

DOI: 10.11766/trxb201809010441

谢龙涛, 潘剑君, 白浩然, 张培育, 康翔, 王飞, 朱燕香. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价——以南京市江宁区某乡镇为例[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 316–325.

XIE Longtao, PAN Jianjun, BAI Haoran, ZHANG Peiyu, KANG Xiang, WANG Fei, ZHU Yanxiang. GIS-Based Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils: A Case Study of a Town of Jiangning, Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 316–325.

基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及污染评价* ——以南京市江宁区某乡镇为例

谢龙涛¹, 潘剑君^{1†}, 白浩然¹, 张培育¹, 康翔², 王飞¹, 朱燕香¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

摘 要: 土壤污染近年来备受瞩目, 我国已出台多项法律法规来规范防治, 合理评价不同地区土壤重金属的污染情况, 具有现实和长远意义。2017 年 11—12 月在研究区采集的 29 个表层土壤 (0~20 cm), 分析测定土壤 pH、有机质和 8 种重金属元素砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、汞 (Hg)、镍 (Ni)、铅 (Pb) 和锌 (Zn) 的含量, 采用最新发布的《土壤环境质量—农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618-2018) 进行污染评价, 运用 GIS 地统计学方法分析重金属空间分布特征。结果表明, 研究区土壤 pH 呈现酸性至中性; 有机质平均含量为 17.73 mg·kg⁻¹, 较为缺乏; 8 种重金属元素 (As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn) 的平均含量分别为 8.27、0.17、70.84、24.74、0.20、32.07、28.48 和 73.57 mg·kg⁻¹, 除 As 外, 其他重金属含量均超过南京市江宁区土壤环境背景值, 但未超过国家现行标准, 总体无重金属污染。其中 Cd、Cu 和 Hg 元素在局部地区达到了警戒线, 风险区主要分布在西南部 and 南部, 呈现带状分布, 农业生产上需引起重视。

关键词: GIS; 土壤重金属; 表层土壤; 空间分布; 污染评价

中图分类号: X82 **文献标志码:** A

GIS-Based Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils: A Case Study of a Town of Jiangning, Nanjing

XIE Longtao¹, PAN Jianjun^{1†}, BAI Haoran¹, ZHANG Peiyu¹, KANG Xiang², WANG Fei¹, ZHU Yanxiang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. School of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: 【Objective】 Heavy metals pollution level in farmland soil is related to quality and safety of the agricultural produce and health of the farmland ecosystems. Spatial distribution and evaluation of heavy metal pollution of the soils has become the focus of concerns all over the world, and attracted wide attentions from the governments and scientists of all the countries. In recent years, the situation of soil heavy metal pollution in farmland in China is getting so serious that it has aroused country-wide concerns. To address the problem, China has promulgated the “Law of the People's Republic of China on Soil Pollution Prevention and Control”, which is an act of long-term realistic significance to regulation, control, and reasonable evaluation of

* 国家自然科学基金项目 (41771247) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771247)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jpan@njau.edu.cn

作者简介: 谢龙涛 (1993—), 男, 山东青岛人, 硕士, 主要从事土壤信息技术方面研究。E-mail: 953635319@qq.com

收稿日期: 2018-09-01; 收到修改稿日期: 2018-11-23; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-01-02

the pollution of heavy metals in soils of China. 【Methods】 Jiangning District of Nanjing City, the largest agricultural produce and sideline product logistics center in East China and the second in the country, has rarely been reported about the issue before. It is, therefore, necessary to perform investigations and evaluations of any heavy metal pollution problems in this region. For this study, samples of topsoil (0~20 cm) were collected from 29 pieces of farmland scattered in the region during November and December, 2017 for analysis of soil pH, organic matter and contents of 8 heavy metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd) and chromium (Cr), Copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn), and heavy metals pollution of the soil was evaluated in line with the newly released “Standards for Soil Environmental Quality and Risk Control of Agricultural Land Soil Pollution (Trial)(GB 15618-2018)” with a view to improving and optimizing the traditional evaluation methods for pollution assessment, and developing a more scientific and reasonable region-specific evaluation method, which combines the technical characteristics and spatial analysis function of GIS, and makes use of the geostatistics method in analyzing spatial distribution characteristics of the heavy metals pollution. 【Results】Results show that the soils in the study area varied in the range from acidic to neutral in soil pH, lacked organic matter, and contained 8.27, 0.17, 70.84, 24.74, 0.20, 32.07, 28.48 and 73.57 mg·kg⁻¹ of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn, respectively, all of which except for As, were higher than their respective background values of the soil environment of the region, but still within the safe ranges specified in the current standards of the nation for agricultural environment quality. So on the whole, the region is not polluted with heavy metals. 【Conclusion】In certain areas of the region, soil Cd, Cu and Hg has reached their respective alert threshold, posing pollution risks, which calls for serious attention in agricultural production. The risks are quite high in the southwest and south parts of the region, forming a band in distribution. In that band, Cd, Cr, Cu, Ni and Zn are found to have come from the same source, potentially the Lishui River running through the study area. The upper reaches of the Lishui River is the Qinhuai River flowing through the urban area of Nanjing. Further studies should be done as to specific sources of the risks. Comparison of the methods for evaluating heavy metal pollution in soil shows that the single factor index method is simple, intuitive and highly adoptable to determination of whether a single item of heavy metal in soil has surpassed the criterion in soil survey and to grading of the risk; the comprehensive index method is more scientific and reasonable for comprehensive evaluation of soil heavy metal pollution; The newly promulgated “Standards for Soil Environmental Quality and Risk Control of Agricultural Land Soil Pollution (Trial)(GB 15618-2018)” is aimed at soil pollution assessment of farmland in the light of soil pH and type of land use. The promulgation of the standard is of great significance to comprehensive risk assessment of soil heavy metal pollution of farmland soils, survey and grading of soil pollution and remediation of polluted soils.

