

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200504

· 绿色发展 ·

基于农户视角的耕地重金属污染影响因素研究^{*}

——以陕西省米脂县高渠乡为例

赵 岩^{1,2}, 陈 海^{1,2*}, 刘 迪^{1,2}, 史琴琴^{1,2}, 张 敏^{1,2}

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘要 [目的] 农户是农业土地利用最主要的决策单元, 对耕地重金属累积起主导作用。通过对陕西省米脂县高渠乡典型村落耕地重金属污染的空间分异与影响因素研究, 探讨黄土丘陵沟壑区不同类型农户耕地污染影响差异。[方法] 选择性采集 58 个样品, 通过单因子指数及内梅罗综合指数进行耕地重金属污染评价, 运用普通克里金插值实现综合污染值空间可视化。采用多层次模型进行耕地重金属污染差异的机理研究。[结果] (1) 典型村落耕地单因子污染指数的平均值大小顺序为: Pb < Zn < As < Cr < Cu < Ni; 内梅罗综合污染指数介于 1.44 ~ 1.99, 皆处于轻度污染; 自给自足型、兼业型和种植型农户综合污染平均值分别为 1.66、1.71 和 1.73; (2) 从空间分异来看, 自给自足型农户耕地污染空间分布无规律, 兼业型污染高值集中于中部地区, 种植型污染从东北向西南递减; (3) 多层次模型结果显示, 自给自足型耕地重金属污染与农户年龄、劳动力数量和地块距离显著相关; 兼业型与种植面积、农业收入及地块所处高程和距道路距离显著相关; 种植型与保护意识、劳动力数量和农产品价格显著相关。[结论] 基于农户视角探讨耕地重金属污染能对黄土丘陵沟壑区发展绿色农业, 保护生态环境提供科学依据, 是促进区域农业发展与环境保护并行的有效手段之一。

关键词 重金属污染 农户视角 多层次模型 黄土丘陵沟壑区 高渠乡

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9121[2020]05026-09

0 引言

人多地少、耕地后备资源不足的基本国情使得中国的耕地安全问题尤为突出, 伴随农用地的高强度使用, 耕地质量安全问题愈发凸显。作为土壤环境的重要组成部分, 土壤重金属直接影响了农作物的产量和质量, 并以食物链的方式间接危害人体健康^[1-3]。此外, 受重金属污染的土壤以风力、水源等为媒介能够对大气、地下水等造成二次污染。因此, 耕地土壤重金属污染研究已成为生态学、环境学应对人类干扰的关键研究方向之一。

国内外学者针对耕地土壤重金属的研究主要从耕地土壤重金属的污染评价^[4-5]、空间分异特征^[6-7]、溯源分析^[8-9]以及土壤重金属污染的影响因素^[10]几个方面进行。一般认为, 土壤中重金属元素是自然和人文因素综合作用的结果^[11], 人群特征和农田本身特征共同影响了土壤环境质量^[12], 同时人文因素已经逐渐成为影响耕地质量变化的主要因素^[13]。农户作为农用地生产和经营等经济活动的主体, 是农业土地利用最主要、最基本的决策单位^[14], 处于影响耕地状况的核心位置^[15-16], 尤其是对于欠发达地区, 农户行为对耕地土壤环境质量的影响更为明显^[14]。农耕生产活动中, 农户对化肥、农药的不合理使用, 导致了土壤中重金属的富集^[17], 而农户土地利用行为受农户自身社会经济属性以及地块分布的综合影响^[18], 因

收稿日期: 2019-09-03

作者简介: 赵岩(1995—), 男, 陕西延安人, 硕士研究生。研究方向: 农户行为与土壤重金属

*通讯作者: 陈海(1971—), 男, 山西侯马人, 教授。研究方向: 土地利用与农户行为。Email: chw@nwu.edu.cn

*资助项目: 国家自然科学基金项目“生态脆弱区土地利用功能变化及农户响应研究——以陕西省米脂县为例”(41671086); 国家自然科学基金项目“基于生态系统服务供需流的绿洲城市景观过程模拟研究”(41871185)

此从农户及地块的多层次视角解读农户土地利用行为对土壤重金属空间分异的作用具有一定的实践价值。

高渠乡为典型的黄土丘陵沟壑区，以传统农业种植作为主要生产模式，农户生计方式单一，严重依赖耕地资源，同时由地块分布造成的农户土地利用行为差异，引致了土壤重金属累积的空间分异。为此，文章运用内梅罗污染指数测算耕地土壤重金属污染值并进行空间化表征，构建多层次模型从农户个体和地块两个层次^[19]剖析村落耕地重金属污染的影响因素，以期为黄土丘陵沟壑区耕地土壤重金属的污染防治提供参考。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

