

引用格式:姬超,侯大伟,赵晓杰,等.江苏省耕地土壤重金属健康风险强度空间集聚特征及影响因素[J].资源科学,2023,45(1):174-189. [Ji C, Hou D W, Zhao X J, et al. Spatial agglomeration characteristics and influencing factors of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil in Jiangsu Province[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 174-189.] DOI: 10.18402/resci.2023.01.13

江苏省耕地土壤重金属健康风险强度空间集聚特征及影响因素

姬超¹,侯大伟²,赵晓杰¹,于博¹,包广静³,吴锋⁴,孙华¹

(1. 南京农业大学土地管理学院,南京 210095;2. 东北农业大学公共管理与法学院,哈尔滨 150030;3. 云南财经大学物流与管理工程学院,昆明 650221;4. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要:【目的】在健康中国战略深入实施背景下,环境健康风险已逐步融入到土壤污染防治过程中,如何揭示省域土壤重金属健康风险强度的空间集聚特征和影响因素,对于维护土壤资源可持续利用、完善风险防控体系和保障区域人群健康至关重要。【方法】本文在优化了US EPA健康风险评估模型的基础上,明晰了江苏省耕地土壤重金属健康风险特征因子和不同县区健康风险强度,从地理学视角构建了包括加权标准差椭圆、莫兰指数和地理探测器在内的空间分析方法体系,揭示了健康风险强度的空间集聚特征和影响因素,并探讨了江苏省耕地土壤重金属健康风险管控对策。【结果】结果表明:①Cr、Pb和As是江苏省耕地土壤重金属健康风险特征因子,且对应的儿童致癌风险高于 10^{-6} 的点位占比分别为99.97%、74.24%和98.39%;②Cr、Pb和As在不同县域的健康风险强度变化范围为0.0158~0.6532、0.0002~0.0466和0.0025~0.3859,对应的综合健康风险强度变化范围为0.0256~1.0399,且江苏省北部县区对于其健康风险强度具有较高的影响,对应的影响程度顺序为As>Cr>Pb;③Cr、Pb、As及综合健康风险强度具有显著空间集聚特征,对应的全局莫兰指数分别为0.084、0.053、0.225和0.143,且以HH和LL空间聚类为主,其类型区数量占4种类型区的68.18%。④地均化肥施用量、居民受教育程度、道路密度和地均GDP等4个探测因子的 q 值均大于0.3,对于重金属健康风险强度的空间分异有较高的解释度,且探测因子间呈现出非线性增强和双因子增强作用。【结论】江苏省耕地土壤重金属健康风险强度评价与分析为环境与健康研究提供了新的思路,研究结果可为江苏省耕地土壤重金属健康风险管控策略的制定提供现实依据。

关键词:健康风险强度;重金属;耕地土壤;地理探测器;江苏省

DOI: 10.18402/resci.2023.01.13

1 引言

《全球环境展望(GEO6)》报告指出,若人类再不采取紧急行动遏制地球生态环境的恶化,人类健康将会受到严重威胁^[1],世界卫生组织(WHO)统计数据也显示2016年全球23.1%的疾病和24.3%的死亡人数与环境因素有关^[2],环境与健康是当前人类可持续发展的重要议题,解析环境与健康的关系已成为当前全球研究的热点和前沿^[3-5]。作为全球环境污染物的类型之一,重金属可通过呼吸吸

入、经口摄入和皮肤接触等暴露途径直接威胁人体健康,也可通过食物链的方式间接对人体健康造成危害^[6],其健康风险强度研究对于完善环境风险防控体系、保障区域人群健康和维护土地资源可持续利用等具有重要的意义^[7,8]。

人类科学技术的发展和对地球资源的大规模利用增加了重金属进入地表环境的总量^[9],土壤是重金属向大气、水体和有机体传播的主要介质,物质与能量循环的开放包容特征致使重金属在土壤

收稿日期:2022-08-17 修订日期:2022-11-09

基金项目:江苏省社会科学基金项目(22JZB001);NSFC-云南联合基金重点支持项目(U2102208)。

作者简介:姬超,男,安徽亳州人,博士研究生,研究方向为资源环境评价与规划管理。E-mail: 208860788@qq.com

通信作者:孙华,男,安徽滁州人,博士,教授,研究方向为资源环境评价与规划管理。E-mail: sh@njau.edu.cn

中持续累积^[8,10],土壤重金属污染也逐步呈现出从局部到区域的蔓延态势^[11],其对人体健康产生危害程度也日益加剧^[8]。自20世纪70年代以来,国内外学者基于环境与健康视角对于土壤重金属开展了长期的研究和探索^[9-13],对于研究区域而言,当前的研究主要基于健康风险评估模型分析小尺度和典型区域的土壤重金属健康风险,如潜在污染场地^[9,12,13]、生活集中区^[14,15]、污水灌溉区^[16,17]等,将风险受体“人”纳入到健康风险评估过程,进而为明晰以行政区划为研究单元的区域土壤重金属健康风险强度提供基础支撑^[5,18]。对于研究视角而言,侧重于环境毒理学和环境流行病学,如重金属毒理作用分析^[4,8,19]、健康风险评估^[9,11,13]等,探索陆地表层自然要素与人文要素之间相互作用及其规律的时空格局是地理科学的核心,已在环境化学要素的空间分异特征与地方病防治的研究中取得重要进展^[5],利用地理空间统计分析方法,揭示土壤重金属健康风险强度的空间集聚特征,可为明晰健康风险空间管控的优先级提供有效的决策支撑,也有助于推动环境与健康多学科交叉研究^[3]。土壤重金属健康风险强度影响因素分析是在明确空间管控优先级的基础上制定具体管控措施的重要依据^[20,21],国内外学者利用化学质量平衡模型^[22]、排放清单^[23]、多元统计分析^[24,25]等方法从不同研究视角探析了重金属来源。由于土壤重金属的空间异质性和来源的区域差异性^[26],当前的源解析研究方法并不适用于省级尺度的土壤重金属健康风险强度影响因素分析,也难以定量分析不同人为因素对其影响的重要程度。地理探测器是以研究对象在不同空间位置之间超出随机变异的差异为基础,分析研究对象的空间分层异质性和揭示其背后驱动力的有效工具,已被广泛应用于经济社会和资源环境的相关领域中^[27],利用地理探测器揭示土壤重金属健康风险强度的影响因素可以弥补上述研究方法的不足。

长江三角洲是中国土壤重金属污染的核心区域之一,江苏省作为长江三角洲工业发展、农业生产以及人口集聚的重要区域,在经济社会高强度发展的同时也面临着突出的土壤重金属污染问题^[28],分析江苏省耕地土壤重金属健康风险强度具有典型和示范意义。鉴于此,本文以江苏省耕地土壤重金属为研究对象,通过优化健康风险评估模型,明晰健康风险特征因子及不同县区重金属健康风险

强度,构建包括加权平均中心、标准差椭圆和莫兰指数在内的地理空间格局分析方法体系,揭示健康风险强度的空间集聚特征,利用地理探测器探测健康风险强度的影响因素,并基于上述研究结果从健康风险特征因子、空间管控优先级和管控因素3个方面探讨健康风险管控策略,以期在丰富环境与健康研究视角和方法体系的同时,为江苏省完善环境风险防控体系、保障人群健康和维护土壤资源可持续等利用提供现实依据。

2 理论分析

2.1 重金属对人体健康的作用机理

重金属不能分解,也不可生物降解^[10],且可以与有机基团共价结合,形成亲脂性离子和化合物,对人体产生毒性作用^[8]。人体可以将重金属活性元素隐藏在蛋白质中或以不溶性形式沉积在细胞内,进而存储在体内或者排除体外^[29]。因此,进入人体中的重金属可累积在不同的组织或器官中,引起生物和生理的并发症,如线粒体、细胞核、溶酶体和酶等均会受到重金属的影响,且部分重金属离子能够与核蛋白相互作用,引起DNA损伤,导致细胞功能丧失、凋亡或癌变,影响大脑、肺、肾、肝和其他重要器官的正常功能^[8,30]。另外,铜(Cu)、锰(Mn)和镍(Ni)等重金属虽然是人体生化生理功能所必需的微量元素,但是当其在人体中过度累积时,也会对人体健康产生威胁^[31]。对于土壤而言,铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)和汞(Hg)等重金属广泛分布于土壤环境系统中,并通过呼吸、饮食、皮肤接触等暴露途径进入人体并持续累积^[32],进而威胁人体健康。

2.2 土壤重金属健康风险评估理论框架

土壤重金属健康风险评估是连接风险识别和风险防控的重要环节,也是科学合理制定和落实风险管理策略的重要前提,其本质是基于土壤重金属监测分析、毒理学实验、人群暴露调查等,运用概率论和数理统计分析方法评估土壤重金属对人体健康威胁程度^[13]。土壤环境系统复杂多变性决定了重金属健康风险评估中的不确定性难以避免^[11],美国环境保护署(US EPA)推荐的,包括危害识别、剂量-反应关系评估、暴露评估、风险表征在内的环境健康风险评估框架将不确定性纳入环境健康风险评估过程中,可定量分析人群健康在不同暴露途径下受到土壤重金属危害的可能性^[33],该框架已成为土壤重金属健康风险评估的新趋势^[12,34]。因此,本文