Key words: GIS; Soil heavy metals; Surface soil; Spatial distribution; Pollution assessment

土壤作为组成地球陆地生态系统中的关键部分,在多种生命活动中充当着极为重要的媒介作用^[1-3]。土壤重金属本身具有生物毒性、累积性以及不可降解性等特征,使其在土壤中极易产生富集现象,尽管土壤对土壤污染物具有一定的吸收和容纳能力,但是由于近年来人类不合理的生产活动,使得产生的大量重金属通过废水、大气沉降持续释放至周围环境的表层土壤中^[4-5],而表层土壤又是重金属重要的迁移、转化和沉积的场所,不断累积的重金属在土壤中通过有机体转化为有机复合物,最终对自然生态系统和人类健康造成威胁^[6-8]。

农田土壤重金属的污染程度关系到农产品的质量安全,关于土壤重金属污

染的空间分布与评价已经成为当今世界各国关注的焦点,备受各国政府和科学家的广泛关注^[9-15]。我国农田的土壤重金属污染形势十分严峻,在 2014 年 4 月 17 日,我国环保部与国土部联合在《全国土壤污染状况调查公报》中指出,2014 年全国农田土壤的点位超标率约为 16.1%,其中 8 种重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的污染占了 82.4%^[1]。随后在 2016 年 5 月 28 日,我国国务院在此基础上又印发了《土壤污染防治行动计划》,也就是当时所说的“土十条”,当年这一计划的发布可以说是整个土壤污染修复事业的里程碑事件。最终在 2018 年 8 月 31 日,我国全国人大常委会第五次会议正式通过了《中华人民共和国土壤污染防治法》,从而土壤污

染修复事业实现了有法可依,这也是我国首次通过制定专门的法律来规范防治和治理修复土壤污染,均充分体现了国家对土壤污染防治工作的重视。近年来,国内外对于土壤重金属污染的研究从重要工业城市开始向城市周边区域扩展,南京市江宁区作为华东最大、全国第二的农副产品物流中心,此前胡文友等^[16]曾对南京市郊镉和汞的累积特征做了一定的研究,但针对此地区的土壤重金属综合污染情况鲜有报道。该地区作为南京市重要的粮食产区,有必要对其进行污染调查与评价,本研究通过采用最新发布的 GB 15618-2018^[17],针对 pH 分级和不同土地利用类型进行评价,对于全面评估土壤重金属风险、开展污染等级调查以及土壤修复工作具有十分重要的意义。并且本研究对传统评价方法进行

改进优化,得到一种针对此地区更加科学合理的评价方法,结合 GIS 的技术特点和空间分析功能,深入分析利用 GIS 技术评价土壤重金属污染的合理性,并在此基础上进一步展望了 GIS 技术在土壤重金属研究中的应用趋势,以期能够为保障土壤安全和预防土壤潜在风险提供具体措施和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于江苏省南京市江宁区湖熟街道周岗社区,地处溧水河的南北两条分支河流高阳河与二干河之间($31^{\circ}46'9.07''$ — $31^{\circ}49'42.27''$ N、 $118^{\circ}53'41.77''$ — $119^{\circ}0'4.55''$ E),总面积约为 41 km^2 (图 1a)。