高渠乡地处米脂县 ($109^{\circ}49'E \sim 110^{\circ}29'E$, $37^{\circ}39'N \sim 38^{\circ}5'N$) 城北 10 km 处 (图 1)，属典型黄土丘陵沟壑区，土壤类型以黄绵土为主。高渠乡土地面积 72.4 km^2 ，总耕地 12 km^2 ，下辖 20 个行政村，共计 3 116 户。该地区以农业为主导，二、三产业发展薄弱，经济水平较低，无明显点源污染。依据经济水平、种植作物类型、农业合作社差异及人口组成等特点，选取高西沟、马蹄坬和李郝山等 3 个村庄作为典型案例地。其中，高西沟总面积 4.06 km^2 ，耕地面积 0.84 km^2 ，共计 160 户，年人均收入 1 万元，整体发展水平较高，无贫困家庭。其“三三制”(农林牧各占 $1/3$)治理模式已成为黄土丘陵沟壑区生态治理的典范，主要发展林果业及旅游业，村内果业种植面积达到总耕地 50% ，有果树及杂粮合作社；马蹄坬总面积 3.04 km^2 ，耕地面积 0.78 km^2 ，共计 268 户，其中贫困户 34 户，是典型的人口密集型村落。该村以种植红葱为主，种植面积超 0.2 km^2 ，占该村耕地面积 25% 以上，设有红葱种植合作社；李郝山总面积 4.06 km^2 ，耕地面积 0.43 km^2 ，共计 110 户。该村因道路崎岖居住分散，贫困家庭占比大，达 66 户。以种植传统作物如玉米、土豆和豆类为主，种植面积超过总耕地的 80% ，优势作物不明显，经济水平相对较低，无合作社。

1.2 数据来源

1.2.1 地块数据收集

村落地类数据来源于 2016 年高分一号影像，该影像为 2 m 全色、 8 m 多光谱融合数据，在 ENVI 5.1 软件下进行几何校正、影像增加处理后，结合典型地物图斑样点数据和 2009 年米脂县二调土地利用数据进行监督分类和目视解译获取，并于 2018 年 7—8 月通过手持 GPS 实测点数据进行地块权属确认与地类订正，Kappa 系数达到 0.86 ，符合研究需要。

1.2.2 样品采集与处理测定

课题组于 2018 年 7—8 月在研究区进行表层 ($0 \sim 20\text{ cm}$) 农田土壤样品采样，总采集 58 个样品。样品采集过程参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2000)。采样过程采用 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 内“梅花形”布设 5 个子样点，每个子样点采集表层土壤 200 g 左右，充分混合后装入洁净自封塑料袋内。在取样的同时，记录样点的地理位置、海拔高程、农作物类型以及周围环境状况以备分析。将采集的土样带回实验室于室温下风干，之后每袋土样均匀分为两份，一份用于测试，另外作为备用，样品通过 100 目尼龙筛后，通过赛默飞尼通 (Themo Scientific Niton) 便携式 X 荧光元素分析仪测定研究区土壤中的 6 种重金属元素铅 (Pb)、砷 (As)、铜 (Cu)、铬 (Cr)、镍 (Ni)、锌 (Zn)，每个样品设置 3 组平行实验，求取平均值作为该样品最终重金属含量，且测定过程中使用国家标准样品 (GBW07307) 进行校准。为避免

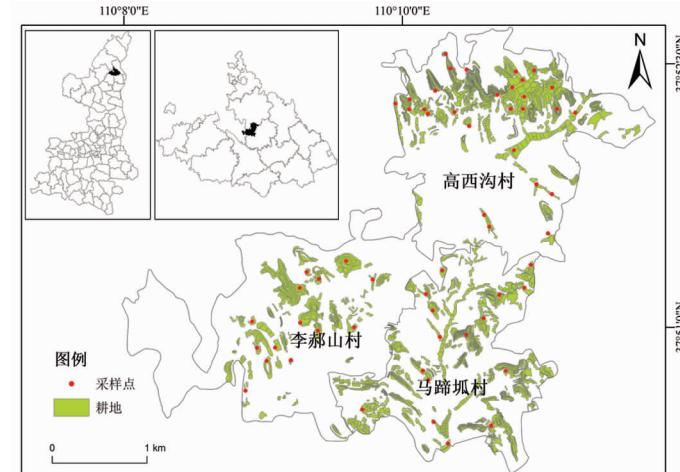


图 1 研究区地理位置及采样点分布

人为干扰及与其他金属接触，样品采集、混合、研磨等过程中均采用塑料和玛瑙制品。

1.2.3 农户问卷调查数据

课题组于 2017 年 7—8 月进行预调研，2018 年 7—8 月正式调研。农户调查数据通过参与式乡村评估（Participatory Rural Appraisal, PRA）与入户问卷调查结合的方法获取。调研在村干部配合下进行，便于与农户沟通以及抽取更多样的农户类型样本。被调查者以男性为主，问卷时长在 30min 左右。问卷内容包括两部分：①农户社会经济情况调查，涵盖年龄、受教育程度、家庭成员、劳动力数量、是否加入合作社、家庭收入及消费状况等信息；②种植情况调查，包括各类作物种植面积、施用化肥农药量、有无施肥保障措施等信息。共计获取问卷 131 份，其中，马蹄坬 50 份，高西沟 42 份，李郝山 39 份。

