

经济发达地区耕地景观格局对土壤重金属污染风险的影响分析

李武艳¹, 朱从谋², 和雪滢³, 王 华⁴, 周依甸³, 徐保根¹

(1. 浙江财经大学土地与城乡发展研究院, 杭州 310018; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3. 浙江财经大学工商管理
学院, 杭州 310018; 4. 浙江财经大学东方学院, 嘉兴 314000)

摘 要: 探讨耕地景观格局对土壤重金属污染风险的影响有利于丰富耕地可持续利用和保护路径, 对维护国家粮食安全和景观生态安全具有重要意义。该研究以经济发达地区县市为研究对象, 基于土地利用数据、耕地分等成果和 93 个样点采样数据, 测算耕地重金属镉 (Cd)、铅 (Pb) 和汞 (Hg) 污染水平和耕地景观格局指数, 采用逐步回归模型和空间回归模型分析耕地景观格局与重金属污染的关系。结果表明: 1) 研究区各土壤重金属因子污染指数及内梅罗综合评价指数的均值范围为 0.22~0.42, Cd、Pb 和 Hg 污染风险依次降低, 整体污染风险较低, 单个重金属污染指数变异系数均大于 0.5, 污染风险较高地区呈现团状聚集空间分布特征。2) 耕地重金属污染与景观格局在城乡和道路梯度上存在明显的空间关联关系。3) 耕地不同类型重金属污染与耕地景观格局各类指数呈现显著相关关系, 耕地景观斑块规模、破碎度以及斑块形状复杂度与耕地重金属污染呈显著负相关关系, 耕地景观聚集度与耕地重金属污染呈显著正相关关系。该研究进一步深化耕地景观格局与土壤重金属污染的定量关系, 可为从景观格局优化路径控制土壤重金属污染提供参考。

关键词: 土壤; 重金属; 污染; 景观格局; 空间计量模型

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.029

中图分类号: X37

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0233-09

李武艳, 朱从谋, 和雪滢, 等. 经济发达地区耕地景观格局对土壤重金属污染风险的影响分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 233-241. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.029 <http://www.tcsae.org>

Li Wuyan, Zhu Congmou, He Xueying, et al. Impacts of cultivated land landscape patterns on the risk of soil heavy metal pollution in economically developed areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 233-241. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.029 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

土壤重金属因其不可降解、移动且具有毒性的特性^[1-2], 直接或间接通过食物链威胁着粮食安全、生态系统和人类健康^[3-4]。据 2014 年原环境保护部和原国土资源部发布《全国土壤污染状况调查公报》显示, 目前全国近 1/5 耕地主要受到重金属污染。已有研究揭示中国自 20 世纪 80 年代以来, 耕地土壤重金属含量呈增加趋势, 且南方地区超标占比变化高于北方^[5]。景观格局在时空上直接反映了人类活动对土地利用/覆盖的影响, 景观类型、结构和空间格局的变化对土壤重金属的累积、分布和迁移等过程产生显著影响^[6-7]。靠近道路^[8-9]、电子垃圾处理厂^[10]、射击场越近^[11], 周边土壤中与污染源相关的重金属元素含量往往也越高。县域尺度上的工业用地位置、数量和景观多样性^[12]以及较大尺度范围内的景观基底和格局^[13]被证实能很好地反映或者模拟土壤中重金属元素。耕地作为一种重要的景观类型, 极易受人类活动干扰。耕地重金属污染的产生与发展与地形、土壤、土地利用以及人类活动等密切相关^[3,14-15]。景观格局的优化是耕地生态保护和管理的有效措施, 探究耕地景观格局对土壤重金属污染的影响, 能够从土地资源的优化配置和

景观可持续管理的角度为土壤重金属污染的预防和管控提供科学依据和决策支持。

目前关于耕地重金属污染的研究主要集中在土壤重金属污染评价^[16]、空间分布^[17]、来源解析^[18-19]、环境风险^[20]等方面。由于土壤污染具有显著的累积性, 其空间分布越来越受到人类活动的影响, 诸如交通、开矿、农药化肥和工业废物等^[21-22]。耕地景观格局是人类农业土地利用活动的集中体现, 与耕地土壤重金属污染累积及其空间分布密切相关^[23-24]。李铖等^[25]以珠江三角洲为例发现缓冲区内农业土壤重金属污染指数的平均值与水体景观格局有较显著的相关关系, 缓冲区内水体比例、平均斑块规模、破碎化程度、景观形状复杂度和斑块连接度越大, 土壤 As、Pb、Cd 和 Ni 污染水平越高。隋传嘉等^[7]以村镇为研究对象发现耕地景观格局与重金属污染显著相关, 且不同重金属在不同尺度与景观要素关系不同。然而, 由于人类活动导致的土壤重金属污染通常具有空间集聚特征, 某区域的土壤重金属污染可能与邻近区域的景观格局变化相关^[26-27], 而一般线性回归模型未考虑到潜在的空间相关性, 导致自变量对因变量的影响被低估, 从而影响结果的正确性^[28]。随着空间统计方法的快速发展, 空间计量模型可以有效解决空间效应问题, 但尚未有研究采用空间计量模型分析土壤重金属污染的影响因素。长三角地区人口集中, 社会经济发展迅速, 高强度的人类活动导致农业土地面临严重污染威胁, 其中重金属、持久性有机污染物等有毒物质对土壤的污染

收稿日期: 2021-04-20 修订日期: 2021-07-02

基金项目: 浙江省哲学社会科学项目 (21NDJC097YB)

作者简介: 李武艳, 博士, 教授, 研究方向为土地利用与生态安全。

Email: liwuyan@zufe.edu.cn

已经受到社会广泛关注^[29-30]。因此,本文以长三角经济发达县市为例,分析景观格局与耕地污染的空间关系,以期通过制定耕地景观规划来降低土壤污染,对探索可持续的耕地利用和保护路径,维护国家粮食安全和景观生态安全具有重要意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区域嵊州位于长江下游、环杭州湾南岸地区,土地面积 1 784 km²,四面环山、五江汇聚,中为盆地,地貌呈现“七山一水两分田”的特征,地势自西南向东北倾斜。市内低山和中山的成土母质以红壤为主,黄壤次之;台地丘陵的成土母质主要以红壤和岩性土为主;河谷平原大部分是水稻土。耕地主要分布在中部盆地以及北部平原地区,土壤肥沃,光热充足,是长江中下游地区重要的粮食生产基地。同时,该地区地理位置优越,位于多个都市圈交叉区域,社会经济发展迅速,产业以二三产业为主,工业活动的增加和高强度的农业生产成为耕地土壤重金属污染的主要来源^[31]。

