

引文格式: 王宗磊, 徐颖, 李作为, 等. 高原山区茶园土壤 pH 和重金属铬的空间异质性研究——以贵州省贵定县为例[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(4): 159–165. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202208025](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202208025)

高原山区茶园土壤 pH 和重金属铬的空间异质性研究——以贵州省贵定县为例*

王宗磊¹, 徐颖¹, 李作为¹, 文锡梅^{2**}, 朱栋³, 湛天丽²

(1. 贵州省第一测绘院, 贵州 贵阳 550003; 2. 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001;

3. 贵州省环境工程评估中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要:【目的】探究高原山区茶园土壤 pH 及重金属铬 (chromium, Cr) 含量的空间异质性及其驱动因素, 为茶树高产优质栽培提供科学依据。【方法】采集贵州省贵定县 423 个茶园土壤样品, 采用地统计学和半方差函数模型法探究茶园土壤 pH 和 Cr 的空间异质性, 并利用随机森林算法研究不同 pH 下 Cr 含量变化的驱动因素。【结果】高原山区茶园土壤 pH 值为 4.5~6.0 的样品占 74%, 适宜茶树生长。研究区域内土壤 Cr 含量处于安全水平。土壤 pH 值自西南向东北逐渐减小, 呈明显的带状分布。土壤重金属 Cr 含量的空间分布呈现自北向南逐渐降低的趋势, 低值斑块多出现在东南区域, 高值斑块集中在中西部。【结论】不同土壤 pH 值对 Cr 含量的影响不同。在 $pH \leq 5.5$ 的茶园土壤中, 土壤 pH 对 Cr 含量影响最大; 在 $5.5 < pH \leq 6.5$ 的茶园土壤中, 土壤颗粒对 Cr 含量影响最大。

关键词: 茶园; 土壤; pH; 重金属; 铬

中图分类号: S153.61

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2024) 04-0159-07

Spatial Heterogeneity of Soil pH and Chromium Content in Tea Plantations in Plateau Mountainous Areas: a Case Study of Guiding County, Guizhou Province

WANG Zonglei¹, XU Ying¹, LI Zuwei¹, WEN Ximei², ZHU Dong³, ZHAN Tianli²

(1. Guizhou First Institute of Surveying and Mapping, Guiyang 550003, China;

2. Guizhou Institute of Mountain Resources, Guiyang 550001, China;

3. Guizhou Environmental and Engineering Appraisal Center, Guiyang 550003, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the spatial heterogeneity and driving factors of soil pH and heavy metal chromium (Cr) content in tea plantations in plateau mountainous areas, providing a scientific basis for high-yield and high-quality tea cultivation. [Methods] Soil samples from 423 tea plantations in Guiding County, Guizhou Province were collected. Geostatistics and semivariance function models were used to explore the spatial heterogeneity of soil pH and Cr in the tea plantations. Random forest algorithm was used to study the driving factors of Cr content variations under differ-

收稿日期: 2022-08-17

修回日期: 2024-07-05

网络首发日期: 2024-08-21

*基金项目: 贵州省成果转化项目 (黔科合成果 [2024] 一般 102); 贵州科学院青年基金项目 (黔科院 J 字 [2020] 17 号)。

作者简介: 王宗磊 (1984—), 男, 贵州贵阳人, 学士, 工程师, 主要从事土地管理与土地规划研究。

E-mail: 478932047@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 文锡梅 (1974—), 女, 贵州凯里人, 硕士, 副研究员, 主要从事 GIS 应用与生态环境研究。E-mail: wxm220706@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240820.1543.001>



ent pH conditions. [Results] 74% of soil samples in plateau mountainous tea plantations had a pH value between 4.5 and 6.0, suitable for tea cultivation. The Cr content in the soil was within safe levels. The soil pH value decreased gradually from southwest to northeast, showing a clear zonal distribution. The spatial distribution of soil heavy metal Cr decreased gradually from north to southeast, with low-value patches mostly appearing in the southeast and high-value patches concentrated in the central-western region. [Conclusion] Different soil pH values have varying impacts on Cr content. In tea plantation soils with $\text{pH} \leq 5.5$, soil pH has the greatest impact on Cr content; in soils with $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, soil particles have the greatest impact on Cr content.

