

岩溶石漠化地区不同利用方式对土壤肥力和重金属质量分数的影响

邵 晗¹, 王 虎¹, 王 妍^{1,2}, 徐红枫¹, 苏 倩¹, 刘云根^{1,2}

(1. 西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2. 西南林业大学 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要: 【目的】探讨不同土地利用方式下土壤肥力和重金属污染的特征及土壤养分与土壤重金属之间的关系。【方法】以云南省西畴县三光石漠化综合治理示范区的撂荒地、灌草地、人工林地、自然林地、玉米 *Zea mays* 地、核桃 *Juglans regia* 林地和猕猴桃 *Actinidia chinensis* 地为研究对象, 测定土壤养分和重金属质量分数并进行相关性分析。【结果】自然恢复方式下土壤有机质、全氮、全磷质量分数显著高于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 灌草地土壤 [土壤肥力综合指数 (I_{FI}) 为 0.915] 和撂荒地土壤 ($I_{FI}=0.913$) 较为肥沃, 猕猴桃地土壤 ($I_{FI}=0.485$) 和核桃林地土壤 ($I_{FI}=0.501$) 较为贫瘠; 不同土地利用方式下, 灌草地重金属污染风险最低 [生态风险指数 (I_R) 为 66.91], 猕猴桃地重金属污染风险最高 ($I_R=169.16$)。相关性分析发现: 土壤养分质量分数对重金属质量分数的影响因土地利用方式的不同而不同, 且在灌草地、人工林地和自然林地中较为显著 ($P < 0.05$), 在撂荒地和作物种植地中并不显著 ($P > 0.05$)。【结论】自然属性较强的地区土壤肥力水平高, 且重金属污染风险低, 说明人为干扰是影响石漠化地区进行植被恢复的重要因素。为了更好地提高土壤质量, 应适当减少人为活动的干扰。图 3 表 8 参 29

关键词: 石漠化; 不同土地利用方式; 土壤养分; 重金属

中图分类号: S153 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)03-0635-09

Effects of different land use modes on soil fertility and heavy metal contents in karst rocky desertification area

SHAO Han¹, WANG Hu¹, WANG Yan^{1,2}, XU Hongfeng¹, SU Qian¹, LIU Yungen^{1,2}

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous and Rural Areas of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the characteristics of soil fertility and heavy metal pollution under different land use modes and the relationship between soil nutrients and heavy metals. [Method] Abandoned land, shrub land, artificial forest land, natural woodland, *Zea mays* field, *Juglans regia* woodland, and *Actinidia chinensis* land in Sanguang Rocky Desertification Comprehensive Control Demonstration Area in Xichou County of Yunnan Province were taken as the research objects, and the mass fractions of soil nutrients and heavy metals were measured and analyzed. [Result] The mass fractions of soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus under natural restoration mode were significantly higher than those under other land use modes ($P < 0.05$). The soil of shrub land ($I_{FI}=0.915$) and abandoned land ($I_{FI}=0.913$) was more fertile, while the

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31760245); 云南省基础研究专项 (202001AT070115)

作者简介: 邵晗 (ORCID: 0000-0003-2975-3930), 从事石漠化治理研究。E-mail: 1139731064@qq.com。通信作者: 刘云根 (ORCID: 0000-0001-5419-5657), 副教授, 博士研究生, 从事生态系统修复研究。E-mail: henryliu1008@163.com

soil of *A. chinensis* land ($I_{FI}=0.485$) and *J. regia* land ($I_{FI}=0.501$) was poor. Under different land use modes, the risk of heavy metal pollution was the lowest ($I_R=66.91$) in shrub land, and the highest ($I_R=169.16$) in *A. chinensis* land. Correlation analysis showed that the effect of soil nutrient content on heavy metal content was different with different land use modes, and was more significant in shrub and grass field, artificial forest and natural forest land ($P<0.05$), but insignificant in abandoned land and crop planting land ($P>0.05$). [Conclusion] Areas with strong natural attributes have high soil fertility and low risk of heavy metal pollution, indicating that human disturbance is an important factor affecting vegetation restoration in rocky desertification areas. Human disturbance should be appropriately reduced to better improve soil nutrients. [Ch, 3 fig. 8 tab. 29 ref.]

Key words: rocky desertification; different land use modes; soil nutrients; heavy metals