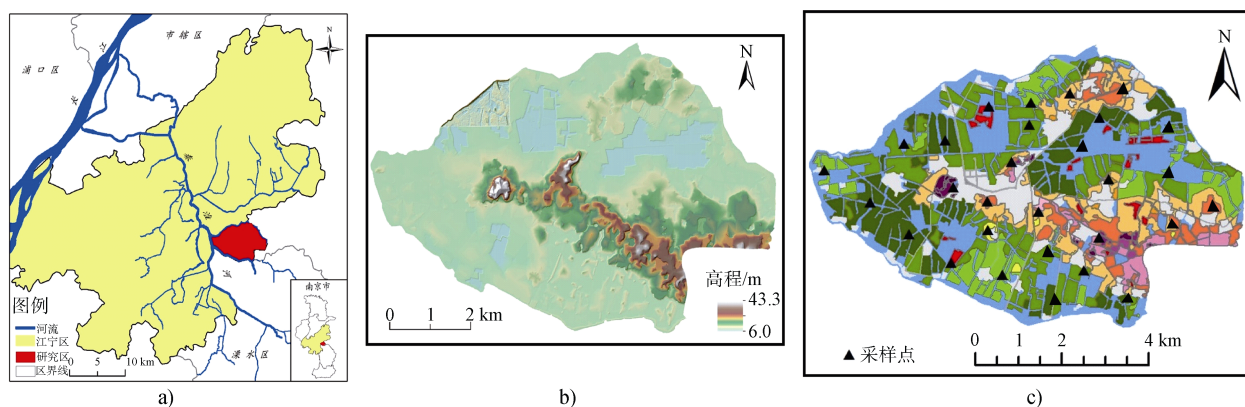


图 1 研究区地理位置图 (a)、高程图 (b) 和采样点分布图 (c)

Fig. 1 Geographic location map (a), elevation map (b) and sampling point distribution map (c) of the study area

研究区位于北亚热带,气候属于北亚热带暖湿气候,研究区属于秦淮河平原的一部分,绝对高程范围在 $6\sim 43\text{ m}$,总体地势为中间高、四周低(图 1b)。研究区主要土壤类型有水稻土、黄棕壤、新积土和石质土,其中水稻土占绝大部分。居民点主要分布于地势较高的微高地和坡度平缓的岗地区域。

1.2 数据来源

研究区影像是由中国资源卫星高分一号影像应用中心提供,时间为 2017 年 4 月 22 日,产品等级为 1A 级产品,包括全色波段影像和多光谱波段影像各一景,用于提取研究区的地貌类型;Google 影像来源于 Google Earth 平台,通过多期影像拼接合成的栅格数据,该影像共有红色、绿色和蓝色三个波段,输出像元大小为 $0.29\text{ m}\times 0.29\text{ m}$,用于矢量化研究区耕地地块边界(图 1c);周岗镇行政边界矢

量图用于确定研究区的范围;土地利用图用于确定各个具体土地利用类型和微域景观分类;研究区 DEM 数据像元大小为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}$,用于制作研究区地貌类型图。

1.3 试验设计

关于样点布设和采集路线的确定,根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)的规定,土壤采样点布点方法一般分为三种,分别为:简单随机法、分块随机法、系统随机法,其中系统随机法更具代表性,为了全面了解研究区土壤重金属含量,同时体现采样点的典型性、代表性、均匀性,利用 ArcGIS 10.3 软件在数字底图上按照规则网格进行采样点的布设,土壤样品采集时间为 2017 年 10-11 月,研究内容为农田表层土壤 pH、土壤有机质和 8 种土壤重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb

和 Zn, 农田以水稻田为主。采集到的 0~20 cm 表层土壤, 等量混合后用四分法取约 1 kg 装入聚乙烯密封袋内, 用 GPS 记录实地坐标, 并对环境拍照记录, 采样工具为竹勺^[17-19]。经过自然风干后的土壤样品, 用玛瑙研钵进行研磨, 过 0.25 mm 孔径筛后继续研磨, 使之全部通过 0.074 mm 孔径筛, 然后采用 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 法消煮后, 测定 pH、有机质和 8 种重金属项目; 其中 pH 采用 pH 计测定法测定, 有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定, Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 采用等离子体原子发射光谱法 (ICP-OES) 测定, Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法 (GF-AAS) 测定, As 和 Hg 采用原子荧光光谱法 (HG-AFS) 测定^[20-21]。所有分析方法的准确度和精密度均采用国家一级土壤标准物质 (GBW 系列) 进行检验^[22], 并且保证测试结果均符合监控