1.2 数据采样点布设与处理

本文布设耕地质量监测样点,在监测耕地质量相关指标同时取土化验样点的重金属指标。研究区域耕地质量监测样点选取方法请见参考文献[32]。首先,选择国家自然等指数的均方差和绝对偏差计算在允许误差范围内监测样点的样本容量;其次,计算国家自然等指数的滞后距离,将其作为格网间距进行网格布点,得到监测样点的预布设结果;然后,根据耕地的等别组合对监测样点进行优化;最后,分析耕地质量等别分布、分等因素各分级区间、耕地潜在变化类型及潜在变化区域的空间分布特征,分析监测样点布设的合理性,并选择总体精度与 Kappa 系数 2 个精度评价指标。依据上述方法,对研究区选取耕地样本点 93 个,其中水田 64 个,旱地 29 个,覆盖研究区域耕地国家利用等别 7~11 等,如图 1 所示。

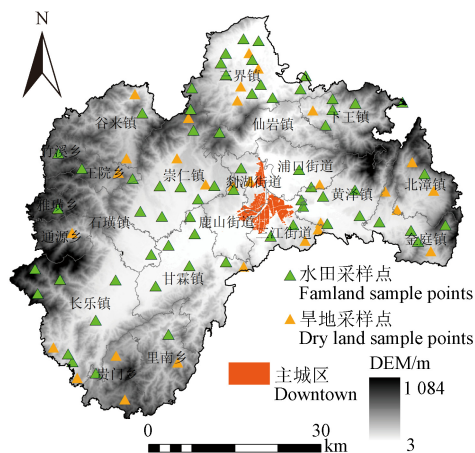


图 1 研究区地理位置及采样点分布图

Fig.1 The geographical location of the study area and the distribution of sampling points

每个采样单元进行多点采样,取其中心点和 4 个顶点的 0~20 cm 表层土壤,从现场等量均匀混合的样品中

选择 1.0 kg 为该采样样品,均采用 GPS 定位。所有样品均在室温下风干,压碎,然后筛过 0.15 mm 尼龙筛。pH 值采用玻璃电极法,有机质采用重铬酸钾容量法。按照 GB15618—1995 标准中推荐的方法测量重金属含量。耕地主要受到 Cd、Pb 和 Hg 等重金属的影响,Cd 和 Pb 采用石墨炉原子吸收法测定,Hg 采用冷原子吸收法测定。每个样品 3 次重复,取平均值,样品采用有证标准物质、实验室空白和平行双样分析等实验室质量方法保障试验结果的科学性。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤重金属污染评价

土壤重金属单项平均污染指数 P_i 与综合污染指数 P_N 均采用内梅罗 (Nemoro) 公式计算^[33],土壤污染物的评价标准值参考《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)。 P_i 值越大,表示土壤污染越严重。

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (1)$$

式中 P_N 为综合污染水平; P_{ave} 为各土壤重金属污染指数的平均值, P_{max} 为各土壤重金属污染指数的最大值。依据内梅罗综合指数可将土壤重金属污染划分为安全 ($0 < P_i \leq 0.70$)、警戒限 ($0.7 < P_i \leq 1.0$)、轻污染 ($1.0 < P_i \leq 2.0$)、中污染 ($2.0 < P_i \leq 3.0$) 和重污染 ($P_i > 3.0$) 5 个等级。

1.3.2 耕地景观指数选取与计算

景观指数能够高度浓缩景观格局信息,并反映其结构组成和空间配置特征,是定量分析景观格局特征的重要手段。由于景观格局表现形式的多样性,在耕地景观尺度上,从耕地斑块数量规模(平均斑块面积, Mean Patch Area, MPS)、破碎化(斑块密度, Patch Density, PD 和景观形状指数, Landscape Shape Index, LSI)、形状复杂度(面积加权斑块形状指数, Area-Weighted Mean Shape Index, SHAPE; 面积加权斑块分维数, Area-Weighted Patch Fractal Dimension, FRAC)和聚集度(斑块凝聚度, Patch Cohesion Index, COHE-SION 和聚集度指数, Aggregation Index, AI) 4 个方面选取不同指标对区域耕地景观格局进行测度^[7,12]。本文采用移动窗口分析法生成景观指数栅格图。先设定一个窗口半径,从左上角开始移动,每移动一格,计算窗口范围内的景观指数数值,并赋予中心栅格,形成景观指数栅格图。有关研究表明,窗口分析尺度对景观格局指数的影响显著^[27]。因此,本文分别采用 200、500、800 和 1 000 m 为半径,在 Fragstats4.2 软件上进行筛选,最终选取 500 m×500 m 作为景观格局分析尺度。

1.3.3 分析模型

空间回归模型能够有效解决回归模型中复杂的空间自相关性问题,因此,本文分别采用逐步回归模型、空间滞后模型 (Spatial Lag Model, SLM) 和空间误差模型 (Spatial Error Model, SEM) 分析景观格局与耕地重金属污染的空间关系^[34-35],并择优选用。

1) SLM 模型

SLM 模型主要探讨因变量在一个地区是否有扩散现

象（空间溢出效应），其表达式为

$$Y = pW_1Y + X\beta + \mu \tag{2}$$

式中 Y 为因变量， X 为解释变量， p 为空间滞后项 W_1Y 回归系数，反映了样本观测值中的空间依赖性，即相邻地区的观测值 Y 对本地区观察值 Y 的影响方向和程度， W_1 为 $n \times n$ 阶的空间权重矩阵，选择连续性距离权重矩阵，距离阈值为任意两个空间单元距离的最大值， u 为随机误差项， β 反映了自变量 X 对因变量 Y 的影响。

2) SEM 模型

SLM 模型重视空间依赖效应，但 SEM 模型假设模型的误差是空间相关的，能够度量邻接地区因变量的误差冲击对本地区观察值的影响程度，其表达式为

$$\begin{cases} Y = X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon = \lambda W_2 + \alpha \end{cases} \tag{3}$$

式中 ε 为随机误差项， λ 为空间误差项的回归系数， W_2 为残差的空间自回归过程相关的权重矩阵， α 为随机误差，其他同上。

为了解决模型自变量可能存在的多重共线性问题，本文采用多元逐步回归模型识别耕地土壤污染水平的显著因素。在此基础上，建立一系列的模型检验，以确定合适的空间回归模型。首先，用 Moran's I 指数检验因变量是否存在空间自相关性。Moran's I 的值在 -1 到 1 之间，负/正值分别表示负/正空间自相关。其次，运用拉格朗日乘数 (LM) 和稳健 LM 检验，包括 4 种 LM 统计，即 LM 滞后、稳健 LM 滞后、LM 误差和稳健 LM 误差，来定量确定合适的空间回归模型^[36-37]。此外，采用 R^2 、Akaike 信息准则 (AIC) 和 Schwartz 准则 (SC) 来评估模型的性能。

