

Speciation and Ecological Risk Assessment of Metal Elements in the Paddy Soil of Sheyang River Watershed

Fengzhi Bi¹, Qiaojia Wang², Shanshan Wu², Hao Yang², Jin'e Liu¹, Guoxiang Wang¹, Ruiming Han^{1*}

¹School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

²School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

Email: ruiming.han@njnu.edu.cn, 1529258685@qq.com

Received: Oct. 17th, 2017; accepted: Oct. 25th, 2017; published: Oct. 31st, 2017

Abstract

To determine the metal accumulation characteristics and assess the ecological risks in the paddy soils in Lixiahe Area, eight metal elements (Cu, Zn, Mn, Fe, Mg, Pb, Cr, Ni) and the related physio-chemical parameters were analyzed along Sheyang River, eastern area of Jiangsu, China. Paddy soils samples (0~20 cm) from twenty five sites were analyzed for pH, Eh, EC, contents of metal elements, their fractions, and nutrients (total nitrogen, total phosphorus, total organic carbon). Geoaccumulation index (Igeo), enrichment factor method (EF) and modified potential ecological risk index (MRI) were used to evaluate the pollution condition. Principal component analysis was applied for identifying the sources of metals. The results showed that the average contents of Mg, Zn, Ni and Cu were 12597.20 mg/kg, 1557.54 mg/kg, 73.71 mg/kg and 58.75 mg/kg, respectively, which were higher than environmental background values. The contents of Zn, Ni and Cu were 5.19, 1.23 and 2.63 folds to the national secondary standard. The average contents of Fe and Mn were 22825.12 mg/kg and 487.02 mg/kg, both lower than the environmental background values. The range of Pb and Cr were 30.72~121.61 µg/kg, lower than the national secondary standard. Three assessment models showed that all sites were severely polluted by Zn and significantly moderately polluted by Ni and Cu. Mn, Fe, Pb and Cr almost showed no pollution, while enrichment factor indicated moderate contamination of Mg. Principal component analysis showed that Zn and Ni may both come from road traffic source. Modified ecological risk assessment showed that Zn did not reach the serious pollution level thanks to low bioavailable proportion, which improved the accuracy of the evaluation to certain extent. The accurate source of metal pollutants and environmental factors accelerating metal accumulation in Sheyang River catchment require further extensive investigation and monitoring.

Keywords

Sheyang River, Paddy Soils, Metal Elements, Speciation Forms, Ecological Risk Assessment

*通讯作者。

射阳河流域稻田土耕作层金属赋存形态及生态风险评价

毕凤稚¹, 王巧佳¹, 吴姗姗², 杨浩², 刘金娥¹, 王国祥¹, 韩睿明^{1*}

¹南京师范大学环境学院, 江苏 南京

²南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京

Email: ruiming.han@njnu.edu.cn, 1529258685@qq.com

收稿日期: 2017年10月17日; 录用日期: 2017年10月25日; 发布日期: 2017年10月31日

摘要

为研究江苏东部里下河地区稻田土金属累积特征与生态风险水平, 调查了该地区最大天然干河 - 射阳河流域25个稻田耕作层土壤样品的Cu、Zn、Mn、Fe、Mg、Pb、Cr、Ni总量、赋存形态、pH、Eh、EC及TN、TP、TOC含量。采用主成分分析法判断其主要来源, 运用地积累指数法(Igeo)、富集因子法(EF)、改进的潜在生态风险指数法(MRI)进行综合的生态风险评价。结果表明: Mg、Zn、Ni、Cu的平均含量分别为12597.20 mg/kg、1557.54 mg/kg、73.71 mg/kg、58.75 mg/kg, 均高于环境背景值, 其中, Zn、Ni、Cu含量分别达国家二级标准的5.19、1.23、2.63倍; 金属Fe、Mn平均含量为22825.12 mg/kg、487.02 mg/kg, 均低于环境背景值; 金属Pb、Cr含量较低, 在30.72~121.61 μg/kg之间, 低于国家二级标准。三种方法评价结果均显示, 研究区域土壤耕作层中, 金属Zn达到中度至重度污染, Ni、Cu为轻度至中度污染, Mn、Fe、Pb、Cr无污染; 富集因子计算结果显示Mg达到中度污染。主成分分析显示Zn、Ni同源性较高, 可能源于公路交通污染。结合金属有效态占总量比例, 改进的生态风险评价显示Zn未达到重度污染水平, 在一定程度上提高了评价的准确性。金属污染的来源、影响累积的环境因子, 有待开展更加广泛的调查和分析。

关键词

射阳河, 稻田土, 金属, 赋存形态, 生态风险评价

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

射阳河作为里下河地区最大的天然入海干河, 河道曲折, 支流纵横[1], 该流域不仅拥有 260 万亩农田面积, 同时分布有 60 家以上的重点工业污染源[2]。交通尾气、工业污废、农业施肥构成该地区土壤金属的主要来源[3]。土壤环境中的金属污染具有隐蔽性、累积性、难降解等特点[4], 且可通过作物富集、改变根际生态系统、毒害作物等方式影响人类和动物的健康[5]。

地累积指数法、富集系数法、潜在生态风险评价法是应用较为广泛的土壤与沉积物金属生态风险评价方法, 但以上评价方法均基于介质中金属总量, 忽视了金属赋存形态对有效性及生态风险的影响[6]。

祝慧娜[7]采用改进的潜在生态风险评价法(MRI),通过给金属不同赋存形态加权,提高可提取态(F1、F2、F3、F4)在计算过程中的权重,同时降低无环境风险的残渣态(F5)权重,完善了计算结果,使得评价更加接近真实情况。

目前,关于射阳河流域稻田土耕作层金属形态和风险评价的研究较少,多以对盐城海岸带[8] [9] [10] [11]、射阳河底泥沉积物[12]中金属分布的分析为主,缺乏对耕地土壤的风险评估。本研究采集射阳河流域水稻田耕作层土壤样品,探讨金属(Cu、Fe、Mg、Mn、Zn、Pb、Ni 和 Cr)的含量特征及赋存形态,并采用地累积指数法、富集因子法、以及改进的潜在生态风险评价法对当地污染情况进行评估,利用主成分分析和聚类分析判断研究区金属的主要来源与影响因子,为区域环境保护和治理提供理论支持。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集与处理

江苏省盐城市射阳河源于宝应县射阳湖,是里下河地区排水入海的最大天然干河。该河全长 210 公里,河床宽 350 米,水深 3~5 米,流域面积 820 平方公里,控制土地面积 86.1 万亩[13],是盐城众多城镇、工农业用水和排水的主要渠道。本研究采样区域位于射阳河流域中下游正红镇至千秋镇的连片水稻田(120°13'E, 33°53'N),属于亚热带向暖温带过渡气候带,气候温和、四季分明、日照充足、雨量适中。

对采样区域进行调查后,2015年7月采用 Trimble Juno SA 手持 GPS 定位仪定位,用竹铲直接采集 0~20 cm 农地表层土样,共采集 25 个土壤样品,具体采样点分布见图 1。每个点采集的土样按四分法混匀,保留不少于 1 kg 土壤样品装入聚乙烯塑封袋。采样完后将样品立即运回实验室冷冻干燥。干燥样品剔除碎石、砂砾及植物残体等,用玛瑙研磨机(RM200, Retsch) 8000 r/min 研磨 6 min,过 100 目尼龙筛后贮存于塑料密封袋待测。