2 研究方法

2.1 耕地土壤重金属污染评价

对研究区土壤采用单因子指数法和内梅罗（N. L. Nemerow）综合污染指数法^[20]进行评价，采用黄绵土背景值作为评价标准。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式（1）中， P_i 为土壤中 i 污染物的污染指数， C_i 为研究区土壤中重金属元素 i 的实测浓度， S_i 为黄绵土中重金属元素 i 的背景浓度。单因子污染指数法分级标准： $0 < P_i \leq 0.7$ 为无污染， $0.7 < P_i \leq 1$ 为轻微污染， $1 < P_i \leq 2$ 为轻度污染， $2 < P_i \leq 3$ 为中度污染， $P_i > 3$ 为重度污染^[6, 21]。

$$I = \sqrt{\frac{P_{i(\max)}^2 + P_{i(\text{ave})}^2}{2}} \quad (2)$$

式（2）中， I 表示内梅罗综合污染指数， $P_{i(\max)}$ 指单因子指数中的最大值， $P_{i(\text{ave})}$ 是单因子指数的平均值。内梅罗综合污染指数分级标准： $0 < I \leq 0.7$ 为清洁， $0.7 < I \leq 1$ 为尚清洁， $1 < I \leq 2$ 为轻污染， $2 < I \leq 3$ 为中污染， $I > 3$ 为重污染^[5, 22]。

采用极差标准化对耕地土壤重金属综合污染指数进行归一化处理，使处理后的所有污染值处于 $[0, 1]$ ，值越大，表明污染越严重。

2.2 农户分类方法

依据农户年龄、收入结构、种植面积大小等将农户划分为 3 种类型^[23]。享有高龄、贫困补贴的称为自给自足户，主要包括年龄 70 岁以上的农户和生活困难的家庭，共 36 户，占总调研数量的 27.48%。具有工资/打工收入的称为兼业户，以 60 岁以下农户为主，兼职种地，具有一定的非农收入，共 30 户，占调研总数量的 22.90%。其余称为种植户，年龄基本处于 60~70 岁之间，专职种地，共 65 户，占调研总数量的 49.62%。

2.3 多层次模型

多层次模型（Multi-level Model）通过建立多层回归方程组，根据不同层次分解误差，解决了传统回归在分析多层（嵌套）数据时的缺陷^[24]，广泛应用于具有明显层次结构的系统分析。

$$\text{第 1 层: } Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} X_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (3)$$

$$\text{第 2 层: } \beta_{0j} = r_{00} + r_{01} W_j + \mu_{0j} \quad (4)$$

$$\beta_{1j} = r_{10} + r_{11} W_j + \mu_{1j} \quad (5)$$

式（3）至（5）中，第 1 层有 i 个单元嵌套于第 2 层的 j 个单元。其中， β_{0j} 和 β_{1j} 是随机变量； X_{ij} 是第 1 层回归方程的预测变量； ε_{ij} 是第 1 层回归方程的残差； r_{00} ， r_{01} ， r_{10} 和 r_{11} 是第 2 层回归方程的系数，也称做固定效应； W_j 是第 2 层回归方程的预测变量； μ_{0j} ， μ_{1j} 是第 2 层回归方程的随机效应。

为了厘清农户和地块层次各自变量对耕地土壤综合污染指数的影响以及两个层面自变量之间的内在关联效应，该文使用 stata12.0 进行多层次模型估计，指标体系的构建如表 1 所示。依据将各变量中最大数量值设为对照组的原则，分别将小学教育水平、具有保护意识以及劳动力数量为 2 的样本作为对照组。

1 多层次模型指标体系

层次	变量名称	含义
个体层次	年龄	户主年龄(岁)
	受教育程度	户主受教育程度, 文盲1, 小学2(对照组), 中学及以上3
	保护意识	农作中具有自我保护行为或环境保护意识, 无0(对照组), 有1
	劳动力数量	家庭实际劳动力数量(人)
	耕种面积	家庭实际耕种面积(m^2)
	农业收入	农户在农业经营活动获得的收入(元)
地块层次	每 $667m^2$ 收益	由当年作物价格而定, (农作物价格 \times 平均每 $667m^2$ 产量)(元)
	高程	地块所处的海拔高度(m)
	距道路距离	地块距离道路的距离(m)
	地块面积	地块的面积(m^2)

3 结果与分析

3.1 耕地土壤重金属特征

3.1.1 耕地土壤重金属含量特征

对58个耕层土壤的6种重金属元素的含量进行统计分析(表2), 得到高渠乡典型村落耕地土壤中重金属Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn含量平均值分别为16.00、10.65、29.77、102.07、56.20和54.99mg/kg, 变异系数分别为7.76%、9.71%、11.55%、9.37%、7.38%和7.18%。