2 结果分析

2.1 耕地土壤重金属污染风险特征

2014 年研究区域 93 个耕地土壤样品 3 种重金属统计参数如表 1 所示。Cd、Pb 和 Hg 3 种重金属的平均含量分别为 0.13、20.54 和 0.13 mg/kg。由于土壤 pH 是不同重金属风险筛选值划分的重要依据，本文也对样点的 pH 值进行测定，最小值 3.94，最大值 7.44，均值为 5.09，标准差 0.551 7，变异系数为 0.108 3。以《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618—2018）中规定 Cd、Pb 和 Hg 的水田和旱地风险筛选值作为标准，区域耕地样点 3 种重金属含量均未超标，说明研究区域耕地土

壤重金属风险较低；3 种土壤重金属污染指数 (P_i) 的平均值、中位数和第三四分位数均未超过 1，未达到污染水平。对比浙江省土壤背景值，3 种重金属超标率分别为 74.19% (Cd)、39.78% (Pb) 和 73.12% (Hg)，说明重金属 Cd 和 Hg 比 Pb 受区域人类活动影响更大，污染风险相对较高；单因子污染指数的变异系数均大于 0.5，表明耕地土壤重金属污染受到外界干扰比较显著，空间差异较明显。耕地土壤重金属污染综合指数为 0.42，未超过警戒值，表明该地区耕地土壤污染现象较少，其中有 3 个监测点耕地重金属综合污染水平超过 0.7，但小于 1，处于警戒水平。

表 1 研究区域耕地土壤重金属描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of heavy metals in cultivated soils in the study area

类型 Category	重金 属 Heavy metals	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	背景值 Background value	变异系数 Variable coefficient
重金属含量 Heavy metal content (mg·kg ⁻¹)	Cd	0.008	0.294	0.13	0.07	0.54
	Pb	0.937	78.80	20.54	23.7	0.62
	Hg	0.031	0.33	0.13	0.086	0.55
污染水平 Pollution level	Cd	0.03	0.98	0.42	/	0.56
	Pb	0.01	0.99	0.26	/	0.62
	Hg	0.03	0.66	0.22	/	0.71
综合污染水平 Comprehensive pollution level		0.037	0.771	0.396	/	0.42

2.2 耕地土壤重金属污染风险的空间分布格局

运用 ArcGIS10.2 地统计分析工具比较 4 种空间插值方法（反距离加权插值法、局部多项式法、克里金插值法以及核密度平滑法）效果，以此来降低空间插值的不确定性。依据最小预测均方根误差值判断方法优劣。结果表明，反距离加权插值法的均方根误差值最小（图 2）。因此，选取反距离加权插值法对耕地土壤重金属污染风险进行空间可视化表达，结果如图 3 所示。整体上，耕地重金属综合污染风险较高地区呈现团状聚集空间分布特征，主要集中在研究区西南部、北部乡镇以及主城区周边地区，其余部分耕地重金属污染风险相对较低。其中，耕地重金属镉污染压力较大，分布范围较广，主要集中在主城区周边以及西南甘霖、崇乐等乡镇。耕地重金属铅和汞污染空间分布较为类似，主要集中在西南甘霖镇、崇乐镇以及主城区北部的浦口、仙岩和三界镇等地区。

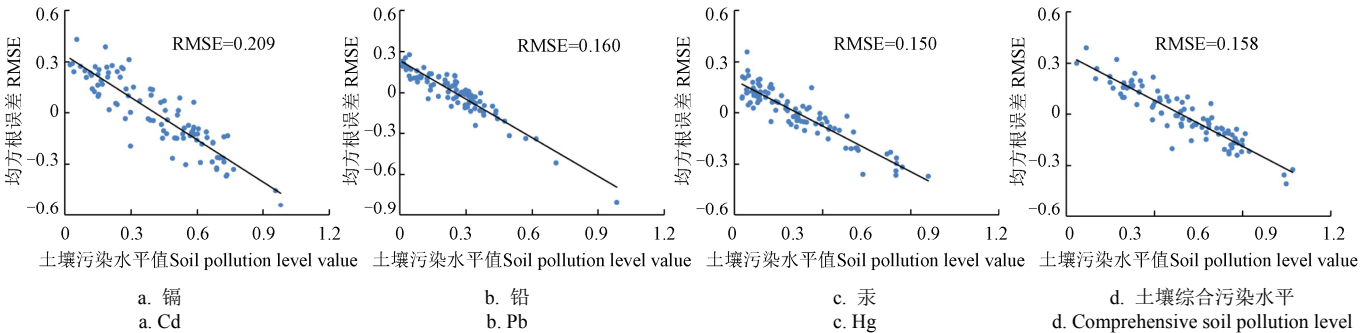


图 2 基于反距离加权插值法的耕地重金属元素均方根误差值统计

Fig.2 Statistic of the Root Mean Square Error (RMSE) values of heavy metal elements in cultivated land based on inverse distance weighted interpolation

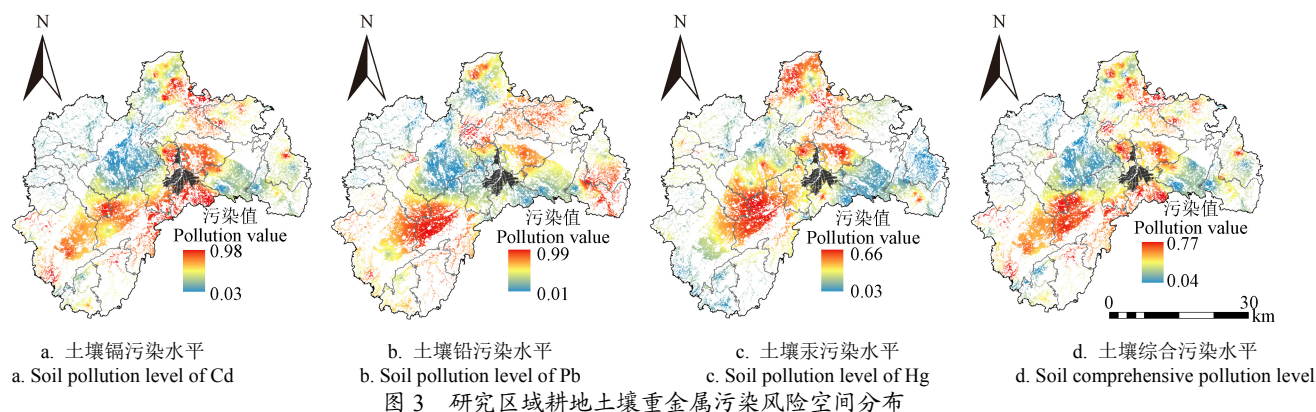


Fig.3 Spatial distribution of heavy metal pollution risk of cultivated land in the study area