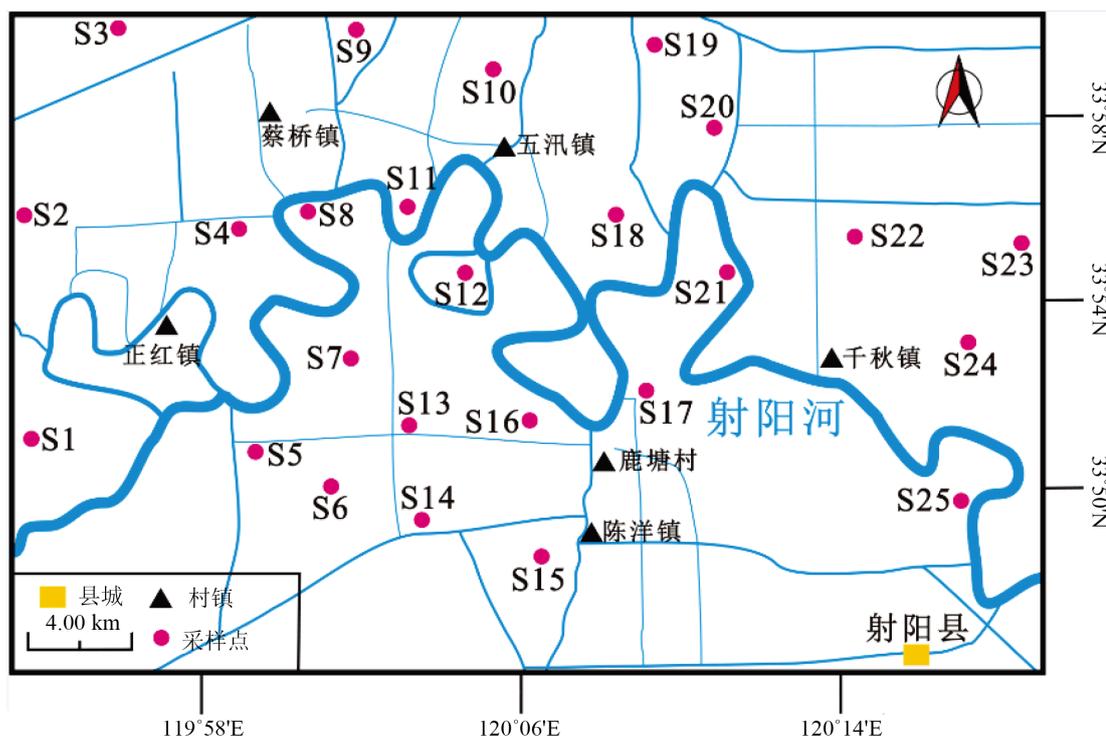


Figure 1. Schematic of sampling sites

图 1. 研究区域采样点分布图

2.2. 样品测定方法

2.2.1. 金属总量测定和形态分级

参照土壤金属全量测定方法(GB/T 17136-1997), 采用盐酸-硝酸-高氯酸-氢氟酸电热板消解土样用于金属总量测定。金属形态的提取方法参考 Tessier 连续提取法[14]。金属元素的检测采用原子吸收分光光度法, 其中 Cu, Fe, Mg, Mn, Zn, Ni 元素采用火焰原子吸收分光光度法(PerkinElmer AA800, 美国)进行测定, Pb, Cr, Cd 元素采用石墨炉原子吸收分光光度法进行测定。本研究土壤样品 Cd 含量均低于检测限。

2.2.2. 土壤基本理化指标的测定

稻田土总氮(TN)通过碱性过硫酸钾紫外分光光度法(HJ 636-2012)测定: 取一定量的土样于具塞比色管中, 加入碱性过硫酸钾, 120°消煮 30 分钟, 取出冷却至室温离心取出上清液, 加 1ml 稀盐酸, 上机测定; 总磷(TP)则根据欧洲标准测试组织通过的 SMT 法提取[15], 分光光度法(UV6100 美谱达, 上海)测定: 精确称取一定量的土样于瓷坩埚中, 450°灰化 2 h, 用一定浓度的盐酸转移至离心管中, 震荡 16 h, 离心, 取上清液至比色管中, 依次添加抗坏血酸和钼酸盐, 显色后上机测定。总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪(HT3100 4541N, 德国)进行分析。pH、Eh 使用 PHS-3C 酸度计测得[16], EC 使用手持 EC 仪测得[17]。

2.3. 风险评价方法

2.3.1. 地积累指数

地积累指数(Index of geo-accumulation, I_{geo}), 是通过结合某种金属的实测含量和其地球化学背景值来评定研究地区的该种金属污染的程度的定量指标[18], 计算公式如式(1)。

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \cdot B_n} \right] \quad (1)$$

其中, I_{geo} 表示地积累指数; C_n 为实测金属含量, mg/kg; B_n 为当地沉积物金属含量背景值, 此处参考江苏 A 层(表层)土壤几何均值[19], Cu、Mn、Zn、Mg、Fe、Pb、Cr、Ni 的背景值分别为: 22.3、585.0、62.6、8400.0、30200.0、26.2、77.8、26.7 mg/kg [20]; k 为考虑成岩作用可能引起的背景值波动而设定的常数, 一般取 1.5 [21] [22] [23]。

地积累指数评价法不仅考虑了环境背景值与人为污染因素, 也考虑了自然成岩作用可能引起背景值波动因素[24] [25] [26]。一般适用于元素较多的研究区域, 可以通过累计计算大量金属的叠加效应。地积累指数分级标准与污染程度划分见表 1。

2.3.2. 富集因子法

富集因子法(Enrichment Factor)是评价污染程度和污染来源的重要定量指标。通过与参比体系的比较可以得出待评定元素的富集情况, 从而判断该种元素的污染情况[27] [28] [29]。本文选择 Fe 为参考元素, 背景值使用《中国土壤元素背景值》中江苏省相关元素几何均值, 计算射阳河水稻土中 Cu、Zn、Mn、Mg、Pb、Cr、Fe、Ni 的富集因子。

EF 计算公式如下[19]:

$$EF = \frac{(C_{Me}/C_{Fe})_{sample}}{(C_{Me}/C_{Fe})_{background}} \quad (2)$$

其中, EF 为富集因子, 为待评估元素与 Fe 在采样区实测含量的比值, 为待评估元素与 Fe 在该采样区背景值的比值。

Table 1. The criteria of Geoaccumulation index [21] [22] [23] [24]
表 1. 地累积指数等级标准[21] [22] [23] [24]

风险级别	地累积指数范围	污染程度
0	$I_{geo} \leq 0$	无污染
1	$0 < I_{geo} < 1$	轻度污染
2	$1 < I_{geo} < 2$	中等污染
3	$2 < I_{geo} < 3$	中等 - 强污染
4	$3 < I_{geo} < 4$	强污染
5	$4 < I_{geo} < 5$	强 - 极严重污染
6	$5 < I_{geo}$	极严重污染

富集因子法通过标准化待评价元素，可以平衡区域差异给污染评价带来的影响，从而判断人类活动对该区域造成的危害程度。一般适用于已知背景值含量的区域污染评价。富集因子法的分级标准见表 2。