基于该风险评估理论框架,依据江苏省耕地土壤重金属监测结果和人体暴露参数调查结果,评估基于调查点位的土壤重金属健康风险。同时,US EPA健康风险评估是基于环境污染物对人体健康作用过程提出的,本文进一步将健康风险受体“人”纳入到健康风险分析过程中,进而揭示江苏省不同县区耕地土壤重金属健康风险强度。

2.3 基于空间分析理论的土壤重金属健康风险评估框架外延

空间分析的本质是针对具有空间位置和数据特征的研究客体进行定量分析,进而挖掘、提取和揭示研究对象隐含的空间特征^[35],空间关联表达、空间关联成因、空间信息分析模型等是空间分析的核心,且空间依赖性和空间异质性始终伴随着空间分析的全过程^[36]。基于空间分析理论的社会经济调查、自然灾害预警、疾病传播与扩散等研究成果已为资源环境和社会经济问题的决策提供了科学依据^[18]。随着人类活动对于自然地理环境作用的不断增强,其逐渐成为驱动土壤环境演变的主要力量^[37],工业生产、农业生产和交通运输等人类活动已成为引起区域土壤重金属累积的核心要素^[9,26],且相近区域之间人类活动的联系更加密切^[38],对应的区域土壤重金属健康风险强度关联性越强。另外,化肥施用量、粮食单产、人口密度、地均GDP等人文过程也可作用于耕地土壤重金属累积^[12,17,26,37],进而对区域间的耕地土壤重金属健康风险强度的差异产生影响。因此,标准差椭圆、莫兰指数、地理探测器等空间信息分析模型可为揭示土壤重金属健康风险强度的空间集聚特征和影响因素提供基础支撑。

3 研究区域、方法与数据来源

3.1 研究区域

江苏省(116°21'E—121°56'E, 30°24'N—35°08'N)位于中国东部沿海地区,下辖95个县区(图1),陆地面积为 $10.32 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括苏北平原、江淮平原和滨海平原等在内的平原面积为 $8.97 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省陆地面积的86.89%,2020年耕地面积为 $7.63 \times 10^4 \text{ km}^2$,是6大世界级城市群之一的“长三角城市群”的核心组成部分,也是唯一一个地级市均进入到全国百强的省份。2005—2020年期间江苏省以不足全国3.6%的耕地生产了超过全国5.6%的粮食,在耕地高产出的背景下,耕地土壤重金属污

染形势也不容乐观,以往研究表明全省超过20%的耕地土壤受到重金属的轻度污染,区域间重金属污染类型、污染程度、污染面积等具有较大的差异,且As、Cd、Hg、Pb和Cr等耕地土壤重金属具有明显的富集特征,并整体呈现出区域性、低强度和多类型重金属污染的现象^[28,39],耕地土壤重金属对人体健康产生的威胁日益凸显。当前,江苏省尚未建立环境健康风险防控体系,环境健康风险也未纳入到生态环境管理制度中^[40],以江苏省为例进行耕地土壤重金属健康风险研究,对于保障土壤资源可持续利用、推动建立环境健康风险防控体系、落实“健康江苏2030”战略等具有重要的现实意义。

3.2 研究方法

3.2.1 健康风险与健康风险强度

基于美国环境保护署(US EPA)的健康风险评估模型,结合中国人群暴露手册中江苏省土壤暴露调查结果及相关学者研究成果^[13,32,41],分析不同调查点位耕地土壤重金属健康风险水平。鉴于土壤重金属通过皮肤和呼吸暴露方式进入人体的总量少于经口摄入量的1%^[21],日均暴露量主要基于经口摄入暴露途径分析(式1)。

$$ADD_i = C_i \times \frac{IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HI_i = \sum_{i=1}^n \frac{ADD_i}{RfD_i} \quad (2)$$

$$CR = \sum_{i=1}^n CR_i = \sum_{i=1}^n ADD_i \times SF_i \quad (3)$$

式中: ADD_i 为日均经口摄入重金属暴露量; C_i 为耕地土壤重金属*i*的浓度; IR 为摄入土壤频率; EF 、 ED 、 BW 和 AT 分别为暴露年限、暴露频率、体重和平均暴露时间; HI 和 CR 分别为耕地土壤重金属非致癌和致癌风险; RfD_i 和 SF_i 分别为重金属*i*毒性参考剂量和致癌斜率因子。当 $HI < 1$ 时,则耕地土壤重金属*i*的非致癌风险水平可被接受,相反则需引起关注; $CR_i \leq 10^{-6}$ 、 $10^{-6} < CR_i \leq 10^{-4}$ 和 $CR_i > 10^{-4}$ 分别表示重金属*i*在经口暴露途径的致癌风险可以被接受、处于可接受的风险水平但需要进行风险管控和被认为存在潜在致癌风险且需要治理^[15],具体参数见表1、表2。

基于不同调查点位健康风险评估结果,进一步构建以不同县区为研究基础单元的耕地土壤重金属健康风险强度分析模型:



图1 江苏省下辖县区分布图

Figure 1 Location of Jiangsu Province and its subordinate counties

表1 江苏省耕地土壤重金属暴露量评价相关参数

Table 1 Parameters for exposure dose assessment of heavy metals in cultivated soil in Jiangsu Province

变量	定义	单位	成人	儿童	英文全称
<i>EF</i>	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	365	365	Exposure Frequency
<i>ED</i>	暴露持续时间	a	30	6	Exposure duration
<i>BW</i>	人体质量	kg	61.8	15	Body weight
<i>IR</i>	土壤摄入量	$\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$	50	100	Ingestion Rate
<i>AT</i>	平均暴露时间	d	10950(非致癌作用) 27375(致癌作用)	2190(非致癌作用) 27375(致癌作用)	Averaging time

表2 重金属致癌斜率因子及毒性参考剂量

Table 2 Carcinogenic slope factor and toxic reference dose of heavy metals

变量	元素	Cr	Pb	Cd	As	Hg
致癌斜率因子(<i>SF</i>)	$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	0.003	0.0035	0.001	0.0003	0.0003
毒性参考剂量(<i>RD</i>)	$\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$	0.5	0.0085	—	1.5	—

$$THI_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^m CR_j}{m} \times AP_k \quad (4)$$

$$TCR_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^m HI_j}{m} \times AP_k \times 10^6 \quad (5)$$

式中: $THI_{i,k}$ 和 $TCR_{i,k}$ 分别代表耕地土壤重金属 i 在研究基础单元 k 的健康风险强度; j 为耕地土壤重金属调查点位; AP_k 为研究基础单元 k 从事农业生产的人口比重。

3.2.2 加权标准差椭圆

加权标准差椭圆主要分析地理要素在空间上的中心趋势、离散程度和方向趋势等,进而表征研究客体在空间的集聚特征、偏移轨迹以及区域对整体的影响等^[35],以耕地土壤重金属健康风险强度分析结果为权重,分析其加权平均中心和加权标准差椭圆,进而揭示其空间分布的总体特征,其对应的表达式为:

$$(\bar{X}, \bar{Y}) = \left(\frac{\sum_{k=1}^n w_k \times x_k}{\sum_{k=1}^n w_k}, \frac{\sum_{k=1}^n w_k \times y_k}{\sum_{k=1}^n w_k} \right) \quad (6)$$

$$\tan \theta = \frac{(A+B)}{C} \quad (7)$$

$$\text{其中: } A = \sum_{k=1}^n w_k^2 \times \tilde{x}_k^2 - \sum_{k=1}^n w_k^2 \times \tilde{y}_k^2; \quad (8)$$

$$B = \sqrt{A^2 + 4 \left(\sum_{k=1}^n w_k^2 \times \tilde{x}_k^2 \times \tilde{y}_k^2 \right)} \quad (9)$$

$$C = 2 \sum_{k=1}^n w_k^2 \times \tilde{x}_k \times \tilde{y}_k \quad (10)$$

式中: (\bar{X}, \bar{Y}) 为加权平均中心; w_k 为研究基础单元 k 的耕地土壤重金属健康风险强度; x_k 和 y_k 分别表示研究基础单元 k 中心的经纬度; \tilde{x}_k 和 \tilde{y}_k 分别表示江苏省平均中心与研究基础单元 k 中心的经纬度差值; n 为研究基础单元的数量。在分析加权平均中心和加权标准差椭圆时,将研究区域的平均中心和标准差椭圆作为对比分析的参照。

3.2.3 莫兰指数

空间自相关分析通过研究客体的位置属性来揭示其空间依赖性和空间异质性,通常采用莫兰指数 (Moran's I) 表示空间要素的自相关程度^[36],基于耕地土壤重金属健康风险强度分析结果,利用全局莫兰指数 (Global Moran's I) 揭示其在江苏省的空间相关性的总体趋势、局部莫兰指数 (Local Moran's