中国西南喀斯特地区是岩溶地貌发育最典型、石漠化最严重、人地矛盾最突出、分布面积最大的喀斯特连续地带^[1-2]。近 20 a 来, 针对西南喀斯特地区的生态地质环境问题, 中国采取了一系列以植被修复为主的石漠化治理措施, 如封山育林、退耕还林还草、建设防护林、种植经济作物等, 获得了显著的研究成果和治理成效^[3-5]。大量研究证实植被修复能够有效改善土壤的理化性质, 如白义鑫等^[6]研究表明: 土壤有机碳含量对不同土地利用方式的响应不同, 其中花椒 *Zanthoxylum bungeanum* 林有机碳含量显著高于其他地类; XU 等^[7]研究发现: 同一地区不同植被类型土壤养分含量之间差异显著; 李青等^[8]通过对不同植被恢复模式下土壤化学特征的测定分析发现, 混交林生态恢复效果优于纯林, 豆科 Fabaceae 植物恢复效果优于非豆科植物。然而, 关于石漠化区不同植被恢复模式土壤的研究多集中于理化性质变化特征及其关系等方面, 对土壤质量的系统研究相对较少。此外, 西南地区丰富的矿产资源导致该地区土壤存在严重的重金属污染现象。有研究表明: 岩溶地区铅锌矿开采和特殊的喀斯特环境能够导致土壤重金属超标^[9]; 罗绪强等^[10]研究发现: 喀斯特地区不同石漠化程度土壤重金属镉含量不同, 其中部分镉伴随石漠化过程向周边扩散。目前, 土壤贫瘠和重金属污染是西南喀斯特地区较为严重的土壤环境问题, 在分析不同土地利用方式下土壤养分特征的同时, 关注养分与重金属之间的关系, 对改善石漠化地区土壤养分和重金属修复具有重要价值。本研究以滇东南西畴县三光石漠化综合治理示范区为例, 比较不同土地利用方式土壤养分和重金属质量分数分布特征的差异, 分析土壤养分与重金属之间的关系, 以揭示不同土地利用方式对石漠化区生态修复的影响, 为石漠化治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三光石漠化综合治理示范区位于云南省文山州西畴县 ($23^{\circ}10' \sim 23^{\circ}14'N$, $104^{\circ}34' \sim 104^{\circ}38'E$), 属热带低纬季风气候, 年平均气温为 $15.9^{\circ}C$, 年均降水量为 1294.0 mm , 年日照时数为 $1\,500 \sim 1\,600\text{ h}$ 。近年来, 该地区实施了一系列生态工程, 如对山头采取封山育林、植树造林、公益林保护等措施修复森林植被, 对山腰耕作条件较差的石旮晃地进行退耕还林, 大力发展核桃 *Juglans regia*、猕猴桃 *Actinidia chinensis* 等特色经济林果, 对山脚坡度小于 25° , 有改造条件的缓坡地和石旮晃地, 实施坡改梯和炸石造地, 建成了全省石漠化综合治理示范区。

1.2 样点布设及样品采集

查阅研究区相关资料并进行野外考察, 根据当地土地利用方式及主要农作物和经济作物类型, 并综合考虑了海拔、坡度、坡向以及植被生长状况, 选取撂荒地、灌草地、人工林地、自然林地、玉米 *Zea mays* 地、核桃林地和猕猴桃地共 7 种利用方式 (表 1)。每种土地利用方式分别设置 3 个重复样地。样品采集于 2020 年 8 月, 每个样地设置 3 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方, 按照 S 型 5 点采样法, 共采集 63 份土样。采样时先除去地面凋落物, 采集 $0 \sim 10\text{ cm}$ 表层土壤样品, 并采用四分法混匀。将土样带回实验室经自然风干、剔除植物根茎和石砾后分为 2 份, 研磨分别过 20 和 100 目筛, 用于化学分析。

表 1 研究区样地概况

Table 1 Sample overview of the study area

土地利用类型	坡向	海拔/m	主要植被
撂荒地(BF)	北坡	1 474.5~1 481.7	鼠尾草 <i>Salvia japonica</i> 、扁穗草 <i>Brylkinia schmidt</i>
灌草地(FG)	北坡	1 519.0~1 537.7	绒毛山胡椒 <i>Lindera nacusua</i> 、尖子木 <i>Oxyspora paniculata</i>
人工林地(AF)	北坡	1 410.6~1 496.5	三尖杉 <i>Cephalotaxus fortunei</i> 、滇青冈 <i>Cyclobalanopsis glaucoides</i>
自然林地(AG)	北坡	1 241.7~1 511.4	三尖杉、云南松 <i>Pinus yunnanensis</i>
玉米地(CN)	北坡	1 459.7~1 472.6	玉米
核桃林地(UJ)	北坡	1 113.5~1 212.7	核桃
猕猴桃地(UA)	北坡	1 513.4~1 547.0	猕猴桃、鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>

1.3 样品分析及数据处理

1.3.1 样品分析 土壤理化性质^[11]及重金属元素^[12]测定方法见表 2。

表 2 土壤理化性质及重金属元素测定方法

Table 2 Measuring methods of soil physicochemical indexes and heavy metal elements

指标	项目	测定方法
物理指标	pH	土水质量比1.0:2.5电位法
	有机质	重铬酸钾容量法-外加热法
	全氮	半微量开氏法
化学指标	碱解氮	碱解扩散法
	全磷	钼锑抗比色法
	速效磷	NaHCO ₃ 浸提-钼锑抗比色法
	速效钾	火焰光度法
重金属元素	砷、锌、铜、镍、铬、锰	三酸分步消解-电感耦合等离子体质谱法

1.3.2 土壤肥力指数综合评价 本研究选取有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾及 pH 作为评价土壤肥力质量的基本指标。在计算土壤肥力综合指数时，采用主成分分析法确定不同用地类型土壤肥力指标的权重值(表 3)，并构建评价指标的隶属度函数模型(S 型和抛物线型)，根据全国第 2 次土壤普查标准确定土壤属性值的分级标准(表 4)，最后采用模糊综合评价(Fuzzy)法计算土壤肥力指数^[13]。