要求。

通过标准偏差百分数 (RSD) 来评价土壤重金属分析测试结果的精密度。一般而言, 土壤中重金属的 RSD 在 20% 以内是可以接受的。本研究针对土壤样品和平行样品分别进行相对标准偏差的计算。RSD 的计算公式如下:

$$(RSD, \%) = \frac{SD}{(X_1 + X_2)/2} \times 100\%$$

$$SD = \sqrt{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2}$$

式中, RSD 为相对标准偏差, SD 为标准偏差, \bar{X} 表示测量数据的平均值。将样品及平行样品的分析结果进行比对并计算相对标准偏差百分数, 具体结果见表 1。

表 1 重金属分析的质量控制结果

Table 1 Quality control of the analysis of heavy metals

重金属 Heavy metal	质控样 ^① 1/ (mg·kg ⁻¹)	对照 ^② 1/ (mg·kg ⁻¹)	RSD/%	质控样 2/ (mg·kg ⁻¹)	对照 2/ (mg·kg ⁻¹)	RSD/ %	质控样 3/ (mg·kg ⁻¹)	对照 3/ (mg·kg ⁻¹)	RSD/%
As	9.04	8.46	4.69	10.65	9.56	8.71	12.87	14.56	7.63
Cd	0.33	0.36	6.15	0.19	0.23	10.10	0.15	0.13	13.47
Cr	91.73	88.76	2.33	80.04	88.56	9.12	76.10	86.59	7.15
Cu	38.27	36.28	3.78	27.57	31.26	9.87	21.46	24.68	8.87
Hg	0.34	0.39	9.69	0.18	0.16	6.15	0.22	0.24	8.32
Ni	41.02	36.28	8.67	36.58	29.88	7.07	40.54	36.68	14.26
Pb	34.44	36.88	4.84	28.79	34.57	8.26	27.81	31.26	12.90
Zn	99.83	90.85	6.66	78.04	72.23	9.92	84.00	96.68	5.47

①Quality control samples; ②Control group.

将实验室获得的 pH、有机质和重金属含量在 SPSS 22.0 中进行极值、均值和标准偏差基本数据的统计, 并用 GS+9.0 软件求出变异函数, 根据国家土壤背景值和国家土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行) (GB 15618-2018) 进行基本统计数据的分析。

1.4 评价方法

评价方法采用内梅罗指数法中的单因子指数法和综合指数法^[23]。

其中单因子指数法的优势在于可以快速确定主

要重金属的污染和危害程度^[23]。一般通过污染指数来表示, 通过重金属含量实测值和评价标准相比除去量纲来计算污染指数:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 为重金属元素 i 的污染指数; C_i 为重元素 i 含量实测值; S_i 为土壤环境质量国家二级标准值。

而综合指数法的优势在于既兼顾了单因子污染指数的平均值和最高值,又能着重突出研究区污染较严重的重金属污染物的污染程度。综合指数法计算方法如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为综合污染指数; P_{imax} 为采样点 i 重金属污染物中单项污染指数的最大值; $\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 为采样点 i 重金属污染物中单因子指数的平均值。

1.5 制图步骤

土壤重金属的空间分布制图具体步骤^[24-25]: (1) 插值 (IDW): 通过创建训练子集和测试子集, 样本数分别为 29 和 3, 将训练子集进行反距离加权插值; (2) 验证 (Validation): 通过使用测试子集进行验证, 统计预测值与真实值之间的平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE), ME 越接近 0, RMSE 越小, 则预测误差越小, 精度就越高; (3) 输出 (Export): 将插值结果输出为栅格图层, 并用研究区的地形边界图对其进行掩模提取, 进而制得研究区农田土壤

重金属分布格局图。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属的描述性统计

通过表 2 可以看出, 该研究区土壤 pH 介于 4.82~7.02, 呈现酸性至中性; 有机质含量范围为 9.32~39.28 mg·kg⁻¹, 参照全国第二次土壤普查养分分级标准, 总体处于较缺乏的水平; As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量范围分别为 5.99~14.63 mg·kg⁻¹、0.07~0.33 mg·kg⁻¹、56.40~91.73 mg·kg⁻¹、15.18~38.27 mg·kg⁻¹、0.074~0.420 mg·kg⁻¹、23.44~41.02 mg·kg⁻¹、24.14~34.85 mg·kg⁻¹ 和 54.18~100.09 mg·kg⁻¹, 参照南京市江宁区土壤背景值^[23]和 GB 15618-2018, 只有 As 的平均值低于土壤背景值, Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 均高于南京市江宁区的土壤背景值, 但低于国家标准。并且 8 种重金属的最大值也低于国家标准, 说明该地区土壤目前尚未受到重金属污染。变异系数 (CV) 反映数据间的离散程度, 也直观反映出样本的空间变异性大小。一般认为, CV<10%为弱变异, 10%~100%中等强度变异, CV≥100%为强变异^[18]。根据表 2 可