I) 明晰其在各个县区的空间集聚程度和异质性,具体的表达式为:

$$I = \frac{n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n W_{kl} (x_k - \bar{x})(x_l - \bar{x})}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n W_{kl} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (11)$$

$$I_k = \frac{n(x_k - \bar{x}) \sum_{l=1}^n W_{kl} (x_l - \bar{x})^2}{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2} \quad (12)$$

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (13)$$

式中: x_k, x_l 分别为研究基础单元 k 和 l 对应的耕地土壤重金属健康风险强度评估结果; W_{kl} 为研究基础单元 k 和 l 的空间关系测度; \bar{x} 是研究基础单元的健康风险强度的平均值; I 为全局莫兰指数; I_k 为局部莫兰指数; $Z(I)$ 则是用来检验空间自相关的显著性水平; $E(I)$ 和 $\text{Var}(I)$ 为对应的期望和方差。其中 I 的范围为 $[-1, 1]$, 该指数大于 0 则表明研究区域耕地土壤重金属健康风险强度呈现空间集聚特征, 小于 0 则呈现空间孤立特征, 等于 0 则呈随机分布特征^[42]。

3.2.4 地理探测器

地理探测器以空间分层异质性理论为基础,通过诊断研究对象的地理或属性空间分异性或耦合性,能够揭示其背后产生的机理和发生的主要驱动因子^[27],利用因子探测器分析影响因子对于耕地土壤重金属健康风险强度的解释程度,利用交互作用探测器识别两两影响因子在交互作用下的解释程度,分析模型如下:

$$q = 1 - \frac{1}{K\mu^2} \sum_{h=1}^R N_h \mu_h^2 \quad (14)$$

式中: N_h 和 μ_h^2 分别为 h ($h=1, 2, \dots, R$) 层的样本量和方差; K 为样本总量; q 为各探测因子对耕地土壤重金属健康风险强度的解释程度,其范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表示探测因子对其在空间分布上的解释力越强,相反则越弱。

交互作用探测器是在因子探测的基础上,分析两种探测因子交互时的 q 值,通过对比分析 $q(X_1 \cap X_2)$ 、 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 确定探测因子对因变量的交互作用,其类型可以划分为非线性减弱、单方减弱、相互增强、相互独立和非线性增强^[27]。基于已有研究成果^[9,10,25,26,28,32]以及数据的代表性和可获取性,选取地

2023年1月

均化肥施用量(X_1)、地均农业机械总动力(X_2)、粮食单产(X_3)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)、地均GDP(X_6)、人口密度(X_7)、汽车拥有量(X_8)和地均工业企业数(X_9)等9个探测因子。

3.3 数据来源

本文涉及的数据包括重金属的毒性数据、日均暴露参数、耕地土壤重金属调查点位数据、区域矢量数据和社会经济统计数据。日均暴露参数主要来源于中国人群暴露手册成人卷和儿童卷,重金属毒性数据来源于风险评估信息系统^①,矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心^②,耕地土壤重金属调查点位数据共10527个耕地土壤调查点位,其在江苏省各个县区的具体数量见图1,社会经济数据源于与土壤监测时间一致的2017年江苏省各县区统计年鉴(表1、表2)。

4 结果与分析

4.1 基于调查点位的健康风险评估结果分析

基于调查点位的耕地土壤重金属Cr、Pb、Cd、As和Hg的成人及儿童健康风险评价结果的描述性

统计分析如表3。对于致癌风险而言,Cr、Pb和As的儿童致癌风险的平均值均高于 10^{-6} ,并且超过 10^{-6} 的点位占比分别为99.97%、74.24%和98.39%,Cr和As的成人致癌风险的平均值、最大值以及5%分位数的分别为 10.9934×10^{-6} 和 4.5979×10^{-6} 、 39.8058×10^{-6} 和 21.2621×10^{-6} 、 4.9366×10^{-6} 和 1.8466×10^{-6} ,均高于可忽略致癌风险水平的最大限值 10^{-6} ,并且超过 10^{-6} 的点位占比分别为99.88%和97.75%,表明Cr、Pb和As的致癌风险处于可接受的风险水平但需要进行风险管控。对于非致癌风险而言,由于Cr、Pb、Cd、As和Hg的成人综合非致癌风险最大值为0.6158,远低于可接受水平的最大值1,表明其非致癌风险均处于可接受水平;Cr、Cd、As和Hg的儿童非致癌风险最大值均小于1,虽然Pb的儿童非致癌风险最大值为1.5848,但是其平均值、标准差、95%分位数及风险大于1的点位占比分别为0.5381、0.1943、0.8781和2.63%,表明江苏省耕地土壤重金属非致癌风险总体水平较低,尤其是成人非致癌风险,均低于可接受风险水平的最大限值。

表3 基于调查点位数据的江苏省耕地土壤重金属健康风险评价分析结果

Table 3 Results of health risk of heavy metals in cultivated soil based on the data of sampling sites in Jiangsu Province

		非致癌风险						致癌风险(10^{-6})			
		Cr	Pb	Cd	As	Hg	综合	Cr	Pb	As	综合
成人	平均值	0.0183	0.1633	0.0012	0.0255	0.0024	0.2108	10.9934	0.0777	4.5979	15.6690
	中位数	0.0179	0.1587	0.0001	0.0233	0.0003	0.2045	10.7605	0.0756	4.1942	15.2883
	众数	0.0151	0.1526	0.0001	0.0272	0.0006	0.2023	9.0615	0.0726	4.9029	13.5903
	标准差	0.0065	0.0590	0.0085	0.0125	0.0180	0.0632	3.9243	0.0281	2.2559	4.8481
	偏度	1.5960	0.9080	7.9910	1.3430	10.0300	0.8720	1.5960	0.9080	1.3430	0.5750
	峰度	8.6150	3.1020	62.9610	3.2500	101.5110	2.4570	8.6150	3.1020	3.2500	2.9510
	最小值	0.0000	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0155	0.0154	0.0004	0.0000	0.7169
	最大值	0.0663	0.4808	0.0995	0.1181	0.3186	0.6158	39.8058	0.2289	21.2621	43.7050
	5%百分位数	0.0082	0.0838	0.0001	0.0103	0.0001	0.1238	4.9366	0.0399	1.8466	8.4626
	95%百分位数	0.0275	0.2664	0.0004	0.0507	0.0025	0.3176	16.5049	0.1268	9.1262	23.9317
儿童	平均值	0.1510	0.5381	0.0102	0.2105	0.0107	0.9204	18.1171	1.2806	11.3659	30.7637
	中位数	0.1478	0.5232	0.0012	0.1920	0.0015	0.8923	17.7333	1.2453	10.3680	29.9712
	众数	0.1244	0.5029	0.0009	0.2244	0.0024	0.8455	14.9333	1.1968	12.1200	32.1939
	标准差	0.0539	0.1943	0.0697	0.1033	0.0791	0.2585	6.4673	0.4625	5.5767	9.3812
	偏度	1.5960	0.9080	7.9910	1.3430	10.0300	0.6450	1.5960	0.9080	1.3430	0.3680
	峰度	8.6150	3.1020	62.9610	3.2500	101.5110	1.5740	8.6150	3.1020	3.2500	1.7590
	最小值	0.0002	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000	0.0700	0.0253	0.0059	0.0000	1.4231
	最大值	0.5467	1.5848	0.8200	0.9733	1.4000	2.5151	65.6000	3.7717	52.5600	76.9912
	5%百分位数	0.0678	0.2762	0.0005	0.0845	0.0004	0.5647	8.1355	0.6573	4.5648	17.1953
	95%百分位数	0.2267	0.8781	0.0031	0.4178	0.0108	1.3712	27.2000	2.0899	22.5600	47.7016

① <https://rais.ornl.gov/index.html>

② <http://www.resdc.cn>

基于调查点位的江苏省耕地土壤重金属健康风险评估结果表明,儿童非致癌风险和致癌风险均高于成人,这主要由于儿童时期是生长发育的重要阶段,也是对各种营养物质、微量元素等需求的关键阶段,与成人阶段相比,其对环境污染物更加敏感以及更容易受到环境污染物的不利影响^[13,43];Cr、Pb和As是江苏省耕地土壤重金属健康风险的主要风险特征因子,其也是常熟市^[41]、泰州市^[43]、徐州市^[21]等江苏省局部区域的健康风险特征因子,也进一步表明耕地土壤重金属健康风险不容忽视,在后续的风险分析或管控过程中需要重点关注该风险特征因子,尤其是其引起的儿童致癌风险。