2.3.3. 改进的潜在生态风险评价法

Hankanson 的潜在生态风险评价方法(RI, risk index) [30]综合考虑了多种金属之间的协同作用、不同金属对环境的毒性水平差异、污染程度和背景值差异等方面的因素，对待评价元素的毒性进行加权计算，进而对研究区域的潜在生态风险进行全面评价[4] [30] [31] [32] [33]。

RI 计算公式如下：

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times \frac{C^i}{C_0^i} \quad (3)$$

其中， RI 为多金属综合的潜在生态风险评价指数； E_r^i 为某区域单种金属的潜在生态危害指数； T_r^i 为第 i 种金属的毒性响应参数； C_f^i 为第 i 种金属的污染系数； C_0^i 为第 i 种金属的背景参照值； C^i 为第 i 种金属的实测浓度；各元素的毒性系数分别为： $T_{Mn} = T_{Zn} = T_{Mg} = T_{Fe} = 1$ ， $T_{Cr} = 2$ ， $T_{Cu} = T_{Ni} = T_{Pb} = 5$ 。

祝慧娜[7]在 RI 的计算过程中，针对金属不同有效态含量引入了金属浓度的修正系数，实现了金属不同形态的比例和潜在生态风险评价的结合。 MRI 的计算公式如下：

$$MRI = \sum \overline{E_r^i} = \sum T_r^i \times C_f^i = \sum T_r^i \times \frac{\sum W_j \times C_{\text{实测}}^i}{C_n^i} \quad (4)$$

其中， MRI 为改进的多种金属潜在生态风险评价指数； $\overline{E_r^i}$ 为改进的多种金属潜在生态风险评价指数； T_r^i 为第 i 种金属的毒性系数； W_j 是(j 代表金属的存在形态)土壤金属生物毒性权重系数[34]： $W_{F1} = 1.8$ ， $W_{F2} = 1.4$ ， $W_{F3} = 1.2$ ， $W_{F4} = 1.0$ ， $W_{F5} = 0.6$ 。改进的潜在生态风险评价法的分级标准见表 3。

2.4. 数据分析方法

实验所有数据均为三次平行取得的均值，采用 Excel 2013 进行整理，使用 SPSS 19.0 和 SigmaPlot 12.5 进行数据分析与绘图，采用 Google Earth 和 CorelDraw 12 绘制采样点位分布图。

3. 结果与分析

3.1. 水稻田耕作层土壤基本理化特征

土壤样品理化指标(pH, Eh, EC, TP, TN, TOC)分析结果见表 4。研究区域水稻田耕作层 pH 值的范围为 7.81~8.92，平均值 8.17，说明该区域表层稻田土壤呈弱碱性，与苏北农田酸碱度相近[36]。变异

Table 2. The criteria of enrichment factors
表 2. 富集因子污染程度分级标准[29]

F 值	≤2	2~5	5~20	20~40	>40
污染程度	无污染	中度污染	显著污染	高度污染	极度污染

Table 3. The criteria of risk index and modified risk index [35]
表 3. 潜在风险评价法与改进的潜在风险评价法分级标准[35]

RI	MRI	潜在生态风险程度
<150	<25	轻度
150~300	25~45	中等
300~600	45~95	较强
>600	>95	很强

Table 4. Physiochemical parameters of the surface paddy soil in the studied region
表 4. 研究区稻田表层土壤基本理化特征

	pH	Eh	EC	TP	TN	TOC
	/	mV	μS/cm	mg/kg	mg/kg	g/kg
最大值	8.72	-44.00	794	927.08	1707.79	25.14
最小值	7.81	-98.00	184.2	506.36	89.46	13.12
平均值	8.17	-65.32	389.74	732.31	857.34	19.19
标准差	0.25	14.34	178.61	110.02	498.49	9.32
变异系数	3.03	21.96	45.83	15.02	58.14	48.96
射阳县长荡镇	7.48	/	/	712.50	926	15.20
杭州良渚试验站	6.90	/	/	4500	2980	34
宜兴农田表层	6.40	/	/	550	1070	23.50

系数 3.03%，沿程分布差异很小。Eh 范围为-98 mV~-44 mV，平均值-65.4 mV，表明该区域土壤环境呈还原性；EC 值范围为 0.184 mS/cm~0.794 mS/cm，平均值 0.390 mS/cm，低于江苏土壤电导率平均值(1~4 mS/cm)。耕作层土壤 TN 含量范围为 89.46 mg/kg~1707.79 mg/kg，最高浓度约为最低浓度的 19 倍，变异系数 58.14%，分布很不均匀，受外界条件影响较大。均值为 857.34 mg/kg，低于江苏水稻田 TN 平均值 [37] [38]；TP 含量范围为 506.36 mg/kg~927.08 mg/kg，变异系数 15.02%，分布较均匀，高于江苏其他水稻田 TP 平均值。TOC 含量范围为 13.12 g/kg~25.14 g/kg，变异系数 14.93%，各点含量差异不显著，低于江苏省平均水平。

稻田土 pH 值一般受成土母质和水层管理的影响较大。一般稻田土壤 pH 值在 4.6~8.0 之间，对比其他区域，里下河研究区域土壤 pH 值略高，这可能是由于农业灌溉，土壤中的 Fe 离子和 Mn 离子水解形成氢氧化物所致。稻田土 Eh 值在灌水前和灌水后有很大不同，灌水后的耕作层 Eh 会因为微生物耗氧等原因显著下降，使土壤呈还原性。此时，低价态的 Fe、Mn 会与土壤中的有机质大量络合产生沉淀。土壤溶液电导率反应土壤盐渍化程度，植物最适生长范围在 0~0.5 mS/cm 之间，研究区土壤 EC 值的范围在 0.184~0.794 mS/cm 之间，低于管孝艳、李立平[39] [17]等人的测定结果，变异系数 45.83%，显示受外界因素影响较大[40]。

3.2. 水稻田耕作层土壤金属及其形态分布特征

3.2.1. 金属总量分布特征

研究区域稻田土耕作层八种金属的统计分析见表 5。结果显示, Pb、Cr 含量较低, 分别为 30.70~77.20 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、48.70~121.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 均低于国家二级标准, 二者的变异系数分别为 24.41%、24.69%, 表明 Pb、Cr 分布受外界影响较大; 平均值远低于土壤背景值(<1%), 这可能是自然降雨、农业退水和地下水位上升导致元素迁移所致。Fe 的含量最高, 范围在 15,000~33,000 mg/kg 之间, 与方淑波测定结果类似[9], 变异系数 17.58%, 属中等变异。Zn 的含量为 1245~3015 mg/kg , 平均含量 1557.54 mg/kg , 是国家二级标准(300 mg/kg)的 5.19 倍, 但低于盐城其他土地利用类型的平均含量[9] [10]; Ni 的平均含量为 73.71 mg/kg , 是国家二级标准(60 mg/kg)的 1.23 倍; Cu 的平均含量为 58.75 mg/kg , 是国家二级标准的 2.63 倍。Cu、Zn、Ni 的含量均超过江苏省元素背景值和土壤环境质量二级标准, 说明研究区域 Cu、Zn、Ni 三种金属累积程度较大, 可能主要来源于燃煤与汽车尾气排放[41] [42] [43]。Cu、Ni 的高值出现在公路辐射区 S16、S17、S18 点位, 可能受到交通污染影响。