Keywords: tea plantation; soil; pH; heavy metal; chromium

茶 [*Camellia sinensis* (L.) Kuntze] 隶属于山茶科 (Theaceae) 山茶属 (*Camellia*), 为多年生常绿灌木或小乔木, 原产于中国西南高原地区。目前已知山茶科植物 (包括野生种与栽培种) 共 23 属 380 多种, 其中约 2/3 分布在中国^[1]。贵州是中国唯一全境具备低纬度、高海拔、多云雾条件的高原地区, 非常适合茶树生长^[2]。喀斯特地区由于母质发育及成土过程的影响, 导致重金属自然属性特征较高, 部分区域土壤中重金属铬 (chromium, Cr) 的背景值较高^[3]。茶树在生长过程中, 除了从土壤中吸收必需营养元素外, 也可能会富集土壤中的 Cr 等重金属元素^[4]。茶园土壤中适量的 Cr 可以促进茶树生长^[5], 但过量 Cr 可能抑制茶树生长, 降低产量与品质, 并通过食物链转移到人体, 增加人体致畸、致癌的风险^[6]。因此, 开展茶园土壤 Cr 空间分布及其驱动因素等相关研究具有重要意义。

目前对茶园土壤重金属的研究主要集中于重金属在茶树—土壤系统中的迁移和富集。高海荣^[7]通过测定武夷岩茶土壤和茶叶中的 Cr 含量及其化学形态, 分析了 Cr 的生物有效性及影响因素, 发现土壤 Cr 的影响因素存在诸多不确定性。李晓林^[8]通过盆栽试验分析了茶树对 Cr 胁迫的生理特性响应, 发现 Cr 在茶树体内的分布规律主要受环境因素影响。其他学者也通过盆栽试验研究了不同茶树品种对重金属的富集特征, 探讨了不同品种的重金属分布规律^[9]。上述研究主要基于盆栽等模拟试验, 也有学者开展了不同茶园土壤重金属的污染特征研究, 探索了土壤—茶树系统中的重金属富集规律^[10]。目前, 国内外对不同 pH 条件下 Cr 分布规律的研究主要集中在处理 Cr 污染废水的效果及影响因素等方面, 鲜

有不同 pH 条件下土壤重金属 Cr 分布规律及其驱动因素的研究, 尤其是高背景值地区高原山区茶园土壤 Cr 的空间异质性研究较为罕见。因此, 本研究以贵州省黔南布依族苗族自治州贵定县高原山区茶园土壤为研究对象, 通过分析茶园土壤 pH 与 Cr 的空间分布特征, 探究土壤 pH 与 Cr 的空间异质性及其驱动因素, 以期为西南高原山区茶园高产优质栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵定县位于贵州中部苗岭山脉一带 ($26^{\circ}05' \sim 26^{\circ}45' \text{N}$, $106^{\circ}59' \sim 107^{\circ}21' \text{E}$), 辖区自然条件优越, 具有高海拔、寡日照、气候湿润等适宜茶树生长的环境特征, 属于典型的喀斯特岩溶地貌类型, 区域内谷岭相间, 群山林立, 溶洞遍布。全县最高海拔为斗蓬山 (1 961 m), 最低为南部珠江水系河口处 (710.9 m), 平均海拔 1 100 m。贵定县属于亚热带地带性砖红壤和中亚热带黄壤地带, 以硅质黄壤为主, 其全坡面为酸性, 茂盛灌丛下的土壤酸性更强。

1.2 样品采集与制备

根据自然及人为环境条件, 选择典型区域为采样区。采用梅花形布点法采集土壤样品, 使用 GPS 对采样点进行定位。在采集点选择 1 个中心点, 采集土样 1 kg; 将皮尺的一端置于中心点, 以 5 m 为半径, 在中心点的 4 个成 90° 位置分别采集土样 1 kg; 将 5 个采样点的土壤混合均匀后, 用四分法取土样 1 kg 作为该点的最终土样。采样时, 将土壤样品置于无菌自封袋中, 并低温密封保存。共采集茶园土壤样品 423 个 (图 1)。

土壤样品运回实验室后, 置于通风阴凉处自

然风干;在无酸碱等污染条件下,将土样中植物、较大砾石等杂质去除;采用四分法选取部分土样,经木棍碾压后用玛瑙钵研细,分别过 10 目和 100 目尼龙筛,置于干燥器中备用。