4.2 江苏省耕地土壤重金属健康风险强度评估结果分析

基于最大可能损失或者最大预期损失的健康

风险管控原则,以县区为研究基础单元,以耕地土壤重金属As、Pb和Cr的致癌风险评价结果为基础,评估江苏省不同县区健康风险强度并构建对应的雷达图(图2)。Cr、Pb和As在不同县区耕地土壤重金属健康风险强度变化范围为0.0158~0.6532、0.0002~0.0466和0.0025~0.3859,对应的综合健康风险强度变化范围为0.0256~1.0399,其中Cr在江苏省不同县区的耕地土壤重金属健康风险强度高于As和Pb,对应的健康风险强度高于0.5的县区为邳州市,对应的健康风险强度为0.6532;Pb的健康风险强度主要分布在0.03以下,超过0.03的县区分别为武进区、沭阳县、兴化市、邳州市和新沂市,对应的健康风险强度分别为0.0303、0.0320、0.0363、0.0466和0.0336;As的健康风险强度以低于0.3为核心,超过0.3的县区共8个,如邳州市、新沂市和沭阳县

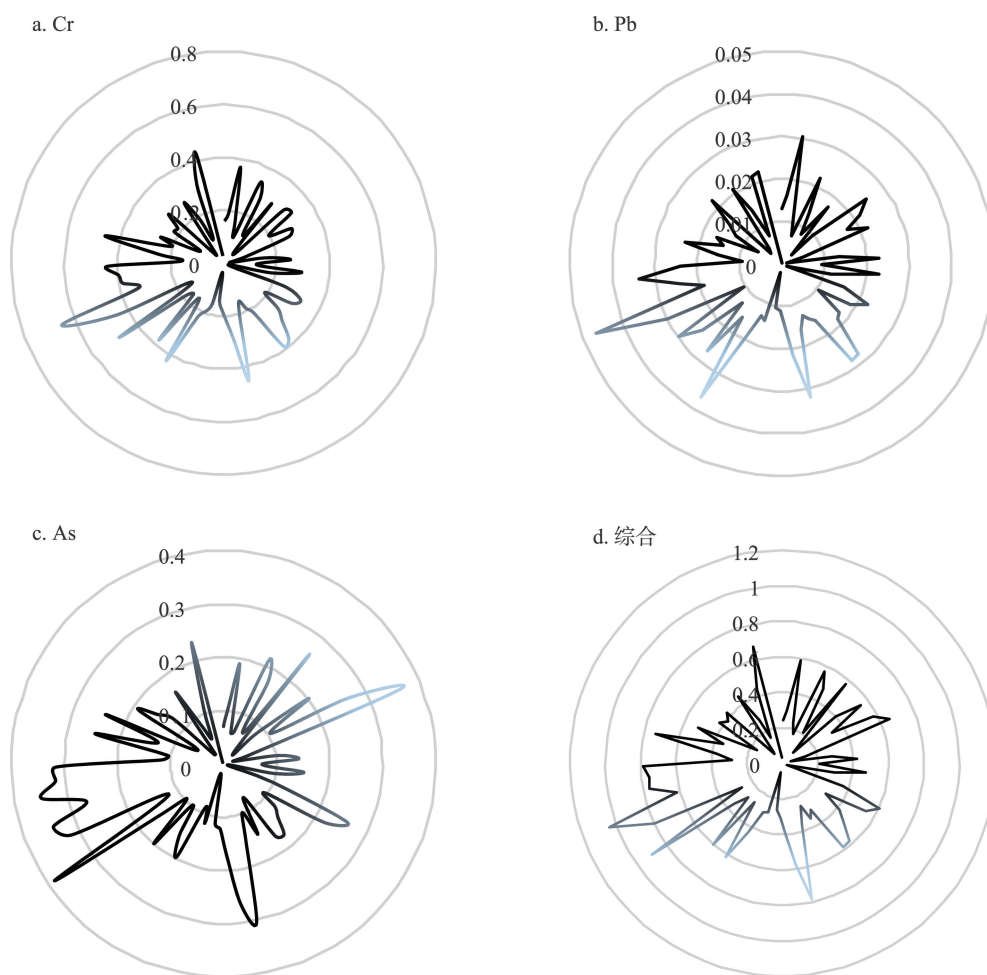


图2 江苏省不同县区耕地土壤重金属健康风险强度分析结果图

Figure 2 Results of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil in different counties of Jiangsu Province

2023年1月

等。同时,邳州市的耕地土壤重金属综合健康风险强度为1.0399,是江苏省所有县区健康风险强度唯一高于1的县区。除贾汪区之外,徐州市各县区的耕地土壤重金属Cr的健康风险强度均较高,而基于调查点位数据的徐州市各县区的耕地土壤重金属健康风险的平均水平在江苏省相对较低,如邳州市综合致癌风险的平均值为 18.87×10^{-6} ,低于江苏省 26.31×10^{-6} 的平均水平,从事农业生产的人口较多是导致徐州市健康风险强度在江苏省较高的主要原因。因此,在人地关系中,作为风险受体的“人”在区域环境健康风险的评价分析和风险管控中也需要重点关注。

4.3 耕地土壤重金属健康风险强度空间集聚特征分析

江苏省耕地土壤重金属健康风险强度加权标准差椭圆分析结果如图3,椭圆的扁率越大,表明其方向性越明显,短半轴表示数据分布的范围,短半

轴越长则表明其离散程度越大。江苏省耕地土壤重金属Cr、Pb、As以及综合健康风险强度加权平均中心的坐标分别为(444587.3414, 3654539.1100)、(446505.7925, 3648200.9010)、(436016.3805, 3671333.6240)和(441483.4596, 3660515.0760),综合健康风险强度的加权平均中心更接近于Cr的加权平均中心,表明Cr对于综合健康风险强度的贡献率较高。同时,研究区域的平均中心坐标为(453421.8896, 3638798.3550),Cr、Pb、As和综合健康风险强度的加权平均中心均在区域平均中心的西北部,进一步表明江苏省西北部区域是影响耕地土壤重金属健康风险强度的核心区域,且对于不同重金属影响程度的顺序为 $As > Cr > Pb$ 。Cr、Pb、As以及综合健康风险强度的加权标准差椭圆主要分布在扬州市、宿迁市、南京市等江苏省西部区域,其长短轴差距相对较大,均大于120 km,对应的扁率为0.5667、0.5709、0.5610和0.5651,且研究区域标准