土壤中Cu、Cr和Ni3种元素含量平均值分别超出黄绵土背景值的1.58、1.57和2.04倍。由于土壤背景值是未受人类活动影响下的环境中重金属元素的自然含量, 重金属含量超出背景值说明土壤受到包括农业生产及土地利用等人为活动的影响, 农作物开始受到污染, 并有一定的聚集趋势。

表2 耕地土壤重金属含量特征

重金属元素	Pb	As	Cu	Cr	Ni	Zn
极大值 (mg/kg)	18.87	13.30	40.32	127.74	65.63	69.23
极小值 (mg/kg)	13.46	8.46	24.13	78.24	45.94	45.36
平均值 (mg/kg)	16.00	10.65	29.77	102.07	56.20	54.99
变异系数 (%)	7.76	9.71	11.55	9.37	7.38	7.18
黄绵土背景值 (mg/kg)	19.80	11.40	18.90	65.10	27.60	65.60

3.1.2 耕地土壤重金属污染特征

采用黄绵土背景值作为耕地土壤重金属污染的评价标准, 各重金属元素单因子污染指数平均值从小到大依次为: Pb (0.81)、Zn (0.84)、As (0.93)、Cr (1.57)、Cu (1.58)、Ni (2.04)。其中, Pb、Zn和As属于轻微污染, Cr和Cu属于轻度污染、Ni中度污染。从各重金属元素不同污染等级样点数占样点总数的比例来看, 样点Pb污染指数整体属于无污染(8.62%)和轻微污染(91.38%); 大部分样点的As、Zn污染指数属于轻微污染, 轻微污染样点数分别占总样点数的79.31%和96.55%; 样点Cr污染指数全部属于轻度污染; 部分Cu属于中度污染, 样点数占总样点数的3.45%; Ni轻度和中度污染样点的比例分别占样点总数的41.38%和58.62%。内梅罗综合指数极小值为1.44, 极大值为1.99, 均值为1.71, 土壤重金属综合污染值皆为轻污染。

3.1.3 不同农户类型的重金属污染特征

自给自足型农户土壤重金属污染值介于1.44~1.78, 均值为1.66, 低于兼业户和种植户(表3), 究其原因, 一是自给自足农户以高龄户主和无法自理的困难家庭组成, 因劳动力不足而种植面积较少, 二是

此类农户种植产出用于自给，耕地依赖程度较低，农药化肥等农业投入较少。兼业型农户丰富的专业技能与强壮的体质，通过农闲务工提升了生活质量，故此类农户虽不能分配较多时间从事农业耕作，但生产资料购买及投入能力较强，这是导致兼业农户重金属污染较高的主要原因。种植型农户依靠出售农产品获得经济收入，通过轮作、施肥提高土壤肥力，为获取经济收益，耕地投入强度最大，进而导致土壤重金属污染最为严重（均值 1.73）。

3.2 耕地土壤污染的空间分布特征

3.2.1 高渠乡典型村落耕地土壤污染的空间分异

为分析村落耕地相对污染状况，对内梅罗综合污染指数进行克里金插值，分辨率设置为 10m，根据自然断点法分为 5 级，结果见图 2。

由图 2 可知，村落污染指数呈现北高南低，东高西低的空间分布。I 级污染耕地集中在李郝山南部；II 级污染耕地分布在李郝山北部、马蹄坬南部以及高西沟北部；III 级污染耕地集中在马蹄坬中部以及高西沟北部；IV 级污染耕地聚集于马蹄坬北部和高西沟的中部；V 级污染耕地位于高西沟东南部。

就村域尺度比较，污染程度依次为：高西沟 > 马蹄坬 > 李郝山。其中，高西沟污染最严重：首先，该村依托旅游业实现经济富足，高强度的人类活动导致耕地土壤重金属的富集；其次，该村于 2009 年成立果树、杂粮合作社，10 年来村民依靠种植果树和杂粮致富，而此两种作物的化肥农药需用量大，造成污染物累积。马蹄坬村污染水平次之。首先，这与高渠乡“一村一业”的政策相关，马蹄坬 2013 年成立红葱种植合作社，以经济作物红葱作为自己的优势作物，而红葱需要每年 3 次的施肥才得丰产；其次，马蹄坬作为人口密集型村庄，人口众多而耕地有限，耕地多年高强度使用而无法轮休，造成了土壤重金属的污染；另外，马蹄坬北部多年种植红葱，南部川道以传统作物为主，使得北部重金属污染高于南部。李郝山村污染最轻。首先，该村无合作社组织，经济作物种植少，以传统作物及传统耕作方式为主，加之交通不便，经济发展相对落后，农机具数量显著少于高西沟和马蹄坬；其次，该村人少地稀、青壮年流失严重，致使土地撂荒现象普遍，耕地土壤污染较轻。

3.2.2 不同农户类型耕地污染空间分布特征

基于多年权属调研数据，对 3 种农户类型耕地重金属综合污染值分别进行空间化（图 3）。其中，自

表 3 3 种类型农户耕地重金属综合污染值

农户类型	最小值 (min)	最大值 (max)	平均值 (avg)
自给自足型	1.44	1.78	1.66
兼业型	1.59	1.92	1.71
种植型	1.52	1.99	1.73