各元素变异系数大小顺序为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Mg}$, 元素 Zn 的变异系数最大, 分布很不均匀, 受外界影响较大, Mg 的变异系数最小, 为 9.39%, 受外界影响最小[39]。

3.2.2. 金属赋存形态分析

Mg、Pb 的 F1 态、Cr 的 F1、F2 态均未检出。研究区土壤耕作层中金属形态分布图见图 2。

金属的可交换态(F1)易被植物吸收, 对环境与生态系统危害较大[14]。除未检测出的金属, Ni、Cu、Zn、Mn、Fe 的 F1 态平均占比分别为 6.58%、3.43%、2.40%、0.73%、0.04%。

碳酸盐结合态(F2)受土壤 pH 值影响较大, pH 降低有利于碳酸盐结合态金属释放。Pb、Mn、Mg、Ni、Cu、Zn、Fe 的碳酸盐结合态占比分别为 10.63%、12.23%、12.31%、5.08%、3.88%、3.76%、0.03%。本研究区域 pH 值范围 7.81~8.92, 呈弱碱性, 有利于碳酸盐结合态金属的稳定。

铁锰氧化物结合态(F3)以离子键结合, 一般凝结于矿物外表面或以细小颗粒存在, 不易释放, 主要受环境 pH 值和氧化还原电位影响[44]。氧化还原电位降低或缺氧时, 铁锰氧化物结合态金属易被还原, 造成污染。Mn 的 F3 形态平均值最高, 为 48.1%; Mg、Pb、Zn、Ni 和 Cu 次之, 分别为 24.62%、23.44%、22.16%、15.29%、10.10%, Fe (8.7%)和 Cr (1.9%)该形态含量最低。研究区域土壤氧化还原电位平均值为 -65.4 mV, 呈还原性, 该结合态金属有释放风险。

有机质结合态(F4)是金属离子与土壤中的有机质活性基团结合而成, 在正常的氧化还原条件下, 金属不易释放。研究区域土壤呈强还原性, 金属的有机质结合态释放风险较低。Pb 的 F4 形态最高(14.3%); Cu、Mn、Cr、Ni、Mg 和 Zn 次之(2%~7%), Fe 最低(0.2%)。

Table 5. Contents of metal elements in the surface paddy soils

表 5. 稻田土耕作层重金属含量(mg/kg)

	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cr	Mg	Ni
最大值	77.70	3015.47	569.32	32110.97	0.08	0.12	14460.13	88.81
最小值	40.99	1136.66	283.80	16653.64	0.03	0.05	9236.06	53.62
平均值	58.76	1724.34	487.02	22825.12	0.06	0.08	12597.20	73.71
标准差	8.53	484.51	73.60	4013.11	0.01	0.02	1182.92	10.01
变异系数(%)	14.52	28.10	15.11	17.58	24.41	24.69	9.39	13.58
江苏 A 层元素背景值	22.30	62.60	585	30200	26.20	77.80	8400	26.70

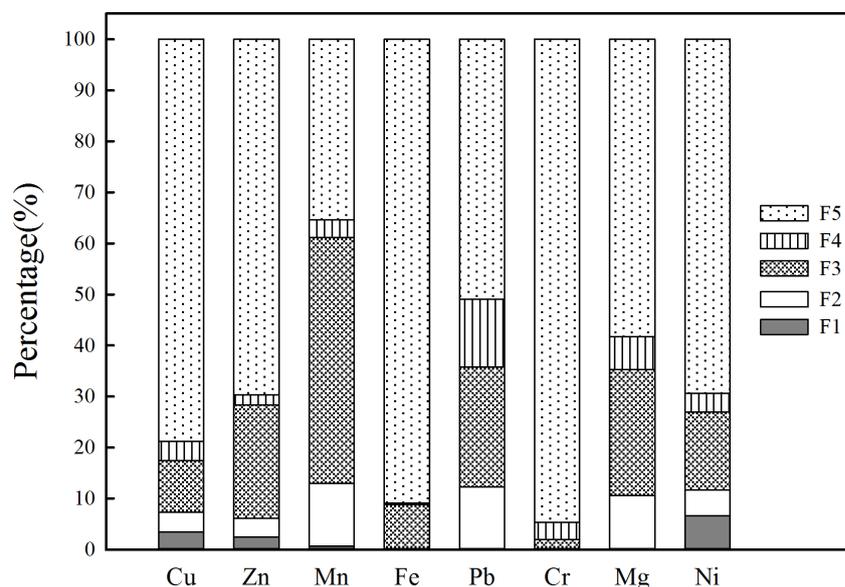


Figure 2. Speciation of metal elements in the studied region

图 2. 研究区域金属形态分布图

残渣态(F5)金属在正常条件下不易释放离子,能在土壤中长期保持稳定,不被植物吸收。Cu、Zn、Fe、Cr、Ni 五种金属的残渣态含量都很高,所占比例均超过 70%,高于臧飞[28]、陈春霄[45]等对不同研究区域的结果,显示该研究区域 Cu、Zn、Fe、Cr、Ni 的二次释放能力较弱。

8 种金属的可提取态(F1 + F2 + F3 + F4)含量大小顺序为: Mn > Pb > Mg > Ni > Zn > Cu > Fe > Cr。环境条件改变时,金属 Mn、Pb、Ni 二次释放的可能性很大。

3.3. 水稻田耕作层土壤金属生态风险评价

3.3.1. 地累积指数法

研究区域水稻田土壤中各金属元素地累积指数计算结果见表 6。Zn、Mn、Ni、Cu、Mg、Fe、Pb 和 Cr 的地累积指数平均值分布为 4.15、2.45、0.87、0.80、-0.01、-1.01、-9.49 和 -10.64;结合风险分级标准分析可知:① 对于元素 Fe、Pb、Cr、Mn 和 Mg,各采样点土壤环境中均未形成污染,生态风险级别为 0 级。② Zn 的污染程度为极严重污染,风险级别为 5 级;Cu 和 Ni 平均污染程度为轻度污染,风险级别 1 级。8 种金属元素的风险级别依次为 Zn > Ni > Cu > Mg > Mn > Fe > Pb > Cr。

3.3.2. 富集因子法

参照江苏省 A 层(表层)土壤背景值,选择比较稳定的 Fe 为参照元素[28],将 Zn、Ni、Cu、Mg、Mn、Pb、Cr 与 Fe 的比值标准化,得到各采样点的富集系数,结果见表 7。除 Zn 以外,其余 7 种金属的平均富集系数均低于 4;Cu、Mg、Ni 的富集系数在 2~5 之间,属中度污染水平;Mn、Pb、Cr 三种金属的富集因子均小于 2,属于轻微污染或无污染;Zn 富集程度最大,平均富集系数 37.51,为强烈污染水平。7 种金属富集程度依次为: Zn > Ni > Cu > Mg > Mn > Pb = Cr。

3.3.3. 改进的潜在生态风险指数法

研究区域稻田土耕作层金属的潜在风险评价结果见表 8。金属单项潜在生态风险指数表明,Zn 的生态风险指数最高,平均值达 22.04,环境风险程度为强风险;Ni 和 Cu 的生态风险指数仅次于 Zn,呈中等风险水平;其余 5 种金属无风险。8 种金属的潜在生态风险指数由高到低分别为: Zn > Ni > Cu > Mg > Mn >