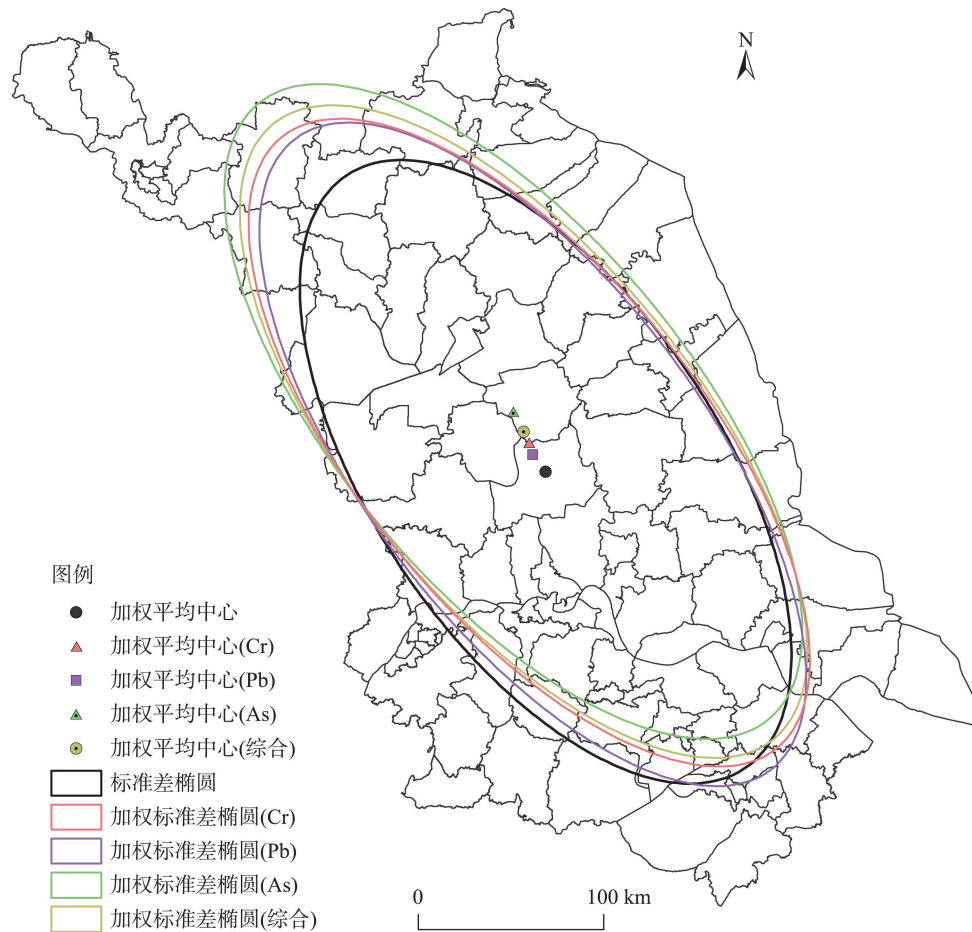


图3 江苏省耕地土壤重金属健康风险强度加权平均中心和加权标准差椭圆分析结果

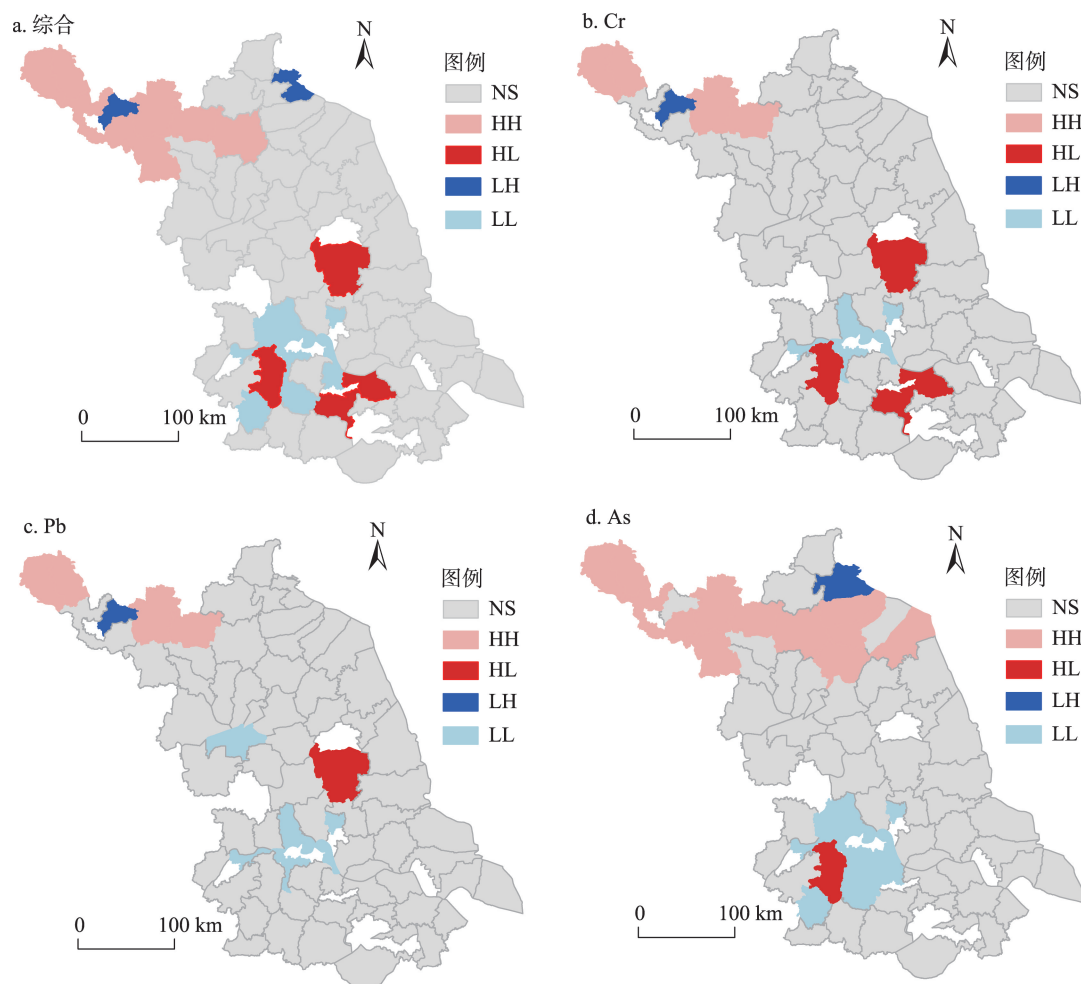
Figure 3 Weighted mean center and standard deviation ellipse of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil of Jiangsu Province

差椭圆的长轴扁率为0.5146,同时其对应的旋转角度分别为 141.06° 、 143.11° 、 140.35° 和 140.94° ,表明江苏省耕地土壤重金属健康风险强度具有明显方向性和向心性。

由于加权标准差椭圆侧重于定性分析江苏省不同县区的耕地土壤重金属健康风险强度的总体空间特征,因此,以不同县区的耕地土壤重金属健康风险强度为单元属性值,进一步利用全局空间自相关分析中的全局莫兰指数定量分析空间单元属性值与邻近单元属性值的空间集聚特征。全局空间自相关分析结果显示,耕地土壤Cr、Pb、As及综合健康风险强度的全局莫兰指数均大于0,并且其Z值均高于1.96,均通过了0.01水平的显著性检验,进一步表明江苏省区域耕地土壤重金属健康风险强度具有明显的空间集聚特征。Pb、Cr及As的健康风

险强度的全局莫兰指数分别为0.053、0.084和0.225,空间集聚态势逐步增强。同时,全局空间自相关分析也是加权标准差椭圆分析的补充与验证,全局莫兰指数和加权标准差椭圆可有效揭示江苏省耕地土壤重金属健康风险强度空间集聚特征。

全局莫兰指数和加权标准差椭圆侧重于揭示研究对象总体的空间集聚特征和分布方向。因此,在上述分析的基础上进一步利用局部莫兰指数揭示江苏省不同县区耕地土壤重金属健康风险强度的空间依赖性(图4)。江苏省不同县区As的健康风险强度对应的HH和LL类型区的数量均为11个,其中HH类型区主要分布在江苏省北部由徐州市丰县至盐城市滨海县沿线的部分县区,LL类型区主要分布在以镇江市所有县区为核心,包括南京市、常州市、扬州市部分县区在内的江苏省中部地区;Cr



NS:无显著关系;HH:高高聚类;HL:高低聚类;LH:低高聚类;LL:低低聚类

图4 江苏省耕地土壤重金属健康风险强度局部空间自相关分析结果

Figure 4 Local Moran's I of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil of Jiangsu Province

2023年1月

健康风险强度的HH、HL、LH和LL类型区数量分别为4、4、1和6个,其中HH区主要分布于徐州市的邳州市、新沂市、丰县、沛县,LL类型区主要分布在江苏省中部的镇江市、扬州市以及南京市等部分县区,LH和HL类型区则零散分布于江苏省整个区域;Pb健康风险强度的4种类型区域的数量分别为4、1、1和7个,以LL类型区域为主,和Cr的空间分布特征相似;江苏省不同县区综合健康风险强度的HH类型区数量为7个,主要分布于江苏省西北部的徐州市,LL类型区数量为10个,主要分布在溧水区、金坛区等江苏省中部的县区,HL类型区分布在句容市、江阴市、常州市和江阴市,LH类型区分布在贾汪区和连云区。

江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的空间集聚特征主要以高值或低值的空间聚类为主,其类型区数量占4种类型区的68.18%,其中HH类型区主要分布在江苏省北部,LL类型区主要分布在镇江市、扬州市等江苏省中部区域,HL和LH类型区则零散地分布在江苏省部分县区,在后续风险管控策略制定的过程中需重点关注包括丰县、沛县、新沂市等在内的HH类型区。

4.4 基于地理探测器的健康风险强度影响因素分析

因子探测器分析结果如表4所示,影响江苏省耕地土壤重金属综合健康风险强度的9个探测因子的重要性排序依次为居民受教育程度(X_4)>地均化肥施用量(X_1)>粮食单产(X_3)>道路密度(X_5)>地均规模以上工业企业数(X_9)>地均GDP(X_6)>人口密度(X_7)>汽车拥有量(X_8)>地均农业机械总动力(X_2),且居民受教育程度(X_4)和地均化肥施用量(X_1)的 q 值均大于0.4。对于不同类型重金属的健康风险强度而言,地均化肥施用量(X_1)、粮食单产(X_3)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)和地均GDP(X_6)是影响Cr的健康风险强度的核心因素,对应的 q 值均大于0.3;影响Pb的健康风险强度的主要因素为道路密度(X_5)、地均GDP(X_6)和人口密度(X_7);地均化肥施用量(X_1)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)、地均GDP(X_6)和地均工业企业数(X_9)则是影响As健康风险强度的主要因素,尤其是地均化肥施用量和居民受教育程度,对应的 q 值均高于0.5。总体来看,地均化肥施用量(X_1)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)和地均GDP(X_6)是影响江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的主要因

素,其对应的 q 值的排序相对较高且均大于0.3。由于不同探测因子对于不同类型的重金属健康风险强度的作用程度也具有一定的差异,需进一步借助地理探测器的交互式探测器模块来分析不同探测因子对江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的综合作用程度。

