

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.021

长江三角洲典型县域耕地土壤重金属污染生态风险评价

魏洪斌^{1,2} 罗 明^{1,2} 吴克宁^{2,3} 陈庭永^{2,3}

(1. 自然资源部国土整治中心, 北京 100035; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035;
3. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要: 为全面掌握长江三角洲地区典型县域耕地土壤重金属污染状况与生态风险特征,通过野外实地采样和室内土壤重金属含量化验分析,采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和潜在生态风险指数法对宜兴市县域耕地土壤中 As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn 6 种重金属元素进行污染和生态风险评价。结果表明,宜兴市耕地土壤重金属土壤污染总体较轻,耕地土壤重金属污染点位超标率为 10.27%,Cd、Cu、As、Hg、Pb、Zn 的超标率分别为 10.11%、0.88%、0.44%、1.49%、0.10%、0.35%,从超标率来看 Cd 和 Hg 为宜兴市主要污染元素,其中 Cd 的样本超标率高于全国耕地 Cd 的超标率。宜兴市耕地土壤重金属污染总体呈现“轻微”生态风险,生态风险贡献率较高的为 Cd,达到 57.46%,生态风险等级较高区域为丁蜀镇的东北部、张渚镇的东南部和徐舍镇的东北部区域。宜兴市耕地土壤重金属污染源可能主要来源于人为的化工生产活动。研究可为耕地土壤重金属污染预防控制治理提供理论依据,提高耕地资源安全利用水平。

关键词: 耕地土壤; 重金属污染; 生态风险; 典型县域; 长江三角洲地区

中图分类号: X825 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0200-10 OSID: 

Ecological Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil at Typical County Level in Yangtze River Delta

WEI Hongbin^{1,2} LUO Ming^{1,2} WU Kening^{2,3} CHEN Tingyong^{2,3}

(1. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China
2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China
3. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: For a comprehensive understanding of the pollution characteristics and ecological risk of heavy metals of farmland soil in Yingxing County of Yangtze River Delta, China, the cadmium (Cd), arsenic (As), copper (Cu), zinc (Zn), mercury (Hg) and lead (Pb) pollution situations were evaluated by using the single factor index, Nemerow pollution index and Hakanson potential ecological risk index, and the theoretical basis was provided for the safe use of regional cultivated land. The results showed that the heavy metal pollution of cultivated soil in Yixing County was generally light, and 10.27% of the soil samples had heavy metals concentrations higher than the risk screening values for soil contamination of agricultural land. The over standard rates of Cd, Cu, As, Hg, Pb and Zn were 10.11%, 0.88%, 0.44%, 1.49%, 0.10% and 0.35%, respectively. Cd and Hg were the main contaminants in Yixing County, the over standard rate of Cd was higher than that of cultivated land in China. In terms of the ecological risk, heavy metals of farmland soil in Yixing County showed a “light” ecological risk, with Cd accounting for 57.46% of the total ecological risk. The north-east of Dingshu Town, Xushe Town and the south-east of Zhangzhu Town were three areas with high ecological risk in Yixing County. The contamination of farmland soils in Yixing County may mainly come from man-made chemical production activities. Based on the ecological risk assessment of heavy metal pollution in cultivated soil of counties in the Yangtze River Delta region, the research result can provide the basis for the prevention and control of heavy metal pollution in cultivated soil, and improve the level of safe utilization of cultivated land resources.

Key words: cultivated soil; heavy metal pollution; ecological risk; typical county; Yangtze River Delta

0 引言

中国一直以来实施最严格的耕地保护政策,而耕地土壤是农业生产的基本资料,也是人类生产的物质基础。然而,随着我国城镇化、工业化及农业现代化的不断推进,耕地土壤重金属污染呈现不断加剧趋势,耕地土壤质量状况直接影响粮食安全与人体健康。

近年来,土壤污染问题日益引起政府部门和科研机构的重视,专家学者开展了土壤污染的相关研究。文献[1-3]通过耕地土壤重金属污染案例资料的现状调查和来源分析,研究我国耕地土壤重金属污染状况,对工业和农业地区土壤重金属污染现状及风险评价进行分析,提出农田修复和产地环境安全保障体系的系列建议以及污染防治对策,综合分析了近年来国内外有关农田土壤重金属的污染现状和来源,阐述了国内外现行的土壤重金属污染评价方法的研究进展,提出了当前该领域存在的问题并对今后的研究进行了展望^[4]。在区域层面主要以行政区划为单元进行研究,如新疆于田县、喀什地区^[5-6],或者以行政区的局部为研究区,如针对张掖市甘州区北部进行土壤重金属污染特征和生态风险评价^[7],HUANG 等^[8]对中国东南典型城郊区农田土壤重金属污染及健康风险进行评价,陈宗娟等^[9]对天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤表层重金属含量开展研究,文献[10-12]对巢湖流域、太湖流域和三峡库区土壤重金属的污染分布特征与风险评价开展了相关研究;文献[13-14]对煤田露天矿区和冶炼厂周边进行了研究,分析重金属含量水平、关联特征和污染程度,另外文献[15-16]对城市内河流沉积物的重金属含量进行了系统分析,评估重金属污染程度和潜在危险,识别重金属来源;在土壤重金属污染生态风险评价方面,魏洪斌等^[17]开展了重金属污染农用地风险分区与管控研究,文献[18-19]以煤炭基地复垦村庄、北京东南郊为研究区,评价了土壤重金属污染的生态风险,文献[20-23]对城市河流、水道、湿地、公园沉降等重金属污染的生态风险进行了评价,海岛周边海域沉积物、水库沉积物、湿地沉积物重金属污染分布特征和生态风险评价也是学者关注的重点^[24-26];在生态风险评价方法上,主要采用生命周期评价法、三角随机模拟模型进行风险评价,对比分析不同评价方法对重金属污染总体程度评价结果的差异^[27-29],GIS-RS、地统计学方法在土壤重金属污染评价方面也得到了应用^[30-31];污灌农田、矿区周边农田及冶炼厂也是土壤重金属污染生态风险的关注重点,如对微小型

铅锌矿点周边农田进行土壤和植物采样,进行重金属污染特征的分析评价,探讨对当地居民的潜在健康风险^[32];通过对冶炼厂土壤重金属污染状况进行评价,并提出污染土壤修复治理的工程措施^[33];针对长期污灌条件下的农田,根据污灌区土壤和作物中重金属含量评估重金属污染现状、潜在生态风险和潜在健康风险^[34];为研究多金属矿区尾矿库土壤重金属的垂直迁移与生态风险,苏耀明等^[35]对多金属矿区土壤进行分层采集土壤样品并检测不同深度土壤中重金属总量及有效态含量;串丽敏等^[36]对土壤重金属污染修复技术的研究进展进行了综合分析,在国内外土壤重金属防治技术方法与实践基础上提出今后在土壤重金属污染修复领域的发展方向。总体看来,当前围绕重金属污染的调查分析、污染评价、生态风险评估、修复技术方法等开展了研究工作,但针对县域耕地土壤的重金属污染调查评价和生态风险评估的研究相对不足。