Table 6. Igeo of metal elements in surface paddy soils in Sheyang River watershed
表 6. 射阳河水稻田表层土金属元素地累积指数

	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cr	Mg	Ni
最大值	1.22	5.01	-0.62	-0.50	-8.99	-9.91	0.20	1.15
最小值	0.29	3.60	-1.63	-1.44	-10.32	-11.23	-0.45	0.42
均值	0.80	4.15	-0.87	-1.01	-9.49	-10.64	-0.01	0.87
均值等级	1	5	0	0	0	0	0	1

Table 7. EFs of metal elements in surface paddy soils in Sheyang River watershed
表 7. 射阳河水稻田表层土金属元素富集因子

	Cu	Zn	Mn	Pb	Cr	Mg	Ni
最大值	4.40	63.10	1.43	0.00	0.00	2.55	5.54
最小值	2.49	18.51	0.64	0.00	0.00	1.22	2.67
均值	3.54	37.51	1.12	0.00	0.00	2.03	3.72
均值等级	2	4	1	1	1	2	2

Table 8. Index of potential ecological risks of metal elements in surface paddy soils in Sheyang River watershed
表 8. 射阳河水稻田表层土金属元素潜在生态风险指数

	E_r^i								MRI
	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cr	Mg	Ni	
最大值	12.11	35.10	1.03	0.68	0.01	0.00	1.50	13.58	58.18
最小值	7.93	15.58	0.53	0.37	0.01	0.00	1.03	9.54	36.68
均值	9.85	22.04	0.84	0.49	0.01	0.00	1.29	11.40	45.92

Fe > Pb > Cr。评价结果和富集因子法基本相同。土壤 Zn 所有点位均达到较强风险水平，其中，20% 样点达到极强生态风险水平。土壤 Ni 和 Cu 所有点位均达到中等风险水平，其中，土壤 Ni 达到较强风险水平的点位百分数为 12%。根据样点的潜在生态风险指数，S3、S9、S10、S15~S20、S22~S24 点位风险程度均较强(MRI > 45)，且研究区域的平均风险程度也属于较强水平。

以上三种评价方法各有侧重，但是评价结果均一致：地累积指数侧重于单个金属对周边环境的影响，富集因子则侧重于人类活动对环境中金属累积的影响，改进的潜在生态风险评价方法突出不同金属及金属赋存形态对环境的毒性差异，侧重于几种金属及其不同形态对环境的综合影响。综合三种方法评价结果，研究区域各点位土壤耕作层均受到金属 Zn、Cu、Ni 污染，这三种金属的实测含量均高于环境背景值，分别达到国家二级标准的 5.19、2.63、1.23 倍。研究区域土壤金属综合潜在生态风险指数平均值为 45.92，生态风险较高。研究区域稻田土耕作层主要受金属 Zn、Ni、Cu 污染，污染水平较严重。金属 Pb 的三种评价结果均显示无污染，但是有效态占比很高，有二次释放的风险，且总量低于背景值可能受到短期天气条件影响。

3.4. 水稻田耕作层土壤金属潜在来源分析

3.4.1. 土壤金属与营养盐主成分分析

为鉴别研究区耕作层金属主要来源，对 25 个样品的金属、营养盐含量进行主成分分析，结果见图 3。分析表明，四个因子累积贡献率达 82.77%。

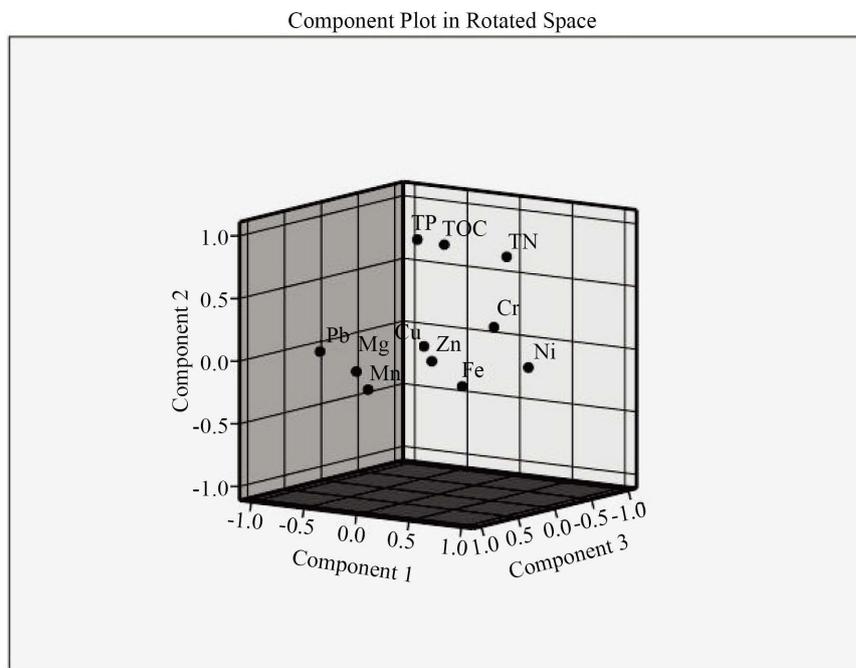


Figure 3. Principal component analysis of loading plot for metal elements and nutrients
图 3. 金属与营养盐主成分分析载荷图

PC1 方差贡献率为 23.19%，在 Ni、Pb、Cr、TN、TOC 上有较高载荷。金属 Ni 平均含量 73.71 mg/kg，是背景值的(26.70 mg/kg)的 2.76 倍，受外界条件影响累积较严重；研究区域 Pb、Cr 含量都较低，分别为江苏省 A 层土壤背景值的 0.002、0.001 倍。这与已有的盐城地区滩涂表层土壤研究结果不一致[9] [46]，TN、TOC 含量也低于江苏省平均水平，可能是研究区域大规模降雨或灌溉所致。Pb、Cr 和 TN、TOC 两两之间变异系数相近，说明受外界影响较一致，可能来自于相同污染源[47]，或受共同的环境因子限制。TN、TOC 的比值(C/N)在一定条件下可以用来表征土壤中有有机质来源[26]，本研究区域的 C/N 介于 13~196 之间，平均值为 39，根据沉积物 C/N 的评定标准，研究区域耕作层土壤以外源有机质为主，可能主要受当地农业活动影响。综合以上结果，Ni、Pb、Cr、TN、TOC 可能均来源于农业污染。

PC2 方差贡献率为 22.05%，在 Cu、Mn、Fe、Mg 上有较高载荷；其中，Cu、Mg 分别为环境背景值的 2.6 和 1.5 倍，已经产生了一定程度的累积。公路沿线土壤中的 Cu 一般来自于汽车部件的磨损[48]。Mn、Fe 均低于环境背景值，变异程度中等，说明金属 Mn、Fe 累积较少，可能因为农业灌溉、连续降水和地表径流造成流失。综上，Cu、Mn、Fe、Mg 可能受自然成土和交通污染的影响较大。

PC3 方差贡献率为 21.20%，在 TP、TOC 上有较高载荷，可能具有相似来源。根据研究区域的 C/N 比值可以推断土壤有机质主要来自于外界输入，所以，研究区域土壤中 TP、TOC 可能都来自于外源输入。