表 3 土壤肥力综合评价指标权重值

Table 3 Weight value of soil fertility comprehensive evaluation index

指标	pH	有机质	全氮	全磷	速效磷	碱解氮	速效钾
权重值	0.056	0.226	0.224	0.162	0.106	0.179	0.047

表 4 土壤养分及 pH 分级标准

Table 4 Soil nutrient and pH classification criteria

分级	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)	评价
一级	>8.5	>40	>2.00	>1.0	>150	>40	>200	很高
二级	7.5~8.5	30~40	1.50~2.00	0.8~1.0	120~150	20~40	150~200	高
三级	6.5~7.5	20~30	1.00~1.50	0.6~0.8	90~120	10~20	100~150	中上
四级	5.5~6.5	10~20	0.75~1.00	0.4~0.6	60~90	5~10	50~100	中下
五级	4.5~5.5	6~10	0.50~0.75	0.2~0.4	30~60	3~5	30~50	低
六级	≤4.5	≤6	≤0.50	≤0.2	≤30	≤3	≤30	很低

说明：表中连接点的值为上限排除法

土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾采用 S 型隶属函数^[14]，土壤 pH 采用抛物线隶属函数^[14]。土壤肥力综合指数(I_{FI})计算公式如下：

$$I_{\text{FI}} = \sum_{i=1}^n W_i N_i$$

其中： W_i 和 N_i 分别表示第 i 项指标的权重值和隶属度值， n 为指标数。 I_{FI} 取值范围为0~1。土壤肥力分级标准见表5。

1.3.3 土壤重金属生态风险评价 潜在生态风险指数(I_{R})可综合反映土壤重金属污染程度及对人类和环境的潜在危害程度^[15]。 I_{R} 计算公式如下： $E_i = T_i(C_i/C_i)$ ， $I_{\text{R}} = \sum_{i=1}^n E_i$ 。其中： E_i 为元素 i 的潜在生态危害系数； T_i 为元素 i 的毒性响应系数； C_i 为元素 i 的实测质量分数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)； C_i 为元素 i 的区域背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[16]。分级标准见表6。

表5 土壤肥力水平分级标准^[17]

Table 5 Classification standard for soil fertility level ^[17]			
指标范围	肥力水平	指标范围	肥力水平
$I_{\text{FI}} \geq 0.8$	高	$0.2 \leq I_{\text{FI}} < 0.4$	较低
$0.6 \leq I_{\text{FI}} < 0.8$	较高	$I_{\text{FI}} < 0.2$	低
$0.4 \leq I_{\text{FI}} < 0.6$	中等		

表6 土壤重金属潜在生态危害分级标准

Table 6 Soil heavy metals potential ecological hazard grading standard					
E_i	I_{R}	生态危害程度	E_i	I_{R}	生态危害程度
<40	<150	轻微	160~320	≥ 600	很强
40~80	150~300	中等	≥ 320		极强
80~160	300~600	强			

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤养分特征分析

2.1.1 不同土地利用方式下土壤养分质量分数差异特征 岩溶石漠化地区不同土地利用方式下土壤养分质量分数之间存在差异(图1)，总体表现为：自然恢复方式下土壤有机质、全氮、全磷显著高于其他利用方式($P < 0.05$)。撂荒地($76.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和灌草地($78.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的土壤有机质质量分数较高，其次是人工林地($55.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、自然林地($52.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和玉米地($53.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，而核桃林地($35.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和猕猴桃地($27.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)土壤有机质质量分数较低，但差异不显著($P > 0.05$)。不同利用方式下土壤的全氮与有机质质量分数的变化趋势相似，不同的是撂荒地全氮质量分数最高($2.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，猕猴桃地全氮质量分数最低($1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，且核桃林地和猕猴桃地与撂荒地土壤全氮质量分数具有显著差异($P < 0.05$)。不同利用方式下土壤全磷与有机质质量分数不同的是，撂荒地土壤全磷质量分数最高($1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，其次是玉米地($1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)，与人工林地、自然林地、核桃林地、猕猴桃地全磷质量分数的差异显著($P < 0.05$)，人工林地土壤全磷质量分数最低($0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由此可见，撂荒地和灌草地更有益于该地区土壤养分的提升，而猕猴桃地和核桃林地因其人为扰动过强导致养分严重流失。