本文评估县域耕地土壤重金属污染的生态风险,服务于耕地土壤的系统保护修复和安全利用。依据研究区域开展的多目标地球化学调查数据,开展重金属污染耕地土壤生态风险评价研究,确定其生态风险等级,制定生态风险管控对策,以逐步改善重金属污染耕地土壤环境质量,为区域耕地重金属污染土壤风险控制和生态环境安全提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江三角洲位于长江的下游地区,包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省,共 41 个城市,濒临黄海与东海,是长江入海之前形成的冲积平原。长江三角洲地区是我国经济发展最活跃、城镇化和工业化进程最快、人口密度最大的区域之一。随着长江三角洲地区社会经济的不断发展,在城市化推进和工业化生产过程中排放废水、废气,农药、化肥在农业生产活动中大量投入使用,造成农用地土壤中重金属累积和超标现象日趋严重。王信凯等^[37]以张家港市为例,研究了长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征及来源,杭小帅等^[38]分析了长江三角洲地区土壤重金属污染现状特点及成因,在此基础上提出了该地区重金属污染的防范措施和不同污染类型的治理与调控措施,邵学新等^[39]对长江三角洲典型地区张家港市进行了重金属的污染评价,钟晓兰等^[40]对长江三角洲地区江苏省太仓市土壤重金属污染特征及潜在风险进行了评价,马成玲等^[41-42]对长江三角洲典型县级市常熟市进行了土壤重金属污染评价方法研究,并对该地区进行了农田土壤重金

属污染状况调查与评价。可以看出近年来对长江三角洲地区土壤重金属污染状况的研究较少,本文在前人研究的基础上,分析宜兴市耕地土壤重金属污染生态风险,识别土壤重金属污染来源。

宜兴市地处江苏省南端、沪宁杭三角中心,位于北纬 31°7′~31°37′,东经 119°31′~120°3′,处于我国东南丘陵向长江中、下游平原的过渡地带(图 1)。宜兴市位于亚热带季风气候区,全年温暖湿润,市域平原地区多为水稻土,山地岗丘多为棕壤、红黄壤和黄棕壤;境内河流密布、纵横交叉,灌溉、运输方便,是太湖地区重要的商品粮生产基地之一。作为长江三角洲地区的典型县域,宜兴农业生产活动发达,工矿企业类型多样。在社会经济持续发展的同时,由于城镇化和工业化的快速推进,宜兴市的工农业生产和生活活动使得境内存在局部土壤重金属污染,部分重金属污染严重,已经引起人们的重视。

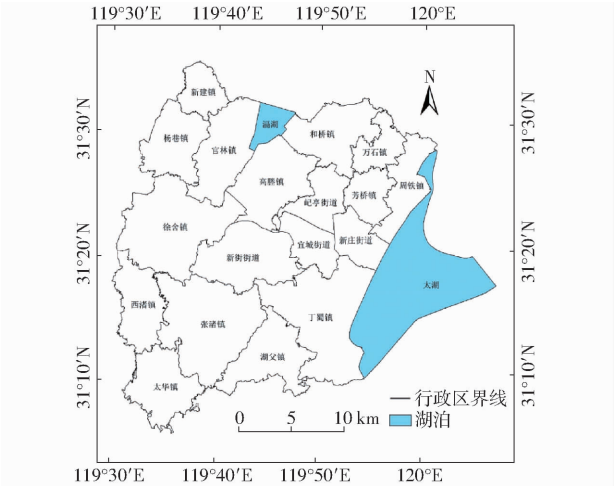


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location map of study area

1.2 样品采集与处理

在宜兴市境内的旱地、水田、水浇地 3 种耕地类型上,土壤采样点按照网格化布置,对宜兴市农用地 0~20 cm 的耕层采集 1 139 个土壤样品(图 2)。采用 GPS 确定土壤采样点的地理位置,使用不锈钢土钻采集土壤样品,垂直入土至规定的深度。每个采样点的取土深度、土壤重量、上层和下层的比例均保持均匀一致。土壤样品由田块内的各样点土壤按照四分法保留 1 kg 左右。土壤样品带回实验室经自然风干,去除石块、植物根茎等杂物后测定土壤 pH 值以及重金属 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn 含量。对土壤样品研磨成粉末过 100 目尼龙筛,采用美国 EPA 制定的标准方法对土壤重金属总量进行消解,制作土壤样品标准溶液,土壤中的 Cd 含量采用石墨炉原子吸收法测定,Hg、As 含量采用还原气化-原子荧光光谱法测定,Pb、Cu、Zn 含量采用电感耦合等离子体

原子发射光谱法。样品测定偏差控制在 ±10% 以内,同时选 10% 的样品做重复测试,相对误差在 ±5% 以内。

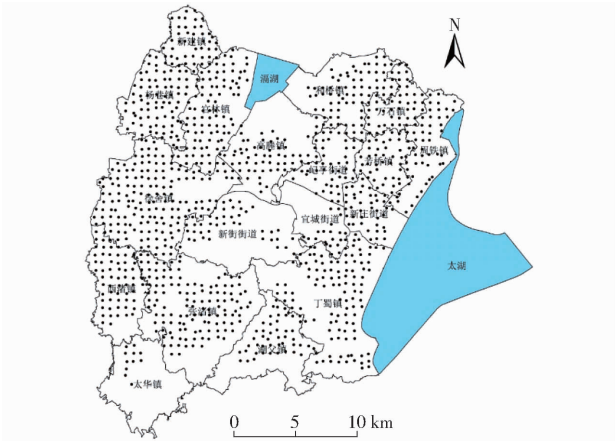


图 2 研究区采样点分布图

Fig.2 Distribution map of farmland soil sampling sites in study area

1.3 评价方法与标准

当前土壤重金属污染评价的方法有非生物指标法、生物指标法和数学模型指标法,这些方法都可以反映重金属的污染程度,建立在数学模型基础上的重金属评价指标方法应用较为广泛,因此本文采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法评价耕地土壤重金属污染程度,采用潜在生态风险指数法进行生态风险评价,各重金属元素的毒性响应系数依据 HAKANSON 提出的参考值。

单因子污染指数法:针对单一的污染物采用单因子污染指数法进行土壤重金属污染评价。单项污染指数计算公式为

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中 P_i ——重金属污染物 i 的单项污染指数
 C_i ——重金属污染物 i 的实际含量
 S_i ——重金属污染物 i 的单项评价含量的限量标准值

单因子污染指数的计算以基线值为限量标准值, $P_i \leq 1$ 时,表示土壤未受污染, P_i 越小,表示土壤越清洁; $P_i > 1$ 时,表示土壤受到污染, P_i 越大,土壤污染越严重。土壤单因子污染指数分级标准见表 1。