2.3 耕地土壤重金属污染风险与景观格局的空间梯度关联

为科学分析研究区耕地重金属污染风险和景观格局的空间异质性特征,揭示人类活动对耕地重金属污染和景观格局的影响。本研究采用环形梯度分析方法,分别探讨耕地重金属污染和景观格局距主城区、河流以及主要道路的梯度变化特征及其二者的空间关联。由图4可知,耕地重金属污染水平在城乡梯度上总体呈现波动下降的趋势,其中在距离城区12 km内呈现显著下降,表明人类活动对周边耕地重金属污染有显著影响。在距离

主城区12 km后则表现出波动上升空间分布特征,这主要是因为耕地污染同时受到其他乡镇、工业区离散分布的影响。在河流梯度上,耕地重金属污染整体呈现逐步下降趋势,其中耕地重金属镉污染在距离河流3 km外快速下降,耕地铅污染水平随着距河流距离缓慢上升。在主要道路梯度方面,耕地重金属综合污染水平呈现逐步下降趋势,其中耕地重金属镉污染在距离道路1.5 km内呈现快速下降、后保持稳定的趋势,表明道路对周边耕地重金属镉污染有显著影响,而耕地重金属铅和汞污染随着距道路越远呈现先上升后趋缓的趋势。

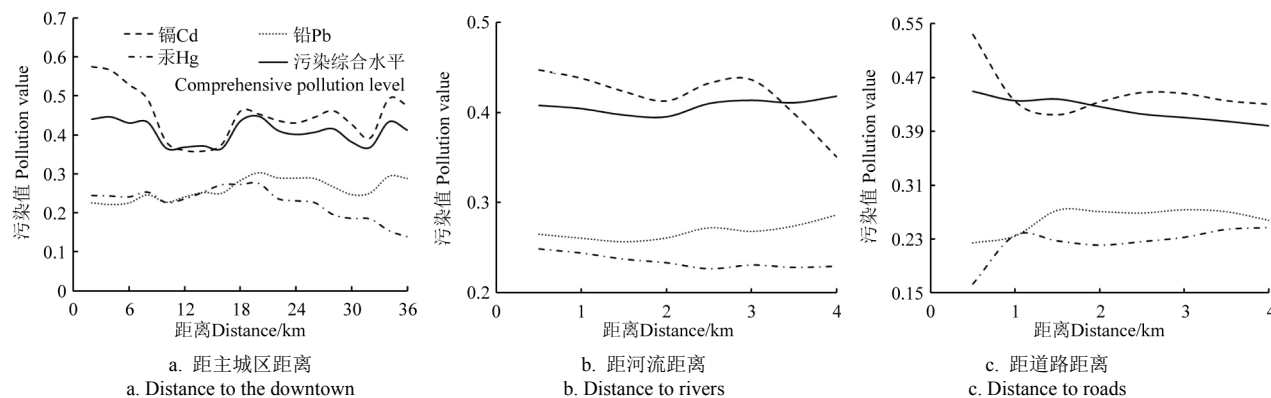


图4 研究区域耕地土壤重金属污染风险不同梯度变化特征

Fig.4 Different gradient characteristics of heavy metal pollution risk of cultivated soil in the study area

由图5可知,耕地景观格局指数在梯度上也呈现明显的空间分异特征。在城乡梯度上,在距主城区8 km内,耕地景观破碎度、形状复杂度以及聚集度指数均呈现出快速上升的趋势,随后开始快速下降;距离主城区26 km后,耕地景观格局保持稳定态势。这主要是由于在城乡交错带上,耕地景观受到人类活动的影响较大,其景观格局呈现明显的城乡梯度变化特征。在河流和道路梯度上,耕地景观格局空间分异特征类似。耕地景观破碎度、形状复杂度和聚集度指数随着距河流和道路距离越远而逐步下降,其中在道路梯度上的变化大于河流梯度变化。耕地破碎化指数和形状复杂度指数的空间梯度变化快于耕地景观聚集度指数。结合图4、图5可知,耕地重金属污染的空间分布与景观格局在空间梯度上存在较为密切的相关关系。距主城区8 km范围内,耕地土壤重金属污染水平随着耕地景观破碎度、形状复杂度以及聚集度的上升而快速下降;

距离主城区8 km外,由于人类活动的空间差异明显,二者关系在城乡梯度的关联不明显。在河流和道路梯度上,耕地重金属污染水平与耕地景观格局(破碎度、形状复杂度以及聚集度)总体上均呈现下降趋势,其中耕地重金属污染梯度变化幅度明显小于耕地景观格局变化。

2.4 空间计量模型估计

2.4.1 耕地土壤重金属污染空间相关性检验

选用空间邻接矩阵作为空间权重矩阵,运用 Geoda 软件对土壤重金属 Cd、Hg、Pb 和综合污染水平进行空间自相关分析,结果如表2所示。整体来看,土壤重金属 Cd、Hg、Pb 的全局 Moran's I 指数均通过了1%显著性水平检验,表明土壤各类重金属污染水平存在显著的空间正相关性。所以,在对研究区域土壤重金属污染水平进行定量研究时,需充分考虑各区域土壤重金属污染之间的空间相关性。