地理探测器的交互式探测器分析结果如表4,对于不同类型重金属健康风险强度而言,探测因子 $X_1 \cap X_3$ 、 $X_3 \cap X_4$ 、 $X_4 \cap X_7$ 对于Cr的 q 值分别为0.9024、0.9338和0.9261; $X_1 \cap X_6$ 、 $X_2 \cap X_7$ 、 $X_3 \cap X_4$ 、 $X_4 \cap X_7$ 对于Pb的 q 值分别为0.9260、0.9297、0.9012和0.9800; $X_1 \cap X_3$ 、 $X_1 \cap X_5$ 、 $X_3 \cap X_4$ 、 $X_4 \cap X_5$ 、 $X_4 \cap X_7$ 对于As的 q 值分别为0.9634、0.9185、0.9433、0.9672和0.9466,其交互作用的 q 值均高于0.9,远高于对应的单一探测因子的 q 值的加和,同时也表明本文所选择的耕地利用要素与社会要素的探测因子交互作用对于健康风险强度的作用程度更高。另外,与耕地土壤重金属Cr和Pb相比,探测因子对于As的健康风险强度交互作用的 q 值总体水平较高,表明其更容易受到探测因子交互作用的影响。探测因子对江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的交互作用主要以非线性增强为主导作用(87.5%),尤其对于不同重金属健康风险强度的作用程度,表明注重多种影响因素的联防联控有利于提升江苏省耕地土壤重金属健康风险的管控效率。

5 基于健康风险视角下的江苏省耕地土壤重金属管控对策分析

耕地土壤重金属健康风险管控是落实“预防为主、保护优先”的土壤污染综合治理理念的重要保障,是构建土壤污染防治体系重要的组成部分,也是一项关系到社会稳定、经济循环、生态环境健康等的复杂系统工程。在分析江苏省耕地土壤重金属健康风险特征因子、空间集聚特征和影响因素的基础上,进一步结合土壤重金属在自然环境中的迁移特征,按照预防为主、保护优先、分类管理的原则,基于环境与健康视角,制定了以Cr、As和Pb为核心的管控要素、以“Z”字型的空间管控优先顺序、以地理探测因子的 q 值为依据并注重联防联控的江苏省耕地土壤重金属风险管控对策,进而为江苏省土壤污染防治、公众健康保障、土壤资源永续利用等提供必要的决策支持(图5)。

表4 耕地土壤重金属健康风险强度因子探测和交互式探测结果

Table 4 Influencing factors of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil based on geographical detector

要素	探测因子	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉
Cr	X ₁	0.3101								
	X ₂	0.6985*	0.1908							
	X ₃	0.9024*	0.8898*	0.3756						
	X ₄	0.7879*	0.8698*	0.9338*	0.3362					
	X ₅	0.8769*	0.6592*	0.7191*	0.8615*	0.3113				
	X ₆	0.8289*	0.8413*	0.6491**	0.7175*	0.7143*	0.3166			
	X ₇	0.8232*	0.8298*	0.6959*	0.9261*	0.7889*	0.7013*	0.2917		
	X ₈	0.7289*	0.5561*	0.6350**	0.6762*	0.5146**	0.7030*	0.7059*	0.2763	
	X ₉	0.8301*	0.7760*	0.7570*	0.7378*	0.6578*	0.6205*	0.8492*	0.5328**	0.2958
Pb	X ₁	0.2664								
	X ₂	0.5709*	0.1516							
	X ₃	0.8453*	0.8769*	0.2730						
	X ₄	0.8404*	0.8485*	0.9260*	0.2932					
	X ₅	0.8615*	0.6452*	0.7228*	0.8950*	0.3155				
	X ₆	0.9297*	0.8297*	0.6373*	0.7786*	0.8060*	0.3613			
	X ₇	0.8193*	0.9012*	0.6554**	0.9800*	0.7797*	0.7470*	0.3829		
	X ₈	0.6925*	0.5326*	0.5666*	0.6217*	0.5734*	0.7274*	0.6974*	0.2058	
	X ₉	0.8084*	0.7411*	0.6610*	0.7767*	0.6619*	0.6910*	0.8084*	0.3871**	0.2372
As	X ₁	0.5518								
	X ₂	0.7770*	0.1441							
	X ₃	0.9634*	0.8796*	0.2695						
	X ₄	0.8704**	0.8909*	0.9185*	0.5571					
	X ₅	0.9433*	0.6876*	0.8150*	0.9672*	0.3421				
	X ₆	0.8685*	0.8368*	0.5448**	0.8364**	0.7713*	0.3006			
	X ₇	0.8725*	0.8143*	0.7314*	0.9466*	0.6321*	0.6852*	0.2886		
	X ₈	0.8222*	0.6337*	0.6624*	0.8191*	0.5867**	0.7538*	0.7686*	0.2491	
	X ₉	0.8601**	0.8663*	0.8626*	0.7864**	0.6932*	0.6396**	0.8667*	0.4719**	0.3466
综合	X ₁	0.4285								
	X ₂	0.7473*	0.1592*							
	X ₃	0.9597*	0.9073*	0.3465						
	X ₄	0.8339**	0.8844*	0.9402*	0.4520					
	X ₅	0.9284*	0.6818*	0.7759*	0.9166*	0.3457				
	X ₆	0.8558*	0.8510*	0.6090**	0.7705*	0.7440*	0.3154			
	X ₇	0.8638*	0.8417*	0.7312*	0.9450*	0.7431*	0.7102*	0.3120		
	X ₈	0.7696*	0.5566*	0.6591*	0.7514*	0.5303**	0.7619*	0.7616*	0.2754	
	X ₉	0.8600*	0.8192*	0.8308*	0.7627**	0.6785*	0.6624*	0.8991*	0.5248**	0.3305

注: *为非线性增强, **为双因子增强。

基于调查点位数据的耕地土壤重金属健康风险评价结果表明,Cr、As和Pb是江苏省耕地土壤重金属健康风险特征因子,对应的健康风险强度总体水平的排序为Cr>As>Pb,在风险管控策略制定时需被重点管控,管控优先级为Cr、As和Pb。从耕地土壤重金属健康风险的空间分布格局分析结果可以

看出,以徐州市和宿迁市部分县区为核心的江苏北部各县区的耕地土壤重金属健康风险相对较高,同时As、Cr、Pb及综合健康风险强度的空间集聚特征呈现出由HH类型区到LL类型区的“Z”字型空间结构,HH类型区主要分布在“Z”字型的空间结构的上侧,而LL类型区主要分布在“Z”字型的空间结构的

2023年1月

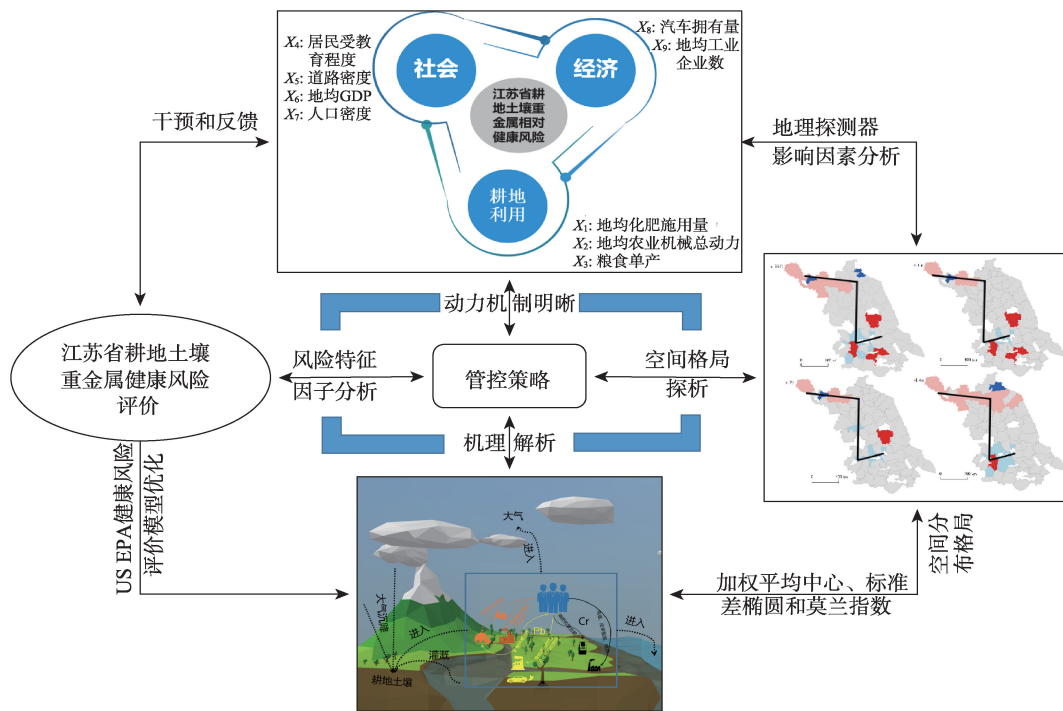


图5 江苏省耕地土壤重金属健康风险管控策略分析框架

Figure 5 Framework of analysis of health risk control strategies for cultivated soil heavy metals of Jiangsu Province