表 1 土壤单因子污染指数分级标准

Tab.1 Classification standard of soil single factor

pollution index

污染等级	单因子污染指数	污染水平
I	[0,1]	无污染
II	(1,2]	轻度污染
III	(2,3]	中度污染
IV	>3	重度污染

内梅罗综合污染指数法:该方法是在单因子污染指数法基础上发展起来的,同时考虑了重金属污染物的平均值和最大值,污染指数计算公式为

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{imax}^2 + \overline{P_i}^2}{2}} \tag{2}$$

式中 P_N ——土壤重金属污染内梅罗综合污染指数

P_{imax} ——土壤重金属污染元素单因子污染指数的最大值

土壤内梅罗综合指数分级标准见表 2。

表 2 土壤内梅罗综合指数分级标准

Tab.2 Criteria for grading of soil composite evaluation indices

评价等级	P_N	评价等级	污染水平
I	[0, 0.7]	安全	无污染
II	(0.7, 1.0]	警戒限	轻微污染
III	(1.0, 2.0]	轻度超标	轻度污染
IV	(2.0, 3.0]	中度超标	中度污染
V	>3.0	重度超标	重度污染

潜在生态风险指数法:潜在生态风险指数法目前广泛应用于土壤环境生态风险研究,在风险评价中不仅考虑了重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,应用范围不断拓展。根据该方法,土壤中重金属的潜在生态风险系数及潜在风险指数计算公式为

$$C_f^i = \frac{C_s^i}{C_n^i} \tag{3}$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \tag{4}$$

$$E_f^i = T_f^i C_f^i \tag{5}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_f^i = \sum T_f^i C_f^i \tag{6}$$

式中 C_s^i ——土壤中重金属 i 的实测含量
 C_n^i ——土壤重金属 i 的背景值或评价基准值
 C_f^i ——土壤重金属 i 的单项污染指数

C_d ——土壤重金属的综合污染程度
 T_f^i ——土壤重金属 i 的毒性响应系数(As 为 10,Cd 为 30,Cu 为 5,Hg 为 40,Pb 为 5,Zn 为 1)
 E_f^i ——土壤重金属 i 的潜在生态风险系数
 RI ——多种重金属的综合潜在生态风险指数
土壤重金属污染潜在生态风险评价分级标准见表 3。

表 3 土壤重金属污染潜在生态风险评价分级标准

Tab.3 Grading standard for potential ecological risk assessment of soil heavy metal pollution

等级	潜在生态风险 系数 E_f^i	潜在生态风险 指数 RI	风险等级
I	[0,40]	[0,150]	轻微风险
II	(40,80]	(150,300]	低风险
III	(80,160]	(300,600]	中风险
IV	(160,320]	(600,1200]	高风险
V	>320	>1200	极高风险

1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 和 Excel 2010 进行土壤重金属含量的描述性统计分析、相关分析和主成分分析等,采用 ArcGIS 10.3 软件进行反距离权重(IDW)插值和空间分析及相关图件制作等。在插值和空间分析前,应用 ArcGIS 10.3 软件中“地统计分析”功能模块进行数据的空间连续性和正态分布检验和转化,通过数据标准化处理使其符合插值的要求。

2 结果与分析

2.1 耕地土壤重金属污染评价

对宜兴市耕地土壤样品 6 种重金属含量进行数学统计分析,其结果如表 4 所示,Cd、Cu、Pb、Zn 4 种重金属的数学统计中偏度和峰度均较大,说明变化幅度大,表示大量土壤样品集中在高含量区域,与重金属含量的平均值偏离较远,且明显高于土壤重金属背景值,呈现高累积特征。

表 4 宜兴市耕地土壤重金属含量特征

Tab.4 Characteristics of heavy metal contents in arable land soil in Yixing County

参数	最小值/(mg·kg ⁻¹)	最大值/(mg·kg ⁻¹)	平均值/(mg·kg ⁻¹)	标准差/(mg·kg ⁻¹)	偏度	峰度	变异系数/%
As 含量	2.410	34.80	8.88	2.720	2.088	11.476	30.7
Cd 含量	0.028	7.18	0.22	0.280	16.019	351.387	125.4
Cu 含量	14.400	593.00	29.33	20.510	20.410	523.037	70.0
Hg 含量	0.018	1.34	0.13	0.078	4.941	58.112	60.8
Pb 含量	21.100	434.00	38.43	15.180	16.973	413.018	39.5
Zn 含量	34.000	3032.00	75.08	91.800	29.611	948.658	122.3

宜兴市耕地土壤 pH 值平均值为 6.39,最小值为 4.13,最大值为 8.23,标准差为 0.86,偏度为

0.071,峰度为 -0.545,变异系数为 13.5%,总体上宜兴市耕地土壤 pH 值呈中性或弱酸性,在 1139 个

土壤样品中,只有 281 个土壤点位呈弱碱性,其余土壤点位 pH 值均呈中性或弱酸性。以 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》农用地土壤污染风险筛选值作为单因子指数法评价的耕地土壤质量参比值,并针对各个土壤点位 pH 值选择不同的二级评价标准。宜兴市耕地土壤 6 种重金属污染评价结果如表 5 所示。

表 5 宜兴市耕地土壤重金属污染状况评价
Tab.5 Assessment of heavy metal pollution of cultivated soil in Yixing County

元素	超标率/%	超标倍数	污染水平	
			单因子指数法	综合污染指数法
As	0.44	0.18	轻微污染	重度污染(8.96)
Cd	10.11	1.00	重度污染	
Cu	0.88	1.76	重度污染	
Hg	1.49	0.28	轻微污染	
Pb	0.10	0.24	无污染	
Zn	0.35	2.70	轻度污染	

在宜兴市 1 139 个耕地土壤样点中,有 117 个土壤样点存在重金属超标情况,超标率为 10.27%,6 种重金属均存在超标情况,超标率由大到小依次为 Cd、Hg、Cu、As、Zn、Pb,从重金属污染超标率来看,超标最严重的为 Cd,土壤样本超标率为 10.11%,平均超标 1 倍,是宜兴市耕地土壤重金属污染最主要的元素,污染严重的样点达到重度污染水平;其次污染较严重的为 Hg,有 1.49% 的土壤样点超标,平均超标 0.28 倍,达到重度污染水平;其余

4 种重金属 As、Cu、Pb、Zn 的污染超标率依次为 0.44%、0.88%、0.10%、0.35%;根据单因子指数法评价得到 6 种重金属元素污染的超标倍数由大到小分别为 Zn、Cu、Cd、Hg、Pb、As。总体看来,宜兴市耕地土壤重金属的内梅罗综合污染指数高达 8.96,达到重度污染水平。