图 1 土壤样品分布图

Fig. 1 Distribution map of soil samples

1.3 测定指标及方法

重金属 Cr 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定^[11]:取经过 $\text{HCl} \rightarrow \text{HF} \rightarrow \text{HNO}_3 \rightarrow \text{HClO}_4$ 前处理的样品 0.1~0.2 g 进行加热消解,再用 1% HNO_3 定容,同时设置空白样品,标准曲线 r 值大于 0.99。土壤 pH 值的测定采用电极电位法^[12]:称取前处理中过 10 目筛的土样约 10 g 置于塑料瓶中,加入超纯水 25 mL,放置在振荡器上搅拌约 1.5 min,静置约 30.0 min,在 pH 计上测定 pH 值。土壤有机质、全氮、全钾等其他理化性质参考已有研究^[13]测定。

1.4 数据处理与统计分析

采用 Excel 2018 和 SPSS 19.0 进行数据统计分析;采用 ArcGIS 10.2 对土壤 pH 值和 Cr 的空间变异性进行分析及 Kriging 插值作图;采用

R 语言中的随机森林算法对不同土壤 pH 值下 Cr 含量的影响因素进行分析。

采用半方差函数进行空间变异性分析,通过对比最终确定最优模型。当模型决定系数 >0.9 且符合高斯模型时,说明该模型能很好地反映土壤 pH 值和 Cr 的空间结构特征。当块基比 ≤ 0.25 时,为强空间自相关性;当 $0.25 < \text{块基比} < 0.75$ 时,为中度空间相关性;当块基比 ≥ 0.75 时,为弱空间自相关性;并用变程指示一定范围内空间自相关性的作用范围^[14]。

利用随机森林算法,从分析测试原始数据中有针对性地随机重复抽取各个样本生成新的训练样本集合,然后根据筛选出的样本集生成多个决策树并组成随机森林,将其分类或形成回归模型,按决策树投票分数得到对应的单个决策树预测值,最后将所有决策树的平均值作为最终预测结果^[15]。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值和 Cr 含量

由图 2 可知:研究区茶园土壤属强酸性,土壤 pH 值为 4.5~6.0 的样品占总数的 74%,均值为 5.23 ± 0.70 ;土壤 Cr 含量基本分布在 0~80 mg/kg 范围内,均值为 (45.57 ± 52.93) mg/kg。根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GT 15618—2018)^[16]进行评估,贵定县土壤 Cr 含量未超出标准。

从贵定县的不同乡镇地区土壤 pH 值(表 1)来看,宝山街道、新巴乡和沿山镇的土壤为强酸性,其余 5 个乡镇土壤为弱酸性。各乡镇土壤 Cr 含量存在明显差异,其中含量最高的为盘江镇,最低的为昌明镇。贵定县土壤 pH 值变异性较弱,而 Cr 含量变异系数较大,表明 Cr 含量空间分布不均匀,可能为外源物质进入所致,但均无超标现象。

2.2 土壤 pH 和 Cr 的空间变异性

由表 2 可知:贵定县土壤全量 Cr 块金效应为 0.487 9,变程为 3 568.07 m,属于中度自相关性,说明结构性因素和随机性因素共同影响 Cr 的空间变异;土壤 pH 块金效应为 0.134 0,属于强空间自相关性,说明土壤物理结构与成土来源是土壤 pH 空间变异的主要影响因素。