表 2 土壤指标描述统计特征及相关标准

Table 2 Descriptive statistics and related standards of soil index

土壤指标 Soil index	最大值 Max/ (mg·kg ⁻¹)	最小值 Min/ (mg·kg ⁻¹)	平均值 Average/ (mg·kg ⁻¹)	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation / %	土壤背景值 Background value of soil ^[23] / (mg·kg ⁻¹)	国家标准值 National standard ^[17] / (mg mg·kg ⁻¹)
pH	7.02	4.82	5.84	0.55	9		
SOM	39.28	9.32	17.73	7.11	4		
As	14.63	5.99	8.27	2.00	24	9.3	30
Cd	0.33	0.07	0.17	0.06	32	0.08	0.4
Cr	91.73	56.40	70.84	10.11	14	67.5	250
Cu	38.27	15.18	24.74	5.28	15	22.1	50
Hg	0.42	0.07	0.20	0.01	40	0.05	0.5
Ni	41.02	23.44	32.07	4.85	15	22.9	70
Pb	34.85	24.14	28.48	2.73	10	25.9	100
Zn	100.1	54.18	73.57	11.63	16	50.0	200

知，pH 和有机质分别为 9%和 4%，为弱变异，说明二者受外界影响比较小，空间变异相对不显著，可能具有同源性。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的变异系数分别为 24%、32%、14%、15%、40%、15%、10%和 16%， $Hg>Cd>As>Zn>Cr>Cu、Ni>Pb$ ，8 种重金属均呈中等强度变异，空间变异相对显著，可能受人为活动影响。由此可知，该地区土壤重金属含量不只是受土壤本底值影响，还可能受到轻微外来干扰，具体情况需要通过相关性分析来验证。

2.2 土壤重金属的相关性

通过以往研究表明，土壤重金属来源于成土母质和人类活动，同一来源的重金属之间可能存在着

相关性，根据相关性可以判断土壤重金属污染来源是否相同，如果重金属之间存在显著正相关，则其来源可能相同，否则来源可能不止一个^[23]。由表 3 可知，该研究区土壤 pH、有机质和重金属间存在一定的相关性。其中，土壤 pH 与土壤有机质含量呈极显著负相关，进一步说明了二者具有同源性，可以确定二者与土壤本底值密切相关；土壤有机质与土壤中 Pb 含量呈极显著正相关，与土壤中 Cu 含量呈显著正相关，说明该研究区土壤有机质与 Cu、Pb 之间可能具有同源性，但重金属有背景值、面源和工矿源等不同来源，来源分析仍需要进一步验证；土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量均呈极显著正相关，可以推测它们之间可能存在同源性。

表 3 不同土壤指标之间的相关性

Table 3 Correlation analysis of different soil index

	pH	SOM	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
pH	1									
SOM	-0.613**	1								
As	0.407	-0.199	1							
Cd	-0.167	0.168	-0.274	1						
Cr	0.151	0.095	0.093	0.662**	1					
Cu	-0.327	0.468*	-0.200	0.648**	0.659**	1				
Hg	-0.049	0.352	-0.123	0.225	0.009	0.341	1			
Ni	0.230	-0.074	0.148	0.623**	0.946**	0.518**	0.033	1		
Pb	-0.354	0.682**	-0.086	0.463*	0.420*	0.704**	0.535**	0.314	1	
Zn	-0.055	0.280	0.006	0.745**	0.879**	0.669**	0.181	0.877**	0.559**	1

注：**在 0.01 水平上显著相关，*在 0.05 水平上显著相关。Note：**：Significantly correlated at the 0.01 level, and*：Significantly correlated at the 0.05 level.