2.2 耕地土壤重金属污染空间分布

土壤作为在空间分布上呈现非均匀、高度变异性的混合体,直接影响重金属污染状况,因此野外采集的土壤样品并不能代表整个区域耕地土壤的污染状况,只反映了样点本身的土壤质量状况,为全面直观地掌握研究区耕地土壤的重金属污染状况,借助 ArcGIS 软件,根据已有的研究成果,采用 IDW(反距离权重)插值法可以分析研究区耕地土壤重金属污染和生态风险的空间分布。

通过对 6 种重金属污染状况进行插值分析(图 3)看出,Cd 在宜兴市耕地土壤污染中污染程度最严重、分布面积最广,在丁蜀镇、徐舍镇、张渚镇出现重度污染现象,这 3 个城镇及周边地区耕地土壤中重金属 Cd 含量的最高值达到 11.3 mg/kg;在丁蜀镇、张渚镇、太华镇、徐舍镇、官林镇的部分地区出现中度污染,部分乡镇出现轻微、轻度污染,剩余部分乡镇为无污染的清洁状态。Cu 和 Zn 也表现出区域性污染特征,在官林镇 Cu 出现中度和重度污染现象,在张渚镇 Zn 出现中、重度污染现象。土壤中 As、Hg、Pb 基本为清洁状态,只在局部区域存在轻微污染现象。

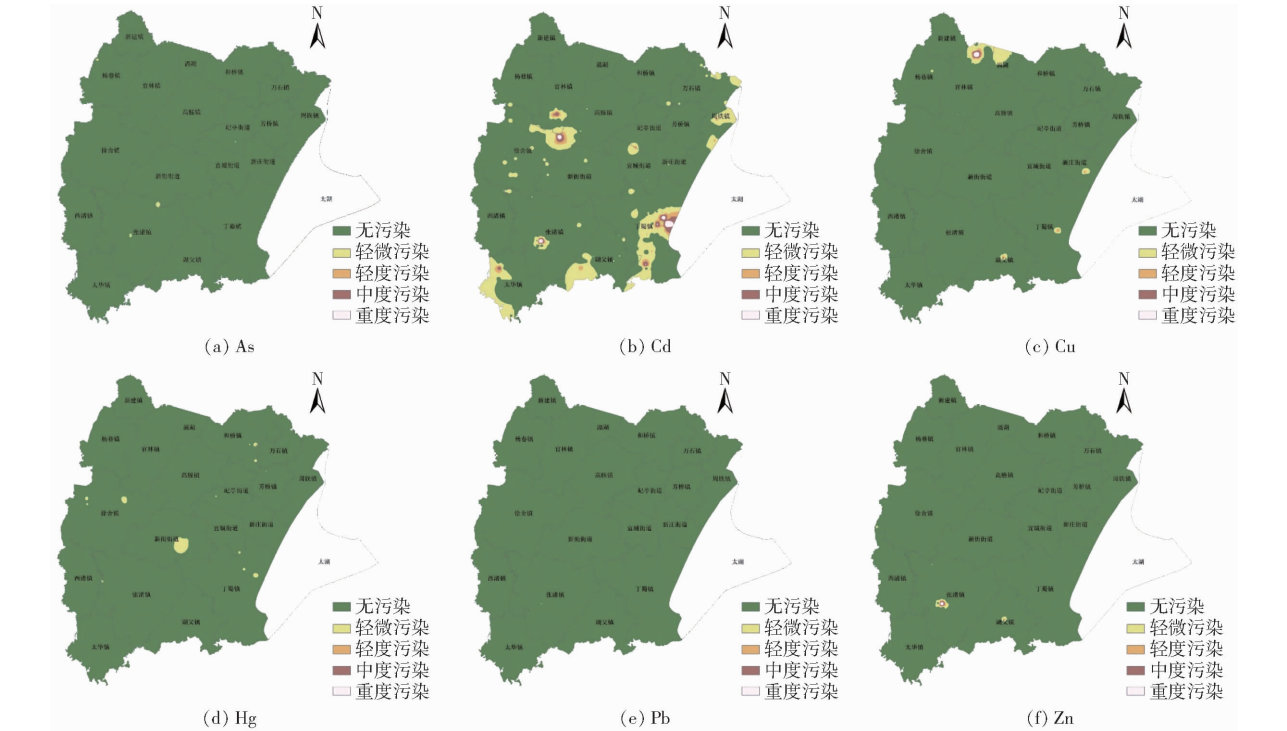


图 3 宜兴市耕地土壤不同重金属污染水平分布
Fig.3 Distribution of heavy metal pollution in cultivated soils of Yixing County

采用内梅罗综合污染指数法对宜兴市耕地土壤重金属污染进行综合评价,宜兴市耕地土壤重金属综合污染空间分布如图 4 所示。由图 4 可以看出,宜兴市部分耕地污染较为严重,在丁蜀镇、徐舍镇、张渚镇、太华镇出现重度污染现象,在丁蜀镇、张渚镇、太华镇、徐舍镇、官林镇等乡镇的部分区域出现中度污染现象,此外,上述乡镇也存在轻微、轻度污染现象,只有西渚镇等个别乡镇显示为无污染的清洁状态。内梅罗综合污染指数评价结果过于强调污染指数最大的污染物对土壤环境质量的作用和影响,即突出土壤中污染程度最重的重金属,使其对土壤环境质量评价的客观准确度不够高,重金属 Cd 在综合污染指数中占据了较大的比重,未完全反映重金属的污染特征,在一定程度上增加了重度污染的范围。

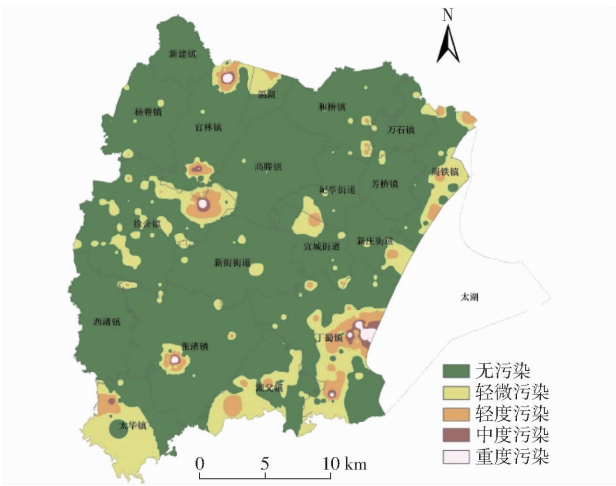


图 4 宜兴市土壤重金属综合污染水平分布
Fig. 4 Distribution of heavy metal pollution in soil of Yixing County

2.3 耕地土壤重金属污染生态风险评价

通过计算宜兴市耕地土壤重金属潜在生态危害指数,由表 6 可以看出,6 种重金属的潜在生态风险系数均属于轻微风险程度,但重金属 Cd 的潜在生态风险系数最大,市域范围内农用地土壤重金属污染综合潜在生态风险指数为 38.29,生态风险程度属于轻微风险,Cd 对生态风险指数的贡献率达到 57.46%,是耕地土壤重金属污染潜在生态风险最主要的污染元素。