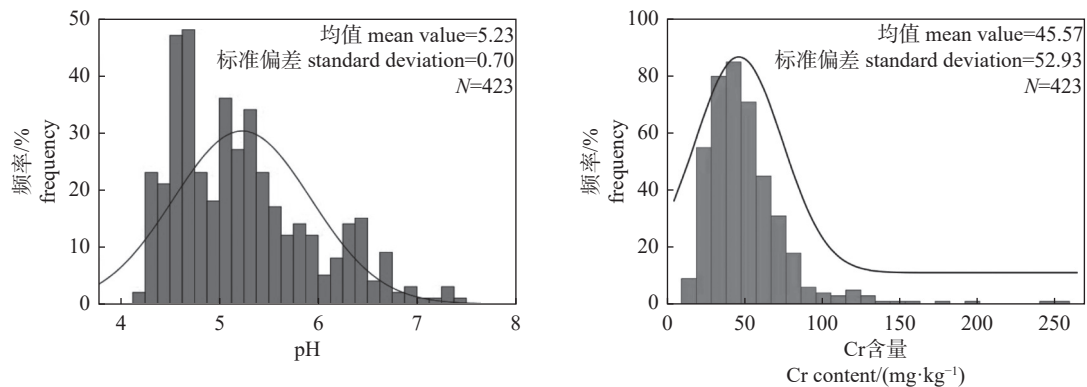


图 2 土壤 pH 和重金属 Cr 含量的分布
Fig. 2 Distribution of soil pH and Cr content

表 1 贵定县的土壤 pH 和重金属 Cr 含量
Tab. 1 Soil pH and Cr content in Guiding County

区域 area	pH		Cr 含量/(mg·kg ⁻¹) Cr content	
	平均值 average	变异系数/% coefficient of variation	平均值 average	变异系数/% coefficient of variation
盘江镇 Panjiang Town	5.11±0.22	4.31	55.42±12.27	22.14
德新镇 Dexin Town	5.57±0.66	11.85	36.67±10.31	28.12
宝山街道 Baoshan Street	4.59±0.18	3.92	34.21±12.11	35.40
金南街道 Jinnan Street	5.23±0.74	14.15	46.83±22.27	47.55
云雾镇 Yunwu Town	5.61±0.78	13.90	51.12±22.24	43.51
新巴乡 Xinba Town	4.68±0.19	4.06	40.27±10.19	25.30
沿山镇 Yanshan Town	4.80±0.32	6.67	30.19±12.16	40.28
昌明镇 Changming Town	5.66±0.48	8.48	30.18±8.15	27.00
全研究区 whole study area	5.23±0.70		45.57±52.92	

表 2 贵定县土壤 pH 和重金属 Cr 空间插值半方差函数模型及参数

Tab. 2 Spatial interpolation semivariance function model and parameters of soil pH and heavy metal Cr in Guiding County

指标 index	模型 model	步长/m step length	块金值 (C ₀) nugget value	偏基台值 (C ₁) partial base value	基台值 (C ₀ +C ₁) base value	块金效应 [C ₀ /(C ₀ +C ₁)] nugget effect	变程/m range change
pH	高斯 Gaussian	525	0.083 5	0.539 6	0.623 1	0.134 0	4 055.78
Cr	高斯 Gaussian	525	465.760 0	488.800 0	954.560 0	0.487 9	3 568.07

2.3 土壤 pH 和 Cr 的空间分布特征

根据高斯模型半变异函数参数进行空间插值,得到贵定县土壤 pH 和重金属 Cr 的空间分布格局(图 3)。贵定县土壤 pH 值自西南向东北方向逐渐减小,呈 2 条明显的平行带状分布,分别为云雾镇—沿山镇—新巴镇、昌明镇—金南街道—德新镇。土壤 Cr 则表现出相反的空间分布趋势,自北向东南逐渐降低,低值斑块多出现东南区域,高值斑块集中在中西部区域。

2.4 不同土壤 pH 下 Cr 含量的影响因素

图 4 显示: pH≤5.5 的土壤中,对 Cr 含量影响因素的排序为: pH>速效钾>全磷>速效磷>黏粒>粗粉粒>有机质>细粉砂>砂粒>碱解氮>全钾>全氮,可见,土壤 pH 是影响土壤 Cr 含量的主要因子;在 5.5<pH≤6.5 土壤中,对 Cr 含量影响因素的排序为: 粗粉粒>黏粒>砂粒>全氮>碱解氮>细粉砂>有机质>全磷>速效钾>全钾>pH>速效磷,因此,土壤颗粒是影响土壤 Cr 含量的主要因子。