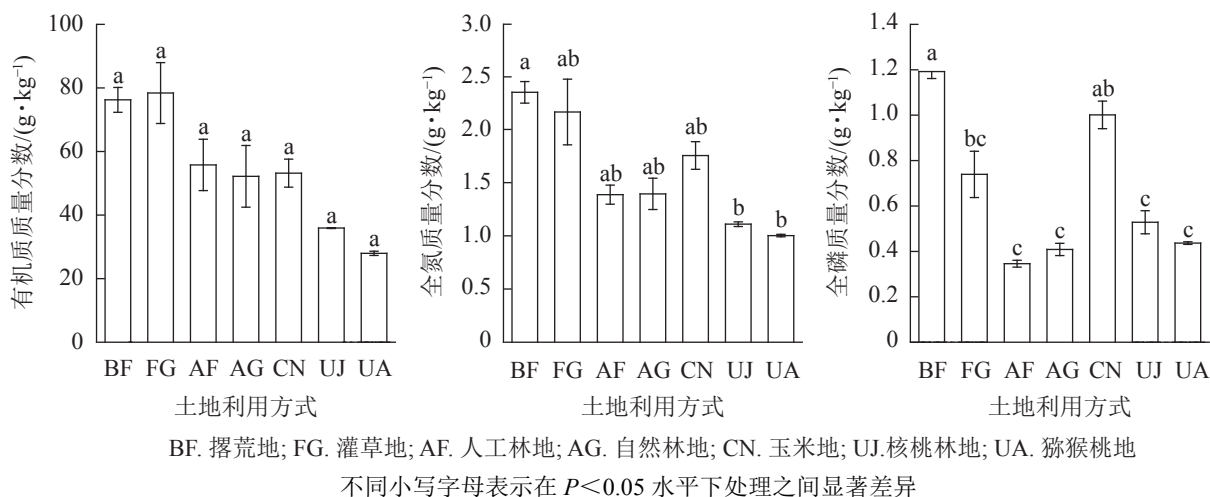


图1 不同土地利用方式下土壤有机质、土壤全氮和土壤全磷的差异特征

Figure 1 Characteristics of soil organic matter contents, soil total nitrogen contents and soil total phosphorus contents under different utilization methods

2.1.2 不同土地利用方式下土壤肥力综合评价 通过对不同利用土地方式土壤肥力综合指数的计算可知, 岩溶石漠化地区人为干扰较弱的利用方式下土壤较为肥沃。撂荒地、灌草地和玉米地的土壤肥力处于高水平, 人工林地和自然林地土壤肥力处于较高水平, 核桃林地和猕猴桃地土壤肥力处于中等水平, 其中, 猕猴桃地 I_{FI} 最低, 为 0.485, 灌草地 I_{FI} 最高, 达到 0.915, 是猕猴桃地的 1.9 倍 (表 7), 说明灌草模式比人为干扰较强的经济作物模式更适合石漠化地区的土壤修复。

2.2 不同土地利用方式下土壤重金属污染风险特征

运用潜在生态危害指数法评价不同土地利用方式下土壤重金属的生态风险水平, 可见 7 种土地利用方式下土壤 I_R 均小于 150, 在轻微风险水平范围内 (表 8), I_R 从大到小依次为猕猴桃地、自然林地、核桃林地、撂荒地、玉米地、人工林地、灌草地。根据 E_i 可知: 砷的风险水平最高, 在自然林地和猕猴桃地表现为强生态风险水平, 在撂荒地、人工林地和核桃林地生态风险水平为中等, 在灌草地和玉米地生态风险水平为轻微。砷质量分数均值在自然林地中达到最大值 $122.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2), 超过国家土壤环境质量标准值 3 倍, 在玉米地中最低, 为 $35.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 略高于土壤质量标准值。此外, 除撂荒地镍的污染水平为中等, 7 种利用方式下土壤中锌、铜、镍、铬和锰均表现为轻微污染。综上, 研究区 7 种不同土地利用方式下土壤重金属污染均为轻度风险水平, 猕猴桃地重金属污染风险水平最高, 其中砷是造成该地区重金属污染的主要污染物。

表 7 不同利用方式土壤肥力指数

土地利用方式	I_{FI}	土地利用方式	I_{FI}
撂荒地	0.913	玉米地	0.837
灌草地	0.915	核桃林地	0.501
人工林地	0.779	猕猴桃地	0.485
自然林地	0.789		

表 8 土壤重金属潜在生态危害指数

Table 8 Soil heavy metals potential ecological hazard index

样地	E_i						I_R
	砷	锌	铜	镍	铬	锰	
撂荒地	46.42	7.87	7.35	40.29	6.83	1.25	110.01
灌草地	37.86	2.68	6.51	16.79	2.22	0.86	66.91
人工林地	70.35	1.10	6.93	10.49	2.54	1.68	93.09
自然林地	113.21	4.70	5.90	14.83	3.32	1.32	143.28
玉米地	32.91	7.45	9.80	37.90	5.87	1.52	95.44
核桃林地	69.44	2.89	9.46	27.90	4.27	1.45	115.40
猕猴桃地	103.97	4.68	16.65	37.14	4.64	2.08	169.16