2.3 土壤重金属的污染评价指数

将 8 种重金属元素的单因子指数与综合指数分别进行统计（表 4），通过对比内梅罗指数法的污染程度分级标准（表 5 和表 6），得到单因子指数的最大值 P_{imax} 均小于 1，均未超标，说明该地区土壤目前尚未受到重金属污染，总体上符合农业生产要求；综合指数的平均值 $P_{\text{综}a}$ 均小于 1，未超标；综合指数的最大值 $P_{\text{综}max}$ 中 Cd、Cu、Hg 达到了警戒线，农业生产中应注意防范，综合指数 $P_{\text{综}}$ 均处于安全水平，说明该地区土壤总体属于清洁土壤。总体而言，该地区土壤中 Cd、Cu 和 Hg 在局部采样点达到

了警戒线，在农业生产上需要引起重视，通过重金属分布特征来确定污染点和污染源。

2.4 土壤重金属的空间分布特征

将综合评价方法得到的结果，利用半方差模型对土壤重金属进行反距离加权插值，得到 8 种重金属的空间分布格局，分级标准依据污染程度等级划分。通过图 2 可以看出，该研究区土壤重金属空间格局的突出特征分布斑块大、分布规律明显。其中土壤中 As 含量的分布呈现出西部和中部高、东部低的趋势；土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量的分布呈现出西北部 and 南部高、东北部低的趋势；土壤中

表 4 研究区土壤重金属污染程度

Table 4 Grading of heavy metal pollution in the soil of study area									
元素 Element	P_{\max}	$P_{\text{综}a}$	$P_{\text{综}\max}$	$P_{\text{综}}$	元素 Element	P_{\max}	$P_{\text{综}a}$	$P_{\text{综}\max}$	$P_{\text{综}}$
As	0.49	0.28	0.49	0.40	Hg	0.84	0.4	0.84	0.66
Cd	0.84	0.43	0.84	0.67	Ni	0.59	0.46	0.59	0.53
Cr	0.37	0.28	0.37	0.33	Pb	0.35	0.28	0.35	0.32
Cu	0.77	0.49	0.77	0.65	Zn	0.5	0.37	0.5	0.44

注: $P_{\text{综}a}$, $P_{\text{综}}$ 平均值; $P_{\text{综}\max}$, $P_{\text{综}}$ 最大值。Note: $P_{\text{综}a}$, average value of $P_{\text{综}}$. $P_{\text{综}\max}$, maximum value of $P_{\text{综}}$.

表 5 土壤单项污染程度分级标准

Table 5 Standard for grading of soil pollution of a single element				
P_i	$P_i \leq 1$	$1 < P_i \leq 2$	$2 < P_i \leq 3$	$P_i > 3$
污染水平	非污染	轻污染	中污染	重污染
Pollution level	Non pollution	Light pollution	Moderate pollution	Heavy pollution

表 6 土壤综合污染程度分级标准

Table 6 Standard for grading of soil comprehensive pollution			
土壤综合污染等级	土壤综合污染指数	污染程度	污染水平
Comprehensive pollution grade of soil	Comprehensive pollution index of soil	Degree of pollution	Pollution level
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全 Security	清洁 Clean
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线 Cordon	尚清洁 Warning grade
3	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻污染 Light pollution	开始污染 Begin to pollute
4	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中污染 Middle pollution	污染明显 Obvious pollution
5	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染 Heavy pollution	污染严重 Serious pollution

Hg 含量的分布呈现出中西部高、东部低的趋势,土壤中 Pb 含量的分布呈现出西南部和东北部高、中部和北部低的趋势。土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的分布类似,结合之前的相关性分析,可以初步断定,该研究区土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 存在同源性,这可能与穿过研究区的漂水河有关,而漂水河作为南京市秦淮河的一个分支,具体风险来源有待进一步研究。

3 结 论

南京市江宁区湖熟街道周岗社区农田土壤总体无重金属污染,但 Cd、Cu 和 Hg 元素在局部地区达到了警戒线,具有潜在污染风险,在农业生产上需要引起重视。风险区分布以西南部和南部较为严重,并呈现带状分布,其中 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 具有同源性。土壤重金属污染评价的方法中,其单因子

