, ZHANG Licheng, et al. Calculation of heavy metal contents in sediments of the Changjiang River system[J]. Actaentiae Circumstantiae, 1995, 15(3):258-264. (in Chinese))

[24] 国家环境保护局主持,中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[25] 臧小平,郭利平. 长江干流水底沉积物中十二种金属元素的背景值及污染状况的初步探讨[J]. 中国环境监测,1992(4):20-22. (ZANG Xiaoping, GUO Liping. Background values and pollution status of twelve metal elements in the sediments of the main stream of the Yangtze River[J]. Environmental Monitoring in China, 1992(4):20-22. (in Chinese))

[26] 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 Weiguo, YU Lizhong, 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 LimnologiaSinica, 2000, 31(6):616-623. (in Chinese))

(收稿日期:2018-04-12 编辑:刘晓艳)