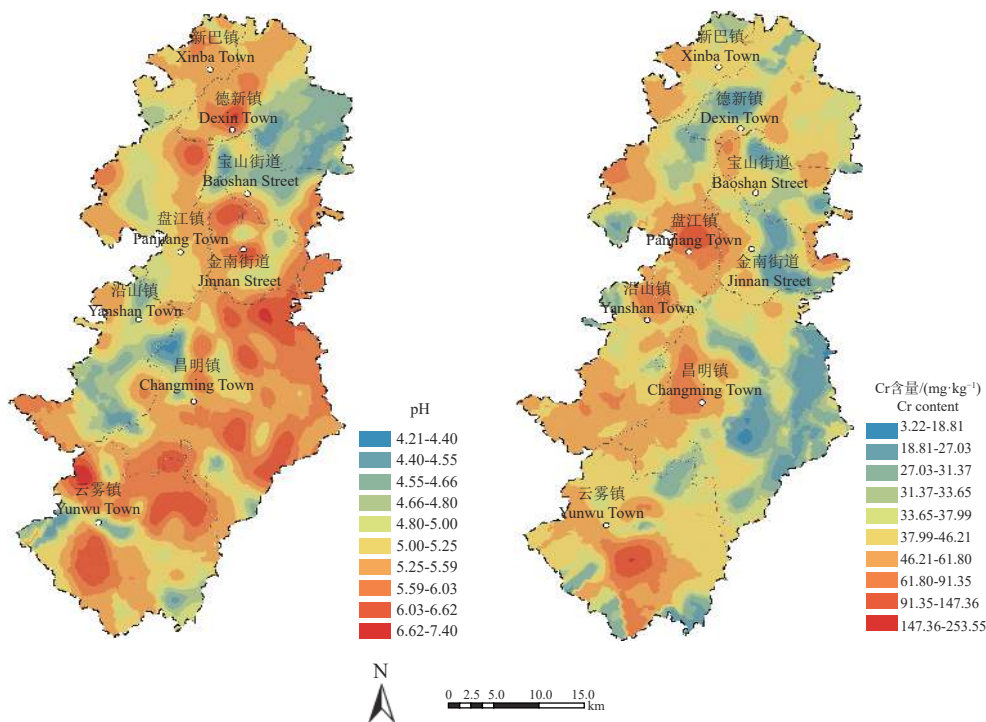


图3 土壤pH和重金属Cr的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of soil pH and Cr

3 讨论

3.1 贵定县茶园土壤pH分布特征及其影响因素

土壤是茶树生长、茶叶产量和茶叶品质的基础条件,而茶园土壤pH是影响茶树生长的重要因素,更是决定茶叶品质的主导因素^[17]。王海斌等^[18]研究表明:茶树根际土壤pH随着种植年限增加而降低,茶叶产量与品质也呈下降趋势。张春蓓等^[19]对中国中部地区213个茶园土壤样品的分析发现:该区域茶园土壤普遍存在潜在的酸化趋势,其中仅约9.9%的茶园土壤pH适宜茶树生长。另有研究发现:土壤酸化程度对茶树根际重金属聚集情况存在一定影响^[20]。在过去的20~30年中,茶园土壤均呈不同程度的酸化,pH值下降了0.47~1.43,下降幅度大于果蔬土壤(0.40~1.08)和谷类土壤(0.30~0.89)。与森林土壤相比,施用化肥的茶园土壤酸化严重,而有机茶园土壤酸化不明显。研究表明:中国土壤酸化问题严重,而有机管理被认为是茶叶可持续生长的有效应对策略^[21]。总体而言,土壤酸化的主要原因可以分为自然因素和人为因素。自然因素包括土壤的自然酸化过程,该过程主要发生在高温和多雨条件下,土壤中的盐基离子通过雨水淋溶而损

失,导致铁和铝相对富集,造成土壤酸化。自然界中还存在酸沉降,即通过酸雨沉降淋失土壤中的盐基离子,导致土壤积累氢离子而酸化,但该过程引起的土壤酸化通常较为轻微。人为因素主要是施肥、灌溉等人为活动导致的土壤酸化。