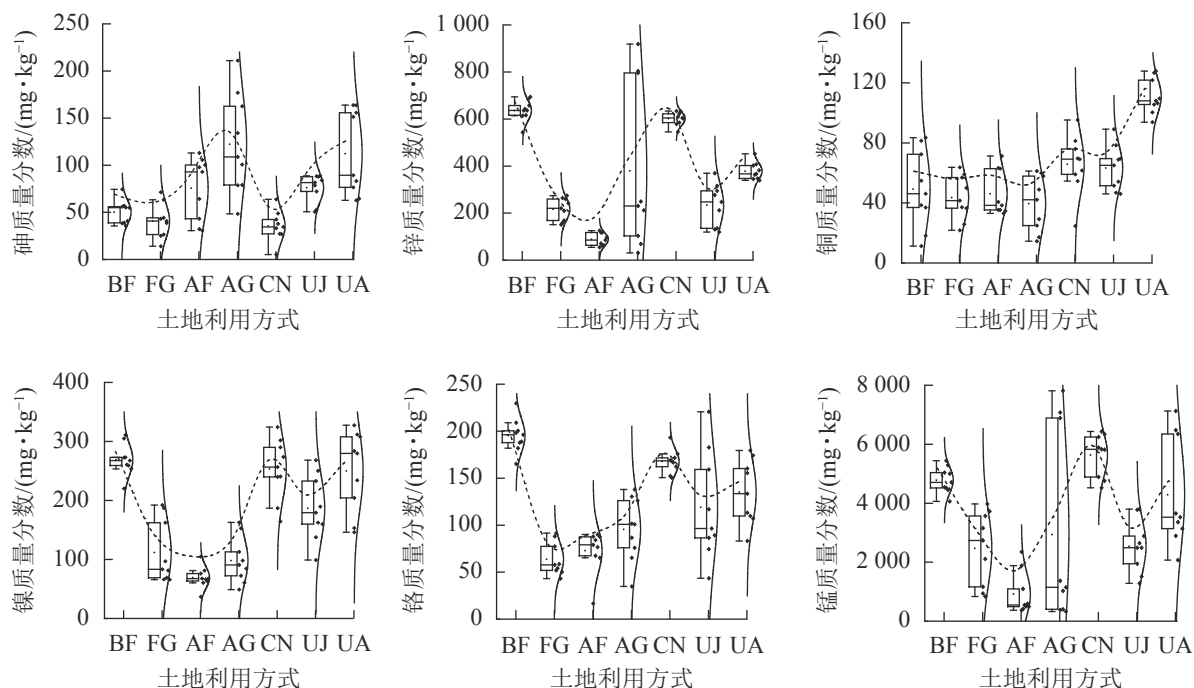
2.3 不同土地利用方式下土壤养分和重金属之间的相关性

对不同土地利用方式下土壤养分与重金属之间的相关性分析可知 (图 3): 不同土地利用方式下各重金属元素与土壤养分之间存在显著相关性 ($P < 0.05$)。具体表现为: 撂荒地中土壤有机质、全氮、全磷与铬和锰呈显著正相关 ($P < 0.05$); 灌草地和人工林地中土壤养分与大部分重金属元素呈显著负相关 ($P < 0.05$); 自然林地中除土壤全磷、碱解氮与铬呈显著负相关外 ($P < 0.05$), 土壤养分与重金属元素呈显著正相关 ($P < 0.05$); 核桃林地中土壤全磷和速效磷与砷和铜呈显著负相关 ($P < 0.05$); 在人为干扰较强的玉米地和猕猴桃地中, 土壤养分与重金属元素之间的相关性不显著 ($P > 0.05$)。总而言之, 岩溶石漠化地区土壤养分质量分数对重金属质量分数具有显著的影响, 但这种影响因土地利用方式的不同而不同。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤养分特征分析

本研究发现: 不同土地利用方式对土壤养分质量分数具有较为显著的影响。人为干扰是直接引起该地区土壤养分流失的重要因素, 其中受人为干扰较大的猕猴桃地土壤养分流失最为严重。研究^[18-21]表明: 人为踩踏行为导致土壤容重增加, 土壤保水持水能力退化, 土壤有机质、全磷和全氮含量降低。自然属性较强的灌草地养分质量分数明显高于其他地类, 是因为灌草地所受人为干扰较弱, 生态系统稳



箱体右侧的散点表示各样地土壤重金属的质量分数, 右侧曲线表示其正态分布概率。BF. 撂荒地; FG. 灌草地; AF. 人工林地; AG. 自然林地; CN. 玉米地; UJ. 核桃林地; UA. 猕猴桃地

图2 不同利用方式下土壤重金属空间分布特征

Figure 2 Spatial distribution characteristics of soil heavy metals under different utilization modes