下侧。因此,江苏省西北部的徐州市、宿迁市、连云港市、淮安市的部分县区作为江苏省耕地土壤重金属健康风险的严格管控区进行风险管控,尤其是丰县、沛县、新沂市;扬州市、泰州市、南京市、镇江市、常州市和无锡市的县区作为重点管控区进行健康风险管控;盐城市、南通市以及苏州市的县区作为一般管控区进行风险管控。地理探测结果显示,地均化肥施用量(X_1)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)和地均GDP(X_6)是影响江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的核心要素。①江苏省一直是化肥生产和使用主要省份,尤其是在严格管控区,其在2017年的化肥施用总量高达 1.675×10^6 t,占江苏省总量的55.10%,徐州市、宿迁市、连云港市和淮安市的单位耕地化肥施用量分别为 0.96 、 0.84 、 0.65 和 $0.79 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,均高于 $0.55 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的江苏省平均水平和 $0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的全国平均水平,未来需持续推进测土配方施肥、化肥总量控制等化肥减量增效行动,降低化肥在耕地生产过程中的使用量;持续开展农业生产人员职业技术培训,保障农业生产过程中上述对策的实施,提升化学肥料使用效率;另外,当前江苏省并未进行提升居民环境与健康素养的相关政

策、指南、规划等,可进一步通过建立素养提升工作体系、加强素养科普能力建设、传播普及农业生产与环境健康的知识,提高居民对耕地土壤重金属与环境健康关系的理性认识,进而为降低耕地土壤重金属健康风险提供必要的知识、行为和技能。②由耕地土壤重金属的道路距离衰减曲线可知,耕地土壤重金属含量随着道路距离的增加呈现出先急剧上升后略有下降的趋势^[44,45],未来可进一步加强以清洁燃料为核心的交通工具的推广使用,并可通过超累积植物种植、道路绿化等方式加强对于道路密度较高的区域耕地土壤重金属的管控。③自2011年以来,江苏省GDP中工业增加值占比为40%左右,随之而来的能源、铁矿石、煤炭等的消耗量以及固体废弃物、废水、废气等的排放量在全国也占有较高的比例,如2017年江苏省粗钢产量、工业废水排放量均超过全国总量的10%以上,工业废水、废气、废渣等中的重金属可以通过污水灌溉、大气沉降、化学循环等直接或间接的方式进入到土壤中,且以往研究表明工业GDP占比是影响土壤重金属累积的重要因素^[25,46],因此,需要进一步制定加快江苏省经济高质量发展的相关举措,提升绿色经济在

GDP的比重。④以非线性增强为主导作用的交互式探测结果进一步表明,区域耕地土壤重金属健康风险强度受多种因素共同作用,共同推进包括提升居民受教育程度、降低地均化肥施用量、提升粮食绿色生产水平等在内的耕地土壤重金属健康风险强度的管控措施,进而提升耕地土壤重金属健康风险管控效率。

6 结论与研究展望

6.1 结论

基于健康风险评估的理论框架,本文首次构建了省域耕地土壤重金属健康风险强度的评价方法体系,并利用加权平均中心、标准差椭圆、莫兰指数和地理探测器揭示了江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的空间分布格局和影响因素,基于此初步制定了以Cr、As和Pb为核心的管控要素、以“Z”字型的空间管控优先顺序、以探测因子的 q 值为依据并注重联防联控的江苏省耕地土壤重金属风险管控策略。主要结论如下:

(1)与成人相比,江苏省耕地土壤重金属Cr、Pb、Cd、As和Hg对于儿童健康威胁程度更高,Cr、Pb、As是主要风险特征因子,对应的儿童致癌风险值处于 10^{-4} ~ 10^{-6} 之间的点位占比分别为99.97%、74.24%和98.39%,需要重点关注其诱发的致癌性疾病或损伤。

(2)不同县区耕地土壤Cr、Pb和As在健康风险强度的变化范围分别为0.0158~0.6532、0.0002~0.0466和0.0025~0.3859,其对应的健康风险强度的总体顺序Cr>As>Pb。不同类型耕地土壤重金属健康风险强度在不同县区有所差异,且综合健康风险强度大于0.5的县区主要分布在江苏省北部的徐州市、宿迁市、连云港市。

(3)江苏省耕地土壤重金属Cr、Pb、As以及综合健康风险强度的加权平均中心均分布在江苏省地理中心的北部,且加权标准差椭圆与标准差椭圆相比具有较为明显的方向性和向心性,对应全局莫兰指数分别为0.053、0.084、0.225和0.143,均通过了0.01水平的显著性检验,具有显著空间集聚态势,且总体呈现“西南-东北”的空间分布格局。局部空间集聚呈现出“Z”字型的空间结构,且以HH和LL空间聚类为主,其对应的类型区数量占4种类型区的68.18%。

(4)影响江苏省耕地土壤重金属健康风险强度的主要因子为地均化肥施用量(X_1)、居民受教育程度(X_4)、道路密度(X_5)和地均GDP(X_6),其对应的 q 值均大于0.3,各探测因子的两两交互作用表现为非线性增强和双因子增强,且非线性增强所占比重为87.5%。

6.2 研究展望

良好的土壤环境是人类健康生存和发展的基础保障,也是建设健康环境的重要支撑,中国环境与健康研究尚处于探索阶段,包括健康风险强度、加权平均中心、标准差椭圆和莫兰指数在内的江苏省耕地土壤重金属健康风险研究方法体系可为实施流域性和全国性环境污染物健康风险及其空间分析规律的研究提供参考借鉴^[47],研究结果也可以为落实识别风险分布状况、推动健康风险防控和增强环境健康技术支撑能力等的《“十四五”环境健康工作规划》主要任务提供现实依据。

本文虽在考虑重金属毒性作用机理、健康风险评估理论框架和健康风险受体的基础上,首次揭示了省域耕地土壤重金属健康风险强度,为健康风险研究提供了新的思路,但也存在需要改进的方面:

(1)由于重金属健康风险的累积效应且本文主要分析耕地土壤Cr、Pb、Cd、As和Hg的健康风险强度,不可避免地造成评价结果的局限性,同时当前采取的经口暴露途径下的耕地土壤暴露参数主要源于《中国人群暴露参数手册》,未来可进一步拓展Ni、Cu、Mn等耕地土壤重金属以及对应的区域暴露参数^[12,13],进而更全面准确地反映区域耕地土壤重金属健康风险强度。

(2)在加权标准差椭圆、莫兰指数、地理探测器等地理科学的方法支撑下,本文探究了区域健康风险强度的空间集聚特征和影响因素,也进一步验证了化肥减量增效、区域教育水平提升等可以缓解耕地土壤重金属健康风险强度,但由于探测因子数据获取的限制性,本文主要选取了地均化肥施用量(X_1)和居民受教育程度(X_4)等具有代表性的探测因子作为地理探测器的自变量,而土壤重金属与人体健康作为人地系统中较为复杂的子系统,涉及到整体与局部、局部与局部、整体与外部环境之间的有机联系,未来可进一步拓展探测因子的范畴,更加全面地反映“人”对“地”的影响^[3]。

(3)第二次土壤污染普查为其时间变化特征的

2023年1月

研究提供了可能,由于研究数据获取的限制,本文并未进行该方面的研究,期望在更多学科和更全面数据支持下,从时间和空间两方面入手,开展大尺度的耕地土壤重金属健康风险的探讨,深入研究其未来格局动态趋势。

参考文献(References):