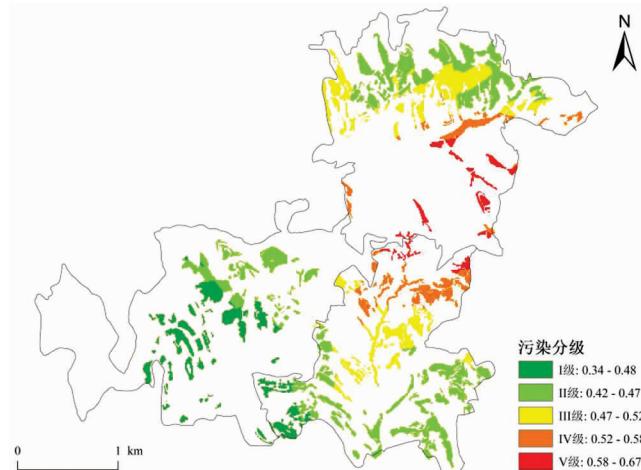


图 2 耕地土壤重金属污染分布

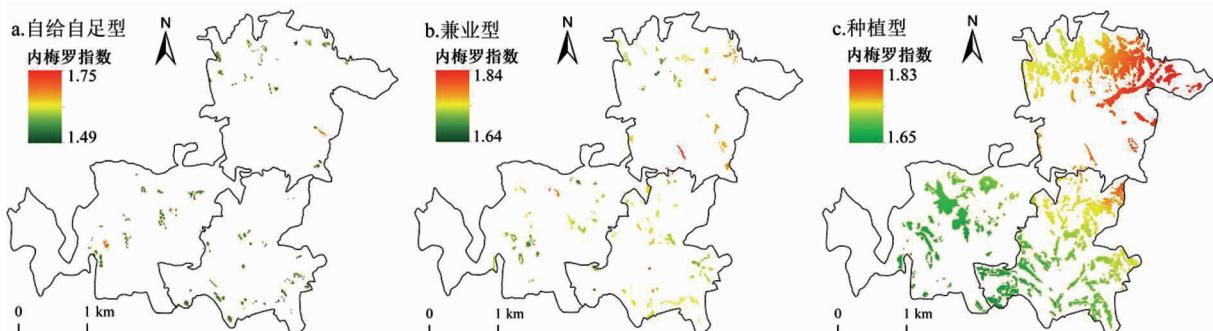


图 3 3 种农户类型耕地重金属污染分布差异

给自足以及兼业农户土地占有量明显少于种植户，且空间分布差异无规律可循。对于自给自足型农户，整体处于低污染水平；兼业农户耕地面积相对自给自足型农户较多，且污染水平更高，高污染主要集中于高西沟东部；种植型农户污染特征与村落整体污染相似，从东北向西南方向递减。

3.3 不同农户类型对于土壤重金属污染的影响因素差异分析

根据多层次模型相关原则，检验了自变量的多重共线性，方差膨胀因子（VIF < 5）的测量结果表明，自变量之间的相关性并没有对模型的参数估计造成过大的偏差^[25]。通过零模型检验说明应用多层次模型的必要性^[26]，模型估计结果显示组间方差 0.006 15，组内方差 0.002 24 ($P < 0.01$)，得出土壤综合污染指数组内相关系数 $ICC = 0.002 24 / (0.006 15 + 0.002 24) = 0.267 07$ ，说明污染差异有 26.707% 的变异来自农户层次。而在考虑组间效应统计分析时，当组内相关系数大于 0.059 00 时，有必要采用多层次分析模型^[27]。分别对 3 种农户类型进行多层次回归分析，估计结果见表 4。

表 4 3 种农户类型多层次模型回归结果

综合污染值	自给自足型		兼业型		种植型	
	显著性	标准误差	显著性	标准误差	显著性	标准误差
个体变量						
年龄	-0.005 48 ***	0.002 07	-0.002 74	0.002 17	0.001 15	0.006 69
文盲	0.027 72	0.041 24	0.024 21	0.035 67	0.040 81	0.034 16
初中及以上	0.003 95	0.034 19	-0.010 89	0.018 71	-0.034 56	0.032 59
有保护意识	0.028 30	0.027 85	0.023 03	0.023 92	-0.096 61 **	0.048 55
劳动力数量 1	-0.061 25 *	0.036 53	0.005 02	0.032 25	0.076 60	0.054 49
劳动力数量 3	—	—	0.021 06	0.022 21	0.070 93 ***	0.034 49
种植面积	0.018 26	0.016 66	0.003 36 *	0.005 08	0.004 85	0.006 32
农业收入	0.000 04	0.000 03	0.000 03 **	0.000 01	0.000 02	0.000 01
每 667m ² 收益	-0.000 02	0.000 02	0.000 01	0.000 02	0.000 01 ***	0.000 01
环境变量						
高程	-0.000 51	0.000 32	0.001 63 **	0.000 42	0.000 81	0.000 72
距道路距离	-0.000 59 *	0.000 36	-0.000 22 *	0.000 09	-0.000 35	0.000 25
地块面积	0.000 17	0.000 11	0.000 29	0.000 23	-0.000 01	0.000 18