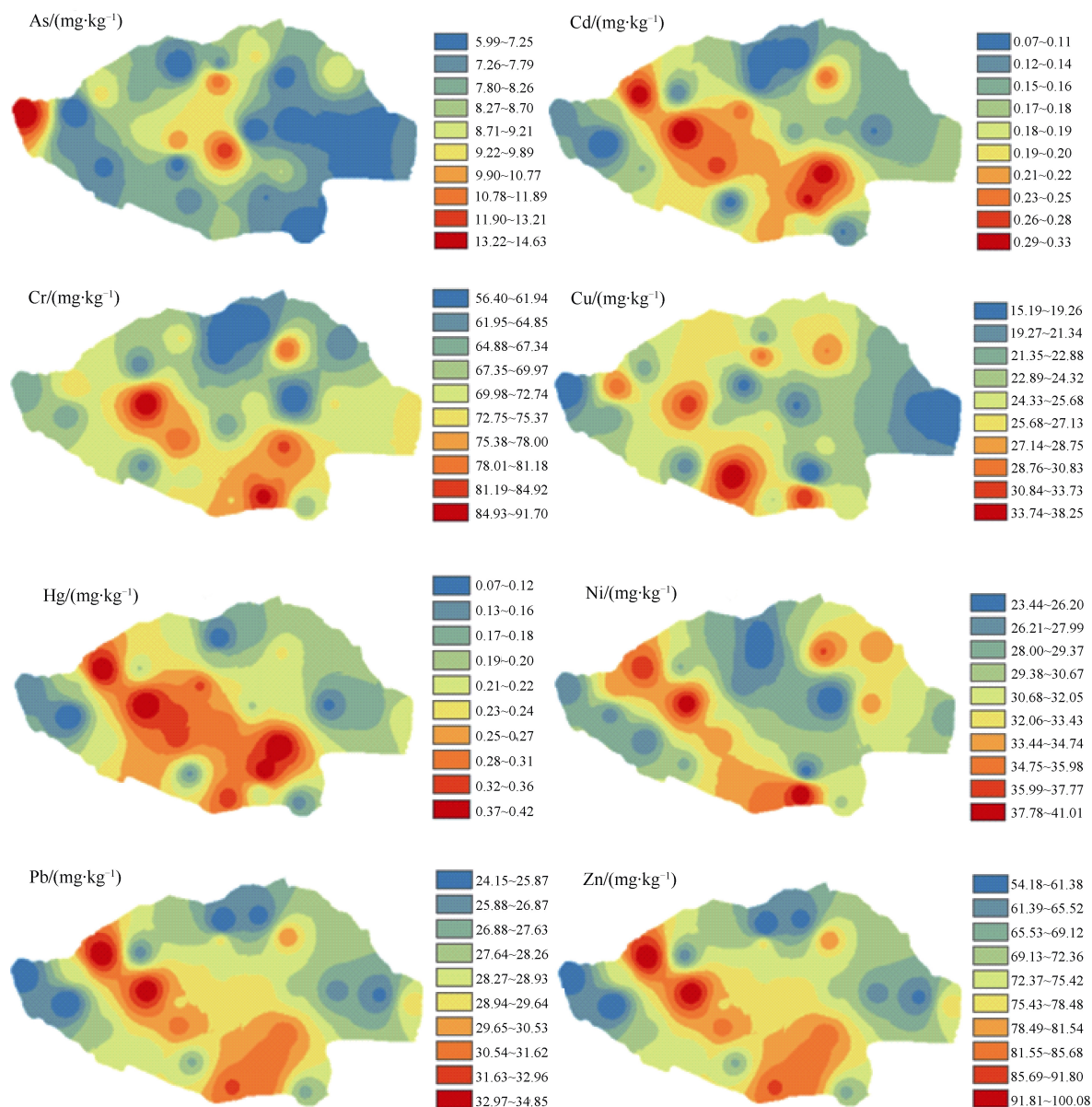


图2 土壤重金属空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soil

指数法简单直观,对于土壤调查中单项重金属的超标判定以及风险级别的划分具有良好的适用性;综合指数法可以更加全面的对土壤重金属污染进行评价,更具科学性;两种方法的结合使用对于全面评估土壤重金属风险、开展污染等级调查以及土壤修复工作具有十分重要的意义。

参考文献 (References)

- [1] Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 261—272. [陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 261—272.]
- [2] Zeng X B, Xu J M, Huang Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 186—194. [曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考. *土壤学报*, 2013, 50 (1): 186—194.]
- [3] Zeng X B, Su S M, Ma S M, et al. Heavy metals cycling and its regulation in China cropland ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21 (9): 2418—2426. [曾希柏, 苏世鸣, 马世铭, 等. 我国农田生态系统重金属的循环与调控. *应用生态学报*, 2010, 21 (9): 2418—2426.]