- [1] Environment U. Global Environment Outlook- Geo- 6: Healthy Planet, Healthy People[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2019.
- [2] WHO. Preventing Disease through Healthy Environments: A Global Assessment of the Burden of Disease from Environmental Risks [R/OL]. [(2016-03-14) [2022-05-21]. <https://www.who.int/news/item/14-03-2016-preventing-disease-through-healthy-environments-a-global-assessment-of-the-burden-of-disease-from-environmental-risks>.
- [3] 宋茂勇, 江桂斌. 加强环境与健康研究 助力美丽中国建设[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(11): 1317-1320. [Song M Y, Jiang G B. Strengthen environmental and health research capacity to build a beautiful China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(11): 1317-1320.]
- [4] Carducci A L, Agodi A, Ancona C, et al. Impact of the environment on the health: From theory to practice[J]. Environmental Research, 2021, DOI: 10.1016/j.envres.2020.110517.
- [5] 陈发虎, 吴绍洪, 崔鹏, 等. 1949-2019年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1799-1830. [Chen F H, Wu S H, Cui P, et al. Progress of applied research of physical geography and living environment in China from 1949 to 2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1799-1830.]
- [6] Sarwar N, Imran M, Shaheen M R, et al. Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives[J]. Chemosphere, 2017, 171: 710-721.
- [7] Ren S Y, Song C Q, Ye S J, et al. The Spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: A meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150322.
- [8] Briffa J, Sinagra E, Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans[J]. Heliyon, 2020, DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04691.
- [9] Yang Q, Li Z, Lu X, 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, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.068.
- [10] Qin G W, Niu Z D, Yu J D, et al. Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology[J]. Chemosphere, 2021, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129205.
- [11] 杨湜烟, 刘杏梅, 徐建明. 土壤重金属污染健康风险评估新视角: 概率风险评估的源起及展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 28-37. [Yang T Y, Liu X M, Xu J M. New perspectives about health risk assessment of soil heavy metal pollution: Origin and prospects of probabilistic risk analysis[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 28-37.]
- [12] Xiao R, Wang S, Li R, et al. Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 17-24.
- [13] Zhang H W, Zhang F, Song J, et al. Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China[J]. Environmental Research, 2021, DOI: 10.1016/j.envres.2021.111702.
- [14] Trujillo-González J M, Torres-Mora M A, Keesstra S, et al. Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses[J]. The Science of the Total Environment, 2016, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.101.
- [15] Yesilkanat C M, Kobya Y. Spatial characteristics of ecological and health risks of toxic heavy metal pollution from road dust in the black sea coast of Turkey[J]. Geoderma Regional, 2021, DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00388.
- [16] Yang S S, Feng W Z, Wang S Q, et al. Farmland heavy metals can migrate to deep soil at a regional scale: A case study on a wastewater-irrigated area in China[J]. Environmental Pollution, 2021, DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116977.
- [17] Wang Y, Qiao M, Liu Y, et al. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin City Cluster, China[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2012, 24(4): 690-698.
- [18] 刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2547-2569. [Liu C M, Zheng D, Cui P, et al. Innovative development and prospect of physical geography[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2547-2569.]
- [19] Cao Y X, Zhao M J, Ma X Y, et al. A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: Mechanism and their combined effect on organisms and humans[J]. The Science of the Total Environment, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147620.
- [20] Sun J X, Zhao M L, Huang J L, et al. Determination of priority control factors for the management of soil trace metal(loid)s based on source-oriented health risk assessment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127116.
- [21] 姬超, 侯大伟, 李发志, 等. 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1440-1448. [Ji C, Hou D W, Li F Z, et al. Assessment and spatial characteristics analysis of human health risk of heavy metals in cultivated soil[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1440-1448.]
- [22] Shi T R, Ma J, Wu F Y, et al. Mass balance-based inventory of heavy metals inputs to and outputs from agricultural soils in Zhejiang Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2019,

- 649: 1269–1280.
- [23] Chen L, Zhou S, Wu S, et al. Combining emission inventory and isotope ratio analyses for quantitative source apportionment of heavy metals in agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 204: 140–147.
- [24] Mostert M M R, Ayoko G A, Kokot S. Application of chemometrics to analysis of soil pollutants[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2010, 29(5): 430–445.
- [25] 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 X K, Zhang Y X, Huang B, et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 82–91.]
- [26] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(10): 2219–2238. [Chen Y L, Weng L P, Ma J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2219–2238.]
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134. [Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.]
- [28] Wang Y, Duan X, Wang L. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, D OI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134953.
- [29] Naidu R, Biswas B, Willett I R, et al. Chemical pollution: A growing peril and potential catastrophic risk to humanity[J]. *Environment International*, 2021, DOI: 10.1016/j.envint.2021.106616.
- [30] Ahmad W, Alharthy R D, Zubair M, et al. Toxic and heavy metals contamination assessment in soil and water to evaluate human health risk[J]. *Scientific Reports*, 2021, DOI: 10.1038/s41598-021-94616-4.
- [31] Mitra S, Chakraborty A J, Tareq A M, et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity[J]. *Journal of King Saud University – Science*, 2022, DOI: 10.1016/j.jksus.2022.101865.
- [32] Wang F F, Guan Q Y, Tian J, et al. Contamination characteristics, source apportionment, and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil in the Hexi Corridor[J]. *CATENA*, 2020, DOI: 10.1016/j.catena.2020.104573.
- [33] US EPA. Conducting a Human Health Risk Assessment[R/OL]. [2022-06-25] [2022-08-01]. <https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>.
- [34] Peng C, Cai Y, Wang T, et al. Regional probabilistic risk assessment of heavy metals in different environmental media and land uses: An urbanization-affected drinking water supply area[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1–9.
- [35] 秦昆. *Gis空间分析理论与方法*[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010. [Qin K. *Theories and Methods of Spatial Analysis in GIS* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010.]
- [36] 王劲峰, 李连发, 葛咏, 等. 地理信息空间分析的理论体系探讨[J]. *地理学报*, 2000, (1): 92–103. [Wang J F, Li L F, Ge Y, et al. A theoretic framework for spatial analysis[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, (1): 92–103.]
- [37] 李小云, 杨宇, 刘毅, 等. 中国人地关系的系统结构及2050年趋势模拟[J]. *地理科学*, 2021, 41(2): 187–197. [Li X Y, Yang Y, Liu Y, et al. The systematic structure and trend simulation of China's man-land relationship until 2050[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(2): 187–197.]
- [38] Goodchild M F. The validity and usefulness of laws in geographic information science and geography[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 300–303.
- [39] 廖启林, 华明, 金洋, 等. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(5): 1163–1174. [Liao Q L, Hua M, Jin Y, et al. A preliminary study of the distribution and pollution source of heavy metals in soils of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 2009, 36(5): 1163–1174.]
- [40] 江苏省生态环境厅. 关于印发《江苏省“十四五”生态环境保护规划》的通知[R/OL]. (2021-11-09) [2022-03-17]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2021/11/9/art_83554_10106343.html. [Department of Ecology and Environment of Jiangsu Provincial. Notice on Printing and Distributing the “Fourteenth Five Year” Ecological Environment Protection Plan of Jiangsu Province[R/OL]. (2021-11-09) [2022-03-17]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2021/11/9/art_83554_10106343.html.]
- [41] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 1658–1668.
- [42] Xiao G X, Hu Y L, Li N, et al. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J]. *Food Control*, 2018, 89: 32–37.
- [43] Xu L, Dai H P, Skuza L, et al. Integrated survey on the heavy metal distribution, sources and risk assessment of soil in a commonly developed industrial area[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113462.
- [44] Zhang J, Wu L, Zhang Y J, et al. Elemental composition and risk assessment of heavy metals in the PM10 fractions of road dust and roadside soil[J]. *Particuology*, 2019, 44: 146–152.
- [45] Pant P, Harrison R M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77: 78–97.
- [46] Hu B F, Shao S, Ni H, et al. Current status, spatial features, health risks, and potential driving factors of soil heavy metal pollution in china at province level[J]. *Environmental Pollution*, 2020, DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114961.
- [47] 龚胜生, 王无为, 杨林生, 等. 地理学参与健康中国建设的重点领域与行动建议[J]. *地理学报*, 2022, 77(8): 1851–1872. [Gong S S, Wang W W, Yang L S, et al. The key fields and action suggestions of geography participating in the construction of Healthy China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(8): 1851–1872.]

Spatial agglomeration characteristics and influencing factors of health risk intensity of heavy metals in cultivated soil in Jiangsu Province

Ji Chao¹, HOU Dawei², ZHAO Xiaojie¹, YU Bo¹, BAO Guangjing³, WU Feng⁴, SUN Hua¹

(1. College of Land Management, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. School of Logistics and Management Engineering, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] Environmental health risk has become the focus of current global research due to the fact that environmental pollution causes harm to human health. The research on health risk of heavy metals in cultivated soil at the provincial level based on interdisciplinary perspectives is of great significance for expanding the understanding of environmental health risk, formulating the control strategies of health risk, and protecting public health. **[Methods]** Based on the theories of human-environment relationship, the essential connotation of environmental health risk, and spatial statistical analysis methods in geography, we constructed an analytical framework for health risk of heavy metals in the soil of cultivated land. The characteristic factors, the spatial agglomeration characteristics, and the influencing mechanism of health risk were analyzed. Furthermore, the key points for health risk control were identified. **[Results]** The results show that: (1) The health risk levels of heavy metals Cr, Pb, Cd, As, and Hg in the cultivated soil of Jiangsu Province are within acceptable range. But Cr, Pb, and As were the main risk characteristic factors and need to be controlled. (2) Heavy metals in cultivated soil in some counties of Northern Jiangsu Province had a greater impact on the relative health risk level than the rest parts of the province. The degree of influence of different characteristic risk factors for the region was $As > Cr > Pb$, and the spatial distribution generally presented a pattern of northeast > southwest. (3) As, Cr, Pb, and the comprehensive health risks showed a spatial agglomeration trend, and the spatial structure of agglomeration exhibited a high-high and low-low pattern. (4) The q values of the four detection factors areal average fertilizer application, residents' education level, road density, and areal average GDP were higher than 0.3, and any two detection factors showed either a nonlinear enhancement or a dual-factor enhancement effect. **[Conclusion]** The health risk intensity of heavy metals in cultivated soil puts forward a fresh thought on environment and health researchs, and the research results could provide the practical basis for formulating control strategies on heavy metals in cultivated soil in Jiangsu Province.

Key words: health risk intensity; heavy metals; cultivated soil; geographical detector; Jiangsu Province