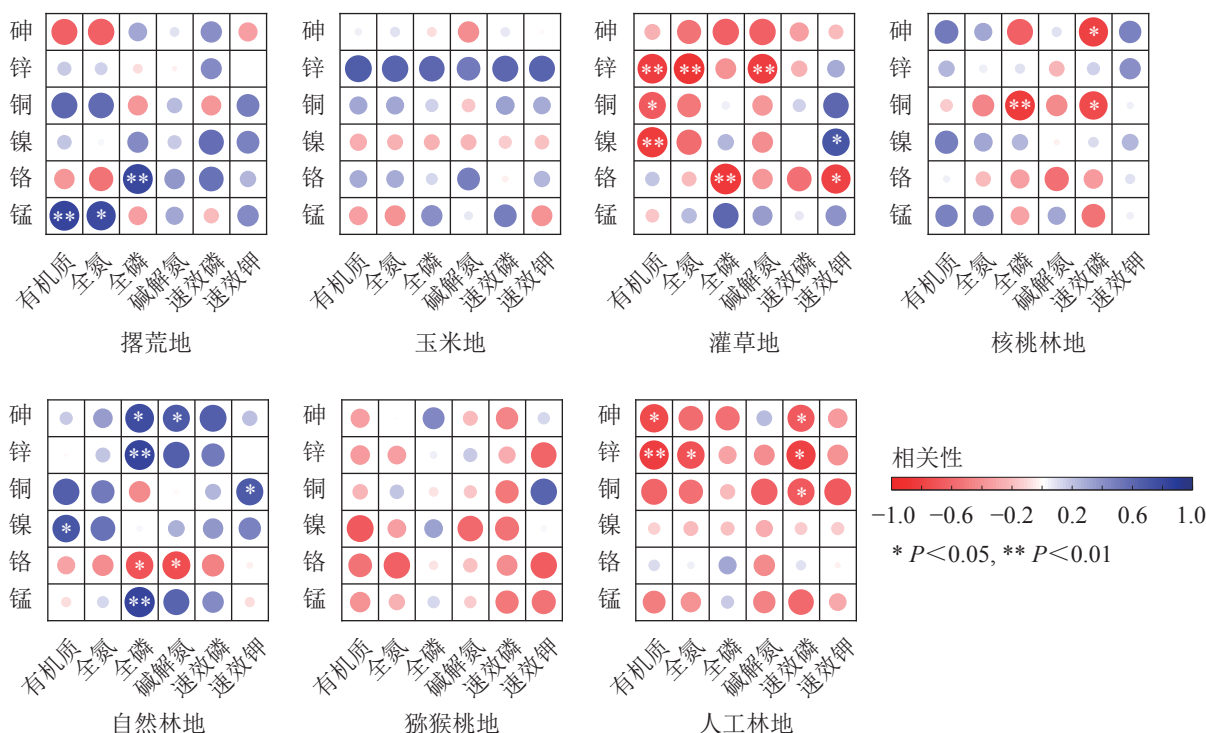


图3 不同利用方式下土壤养分和重金属之间的相关性

Figure 3 Correlation between soil nutrients and heavy metals under different utilization methods

定, 养分不易流失, 且植物种类丰富多样, 根系密度较大, 能够改善土壤结构, 从而使得更多的养分进入土壤^[22]。自然林地和人工林地多为纯林, 植被群落丰富度和多样性较低, 导致养分质量分数低于灌草地。长年耕作的玉米地, 所受人为扰动最强, 但因长期施肥的作用增加了土壤的氮磷质量分数。因此, 在岩溶石漠化地区, 为了能够更好地改善土壤养分状况, 应因地制宜, 选择合适的植被模式, 并适当减少人为干预, 防止养分流失。

3.2 不同土地利用方式下土壤重金属污染特征分析

不同土地利用方式下土壤重金属的分布特征具有显著差异^[23]。本研究中, 猕猴桃地土壤重金属污染风险水平最高。胡春华等^[24]研究结果表明: 农业生产活动中投入大量材料如肥料、除草剂、杀虫剂、塑料薄膜, 不仅提升了土壤养分, 也会导致农用地土壤重金属污染。玉米地土壤重金属污染风险水平较撂荒地低, 是因为玉米的根部能够富集重金属^[25], 也可能是收割作物时带走了土壤中的部分重金属。研究区灌草地重金属污染风险水平最低, 其原因可能是土壤有机质质量分数高, 提高了重金属的环境迁移能力, 且灌草地受人为活动影响较小, 进而重金属输入源较少, 也有可能是因为灌草地上的植被对重金属有一定的富集作用。

3.3 不同土地利用方式下土壤养分对重金属质量分数的影响特征

土壤养分与重金属之间具有一定的耦合关系^[26]。本研究结果表明: 不同土地利用方式下土壤养分与重金属的相关性不同, 其中重金属对灌草地、人工林地和自然林地养分的提升影响较为显著。土壤重金属与土壤酶活性之间的关系密不可分^[27-28], 土壤重金属污染常具隐蔽性、难降解和易富集等特性。重金属以离子形态进入植物体内, 从而影响土壤微生物的生态特性, 在适宜浓度时可促进酶活性, 浓度过低或过高时对酶活性可起到抑制作用, 而养分与酶活性密切相关^[29]。在本研究中, 重金属污染风险最低的灌草地中土壤肥力指数最高, 可能是适度的重金属污染对酶活性起到了促进作用, 从而提升了土壤的肥力。然而, 重金属污染对撂荒地和作物种植地土壤养分的作用并不显著, 主要原因是撂荒地土壤重金属污染是由其特殊的土壤母质造成的, 而玉米地、核桃林地和猕猴桃地的土壤贫瘠及重金属污染主要是由较活跃的人为活动导致的。总之, 土壤养分对重金属的污染程度在不同土地利用方式下有较为显著的响应, 但其响应机制仍需更深入的研究。