PC4 方差贡献率为 16.33%，在金属 Zn 上有较高载荷。Zn 元素在研究区域含量很高，是环境背景值的 27.5 倍，且变异系数达 28.1%，其富集程度受人类活动影响较大。一般研究表明，Zn 被制成抗氧化剂用于汽车轮胎和润滑油中，公路沿线周边土壤中 Zn 污染一般来自于此[35]。PC4 可能主要来源于交通污染。

3.4.2. 采样点间聚类分析

为辨析研究区域生态风险的主导因子，对 25 个点位的 8 种金属和理化指标进行聚类分析(欧式距离)，结果见图 4。研究区域耕作层样点聚为 3 类，第一类包括 S1、S2、S3、S6、S7、S13、S21 共 7 个点，其

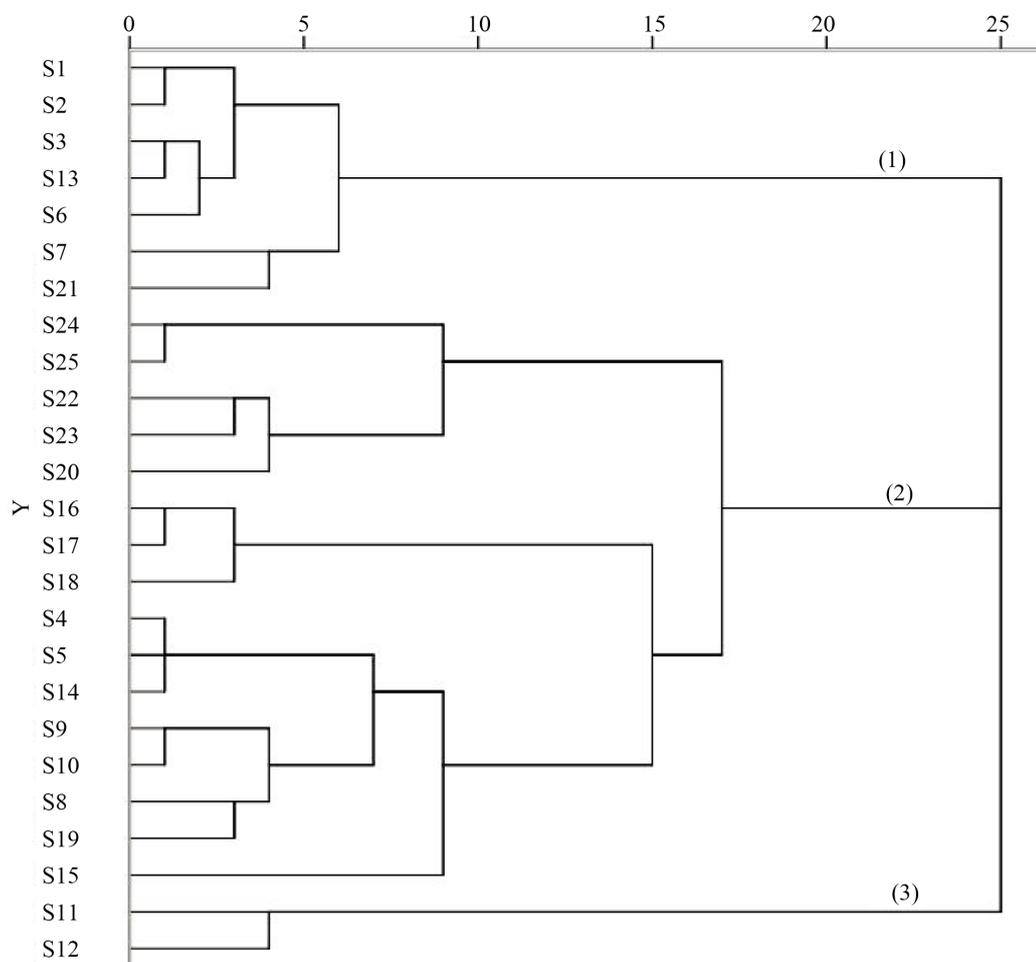


Figure 4. Clustering analysis shows the relevant association among the parameters was performed by a between groups linkage method using the squared Euclidean distance

图 4. 不同采样点水平聚类分析结果

中, S1、S2、S6 位于沿海高速的西北方向, S7、S13 紧邻公路, S21 离公路较远。这 7 个点位土样金属含量及理化指标数值均低于研究区域平均水平, 地累积指数分析显示这几个点位受金属 Zn 影响, 污染程度为重度; 富集因子结果显示这几个点位均受 Cu、Zn、Ni 的影响。盐城地处江苏省中部, 夏季盛行东南风和西南风, 采样时期点 S1、S2、S6 受交通污染影响较小。季辉[49]等研究发现, 交通源对沿线土壤的影响不是简单的随距离缩短而增大, 而是与不同路段、车流量、土壤粒径有一定关系, 这可能是 S3、S7、S13、S21 位于下风向, 但污染水平并不高的原因。

第二类包括 S4、S5、S8、S9、S10、S14、S15、S16、S17、S18、S19、S20、S22、S23、S24、S25 共 16 个点。这些点位土壤的金属含量与理化指标多在研究区域平均水平以上, 包含各变量的高峰值点, 其中, S4、S8、S16 位于沿海高速的下风向, S5、S14、S15 位于上风向; S9、S10、S18、S19、S20、S22、S23、S24 位于流域以北的稻田, S21、S25 位于流域以南的稻田。S15、S20、S23 分别是金属 Zn、Cu、Ni 潜在风险程度最高的点位, 这可能是交通排放, 干沉降、农业活动综合作用的结果[27] [35] [41] [43] [49]。

第三类为 S11 和 S12, 这两个点分别位于研究区域的西北段, 各指标数值基本是所有采样点中的最低水平, 可能是由于离公路和住宅区域较远, 受人为活动影响较小的原因。

3.4.3. 水稻田金属相关性分析

为进一步确认本研究区域影响金属累积的环境因子及污染来源[45] [35], 对金属总量、形态和理化指标进行 Pearson 相关性分析。由表 9 可知, 金属 Mn 与 Cu、Mn 与 Mg、Pb 与 Mg 显著相关, 相关系数分别为 0.535、0.658、0.557, 表明四者可能具有同源性; 结合主成分分析可推断出 Cu、Mn、Mg 受相同污染源影响的可能性较大。金属 Fe 与 Cu、Ni 具有显著相关($\alpha = 0.05$), 相关系数分别为 0.444、0.482, 三者可能具有同一来源。

金属五种赋存形态与营养盐之间的 Pearson 相关性见表 10。Cu 可交换态(F1)与 EC 显著负相关, 铁锰结合态(F3)与 TP、TOC 显著负相关, 有机质结合态(F4)与 pH 显著负相关。研究区域金属 Cu 主要以残渣态形式存在, 残渣态含量占总量的 78.84%, 对环境影响小, 残渣态(F5)与 EC 显著正相关, 其他可提取态均与营养盐含量呈显著负相关($P = 0.01$)。