注：显著性 * $P < 0.1$, ** $P < 0.05$, *** $P < 0.01$

从表 4 中可以看出，研究区耕地土壤重金属综合污染是由个体因素和地块特征共同造成的，对于 3 种不同农户类型，造成土壤污染的因素互不相同。

对于自给自足农户而言，年龄、劳动力数量和距道路距离 3 个变量通过了显著性检验。其中，年龄 (-0.005 48, $P < 0.01$) 越大的农户，造成的耕地重金属污染越低，这与 Damalas 等^[28]的研究结论与之相同。就研究区而言，自给自足型以高龄农户为主，该类农户耕种多为自给，不作商品出售，生产投入较少。以劳动力数量为 2 作为参考，劳动力为 1 时，污染值呈显著负相关 (-0.061 25, $P < 0.1$)，对于自给自足型农户，劳动力数量很大程度上决定种植面积以及生产活动强度。从地块特征来看，距道路距离远近 (-0.000 59, $P < 0.1$) 是影响自给自足型农户耕地重金属污染的原因之一；距离道路的远近反映了地块的通达性，对于劳动力数量和水平均较低的自给自足型农户，更倾向于对容易到达的地块进行农业活动，由此投入相对较多的生产资料，造成更严重的重金属污染。

兼业型农户兼顾打工和耕种，精力较分散。种植面积 (0.003 36, $P < 0.1$) 一定程度上决定兼业户的精力分配，表征对于农业生产的重视程度。农业收入 (0.000 03, $P < 0.05$) 反映农户农业生产资料的购买能力，相关研究表明农村居民收入水平对农药、化肥、农业固定资产、和农膜投入产生显著正向作用^[29]。此外，地块特征同样对耕地污染造成影响。近年来，米脂县大力发展山地苹果，阳光可以促进糖

分的积累，对于黄土高原丘陵沟壑区而言，高程（0.001 63, $P < 0.05$ ）很大程度上决定了光照强度，这使得优势作物占据优势环境，高收益的苹果种植在高程高的地方，其他传统作物种植在相对较低的地方；并且，高程可在一定程度上通过影响气温气压达到影响污染差异的作用^[30]。距道路距离（-0.000 22, $P < 0.1$ ）越远，受到轮胎磨损，扬尘等的影响越小，重金属污染程度越低^[31]。

对于种植型农户而言，农户个体层面起主导作用，个体变量决定了耕地重金属污染状况。保护意识（-0.096 61, $P < 0.05$ ）表明：相对于无自我保护且无环境保护意识的农户，具有保护意识的农户生产活动更规范，对耕地造成污染较少，相关研究^[32]发现，农民的保护意识对于其行为具有显著的正面影响。劳动力数量同样影响种植户生产投入，当劳动力数量为3（0.070 39, $P < 0.01$ ）时，相比对照组，形成显著正相关，刘洪彬等对沈阳郊区农户研究得出的结论与之相同^[13]。每667m²收益（0.000 01, $P < 0.01$ ）对耕地重金属污染起显著作用，不同农作物价格差异明显，农产品价格越高越能刺激农户增加对土地的投入^[13]，而果树地由于长期大量使用农药、化肥，积累了更多的重金属^[33]。农业作为种植型农户的主要收入来源，在作物选择中，更倾向于价格较高的作物类型，且对此更多投入，以期达到更高收益。

整体而言，土壤重金属污染值受到农户个体和地块环境的共同影响。其中，个体变量中年龄和劳动力数量及环境变量中的距道路距离对自给自足型农户影响较大。兼业型农户在个体层面受种植面积和收入状况影响，同时，环境层面的高程和距道路距离也是主要的影响因素。种植户受人为活动影响较大，其中，保护意识、劳动力数量、单产收益起到关键作用，而环境影响不明显。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 耕地土壤重金属存在一定程度累积。耕地土壤Pb、As、Cu、Cr、Ni、Zn含量均值分别为16.00、10.65、29.77、102.07、56.20和54.99mg/kg；其中，Cu、Cr和Ni有不同程度的积累，均值分别超出黄绵土背景值的1.58倍、1.57倍和2.04倍。从污染等级来看，单因子污染指数的均值大小为：Pb < Zn < As < Cr < Cu < Ni；Pb、Zn、As属于轻微污染，Cr、Cu属于轻度污染，Ni属于中度污染。内梅罗综合指数极值分别为1.44、1.99，均值为1.71，表明村落耕地处于轻污染状态；自给自足型、兼业型、种植型农户耕地重金属均值分别为1.66、1.71和1.73。