4 结论

通过对云南省西畴县石漠化治理示范区不同土地利用方式下表层土壤养分和重金属质量分数特征及其关系的研究, 得出以下结论: ①研究区7种不同土地利用方式中, 灌草地对土壤养分的改良效果最好, 猕猴桃地因较强的人为干扰导致养分流失严重, 而玉米地因长期施肥使得土壤养分质量分数增加。②砷是该地区主要污染物, 灌草地重金属质量分数较低且生态风险水平最低, 猕猴桃地生态风险水平最高。③在灌草地、人工林地和自然林地中, 土壤养分质量分数对重金属质量分数的影响较为显著。

综上所述, 在不同土地利用方式下, 人为干扰是导致土壤养分流失的重要因素, 然而, 在人为干扰较弱的利用方式下, 土壤养分质量分数对重金属质量分数具有显著影响。对于该地区土壤所面临的生态问题, 应尽可能地降低人为干扰强度, 以改善土壤的养分状况, 减少土壤重金属的累积, 降低生态风险水平。而土壤养分对重金属的响应机制有待更深入的研究。

5 参考文献

- [1] 熊康宁, 陈永华, 陈沛. 点石成金: 贵州石漠化治理技术与模式[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011: 125 - 139.
XIONG Kangning, CHEN Yongbi, CHEN Hu. *Midas Touch: Technology and Model of Rocky Desertification Control in Guizhou*[M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2011: 125 - 139.
- [2] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
LIU Congqiang. *Biogeochemical Processes and Surface Material Cycling: Erosion and Biogenic Elements Cycling in Karst Basins of Southwest China*[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 等. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6577 - 6585.
HE Xiaojia, WANG Lei, KE Bing, et al. Progress on ecological conservation and restoration for China karst [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, 39(18): 6577 - 6585.
- [4] 肖华, 熊康宁, 张浩, 等. 喀斯特石漠化治理模式研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 330 - 334.
XIAO Hua, XIONG Kangning, ZHANG Hao, et al. Research progress for karst rocky desertification control models [J]. *China Popul Resour Environ*, 2014, 24(3): 330 - 334.
- [5] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6):

- 1281 – 1285.
- WANG Xiaoli, GUO Shengli, MA Yuhong, *et al.* Effects of land use type on soil organic C and N in a small watershed in Loess Hilly Gully Region [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18**(6): 1281 – 1285.
- [6] 白义鑫, 盛茂银, 胡琪娟, 等. 西南喀斯特石漠化环境下土地利用变化对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(5): 1607 – 1616.
- BAI Yixin, SHENG Maoyin, HU Qijuan, *et al.* Effects of land use change on soil organic carbon and its components in karst rocky desertification of southwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(5): 1607 – 1616.
- [7] XU Miaoping, ZHONG Zekun, SUN Ziyang, *et al.* Soil available phosphorus and moisture drive nutrient resorption patterns in plantations on the Loess Plateau[J/OL]. *For Ecol Manage*, 2020, **461**: 117910[2021-06-15]. doi: [10.1016/j.foreco.2020.117910](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117910).
- [8] 李青, 狄晓艳. 晋北丘陵风沙区不同植被恢复模式的土壤化学特征与生态恢复效应[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(5): 88 – 92.
- LI Qing, DI Xiaoyan. Soil Chemical characteristics and ecological restoration effects of different revegetation patterns in the hilly sandy of north Shanxi Province [J]. *Soil Water Conserv Res*, 2017, **24**(5): 88 – 92.
- [9] 覃朝科, 易鹂, 刘静静, 等. 广西某铅锌矿区废水汇集洼地土壤重金属污染调查与评价[J]. 中国岩溶, 2013, **32**(3): 318 – 324.
- QIN Chaoke, YI Yao, LIU Jingjing, *et al.* Investigation and evaluation on heavy metal pollution in the water collecting depression in a lead-zinc mine of karst area [J]. *Carsol Sin*, 2013, **32**(3): 318 – 324.
- [10] 罗绪强, 王世杰, 刘秀明, 等. 喀斯特石漠化过程中土壤重金属镉的地球化学特征[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(1): 160 – 166.
- LUO Xuqiang, WANG Shijie, LIU Xiuming, *et al.* Geochemical characteristics of the cadmium in the process of karst rocky desertification [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18**(1): 160 – 166.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shidan. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [12] 刘向磊, 孙文军, 文田耀, 等. 三酸分步消解-电感耦合等离子体质谱法测定土壤详查样品中 23 种金属元素[J]. 岩矿测试, 2020, **39**(5): 793 – 800.
- LIU Xianglei, SUN Wenjun, WEN Tianyao, *et al.* Determination of 23 metal elements in detailed soil survey samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry with three acid stepwise digestion [J]. *Rock Mineral Anal*, 2020, **39**(5): 793 – 800.
- [13] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 156 – 161.
- ZHENG Lichen, YU Wantai, MA Qiang, *et al.* Advances in the integrated valuation of farmland fertility [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23**(5): 156 – 161.
- [14] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 等. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. 中国农业科学, 2013, **46**(15): 3151 – 3160.
- YE Huichun, ZHANG Shiwen, HUANG Yuanfang, *et al.* Assessment of surface soil fertility and its spatial variability in Yanqing Basin, Beijing, China [J]. *Sci Agric Sin*, 2013, **46**(15): 3151 – 3160.
- [15] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, **14**(8): 975 – 1001.
- [16] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330 – 493.
- WEI Fusheng, CHEN Jingsheng, WU Yanyu, *et al.* *Soil Element Background Value in China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 330 – 493.
- [17] 黎妍妍, 许自成, 肖汉乾, 等. 湖南省主要植烟区土壤肥力状况综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34**(11): 179 – 183.
- LI Yanyan, XU Zicheng, XIAO Hanqian, *et al.* The comprehensive evaluation of soil fertility status for tobacco-growing areas in Hu'nan Province [J]. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For Nat Sci Ed*, 2006, **34**(11): 179 – 183.
- [18] 李胜平, 王克林. 人为干扰对桂西北喀斯特山地植被多样性及土壤养分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(5): 20 – 27.