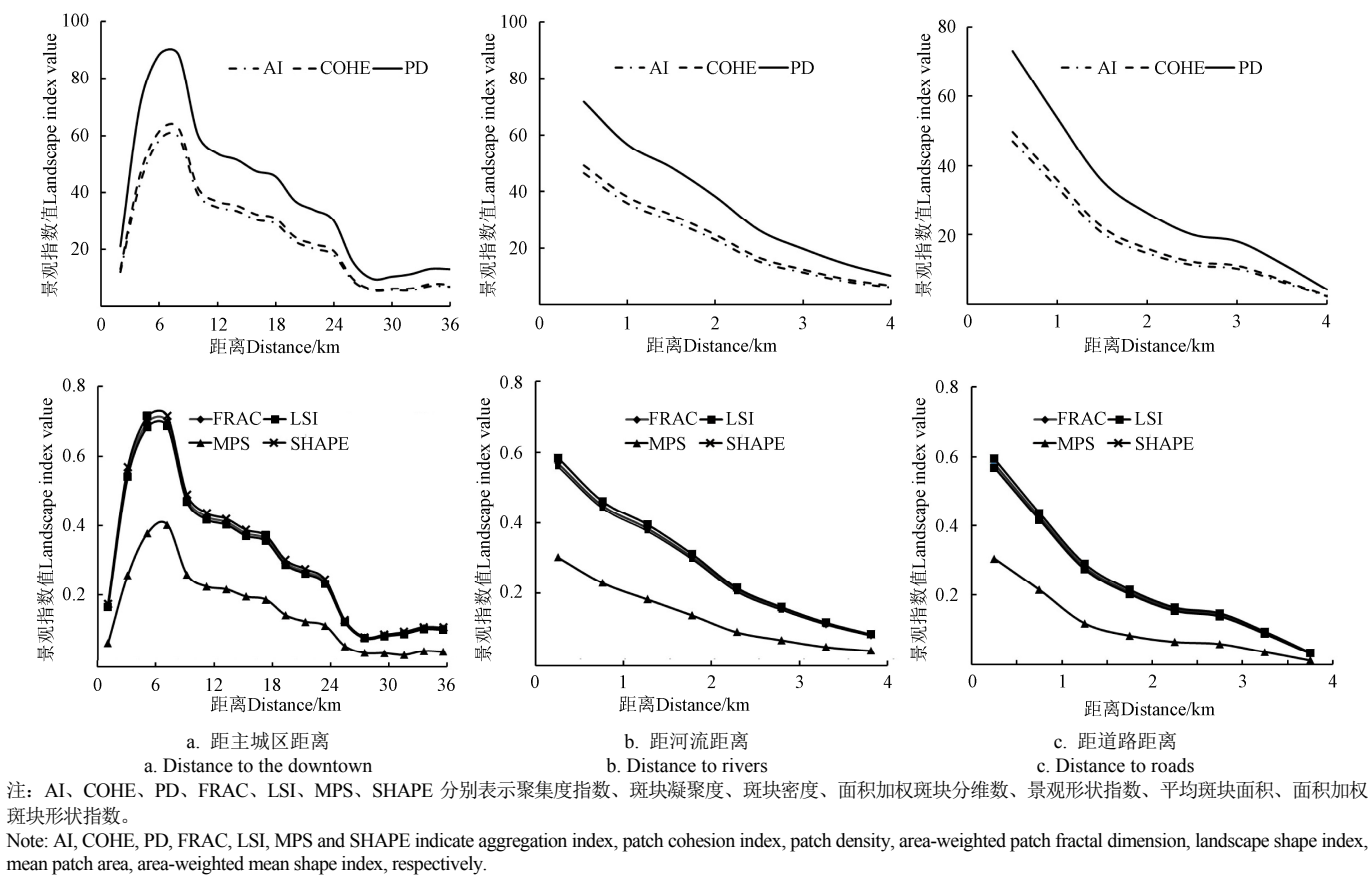


图 5 研究区域耕地景观格局不同梯度变化特征

Fig.5 Different gradient change characteristics of the cultivated land landscape pattern in the study area

表 2 研究区域土壤重金属污染水平的 Moran's I 检验结果

Table 2 Moran's I test results of soil heavy metal pollution levels in the study area

类型 Category	镉 Cd	汞 Hg	铅 Pb	综合污染水平 Comprehensive pollution level
莫兰指数 Moran's I	0.598	0.519	0.662	0.518
P 值 P value	0.000	0.000	0.000	0.000

2.4.2 耕地景观格局对土壤重金属污染的整体影响

运用 Geoda 软件, 选用空间邻接矩阵, 采用逐步线性回归方法识别出对耕地重金属污染具有显著影响的景观格局指数, 结果如表 3 所示。整体上, 耕地斑块规模 (MPS)、景观破碎度 (PD)、景观形状复杂度 (SHAPE、FRAC) 及斑块凝聚度 (COHE) 对耕地重金属综合污染有显著影响, 耕地不同类型重金属污染与耕地景观格局各类指数呈现显著相关关系。

前期研究表明研究区耕地重金属污染水平存在显著的空间自相关性。因此, 在逐步线性回归模型结果基础上, 本文采用空间回归模型 (SLM 和 SEM) 对显著影响耕地重金属污染的各类景观格局因素进行分析。由表 3 可看出, 模型误差项的 LM 检验和稳健性 LM 检验均高于模型滞后项, 且通过 1% 显著性水平检验, 说明空间误差模型 (SEM) 优于空间滞后模型 (SLM)。从表 4 可看出, 空间误差回归模型各影响因素的回归系数均达到了显著水平 ($P<0.01$), 表明耕地重金属污染不仅受到本区域影响因素的显著影响, 同时还受到邻近区域重金属含量和影响因素的共同影响。根据 SEM 模型结果可知,

耕地景观斑块规模 (MPS)、景观破碎度 (PD) 以及斑块凝聚度 (COHE) 与耕地重金属综合污染呈现负相关, 而耕地景观形状复杂度与重金属综合污染呈正相关。

表 3 逐步回归模型, LM 和稳健性 LM 检验结果

Table 3 Stepwise regression model, LM and robustness LM test results

变量 Variables	镉 Cd	铅 Pb	汞 Hg	综合污染水平 Comprehensive pollution level
常数 Constant	-0.088	-0.028	-0.013	-0.034
耕地景观斑块规模 MPS	-0.920**	-0.435**	-0.338**	-0.562**
景观破碎度 PD	-2.793**	-3.476**	-3.593**	-3.357**
耕地形状指数 LSI	7.927**	31.463	9.294**	24.392
加权面积形状指数 Shape	3.346**	4.029**	3.772**	4.625**
加权斑块分维数 FRAC	-17.96	9.946**	-9.197	10.276**
斑块凝聚度 COHE-SION	-0.112	-1.565**	0.24	-1.225**
聚集度指数 AI	0.414**	0.062	1.073**	-0.372
R ²	0.354	0.347	0.381	0.414
最大似然估计 Log-likelihood	-9 081.95	-9 123.21	-8 920.33	-8 713.18
赤池信息量 Akaike info criterion	18 175.9	18 258.4	17 852.7	17 438.4
施瓦兹准则 Schwarz criterion	18 217.5	18 300	17 894.3	17 480
莫兰指数误差 Moran's I error	0.522	0.443	0.561 6	0.380
空间滞后拉格朗日乘 LM-Lag	6 337.62	4 509.55	7 730.34	3 386.71
空间误差拉格朗日乘数 LM-Error	7 575.86	5 461.74	8 777.72	4 007.39
稳健空间滞后拉格朗日乘数 Robust LM-Lag	116.33	66.66	269.43	126.74
稳健空间误差拉格朗日乘数 Robust LM-Error	1 354.57	1 018.84	1 316.81	747.42

注: **表示通过 0.01 的显著性水平检验。下同。

Note: ** means passing the significance level test of 0.01. Same as below.