(2) 土壤重金属综合污染空间分异显著，村落污染水平有所差异，且不同农户类型耕地污染特征迥异。李郝山污染水平处于I~II级，污染较轻；马蹄坬和高西沟接壤部分污染最为严重，处于IV~V级。种植户耕地污染程度由东北向西南方向递减；自给自足型农户污染严重的耕地星散分布；兼业型农户污染高值集中于高西沟。

(3) 不同农户类型耕地土壤重金属综合污染值影响因素各不相同。自给自足型农户受年龄、劳动力数量和地块距道路距离的影响，且每增加一个单位，耕地土壤综合污染值分别减少0.005 48、0.061 25和0.000 59个单位；兼业型受种植面积、农业收入、高程、距道路距离的影响，其每增加一个单位，耕地土壤重金属综合污染值分别增加0.003 36、0.000 03、0.001 63和-0.000 22；种植户受到保护意识、劳动力数量、农产品价格的影响，每增加一个单位，污染值分别增加-0.096 61、0.070 39和0.000 01。

4.2 讨论

耕地土壤重金属污染差异驱动机制的厘清是探究耕地重金属污染变化及其效应的关键。该文以农户视角将农户分类作为突破点，构建多层次模型探究村落尺度耕地土壤重金属污染影响的差异研究，为耕地土壤重金属污染研究提供新思路，同时助益地方农业发展及耕地保护。然而，由于研究区特殊性，该文在以下方面稍显不足：首先，自己自足以及兼业型农户耕地数量少，造成耕地土壤污染空间化不明显。其次，对于多层次模型的构建只考虑农户及地块两个层次，忽视了村落特征的影响。为此，应加大农户调研力度，扩充农户数据集，调整农户分类标准；同时，基于村庄整体问卷添加村落尺度因子，构建农户、地块及村落的3层次模型。

参考文献

- [1] Zarcinas B A, Pongsakul P, McLaughlin M J, et al. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26 (3): 343–357.
- [2] 黄兴星, 朱先芳, 唐磊, 等. 北京市密云水库上游金铁矿区土壤重金属污染特征及对比研究. *环境科学学报*, 2012, 32 (6): 1520–1528.
- [3] 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 等. 黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价. *环境科学*, 2018, 39 (8): 3917–3926.
- [4] 曾妍妍, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆若羌县农田土壤重金属分布特征及污染评价. *干旱区资源与环境*, 2017, 31 (9): 87–91.
- [5] 石磊. 巴中市农田土壤重金属分布及生态风险评价. *中国农业资源与区划*, 2018, 39 (4): 176–180.
- [6] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价. *地理学报*, 2017, 72 (9): 1680–1694.
- [7] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 土壤有效态 Cd、Cu、Pb 的分布特征及影响因素研究. *地理科学*, 2010, 30 (2): 254–260.
- [8] 孙慧, 毕如田, 郭颖, 等. 广东省土壤重金属溯源及污染源解析. *环境科学学报*, 2018, 38 (2): 704–714.
- [9] 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. *土壤通报*, 2016, 47 (1): 179–185.
- [10] 汤波, 赵晓光, 冯海涛, 等. 汉江上游铅锌尾矿库区土壤重金属富集特征与影响因素. *江苏农业科学*, 2017, 45 (13): 233–237.
- [11] Zhou S L, Liao F Q, Wu S H, et al. Heavy metals contents in soil profiles of typical agricultural lands in Yixing, Jiangsu Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (1): 177–187.
- [12] Cai F, Van Vliet J, Verburg P H, et al. Land use change and farmer behavior in reclaimed land in the middle Jiangsu coast, China. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 137 (3): 107–117.
- [13] 刘洪彬, 吕杰. 大城市郊区不同区域农户土地投入行为差异及其影响因素对比研究——以沈阳市苏家屯区为例. *资源科学*, 2014, 36 (10): 2084–2091.
- [14] 李小建. 欠发达农区经济发展中的农户行为——以豫西山地丘陵区为例. *地理学报*, 2002, 57 (4): 459–468.
- [15] 刘洪彬, 于国锋, 王秋兵, 等. 大城市郊区不同区域农户土地利用行为差异及其空间分布特征——以沈阳市苏家屯区 238 户农户调查为例. *资源科学*, 2012, 34 (5): 879–888.
- [16] 钟大洋, 黄贤金. 农户层面土地利用变化研究综述. *自然资源学报*, 2007, 22 (3): 341–352.
- [17] Zhu Y C, Wang L J, Zhao X Y, et al. Accumulation and potential sources of heavy metals in soils of the Hetao area, Inner Mongolia, China. *Pedosphere*, 2020, 30 (2): 244–252.
- [18] 孔祥斌, 张凤荣, 王茹. 近 20 年城乡交错带土壤养分时间空间变异特征分析——以北京市大兴区为例. *土壤*, 2004, 36 (6): 636–643.
- [19] 杨维鸽, 陈海, 杨明楠, 等. 基于多层次模型的农户土地利用决策影响因素分析——以陕西省米脂县高西沟村为例. *自然资源学报*, 2010, 25 (4): 646–656.
- [20] 咸亮, 张贵军, 张慧, 等. 黄骅市土壤重金属空间变异特征及污染评价. *水土保持研究*, 2017, 24 (5): 337–342.
- [21] 郑国璋, 岳乐平. 洛川苹果园地土壤重金属污染调查与评价. *土壤通报*, 2008, 39 (2): 402–405.
- [22] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价. *环境科学学报*, 2018, 38 (6): 2475–2485.
- [23] 陈海, 梁小英, 王国义, 等. 基于过程的农户土地利用行为模型的设计与模拟研究. *自然资源学报*, 2014, 29 (6): 1076–1089.
- [24] 方杰, 邱皓政, 张敏强. 基于多层次模型的情境效应分析——兼与多层次线性模型比较. *心理科学进展*, 2011, 19 (2): 284–292.
- [25] Liu Y Q, Zhang F Z, Wu F L, et al. The subjective wellbeing of migrants in Guangzhou, China: The impacts of the social and physical environment. *Cities*, 2017 (60): 333–342.
- [26] 孙贵艳. 基于多层次模型的甘肃秦巴山区农户生计多样化研究. *中国农业资源与区划*, 2018, 39 (10): 182–188.
- [27] 陈佳, 杨新军, 尹莎. 农户贫困恢复力测度、影响效应及对策研究——基于农户家庭结构的视角. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26 (1): 150–157.
- [28] Damalas C A, Hashemi S M. Pesticide risk perception and use of personal protective equipment among young and old cotton growers in northern Greece. *Agrociencia*, 2010, 44 (3): 363–371.
- [29] 姚冠荣, 刘桂英, 谢花林. 中国耕地利用投入要素集约度的时空差异及其影响因素分析. *自然资源学报*, 2014, 29 (11): 1836–1848.
- [30] 马群, 赵庚星, 李玉环. 小尺度地形因子对农地土壤质量的影响研究. *地理与地理信息科学*, 2009, 25 (3): 77–80.
- [31] 王梦梦, 原梦云, 苏德纯. 我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律. *中国环境科学*, 2017, 37 (11): 4085–4096.
- [32] 郭玲霞, 封建民, 孙铂. 陕北生态脆弱区农民环境感知状况及其影响因素. *水土保持通报*, 2015, 35 (4): 235–241.
- [33] 张玉斌, 曹宁, 余雕, 等. 黄土高原残塬沟壑区梯田土壤重金属分布特征. *中国农学通报*, 2009, 25 (12): 252–256.