利用 ArcGIS 软件,采用 IDW 方法分析宜兴市潜在生态风险指数的空间分布:通过对宜兴市耕地重金属潜在生态风险指数的空间表达,其结果与内梅罗综合污染指数的评价结果具有一致性,生态风险较高的区域主要有 3 处:丁蜀镇的东北部、张渚镇的东南部和徐舍镇的东北部(图 5)。宜兴市除丁蜀镇、张渚镇和徐舍镇外,大部分区域呈现轻微生态风

险。内梅罗综合污染指数的计算过程中含有评价参数中最大的单项污染分指数,宜兴市耕地土壤重度污染的重金属对土壤质量的影响最为严重的是 Cd 污染,而在潜在生态风险评价中 Cd 的毒性响应系数较高,因而潜在生态风险分布与内梅罗综合污染分布具有空间相似性。整体看来,宜兴市耕地重金属污染生态风险属于轻微风险类型。

表 6 宜兴市耕地土壤重金属污染生态风险评价结果

Tab.6 Ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in Yixing County

参数	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
毒性响应系数	10	30	5	40	5	1
评价基准值	25	0.3	100	0.5	300	300
重金属含量平均值/ (mg·kg ⁻¹)	8.88	0.22	29.33	0.13	38.43	75.08
潜在生态风险系数	3.55	22.00	1.45	10.4	0.64	0.25
风险等级	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微
综合潜在生态风险指数	38.29					
综合风险等级	轻微风险					

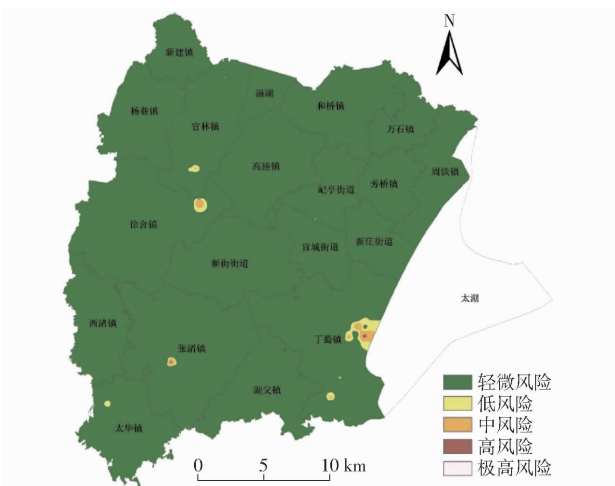


图 5 宜兴市耕地土壤重金属潜在生态风险等级分布
Fig. 5 Potential ecological risk distribution of heavy metals in cultivated soils of Yixing County

3 讨论

3.1 耕地土壤重金属总体污染状况

宜兴市耕地土壤中,重金属超标率 10.27%,略低于全国耕地土壤点位超标率(19.4%);其中轻度、中度和重度污染点位超标率分别为 10.18%、1.32%和 1.14%,根据《全国土壤污染调查公报》全国耕地轻度、中度和重度污染点位比例分别为 2.8%、1.8%和 1.1%,与全国耕地污染状况相比,宜兴市轻度污染点位超标率明显高于全国,中度和重度污染状况与全国基本一致。从重金属污染类型来看,宜兴市耕地土壤中 Cd 的样本超标率为 10.11%,全国耕地 Cd 的污染超标率为 7.0%,比全

国耕地 Cd 的超标率高 3.11 个百分点,其余 5 种重金属 Cu、As、Hg、Pb、Zn 的超标率依次为 0.88%、0.44%、1.49%、0.10%、0.35%,全国耕地 Cu、As、Hg、Pb、Zn 的超标率依次为 2.1%、2.7%、1.6%、1.5%、0.9%,宜兴市 5 种重金属的点位超标率均低于全国耕地污染状况,超标倍数较高的重金属为 Cd、Cu、Zn,分别超标 1.00、1.76、2.70 倍;从超标率来看,宜兴市主要的重金属污染类型为 Cd、Hg。

3.2 耕地土壤重金属污染来源分析

主成分分析和相关性分析可以较好地辨析土壤重金属污染的来源。根据宜兴市耕地土壤重金属元素的相关性分析结果(表 7,括号中数据表示相关性显著的显著水平)可知,Cd、Hg、Pb、Zn 与 Cd、Cu、Hg、Pb 两组呈两两显著正相关($P < 0.05$),没有体现出独立性,说明这些重金属元素存在同源可能性。

表 7 土壤重金属元素相关系数

Tab.7 Correlation of heavy metal elements in soil

	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
As	0.067 (0.012)	0.041 (0.086)	-0.153 (0)	0.128 (0)	0.091 (0.001)
Cd		0.095 (0.001)	0.083 (0.003)	0.683 (0)	0.751 (0)
Cu			0.055 (0.031)	0.229 (0)	0.181 (0)
Hg				0.201 (0)	0.081 (0.003)
Pb					0.832(0)

根据主成分分析结果(表 8)可知,取特征值大于 1 的主成分,2 个主成分反映了宜兴市 62.755% 的农用地土壤重金属含量信息。第一主成分的贡献率为 43.518%,Zn、Pb、Cd 元素有很高的正载荷;第二主成分的贡献率为 19.237%,Zn、Cd、As 有很高的正载荷。由于宜兴市耕地土壤重金属污染较为严重,所提取的主成分不可能反映土壤背景值,因此这两个主成分反映了两个可能的污染途径。

表 9 宜兴市耕地重金属污染特征比较

Tab.9 Comparison of heavy metal pollution characteristics of cultivated land in Yixing County

项目	重金属平均含量/(mg·kg ⁻¹)						综合评价
	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn	
污灌耕地	18.5	2.340	34.21	0.950	76.19	96.47	重度
非污灌耕地	11.2	0.170	10.12	0.240	19.37	16.14	中度
背景基准值	9.4	0.085	23.40	0.025	22.00	64.80	
T 检验	2.97	-0.51 **	-0.14	3.01	1.79 **	-0.67 *	
Sig. 值	0.005	0.629	0.870	0.003	0.067	0.489	

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 显著水平上相关性显著。

表 8 主成分负荷和特征值

Tab.8 Principal component load and eigenvalues

组分	第一主成分	第二主成分
Zn	0.930	0.045
Pb	0.924	-0.021
Cd	0.860	0.030
Cu	0.297	-0.031
As	0.150	0.762
Hg	0.203	-0.755
累积组分贡献率/%	43.518	19.237