其中景观破碎度对耕地重金属综合污染的负向作用最大,而耕地斑块分维数对耕地重金属综合污染的正向作用最显著。在耕地各类重金属污染的景观影响因素中,耕地斑块规模(MPS)、景观破碎度(PD)和加权面积形状指数(SHAPE)对3类主要的重金属污染均有显著的负向影响。耕地形状指数(LSI)对耕地镉和汞污染负向影响显著,斑块凝聚度(AI)对耕地镉和汞污染有显著正向作用,耕地景观凝聚度(COHE)与耕地铅污染具有负向相关关系。

对比空间回归模型与传统线性回归模型结果,空间误差模型的拟合优度 R^2 与自然对数似然函数值Log-L均高于传统线性回归模型,而AIC和SC均低于传统线性回归模型,这表明空间回归模型的估计效果比传统模型更可靠。

表4 SEM模型回归参数结果
Table 4 SEM model regression parameter results

变量 Variables	镉 Cd	铅 Pb	汞 Hg	综合污染水平 Comprehensive pollution level
常数 Constant	-0.050	-0.039	-0.057	-0.034
耕地景观斑块规模 MP)	-0.661**	-0.467**	-0.518**	-0.470**
景观破碎度 PD	-2.187**	-2.562**	-2.009**	-2.573**
耕地形状指数 LSI	-5.862**	—	-5.492**	—
加权面积形状指数 Shape	-2.129**	-3.021**	-1.998**	-3.142**
加权斑块分维数 FRAC)	—	7.529**	—	7.664**
斑块凝聚度 COHE-SION	—	-1.066**	—	-1.034**
斑块凝聚度 AI	0.511**	—	0.614**	—
空间误差回归系数 λ	0.764	0.715	0.807	0.674
拟合优度 R^2	0.664	0.603	0.719	0.604
最大似然估计 Log-likelihood	-7 035.412	-7 592.301	-6 416.668	-7 531.861
赤池信息量 Akaike info criterion	14 082.8	15 196.6	12 845.3	15 075.7
施瓦茨准则 Schwarz criterion	14 124.4	15 238.2	12 886.9	15 117.3

3 讨论

土壤重金属的来源及空间分布主要受成土母质和人类活动的影响。已有研究表明,当土壤重金属污染水平的变异系数大于0.5时,表明耕作管理措施、种植制度等人为活动对土壤重金属污染情况有显著影响^[3]。本文研究结果显示研究区域3类重金属污染水平的变异系数均高于0.5,表明该地区耕地土壤重金属污染受到人类活动影响显著,土壤重金属污染压力较大。在空间梯度上,研究结果表明耕地土壤重金属污染水平在城乡梯度、道路梯度上均呈现由高到低的分布态势,进一步验证了人类活动对耕地土壤污染具有显著空间影响。

景观格局直接反映了人类活动对土地利用的影响,研究耕地景观格局与土壤重金属污染的关系可以从景观生态角度完善耕地污染管控政策。本文研究表明耕地土壤重金属污染具有显著空间集聚特征,采用空间计量模型定量评估耕地景观格局对土壤重金属污染的影响更具有科学性和有效性。研究表明,耕地斑块规模(MPS)、

耕地破碎度(PD)和景观形状指数(Shape)对3类土壤重金属污染均有负面影响,而耕地聚集度(AI)的提升则会增加重金属Cd和Hg的污染水平。这主要是由于在耕地地块破碎化大、形状不规则,尤其是大型斑块的形状复杂的情况下,耕地种植强度降低,土壤重金属累积较少,同时破碎化的耕地斑块也阻碍了土壤重金属的迁移^[2,7]。另一方面,耕地斑块的聚集会增加连通性,同时聚集性的耕地更容易进行规模化经营,从而导致耕地重金属污染风险增加。可见,集约化农田利用可能会加速农田重金属污染的输入和迁移,破碎化的耕地景观可以在一定程度上降低整体污染水平^[7]。

耕地重金属污染不仅受到本区域影响因素的显著影响,同时还受到邻近区域重金属含量和影响因素的共同影响。因此,建议耕地重金属污染治理不能以行政区划为范围进行划分,应综合统筹,根据影响的范围,设置治理区域,根据污染源和污染程度,出台监测、补偿等相关激励和惩罚建议措施,严控耕地重金属污染进一步蔓延。同时,不同尺度不同类型区域的耕地景观格局对重金属污染影响规律不同,不同种类的重金属元素与耕地景观格局关系亦有差异,建议村、乡镇、县市和省等各层级管理主体分别研究区域自身耕地景观格局与主要重金属元素污染的关系,通过制定耕地景观规划来管控土壤重金属污染。在当前耕地“数量-质量-生态”三位一体保护背景下,有必要运用景观生态管理措施来进一步加强耕地保护。

4 结论

1) 研究区域耕地土壤环境良好,土壤重金属风险较低。3种重金属平均污染指数和综合污染指数均小于0.5,处于清洁范围内。重金属污染水平的变异系数均大于0.5,土壤污染受人类活动影响较大。在空间分布上,耕地重金属综合污染风险较高地区呈现团状聚集,主要集中在研究区西南部、北部以及主城区周边地区,耕地重金属综合污染程度具有明显的空间分异特征。

2) 耕地重金属污染水平在空间梯度上呈现波动下降的趋势,其中城乡梯度和道路梯度的变化幅度更大。同时,耕地景观指数在空间梯度上呈现明显的空间分异特征,与土壤重金属污染具有明显空间梯度关联。

3) 耕地土壤重金属污染具有显著空间自相关性,不仅受到本区域影响因素的显著影响,同时还受到邻近区域重金属含量和影响因素的共同影响。耕地景观斑块规模、破碎度以及形状复杂度与耕地土壤重金属污染具有负相关关系,耕地景观聚集度对土壤重金属Cd和Hg污染具有正向影响。

通过调整耕地结构和布局等景观格局优化手段来控制耕地土壤重金属污染具有一定可行性。本文研究经济发达地区耕地景观格局对土壤重金属污染的影响,进一步验证了二者存在密切相关关系。耕地重金属污染具有空间集聚特征,本文采用空间计量模型探讨耕地景观格局与土壤重金属污染的相关关系,可避免由于空间相关性带来了模型结果误差,进一步丰富了土壤重金属污染