- LI Shengping, WANG Kelin. Effect of human disturbance on soil nutrients and plant diversity of grassland in karst mountain [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2016, **23**(5): 20 – 27.
- [19] 王媚臻, 齐锦秋, 魏丽萍, 等. 人为干扰对栲树次生林群落物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2018, **26**(4): 355 – 362.
- WANG Meizhen, QI Jinqiu, WEI Liping, *et al.* Effect of human disturbance on species diversity and soil physiochemical properties of *Castanopsis fargesii* secondary forest [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2018, **26**(4): 355 – 362.
- [20] 吴海勇, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(4): 143 – 147.
- WU Haiyong, PENG Wanxia, SONG Tongqing *et al.* Changes of soil nutrients in process of natural vegetation restoration in karst disturbed area in Northwest Guangxi [J]. *J Soil Water Conserv*, 2008, **22**(4): 143 – 147.
- [21] 巩劼, 陆林, 晋秀龙, 等. 黄山风景区旅游干扰对植物群落及其土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(5): 2239 – 2251.
- GONG Jie, LU Lin, JIN Xiulong, *et al.* Impacts of tourist disturbance on plant communities and soil properties in Huangshan Mountain scenic area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(5): 2239 – 2251.
- [22] 李菲, 李娟, 龙健, 等. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, **34**(12): 3374 – 3381.
- LI Fei, LI Juan, LONG Jian, *et al.* Effect of vegetation types on soil organic carbon and nitrogen in typical karst mountainous area [J]. *Chin J Ecol*, 2015, **34**(12): 3374 – 3381.
- [23] 武天云, SCHOENAU J J, 李凤民, 等. 耕作对黄土高原和北美大草原 3 种典型农业土壤有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(12): 2213 – 2218.
- WU Tianyun, SCHOENAU J J, LI Fengmin, *et al.* Influence of cultivation on organic carbon in three typical soils of China Loess Plateau and Canada Prairies [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14**(12): 2213 – 2218.
- [24] 胡春华, 蒋建华, 周文斌. 环鄱阳湖区农家菜地土壤重金属风险评价及来源分析[J]. *地理科学*, 2012, **32**(6): 771 – 776.
- HU Chunhua, JIANG Jianhua, ZHOU Wenbin. Risk evaluation and sources analysis of heavy metals in vegetable field soil of rural area around Poyang Lake [J]. *Sci Geogr Sin*, 2012, **32**(6): 771 – 776.
- [25] 代文雯. 重金属对玉米生长发育及生理生化特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- DAI Wenwen. *Effects of Heavy Metals on Growth and Physiological and Biochemical Characteristics of Maize*[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [26] 杨艳芳, 邵婷, 吕梦宇, 等. 龙窝湖湿地不同土地利用方式土壤养分和重金属污染特征[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(5): 1312 – 1318.
- YANG Yanfang, SHAO Ting, LÜ Mengyu, *et al.* Characteristics of soil nutrients and heavy metal pollution in wetlands under different land use patterns in Longwo Lake of Wuhu City, Anhui Province, China [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(5): 1312 – 1318.
- [27] 郑永红, 张治国, 姚多喜, 等. 煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究[J]. *煤炭学报*, 2013, **38**(8): 1476 – 1483.
- ZHENG Yonghong, ZHANG Zhiguo, YAO Duoxi, *et al.* Characteristics of temporal-spatial distribution and enrichment of heavy metals in coal mine reclaimed soil [J]. *J China Coal Soc*, 2013, **38**(8): 1476 – 1483.
- [28] 李梦红, 张晓君, 卢杰. 模糊综合评价在农田重金属污染评价中的应用[J]. *西南农业学报*, 2010, **23**(5): 1581 – 1585.
- LI Menghong, ZHANG Xiaojun, LU Jie. Application of fuzzy comprehensive assessment in pollution assessment of heavy metal in farmland soil [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2010, **23**(5): 1581 – 1585.
- [29] 周会程, 周恒, 肖海龙, 等. 三江源区不同退化梯度高寒草原土壤重金属含量及其与养分和酶活性的变化特征[J]. *草地学报*, 2020, **28**(3): 784 – 792.
- ZHOU Huicheng, ZHOU Heng, XIAO Hailong, *et al.* The variation characteristics of heavy metal content, nutrient and enzyme activity in soil of alpine steppe with different degradation gradient in the three river-headwaters region [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2020, **28**(3): 784 – 792.