与 Cu 类似, Zn、Fe 赋存形态与各理化指标无显著正相关。Mn 可交换态(F1)、铁锰结合态(F3)分别与 Eh 显著正相关($P = 0.01$), 说明研究区域金属 Mn 的两种可提取态可能对环境的电导率有一定贡献。Mg 的铁锰结合态(F3)与 TP 显著相关, 有机质结合态(F4)与 pH 显著相关; 残渣态(F5)与 EC 显著相关。Pb 的碳酸盐结合态(F2)与 Eh 显著正相关; 残渣态(F5)与 EC 显著正相关($P = 0.01$)。Ni 的碳酸盐结合态(F2)与 EC 显著正相关, 残渣态(F5)与 Eh 显著正相关。Cr 的铁锰结合态(F3)与 Eh 显著相关。

金属形态与土壤理化指标相关性分析表明, pH 与金属可提取态呈显著负相关, EC 一般与其呈显著正相关, 这与李立平[17]等人的研究结果一致。土壤 pH、EC 与成土母质、农业灌溉、污染排放关系密切, 说明研究区域 Cu、Mg、Ni 的累积可能是人为活动所致。

3.5. 生态风险评价结果比较

本研究发现 Zn 是 8 种金属中超背景值最多的元素, 含量高于王俊杰等的研究结果[46], 但低于方淑波等[9] [10]的研究结果。平均地累积指数为 4.15, 累积程度极严重; 平均变异系数为 28.10, 分布较不均匀, 说明受外界条件影响较大。Zn 的潜在生态风险指数与富集因子都是 8 种金属中最高的, 其中, Zn 的平均富集系数为 37.51, 属于高度污染, 与地累积指数的结果类似; Zn 的潜在生态风险指数平均值为 22.04, 对综合潜在生态风险指数贡献很大。但由于可利用态占比不高, 对生态环境影响很小。主成分分析结果显示 Zn 可能主要来自于残渣态含量占 Zn 全量的 70%, 所以 Zn 全量超标主要与非活性残渣态有关。

Table 9. Pearson's correlation of metal elements

表 9. 金属间的 Pearson 相关性

	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cr	Mg
Cu	1						
Zn	-0.055	1					
Mn	0.535**	0.385	1				
Fe	0.444*	-0.058	0.193	1			
Pb	0.025	-0.047	0.433*	0.014	1		
Cr	0.346	0.208	0.075	0.325	-0.359	1	
Mg	0.342	0.305	0.658**	0.171	0.557**	0.221	1
Ni	0.223	0.211	0.062	0.482*	-0.600**	0.676**	-0.047

*0.05 水平显著相关(双尾), **0.01 水平显著相关(双尾)。

Table 10. Pearson's correlation of metal speciation forms and physiochemical parameters
表 10. 重金属形态与理化指标的相关性

metal	speciation	TP	TN	TOC	pH	Eh	EC
Cu	F1	-0.487*	0.157	-0.257	-0.228	0.213	-0.522**
	F2	-0.370	0.166	-0.042	-0.216	0.195	-0.502*
	F3	-0.763**	-0.431*	-0.731**	0.227	-0.250	-0.394
	F4	-0.067	0.355	-0.034	-0.519**	0.515**	-0.406*
	F5	0.135	0.045	0.330	-0.189	0.200	0.657**
Zn	F1	-0.104	0.067	-0.085	-0.034	0.066	-0.182
	F2	0.122*	-0.069	0.054	0.094	-0.125	-0.046**
	F3	-0.209	-0.006	0.098	0.214	-0.208	-0.066*
	F4	-0.281**	0.204*	-0.096**	-0.244	0.258	-0.468
	F5	-0.081	0.217	0.230	-0.001**	-0.007**	-0.117*
Mn	F1	-0.258	-0.369	-0.286	0.188	-0.197	0.219**
	F2	0.104	0.482	0.419	-0.581	0.571	-0.042
	F3	-0.412*	-0.389	-0.097	0.411	-0.403	0.384**
	F4	-0.620	0.010	-0.226	-0.225	0.189	-0.233*
	F5	-0.042**	-0.416*	-0.112**	0.285	-0.303	0.440
Fe	F1	-0.103	-0.091	-0.417	-0.093**	0.080**	-0.348*
	F2	0.327	0.472	0.418	-0.398	0.405	-0.213**
	F3	0.740	0.439	0.608	-0.268	0.288	0.256
	F4	0.101*	0.445	0.176	-0.442	0.449	-0.389**
	F5	-0.403	-0.101	-0.164	-0.007	-0.002	0.019*
Pb ^a	F2	0.247	0.483	0.443	-0.350**	0.364**	0.005*
	F3	-0.328	0.509	0.159	-0.586	0.587	-0.310**
	F4	-0.313	0.482	0.040	-0.590	0.584	-0.477
Cr ^b	F5	0.199*	-0.552	-0.139	0.611	-0.612	0.418**
	F3	-0.569	0.015	-0.435	-0.200**	0.181**	-0.566*
	F4	0.013	-0.145	-0.398	-0.059	0.054	-0.179**
Mg ^c	F5	0.041	0.472	0.407	-0.408	0.417	0.144
	F2	0.561	0.338	0.604	-0.207	0.209	0.351*
	F3	0.234**	-0.038*	0.157**	0.213	-0.164	0.199
Ni	F4	0.188	-0.117	-0.030	0.153**	-0.163**	-0.045*
	F5	-0.350	-0.404	-0.143	0.308	-0.305	0.330**
	F1	-0.295	-0.142	-0.499	0.106	-0.112	-0.701
	F2	0.208*	0.004	0.339	0.067	-0.079	0.256**
	F3	-0.458	0.377	0.066	-0.502	0.502	-0.242*
	F4	-0.170**	-0.220*	-0.112**	0.045	-0.066	0.101
	F5	-0.189	0.381	0.237	-0.466**	0.450**	0.058*

*0.05 水平显著相关(双尾), **0.01 水平显著相关(双尾)。^aPb 元素 F1 形态低于检测限; ^bCr 元素 F1、F2 形态低于检测限; ^cMg 元素 F1 形态低于检测限。

Cu 的平均含量是国家二级标准的 2.63 倍, 变异系数 14.52; Ni 是国家二级标准的 1.23 倍, 变异系数 13.58; 两者累积、空间变异程度都不高, 说明受人类活动的影响较小。Cu 和 Ni 的地累积指数、富集因子仅次于 Zn, 污染水平为轻度 - 中度污染; 二者的毒性系数相同, 潜在生态风险指数结果也类似; 有效态 Cu 和有效态 Ni 含量都不高, 生物可利用性比较低, 对环境的潜在风险程度贡献较小。金属 Fe 与 Cu、Fe 与 Ni 具有显著相关性, Cu 与 Ni 相关性不显著, 但仍可能具有同源性。综合三种评价结果来看, Cu 和 Ni 对研究区域的影响为中等水平。徐庆生通过地累积指数法发现射阳河底泥沉积物为中度 - 轻度污染, 且研究区域主要受金属 Cu、Zn 的影响, 等级为二级; Cr、Pb、Ni 为轻度污染。王俊杰等通过潜在生态风险评价法发现盐城自然保护区光滩表层沉积物为生态危害程度轻微, 但是 Cr 对环境风险值贡献最大。Mn、Fe、Mg、Pb 和 Cr 的地累积指数均小于 0, 结果显示对环境没有风险。其中, Mg 的富集因子平均值为 2, 对环境的影响为中等风险程度; Mn 小于 2, 程度为轻度。Mg、Mn、Fe 的潜在生态风险指数介于 0.5~2 之间, 对环境的影响程度为轻度。Pb、Cr 的总量均低于盐城其他土地利用类型的测定结果[8, 46, 12], Pb 和 Cr 的空间变异系数分别为 24.41 和 24.69, 变异程度中度, 受外界影响较大。三种基于总量的评价方法均为低风险。金属 Pb 有效态占比较大, 有二次释放风险。