定量研究方法体系, 为完善耕地景观优化和加强耕地健康保护提供了科学依据和决策支持。

参 考 文 献

- [1] He B, Yun Z J, Shi J B, et al. Research progress of heavy metal pollution in China: sources, analytical methods, status, and toxicity[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2): 134-140.
- [2] 李鸿博, 钟怡, 张昊楠, 等. 生物炭修复重金属污染农田土壤的机制及应用研究进展[J], 农业工程学报, 2020, 36(13): 173-185.
Li Hongbo, Zhong Yi, Zhang Haonan, et al. Mechanism for the application of biochar in remediation of heavy metal contaminated farmland and its research advances[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 173-185. (in Chinese with English abstract)
- [3] Rahman M A, Rahman M M, Reichman S M, et al. Heavy metals in Australian grown and imported rice and vegetables on sale in Australia: Health hazard[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 100: 53-60.
- [4] 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 等. 铜仁土壤-水稻重金属积累效应与安全种植区划[J/OL]. 环境科学: 1-13. [2021-07-07]. doi: 10.13227/j.hjxk.202104291
Zhu Liangliang, Wu Yong, Zhou Lang, et al. Heavy metal accumulation effect and safe planting zoning of soil and rice in Tongren [J/OL]. Environmental Science: 1-13. [2021-07-07]. doi:10.13227/j.hjxk.202104291/(in Chinese with English abstract)
- [5] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4670-4683.
Shang Erping, Xu Erqi, Zhang Hongqi, et al. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. Environmental Science, 2018, 39(10): 4670-4683. (in Chinese with English abstract)
- [6] 舒心, 李艳, 李锋, 等. 土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2471-2482.
Shu Xin, Li Yan, Li Feng, et al. Impacts of land use and landscape patterns on heavy metal accumulation in soil [J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2471-2482. (in Chinese with English abstract)
- [7] 隋传嘉, 潘剑君, 余泓, 等. 苏南村镇耕地景观格局对土壤重金属污染的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(8): 2302-2311.
Sui Chuanjia, Pan Jianjun, Yu Hong, et al. Impacts of farming landscape patterns on soil heavy metal pollution in towns of Southern Jiangsu Province[J]. Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2302-2311. (in Chinese with English abstract)
- [8] Zhang H, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Traffic-related metal(loid) status and uptake by dominant plants growing naturally in roadside soils in the Tibetan plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 573: 915-923.
- [9] Nikolay S K, Dmitry V V, Natalia E K. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow[J]. Urban Climate, 2020, 32: 1-15.
- [10] Luo C L, Liu C P, Wang Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186: 481-490.
- [11] Chrastny V, Komárek M, Hájek T. Lead contamination of an agricultural soil in the vicinity of a shooting range[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 162: 37-46.
- [12] Lin Y P, Teng T P, Chang T K. Multivariate analysis of soil heavy metal pollution and landscape pattern in Changhua county in Taiwan[J]. Landscape and Urban Planning, 2002, 62: 19-35.
- [13] Hou L, Wu F Q, Xie X L, The spatial characteristics and relationships between landscape pattern and ecosystem service value along an urban-rural gradient in Xi'an city, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 108: 1-10.
- [14] Wang C, Yang Z F, Zhong C, et al. Temporal-spatial variation and source apportionment of soil heavy metals in the representative river-alluviation depositional system[J]. Environmental Pollution, 2016, 216: 18-26.
- [15] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 934-944.
Li Feng, Liu Siyuan, Li Yan, et al. Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in a industrially developed city[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 934-944. (in Chinese with English abstract)
- [16] Hu B F, Wang J Y, Jin B, et al. Assessment of the potential health risks of heavy metals in soils in a coastal industrial region of the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(24): 19816-19826.
- [17] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 298-305.
Qiu Menglong, Li Fangbai, Wang Qi, et al. Spatio-temporal variation and source changes of heavy metals in cultivated soils in industrial developed urban areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 298-305. (in Chinese with English abstract)
- [18] 孙焰, 祁士华, 李绘, 等. 福建闽江沿岸土壤中多环芳烃含量、来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(6): 1821-1829.
Sun Yan, Qi Shihua, Li Hui, et al. Concentrations, sources and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils collected along the banks of Minjiang River, Fujian, China[J]. China Environmental Science, 2016, 36(6): 1821-1829. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染物源解析研究综述[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 232-242.
Li Jiao, Wu Jin, Jiang Jinyuan, et al. Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1): 232-242. (in Chinese with English abstract)
- [20] 周永超, 孙慧兰, 陈学刚, 等. 绿洲城市伊宁市表层土壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 127-133.
Zhou Yongchao, Sun Huilan, Chen Xuegang, et al. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal

- pollution in surface soil of Yining in Oasis city[J]. *Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 127-133. (in Chinese with English abstract)
- [21] Khan S, Cao Q, Zheng Y M, et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(3): 686-692.
- [22] 敖明, 柴冠群, 范成五, 等. 稻田土壤和稻米中重金属潜在污染风险评估与来源解析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 198-205.
- Ao Ming, Chai Guanqun, Fan Chengwu, et al. Evaluation of potential pollution risk and source analysis of heavy metals in paddy soil and rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(6): 198-205. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1091-1097.
- Han Liyang, Huang Zhilin, Xiao Wenfa, et al. Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1091-1097. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李小曼, 刘勤, 徐梦洁, 等. 苏南村镇土壤重金属空间变异性研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 179-185.
- Li Xiaoman, Liu Qin, Xu Mengjie, et al. Spatial variability of heavy metal contents in towns of Southern Jiangsu Province[J]. *Soil Bulletin*, 2016, 47(1): 179-185. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李铖, 李芳柏, 吴志峰, 等. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1137-1144.
- Li Cheng, Li Fangbai, Wu Zhifeng, et al. Impacts of landscape patterns on heavy metal contamination of agricultural top soils in the Pearl River Delta, South China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1137-1144. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡潇潇, 李建龙, 刚成诚, 等. 张家港市农业景观格局变化及其对土壤-水稻系统重金属迁移的影响[J]. *天津农业科学*, 2013, 19(4): 68-73.
- Hu Xiaoxiao, Li Jianlong, Gang Chengcheng, et al. Effect of agricultural landscape pattern change on the migration of heavy metals in soil-rice system in Zhangjiagang City[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2013, 19(4): 68-73. (in Chinese with English abstract)
- [27] 霍宵妮, 李红, 孙丹峰, 等. 北京耕地土壤重金属空间自回归模型及影响因素[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 78-82.
- Huo Xiaoni, Li Hong, Sun Danfeng, et al. Spatial autoregressive model for heavy metals in cultivated soils of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(5): 78-82. (in Chinese with English abstract)
- [28] 于婷婷, 左冰, 宋玉祥, 等. 中国旅游业发展对区域经济效益的影响: 基于中国 283 个地级市的实证证据[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1357-1369.
- Yu Tingting, Zuo Bing, Song Yuxiang, et al. The influence of tourism development on regional economic efficiency: Evidence from 283 prefecture-level cities in China[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1357-1369. (in Chinese with English abstract)
- [29] 曹伟, 周生路, 王国梁, 等. 长江三角洲典型区工业发展影响下土壤重金属空间变异特征[J]. *地理科学*, 2010, 30(2): 283-289.
- Cao Wei, Zhou Shenglu, Wang Guoliang, et al. Spatial variability characteristics of soil heavy metals due to industry development of typical regions in Changjiang River Delta of China[J]. *Chinese Journal of Geography*, 2010, 30(2): 283-289. (in Chinese with English abstract)
- [30] 甘婷婷, 赵南京, 殷高方, 等. 长江三角洲地区农用地土壤重金属污染状况与防治建议[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(1): 174-184.
- Gan Tingting, Zhao Nanjing, Yin Gaofang, et al. A review on heavy metal pollution of agricultural land soil in the Yangtze River Delta and relevant pollution control strategy[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(1): 174-184. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张云芸, 马瑾, 魏海英, 等. 浙江省典型农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(6): 1233-1241.
- Zhang Yunyun, Ma Jin, Wei Haiying, et al. Heavy metals in typical farmland soils of Zhejiang Province: Levels, sources and ecological risks[J]. *Journal of Ecoenvironment*, 2019, 28(6): 1233-1241. (in Chinese with English abstract)
- [32] 祝锦霞, 徐保根, 章琳云. 基于半方差函数与等别的耕地质量监测样点优化不设方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(19): 254-261.
- Zhu Jinxia, Xu Baogen, Zhang Linyun. Optimization layout method of monitoring sample points of cultivated land quality based on semi-variance analysis and grade combination[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(19): 254-261. (in Chinese with English abstract)
- [33] 索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 179-186.
- Suo Linna, Liu Baocun, Zhao Tongke, et al. Evaluation and analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 179-186. (in Chinese with English abstract)
- [34] Anselin L. *Spatial Econometrics: Methods and Models*[M]. NL: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [35] 于伟, 张鹏. 城市化进程、空间溢出与绿色经济效率增长: 基于 2002-2012 年省域单元的空间计量研究[J]. *经济问题探索*, 2016(1): 77-82.
- Yu Wei, Zhang Peng. The process of urbanization, spatial spillover and the growth of green economy efficiency: A spatial measurement study based on provincial units from 2002 to 2012[J]. *Exploration of Economic Issues*, 2016(1): 77-82. (in Chinese with English abstract)
- [36] Wu Z, Chen Y, Han Y, et al. Identifying the influencing factors controlling the spatial variation of heavy metals in suburban soil using spatial regression models[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 71: 137212.

- [37] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1): 133-141.
Zhao Xiufeng, Wang Qiangsheng, Shi Ningning, et al.

Analysis and assessment of soil heavy metals around a petrochemical industry park[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2010, 30(1): 133-141. (in Chinese with English abstract)

Impacts of cultivated land landscape patterns on the risk of soil heavy metal pollution in economically developed areas

Li Wuyan¹, Zhu Congmou², He Xueying³, Wang Hua⁴, Zhou Yidian³, Xu Baogen¹

(1. Institute of Land and Urban Rural Development, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou, 310018, China; 2. College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058; 3. School of Business Administration, Zhejiang University of Finance and Economics, Hangzhou 310018; 4. Dongfang College, Zhejiang University of Finance & Economics, Jiaxing 31400, China)

Abstract: Landscape patterns indexes have widely been used to clarify the variation of landscape patterns under heavy metal accumulation in various ecological processes. One of the most important landscape types, cultivated land is profoundly disturbed by human activities in recent years, where the generation and evolution of heavy metal pollution are closely related to the landscape pattern. However, it is still lacking understanding of the relationship between landscape patterns and soil pollution in cultivated land. In this study, an attempt was made to explore the impact of landscape patterns on the risk of soil heavy metal pollution in cultivated land, thereby ensuring national food and ecological security. Taking an economically developed area in eastern China as an example, a Nemoro index model was employed to assess the level of soil heavy metal (Cd, Pb, and Hg) pollution using 93 point sampling laboratory data. Then, the landscape pattern indexes were selected from four aspects to evaluate the distribution of landscape patterns in cultivated land. Finally, the stepwise and spatial regression models were used to determine the relationship between landscape patterns and heavy metal pollution. The results showed that: 1) The average range of indexes was between 0.22 and 0.42 in the study area, including three indexes of soil heavy metal pollution, and Nemoro comprehensive pollution index. The level of three heavy metal pollution was ranked in an order of $P_{cd} > P_{pb} > P_{hg}$, indicating a relatively low risk of pollution. Furthermore, the variation coefficients of the single-factor pollution index were all greater than 0.5, indicating that the heavy metal pollution of farmland soil was significantly affected by external interference. 2) There was an obvious spatial differentiation on the comprehensive degree of heavy metal pollution in the cultivated land. The areas with higher pollution risks presented a clustering spatial distribution, where mainly concentrated in the southwestern and northern parts of the study area, as well as the surrounding areas of urban centers. The areas with lower pollution risks are mainly distributed in the northwestern basin. 3) There was a fluctuating downward for the level of cultivated land heavy metal pollution in the spatial gradient, especially in the urban-rural and road gradient. Meanwhile, the landscape pattern indexes in the cultivated land showed a trend of increasing first, and then decreasing in the urban-rural gradient, whereas, gradually downward trends in the river and road gradients. Correspondingly, cultivated land landscape patterns were found to be highly correlated with soil heavy metal pollution in spatial gradient. 4) There was a significant spatial autocorrelation in the heavy metal pollution, where landscape patterns profoundly affected both in local and adjacent areas. Specifically, the patch size, fragmentation, and landscape shape indexes were negatively correlated with three types of soil heavy metal pollution, whereas, there was a positive correlation between landscape aggregation and heavy metal pollution in the cultivated land. Anyway, this research can greatly contribute to determining the relationship between cultivated land landscape patterns and soil heavy metal pollution. The finding can provide insightful implications to control the soil heavy metal pollution from the perspective of landscape pattern optimization.

Keywords: soils; heavy metals; pollution; landscape pattern; spatial econometric model