STUDY ON INFLUENCING FACTORS OF HEAVY METAL POLLUTION IN CULTIVATED LAND BASED ON FARMERS' PERSPECTIVE*

—A CASE STUDY OF GAOQU COMMUNTIY OF MIZHI COUNTY, SHAANXI PROVINCE

Zhao Yan^{1,2}, Chen Hai^{1,2*}, Liu Di^{1,2}, Shi Qinjin^{1,2}, Zhang Min^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. Key Laboratory of Surface System and Environmental Carrying Capacity of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract Farmers were the most important decision-making unit of agricultural land use, and played a leading role in the accumulation of heavy metals in cultivated land. Through the study on the spatial differentiation and influencing factors of heavy metal pollution in typical villages in Gaoqu community, Shaanxi province, the differences of cultivated land pollution among different types of farmers in the loess hilly and gully region are discussed. The heavy metal pollution of cultivated land through single factor index and Nemerow comprehensive index were evaluated, and ordinary kriging interpolation was used to realize the spatial visualization of comprehensive pollution value, then multi-level model was used to conduct a mechanism study on the difference of heavy metal pollution in cultivated land based on the selected 58 samples in the study area. The order of the average value of single factor pollution index of typical village cultivated land was: Pb < Zn < As < Cr < Cu < Ni. Nemerow comprehensive pollution index was between 1.44 and 1.99, which was mildly polluted. The average pollution of self-sufficient, concurrent, and planted farmers' was 1.66, 1.71, and 1.73, respectively. From the perspective of spatial differentiation, the spatial distribution of cultivated land pollution of self-sufficient farmers was irregular, and the high value of cultivated land pollution of concurrent farmers was concentrated in Gaoxigou, the type of cultivated land pollution of planting farmers decreases from northeast to southwest. The results of multi-level model showed that the heavy metal pollution of self-sufficient household farmers were affected by the age, labor quantity and land distance of the farmers. The part-time household farmers were affected by the planting area, income, elevation of the land and the distance from the road. The planting household farmers were affected by environmental protection awareness, quantity of labor and the price of agricultural products. Based on the perspective of farmers, discussing the heavy metal pollution of cultivated land can provide a scientific basis for the development of green agriculture and protection of ecological environment in the loess hilly and gully region. It is one of the effective means to promote regional agricultural development and environmental protection.

Keywords heavy metal pollution; farmer perspective; multi-level model; loess hilly and gully region; Gaoqu community