通过对宜兴市污灌耕地和非污灌耕地做进一步的空间定量分析,进一步揭示了宜兴市耕地土壤重金属可能的污染源。虽然宜兴市污灌耕地和非污灌耕地土壤呈现出不同程度的重金属污染,但是污灌耕地和非污灌耕地土壤中重金属(As、Cd、Cu、Hg、Pb、Zn)含量差异比较明显(表 9)。污灌耕地重金属含量显著高于非污灌耕地,结合主成分分析结果,可以推测,宜兴市耕地土壤 Cd 污染可能主要是由相关工矿企业生产活动造成的。同时宜兴市农业生产活动中投入使用大量农用物资,也可能会导致耕地土壤重金属污染,是耕地土壤重金属累积的重要影响因素,这可能与第二主成分中正载荷较高的 Zn、Cd、As 有关。宜兴市耕地土壤重金属含量的相关性分析结果显示:Cd 的超阈值分布与工业废水排放有关,发现 Cd 污染传输途径主要是灌溉用途的河流,通过分析灌溉河网分布和色料企业空间位置发现,当地土壤中 Cd 污染的主要来源是附近色料企业。As 因长期累积而造成面状地块的含量高于背景值;Cu 和 Hg 的随机因素较大,主要由固体废弃物堆放造成了局部重金属浓度的升高,污染的范围一般以废弃堆为中心向四周扩散。Pb、Zn 主要与交通工具的污染物排放累积有关。汽车尾气排放及汽车轮胎磨损产生的大量含重金属的有害气体和粉尘等是大气中重金属的主要来源,主要分布在工矿的周围和公路、铁路的两侧,经自然沉降和雨淋沉降进入土壤。

一般土壤中重金属污染的来源是多途径的,主要来源于大气沉降、农药及化肥和塑料薄膜的使用、污水灌溉、污泥施肥、含重金属的废弃物堆积、金属矿山酸性废水排放等。根据宜兴市土壤重金属元素主成分分析结果,第一主成分所示的重金属污染为 Zn、Pb、Cd,可能来源于宜兴市域范围内的工矿业生产活动。宜兴市域周边乡镇企业发达,通过对宜兴市实地调研和查阅相关文献发现,城镇中心地带及周边交通便利的区域主要分布有陶瓷、紫砂、玻璃、材料、化工、机械、纺织、电子等行业,这些行业开设的化工厂、陶瓷厂、电子厂、纺织厂、机械厂等企业生产过程中排放大量废水,由于城镇工业化的迅速发展,大量的工业废水涌入河道,使城市污水中含有许多的重金属离子,城市污水包括生活污水、商业污水和工业废水,使用经过一定处理的城市污水灌溉农田、森林和草地,重金属离子随着污水灌溉而进入土壤。随着大量的市政污泥进入耕地,污泥中含有大量的有机质和氮、磷、钾等营养元素,但同时污泥中也含有大量的重金属,使耕地土壤中的重金属含量在不断增高。

结合宜兴市主成分分析,第二主成分中 Pb、Cu、Hg 为负载荷,因此推测宜兴市耕地土壤 Pb、Cu、Hg 污染主要是由于城镇地区化工企业造成的。有关研究表明:宜兴市由于人为排放源进入环境中的 Cd 年总量可达 43.5 kg,其中 90% 排放进入了水体,9.5% 的 Cd 排放进入了土壤,极少量排放进入大气。其中不同污染源排放占比由大到小为:工业生产(62.1%)、水产养殖(9.7%)、废物/水处理(9.3%)、生活消费(8.2%)、农业种植(5.9%)、畜

禽养殖(4.8%)。从总量来看,水体中 Cd 排放的主要来源是色料生产,占比约为 67.6%,土壤中 Cd 的来源主要是使用了含有 Cd 的污水灌溉,以及居民的粪尿,占比约为 73.5%,因此人为排放 Cd 的主要来源为色料生产,占总排放量的 61.1%。其次当地农业生产过程中施用含有 Pb、Hg、Cd、As 等的农药和不合理地施用化肥,也可以导致土壤中重金属的污染。一般过磷酸盐中含有较多的重金属 Hg、Cd、As、Zn、Pb,磷肥次之,氮肥和钾肥含量较低,但氮肥中 Pb 含量较高,其中 As 和 Cd 污染严重。这可能与第二主成分中正载荷较高的 As、Zn、Cd 元素有关。

4 结论

- (1)宜兴市耕地土壤重金属污染以轻度污染为主,局部地区呈现重度、中度污染,其中 Cd 在部分地区呈现重度污染,与全国耕地污染状况相比,宜兴市主要污染元素是 Cd,从重金属元素超标率来看,宜兴市主要的重金属污染类型是 Cd 和 Hg。
- (2)宜兴市耕地土壤重金属生态风险程度属于轻微污染,Cd 是耕地土壤重金属污染潜在生态风险最主要的污染元素,其对生态风险指数的贡献率达到 57.46%,其余元素均表现为轻微生态风险;在空间分布上,生态风险较高的地区主要分布在丁蜀镇的东北部、张渚镇的东南部和徐舍镇的东北部。
- (3)宜兴市耕地土壤重金属污染主要来源于人为排放源,其中工矿业生产活动是土壤重金属污染的主要污染源,排出的废水经河流等灌溉系统进入耕地土壤;Cd 污染主要来源为企业的色料生产,其余重金属污染与工业生产、污水灌溉等密切相关。

参 考 文 献

[1] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等.我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J].环境科学与技术,2014,37(增刊2):223-230.
CAI Meifang, LI Kaiming, XIE Danping, et al. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(Supp. 2): 223 - 230. (in Chinese)

[2] YANG Qianqi, LI Zhiyuan, LU Xiaoning, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642(2):690-700.

[3] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等.中国农田重金属问题的若干思考[J].土壤学报,2013,50(1):186-194.
ZENG Xibai, XU Jianming, HUANG Qiaoyun, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 186 - 194. (in Chinese)

[4] 张继舟,王宏韬,倪红伟,等.我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析[J].土壤与作物,2012,1(4):212-218.
ZHANG Jizhou, WANG Hongtao, NI Hongwei, et al. Current situation, sources and diagnosis method analysis of heavy metal contamination in agricultural soils[J]. Soil and Crop, 2012, 1(4): 212 - 218. (in Chinese)

[5] 陈云飞,曾妍妍,周金龙,等.新疆于田县绿洲区土壤重金属空间分布特征与影响因素[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):263-273.
CHEN Yunfei, ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil heavy metal contents in oasis area of Yutian County, Xinjiang[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 263 - 273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190430&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.030. (in Chinese)

[6] 李有文,莫治新,薛江鹏,等.喀什地区土壤重金属污染评价及来源解析[J].干旱区资源与环境,2020,34(8):147-153.
LI Youwen, MO Zhixin, XUE Jiangpeng, et al. Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in soils from Kashgar region, Xinjiang, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 147 - 153. (in Chinese)