4. 结论

- 1) 研究区域土壤耕作层中, 金属 Zn 达到中度至重度污染; Ni、Cu 为轻度至中度污染; Mn、Fe、Pb、Cr、Mg 无污染。
- 2) 金属的变异程度、主成分分析结果均显示研究区域受人为活动影响较大。
- 3) 土壤理化指标与金属的相关性研究表明, 研究区域金属可能主要来源于公路交通污染, 分布主要受到农业活动和自然降水的影响。

基金项目

国家自然科学基金项目(41403064), 江苏省教育厅基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20140922), 国家自然科学基金委员会面上项目(41773081)。

参考文献 (References)

- [1] 高燕云. 射阳河口现代沉积速率及其重金属污染评价[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2011.
- [2] 吴云波, 杨浩明. 射阳河水环境综合整治对策研究与分析[J]. 污染防治技术, 2011(2): 44-47.
- [3] 李良忠, 杨彦, 蔡慧敏, 等. 太湖流域某农业活动区农田土壤重金属污染的风险评价[J]. 中国环境科学, 2013(S1): 60-65.
- [4] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2014(11): 1832-1838.
- [5] 赵凌宇, 杨浩, 王延华, 等. 云南斗南蔬菜地重金属分布及潜在生态风险评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2015(3): 91-98.
- [6] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005(12): 1499-1502.
- [7] Na, Z.H., Zhong, Y.X., Ming, Z.G., et al. (2012) Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Xiawan Port Based on Modified Potential Ecological Risk Index. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **22**, 1470-1477.
- [8] 方淑波, 贾晓波, 安树青, 等. 盐城海岸带土壤重金属潜在生态风险控制优先格局[J]. 地理学报, 2012(1): 27-35.
- [9] 方淑波, 贾晓波, 王玉, 等. 盐城海岸带表层土壤重金属的空间分布及其影响因素研究[J]. 海洋科学, 2011(5): 82-88.
- [10] 方淑波, 叶属峰, 贾晓波, 等. 盐城海岸带表层土壤重金属潜在生态风险分析[J]. 上海海洋大学学报, 2012(1): 86-91.
- [11] 孟庆峰, 杨劲松, 姚荣江, 等. 滩涂围垦区土壤重金属调查及生态风险评价——以盐城市弢港镇为例[J]. 农业环

境科学学报, 2011(11): 2249-2257.

- [12] 徐庆生, 王胤, 王晓辉, 等. 射阳河底泥重金属沿程变化分析及污染评价[J]. 环境保护科学, 2006(2): 69-72.
- [13] 薛民琪. 农业环境现状与面源污染防治对策研究——以盐城市为例[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2004.
- [14] Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Analytical Chemistry*, **51**, 844-851. <https://doi.org/10.1021/ac50043a017>
- [15] 俞振飞, 王国祥, 钱君龙, 等. SMT 法测定沉积物标准样品有机磷形态分析方法探究[J]. 中国环境监测, 2013(3): 117-122.
- [16] 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: 13-14.
- [17] 李立平, 王亚利, 冉永亮, 等. 铅冶炼厂附近农田土壤 pH 值和电导率与重金属有效性的关系[J]. 河北农业科学, 2012(9): 71-76 + 80.
- [18] Müller, G. (1969) Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River.
- [19] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 501.
- [20] 陆赛英, 朱明远 (1987) The Background Value of Chemical Elements in the Huanghai Sea Sediment. *Acta Oceanologica Sinica*, No. 4, 558-567.
- [21] 崔凤丽. 乌梁素海沉积物-水界面间磷的赋存形态分析及释放规律研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [22] 韦绪好, 孙庆业, 程建华, 等. 焦岗湖流域农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015(12): 2304-2311.
- [23] 于云江, 胡林凯, 杨彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2010(12): 1523-1527.
- [24] Loska, K., Wiechula, D. and Korus, I. (2004) Metal Contamination of Farming Soils Affected by Industry. *Environment International*, **30**, 159-165.
- [25] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015(6): 1069-1074.
- [26] 叶华香. 扎龙湿地沉积物营养盐和重金属空间分异规律及潜在生态风险研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2014.
- [27] Bartoli, G., Papa, S., Sagnella, E, et al. (2011) Heavy Metal Content in Sediments along the Calore River: Relationships with Physical-Chemical Characteristics. *Journal of Environmental Management*, **95**, S9-S14.
- [28] 臧飞, 王胜利, 南忠仁, 等. 工矿型绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价[J]. 环境科学, 2015(2): 497-506.
- [29] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006(1): 65-72.
- [30] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control. A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001.
- [31] 江敏, 阮慧慧, 梅卫平. 滴水湖沉积物重金属生态风险评价及主成分分析[J]. 安全与环境学报, 2013(3): 151-156.
- [32] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008(2): 112-115.
- [33] 许友泽, 刘锦军, 成应向, 等. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价[J]. 环境化学, 2016(1): 189-198.
- [34] 王晓钰. 基于重金属多形态-生物毒活性权重体系的生态危害指数模型[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2012(4): 183-186.
- [35] 陈景辉, 卢新卫, 翟萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险[J]. 应用生态学报, 2011(7): 1810-1816.
- [36] 廖启林, 范迪富, 金洋, 等. 江苏农田土壤生态环境调查与评价[J]. 江苏地质, 2006(1): 32-40.
- [37] 狄霖. 苏北平原河网区农田养分含量分布与磷素流失规律研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2011.
- [38] 肖峻. 宜兴地区农田土壤氮、磷空间分布特征及合理施用量的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [39] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012(4): 198-206.
- [40] 黄静. 西安市公园土壤的重金属含量水平及理化性质研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2009.
- [41] 陈长林, 李晓所, 张勤, 等. 公路交通对土壤重金属污染的研究[J]. 公共卫生与预防医学, 2006(6): 19-21.

- [42] 傅晓文. 盐渍化石油污染土壤中重金属的污染特征、分布和来源解析[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2014.
- [43] 汤洁, 韩维崢, 李娜, 等. 哈尔滨市城区大气重金属沉降特征和来源研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011(11): 3087-3091.
- [44] 陆泗进, 王业耀, 何立环. 湖南省某地农田土壤重金属生态风险评价研究[J]. 环境科学与技术, 2014(12): 100-105 + 117.
- [45] 陈春霄, 姜霞, 战玉柱, 等. 太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析[J]. 中国环境科学, 2011(11): 1842-1848.
- [46] 王俊杰, 黄阳, 黄雪, 等. 盐城滨海滩涂表层沉积物重金属生态风险评价[J]. 海洋通报, 2015(3): 353-360.
- [47] 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 环境科学, 2012(2): 599-605.
- [48] 赵健. 高速公路沿线农田土壤和水稻重金属含量的空间分布特征及其影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [49] 季辉, 赵健, 冯金飞, 等. 高速公路沿线农田土壤重金属总量和有效态含量的空间分布特征及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2013(2): 477-483.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org