- [4] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China : Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (2): 750—759.
- [5] Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, et al. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 692-703. [张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究. *环境科学*, 2014, 35 (2): 692—703.]
- [6] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, et al. Identification and uncertainty analysis of scope of heavy metal pollution in the vicinity of secondary copper smelteries. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1006—1012. [吴春发, 吴嘉平, 骆永明, 等. 冶炼厂周边土壤重金属污染范围的界定与不确定性分析. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1006—1012.]
- [7] Li X N, Jiao W T, Xiao R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: A review. *Environmental Reviews*, 2015, 23 (3): 263—274.
- [8] Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20 (2): 293—298. [宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况. *水土保持研究*, 2013, 20 (2): 293—298.]
- [9] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 452—458. [赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略. *中国科学院院刊*, 2015, 30 (4): 452—458.]
- [10] Arao T, Ishikawa S, Murakami M, et al. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan. *Paddy and Water Environment*, 2010, 8 (3): 247—257.
- [11] Xia M, Zhao B Z, Zhang J B. Gis-based research on soil heavy metal accumulation in a fluvo-aquic soil area typical of the Huang-Huai-Hai plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (4): 684—692. [夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究. *土壤学报*, 2013, 50 (4): 684—692.]
- [12] Zhao Q G, Huang G Q, Qian H Y. Ecological agriculture and food safety. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (6): 1127—1134. [赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全. *土壤学报*, 2007, 44 (6): 1127—1134.]
- [13] Li M, Xi X H, Xiao G Y, et al. National multi-purpose regional geochemical survey in China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 21—30.
- [14] Wang F, Pan J J, Yu H. Prediction on three main soil properties using crop growth information: A case study in the northern plain area of Jiangsu Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48 (4): 769—777. [王飞, 潘剑君, 余泓. 基于农作物长势信息的三种主要土壤属性预测——以江苏北部平原区为例. *土壤通报*, 2017, 48 (4): 769—777.]
- [15] Yuan R J, Yu G W, Qiu X L, et al. Regionally spatial variation of soil heavy metals and their influences on vegetable quality: A case study of Baguazhou and Jiangxinzhou, Nanjing, China. *Journal of Agro- Environment Science*, 2015, 34 (8): 1498—1507. [袁润杰, 于高伟, 邱晓蕾, 等. 区域土壤重金属空间差异及对蔬菜品质安全影响的分析——以南京八卦洲、江心洲为例. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (8): 1498—1507.]
- [16] Hu W Y, Huang B, Ma H W, et al. Health risk of accumulation of cadmium and mercury in greenhouse vegetable production systems typical of South China. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 1045—1055. [胡文友, 黄标, 马宏卫, 等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 1045—1055.]
- [17] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Risk control standard for soil contamination of agricultural land in soil environment quality (Trial). GB 15618—2018. Beijing: China Environmental Science Press, 2018. [中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行). GB 15618—2018. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.]
- [18] Zhong X L, Zhou S L, Li J T, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta—A case study of Taicang City in Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (1): 33—40. [钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征——以江苏省太仓市为例. *土壤学报*, 2007, 44 (1): 33—40.]
- [19] Yang Z J, Chen X M, Jing F, et al. Spatial variability of nutrients and heavy metals in paddy field soils based on GIS and Geostatistics. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (6): 1893—1901. [杨之江, 陈效民, 景峰, 等. 基于 GIS 和地统计学的稻田土壤养分与重金属空间变异. *应用生态学报*, 2018, 29 (6): 1893—1901.]
- [20] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China : Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (2): 750—759.
- [21] Zhou S L, Liao F Q, Wu S H, et al. Farmland soil heavy metal pollution in typical areas of Jiangsu Province based on classification sample plots. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24 (5): 78—83, 313. [周生路, 廖富强, 吴绍华, 等. 基于分等样地的江苏典型区农用地土壤重金属污染研究. *农业工程学报*, 2008, 24 (5): 78—83, 313.]
- [22] Chen Y L, Shi L, Wang Z R. Pollution assessment and spatial distribution of soil heavy metals in mining area based on GIS. *Science of Surveying and Mapping*, 2018,

- 43 (4): 80—86. [陈优良, 史琳, 王兆茹. GIS 的矿区土壤重金属污染评价及空间分布. 测绘科学, 2018, 43 (4): 80—86.]
- [23] Gao Z Q, Liu T F, Liu X F, et al. Risk assessment on heavy metals pollution in soil at Jiangning district of Nanjing. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 43 (22): 140—142. [高占啟, 刘廷凤, 刘献锋, 等. 南京江宁区土壤重金属污染及潜在生态风险评价. 广州化工, 2015, 43 (22): 140—142.]
- [24] Fu C C, Wang W Y, Pan J J, et al. A comparative study on different soil heavy metal interpolation methods in Lishui district, Nanjing. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45 (6): 1325—1333. [付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 南京市溧水区土壤重金属污染不同插值方法的对比研究. 土壤通报, 2014, 45 (6): 1325—1333.]
- [25] Song J X, Zhu Q, Jiang X S, et al. GIS-based heavy metals risk assessment of agricultural soils—A case study of baguazhou, Nanjing. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (1): 81—91. [宋金茜, 朱权, 姜小三, 等. 基于 GIS 的农业土壤重金属风险评价研究——以南京市八卦洲为例. 土壤学报, 2017, 54 (1): 81—91.]

(责任编辑: 卢 萍)