- [7] 任晓辉,高宗军,安永会,等.张掖市甘州区北部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].干旱区资源与环境,2020,34(7):163-169.
REN Xiaohui,GAO Zongjun,AN Yonghui, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in Northern Ganzhou District,Zhangye City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(7):163-169. (in Chinese)
- [8] HUANG Ying, CHEN Qianqian, DENG Meihua, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in Southeast China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207:159-168.
- [9] 陈宗娟,张倩,张强,等.天津东南部某区域不同土地利用方式下土壤重金属的累积特征[J].生态与农村环境学报,2015,31(2):166-173.
CHEN Zongjuan,ZHANG Qian,ZHANG Qiang, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in soils as affected by land use in Southeast Tianjin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2015,31(2):166-173. (in Chinese)
- [10] 肖武,隋涛,王鑫,等.巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J/OL].农业机械学报,2018,49(7):144-152.
XIAO Wu,SUI Tao,WANG Xin, et al. Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu Lake Basin [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(7):144-152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180718&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.018. (in Chinese)
- [11] 李想,江雪昕,高红菊.太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析[J/OL].农业机械学报,2017,48(增刊):247-253
LI Xiang,JIANG Xuexin,GAO Hongju. Pollution assessment and source analysis of soil heavy metals in Taihu Lake Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.):247-253. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s038&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.038. (in Chinese)
- [12] 周萍,文安邦,史忠林,等.三峡库区不同土地利用土壤重金属分布特征与污染评价[J/OL].农业机械学报,2017,48(7):207-213.
ZHOU Ping,WEN Anbang,SHI Zhonglin, et al. Distribution characteristics and pollution evaluation of soil heavy metals of different land use types in Three Gorges Reservoir Region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):207-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170726&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.026. (in Chinese)
- [13] 刘巍,杨建军,汪君,等.准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J].环境科学,2016,37(5):1938-1945.
LIU Wei,YANG Jianjun,WANG Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Junggar Basin in Xinjiang[J]. Environment Science, 2016,37(5):1938-1945. (in Chinese)
- [14] 王成军,冯涛,赵舒婷,等.冶炼厂周边表层土壤重金属关联特征及污染评价[J].环境工程学报,2016,10(4):2064-2070.
WANG Chengjun,FENG Tao,ZHAO Shuting, et al. Correlation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in surface soil around a smelting factory [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016,10(4):2064-2070. (in Chinese)
- [15] 方红,陈秀玲,张雪琼,等.闽江福州段与城市内河表层沉积物重金属污染特征研究[J].环境科学学报,2016,36(4):1160-1168.
FANG Hong,CHEN Xiuling,ZHANG Xueqiong, et al. Heavy metal pollution in the surface sediments from Minjiang River (Fuzhou Section) and urban rivers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(4):1160-1168. (in Chinese)
- [16] 李致春,桂和荣,陈松.宿州市护城河沉积物重金属污染程度及来源分析[J].生态与农村环境学报,2015,31(4):559-565.
LI Zhichun,GUI Herong,CHEN Song. Source and degree of heavy metal pollution in the sediment of the moat of Suzhou City, Anhui Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2015,31(4):559-565. (in Chinese)
- [17] 魏洪斌,罗明,鞠正山,等.重金属污染农用地风险分区与管控研究[J].中国农业资源与区划,2018,39(2):82-87.
WEI Hongbin,LUO Ming,JU Zhengshan, et al. Risk zoning and governance of heavy mental pollution in agricultural land[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018,39(2):82-87. (in Chinese)
- [18] 张琛,师学义,马桦薇,等.煤炭基地复垦村庄土壤重金属污染生态风险评价[J].水土保持研究,2014,21(5):277-284.
ZHANG Chen,SHI Xueyi,MA Huawei, et al. Assessment on ecological risk of soil heavy metal pollution in reclaimed village of coal base[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(5):277-284. (in Chinese)
- [19] 赵倩,马琳,刘翼飞,等.北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险[J].环境科学,2016,37(5):1931-1937.
ZHAO Qian,MA Lin,LIU Yifei, et al. Distribution characteristics and potential ecological hazards assessment of soil heavy metals in typical soil profiles in southeast suburb of Beijing [J]. Environment Science, 2016,37(5):1931-1937. (in Chinese)
- [20] 王馨慧,单保庆,唐文忠,等.典型城市河流表层沉积物中汞污染特征与生态风险[J].环境科学学报,2016,36(4):1153-1159.
WANG Xinhui,SHAN Baoqing,TANG Wenzhong, et al. Pollution characteristics and ecological risk of mercury in the surface sediment of a typical urban river[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2016,36(4):1153-1159. (in Chinese)
- [21] 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,等.顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价[J].环境科学,2016,37(5):1763-1770.
CAI Yimin,CHEN Weiping,PENG Chi, et al. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils sediments in Shunde waterway,southern China[J]. Environment Science, 2016,37(5):1763-1770. (in Chinese)
- [22] 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,等.河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价[J].环境科学,2016,37(5):1754-1762.
WANG Naishan,ZHANG Manyin,CUI Lijuan, et al. Contamination and ecological risk assessment of mercury in Hengshuihu wetland,Hebei Province[J]. Environment Science, 2016,37(5):1754-1762. (in Chinese)

- [23] 王呈, 钱新, 李慧明, 等. 南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1662 – 1669.
WANG Cheng, QIAN Xin, LI Huiming, et al. Pollution evaluation and risk assessment of heavy metals from atmospheric deposition in the parks of Nanjing[J]. Environment Science, 2016, 37(5): 1662 – 1669. (in Chinese)
- [24] 卢霞, 范礼强, 包诗玉, 等. 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(4): 570 – 575.
LU Xia, FAN Liqiang, BAO Shiyu, et al. Assessment of heavy metal pollution in sediments of the sea area around the Liandao island of Haizhou bay[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(4): 570 – 575. (in Chinese)
- [25] 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 等. 梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5410 – 5418.
JIANG Tao, LIN Weiwen, CAO Yingjie, et al. Pollution and ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in sediments of Qingliangshan Reservoir in Meijiang Basin [J]. Environment Science, 2020, 41(12): 5410 – 5418. (in Chinese)
- [26] 张诺, 刘其根, 陈丽平, 等. 长江口盐沼湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(1): 135 – 146.
ZHANG Nuo, LIU Qigen, CHEN Liping, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of sediment heavy metals from salt marsh of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(1): 135 – 146. (in Chinese)
- [27] 王一超, 赵桂慎. 利用生命周期评价方法评估高产粮田的面源污染潜在风险[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 256 – 261.
WANG Yichao, ZHAO Guishen. Assessment of potential non-point source pollution risks of high-yield farmland with life cycle assessment method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(2): 256 – 261. (in Chinese)
- [28] 陈耀宁, 智国铮, 袁兴中, 等. 基于三角随机模拟和 ArcGIS 的河流水环境健康风险评价模型[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4): 1799 – 1806.
CHEN Yaoning, ZHI Guozheng, YUAN Xingzhong, et al. Assessment model of water environmental health risk based on stochastic simulation-triangular fuzzy numbers and ArcGIS[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(4): 1799 – 1806. (in Chinese)
- [29] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 几种区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1309 – 1316.
SU Quanlong, ZHOU Shenglu, YI Haomin, et al. A comparative study of different assessment methods of regional heavy metal pollution[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1309 – 1316. (in Chinese)
- [30] 张天蛟, 刘刚, 王圣伟. 基于 GIS/RS 的不同土地利用类型重金属面源污染比较[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 124 – 132.
ZHANG Tianjiao, LIU Gang, WANG Shengwei. Estimation of heavy metal pollution loads from non-point sources based on GIS/RS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Sup.): 124 – 132. (in Chinese)
- [31] 杨奇勇, 谢运球, 罗为群, 等. 基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 248 – 254.
YANG Qiyong, XIE Yunqiu, LUO Wei-qun, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metals content based on geostatistics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 248 – 254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171229&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.029. (in Chinese)
- [32] 刘晓宇, 梁琼, 高如泰, 等. 长期污灌条件下农田土壤重金属污染环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 572 – 578.
LIU Xiaoyu, LIANG Qiong, GAO Rutai, et al. Environmental risk assessment of soil heavy metal pollution of farmlands with long period of sewage irrigation[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 572 – 578. (in Chinese)
- [33] 李荣华, 冯静, 李晓龙, 等. 陕西某关闭冶炼厂土壤重金属污染评价与工程修复[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 223 – 228.
LI Ronghua, FENG Jing, LI Xiaolong, et al. Heavy metals polluted soil environment assessment and engineering remediation practice in closed smelter in Shaanxi Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 223 – 228. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151029&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.029. (in Chinese)
- [34] 卢一富, 李云峰, 苗向前, 等. 微小铅锌矿区土壤和植物重金属污染特征及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 566 – 571.
LU Yifu, LI Yunfeng, MIAO Xiangqian, et al. Heavy metal pollution of soil and plants in areas of micro-sized lead-zinc mine and risk assessment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 566 – 571. (in Chinese)
- [35] 苏耀明, 陈志良, 雷国建, 等. 多金属矿区土壤重金属垂向污染特征及风险评估[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 130 – 134.
SU Yaoming, CHEN Zhiliang, LEI Guojian, et al. Vertical pollution characteristic and ecological risk assessment of heavy metal of soil profiles in polymetallic ore mine[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 130 – 134. (in Chinese)
- [36] 串丽敏, 赵同科, 郑怀国, 等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊 2): 213 – 222.
CHUAN Limin, ZHAO Tongke, ZHENG Huaiguo, et al. Research advances in remediation of heavy metal contaminated [J]. Soils Environmental Science & Technology, 2014, 37(Sup. 2): 213 – 222. (in Chinese)
- [37] 王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 82 – 91.
WANG Xinkai, ZHANG Yanxia, HUANG Biao, et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 82 – 91. (in Chinese)

[29] GUNDALE M J, DELUCA T H. Temperature and source material influence ecological attributes of ponderosa pine and Douglas-fircharcoal[J]. Forest Ecology and Management,2006, 231(1-3):86-93.

[30] XU Y P, XIE Z B. The effect of biochar oldification on N₂O emission on paddy soil and red soil[C] // Biochar Research Development & Application, Nanjing, 2011:54.

[31] 郭艳亮,王丹丹,郑纪勇,等. 生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响[J]. 环境科学,2015,36(9):3393-3400. GUO Yanliang, WANG Dandan, ZHENG Jiyong, et al. Effect of biochar on soil greenhouse gas emissions in semi-arid region [J]. Environmental Science, 2015,36(9):3393-3400. (in Chinese)

[32] 李香兰,徐华,曹金留,等. 水分管理对水稻生长期 N₂O 排放的影响[J]. 土壤,2006,38(6):703-707. LI Xianglan, XU Hua, CAO Jinliu, et al. Effect of water management on N₂O emission in rice-growing season[J]. Soils, 2006, 38(6):703-707. (in Chinese)

[33] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等. 土壤水分状况和质地对稻田 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报,2000,37(4):499-505. XU Hua, XING Guangxi, CAI Zucong, et al. Effect of soil water regime and soil texture on N₂O emission from rice paddy field [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000,37(4):499-505. (in Chinese)

[34] HUANG S H, PANT H K, LU J. Effects of water regimes on nitrous oxide emission from soils[J]. Ecological Engineering, 2007,31(1):9-15.

[35] 彭世彰,杨士红,徐俊增. 控制灌溉对稻田 CH₄ 和 N₂O 综合排放及温室效应的影响[J]. 水科学进展,2010,21(2):235-240. PENG Shizhang, YANG Shihong, XU Junzeng. Influence of controlled irrigation on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields and subsequent greenhouse effect[J]. Advances in Water Science, 2010,21(2):235-240. (in Chinese)

[36] LI Xianglan, YUAN Wenping, XU Hua, et al. Effect of timing and duration of midseason aeration on CH₄ and N₂O emissions from irrigated lowland rice paddies in China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2011, 91(3):293-305.

[37] 屈忠义,高利华,李昌见,等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(12):111-118. QU Zhongyi, GAO Lihua, LI Changjian, et al. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(12):111-118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.015. (in Chinese)

[38] 高大伟,任树梅,杨培岭,等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014, 45(增刊):168-174. GAO Dawei, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45 (Supp.):168-174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s127&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.027. (in Chinese)

(上接第 209 页)

[38] 杭小帅,王火焰,周健民. 长江三角洲地区土壤重金属污染的防治与调控[J]. 土壤通报,2013,44(1):245-251. HANG Xiaoshuai, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Prenention and regulation countermeasures of soil heavy metal contamination in Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science,2013,44(1):245-251. (in Chinese)

[39] 邵学新,黄标,赵永存,等. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J]. 环境化学,2008(2):218-221. SHAO Xuexin, HUANG Biao, ZHAO Yongcun, et al. Pollution assessment of soil heavy metals in a representative area of the Yangtze River Delta region[J]. Environmental Chemistry,2008(2):218-221. (in Chinese)

[40] 钟晓兰,周生路,赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J]. 地理科学,2007(3):395-400. ZHONG Xiaolan, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Spatial characteristics and pollution ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—a case study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007(3):395-400. (in Chinese)

[41] 马成玲,王火焰,周健民,等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006,25(3):751-755. MA Chengling, WANG Huoyan, ZHOU Jianmin, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze River Delta[J]. Journal of Agro-Environment Science,2006,25(3):751-755. (in Chinese)

[42] 马成玲,周健民,王火焰,等. 农田土壤重金属污染评价方法研究——以长江三角洲典型县级市常熟市为例[J]. 生态与农村环境学报,2006,22(1):48-53. MA Chengling, ZHOU Jianmin, WANG Huoyan, et al. Methods for assessment of heavy metal pollution in cropland soils—a case study of Changshu[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2006,22(1):48-53. (in Chinese)