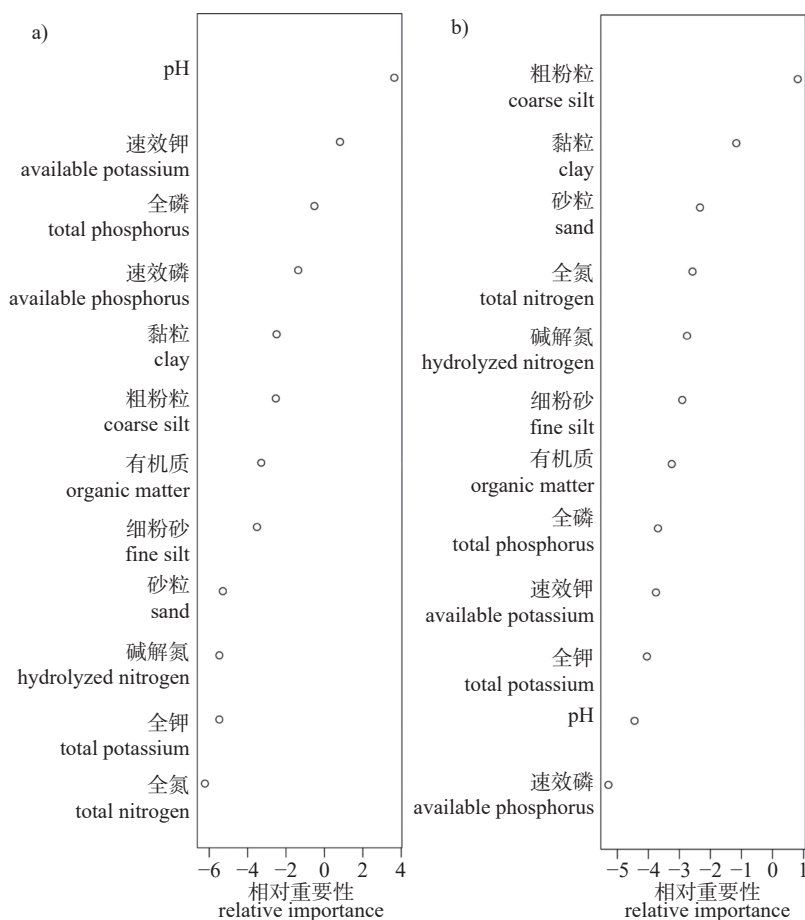
茶树是一种喜酸植物,在pH值为6.5~7.5的土壤上栽培茶树,其可成活但产量低;在pH值大于7.5的土壤上栽培茶树,会出现茶树生长缓慢、叶片黄化、不易过冬等问题,甚至导致幼年茶树从根尖开始腐烂,逐渐向主根扩展,最终死亡;当茶园土壤pH值低于4.0时,会降低土壤的供养能力并抑制茶树的生理过程,影响茶多酚和游离氨基酸的合成代谢,其主要原因是土壤中盐基减少和部分微量元素缺乏,导致肥效降低等问题^[22]。本研究中,贵定县土壤pH值适宜茶树生长,大部分土壤pH值为4.5~6.0,能满足茶树正常生长的基本条件;对于云雾镇、昌明镇等土壤pH值大于6.5的区域,需采取相应措施提高茶树根际土壤酸度,使其根际土壤pH值处于茶树适宜酸度范围。

3.2 贵定县茶园土壤Cr分布特征与土壤pH的关系

Cr作为地壳元素之一,通过风化等作用迁移

至土壤中,在土壤—植物系统中具有较强的迁移性,与其他重金属相比,显示出更强的毒性。姚奋增等^[23]随机选择 98 份市场上的多类别茶叶进行重金属含量评估,结果显示:Cr 的靶标危害系数仅次于铝 (Al)。本研究表明:研究区域内土壤中 Cr 的含量未超过标准值,处于安全范围内,与刘燕飞等^[24]的研究结果类似,这可能是由于研

究区域人为活动和外界干扰较少。然而,本研究仅考虑了土壤中 Cr 的总量,未涉及土壤中 Cr 的形态分析,其总量在一定程度上并不能完全反映其有效性;此外,本研究未考虑食用该地生产的茶叶对人体的健康影响,存在一定的局限性,故仍需对茶叶中重金属的含量及其对人体的影响进行深入的研究。



注/Note: a) $\text{pH} \leq 5.5$; b) $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$.

图 4 不同 pH 下土壤重金属 Cr 含量的影响因素

Fig. 4 Influence factors of Cr content in soil under different pH levels

土壤 pH 与 Cr 的相互关系在不同 pH 条件下表现不同。在 $\text{pH} \leq 5.5$ 的土壤中,土壤 pH 对 Cr 含量的影响最大,这与 PENG 等^[25]和张石棋^[26]的研究结果一致。PENG 等^[25]研究表明: pH 值与重金属含量存在一定的相关性,当 $\text{pH} < 7.5$ 时,重金属含量随 pH 值的增加而显著提高;当 $\text{pH} > 7.5$ 时,重金属含量随 pH 值的增加而下降。张石棋^[26]对菜地土壤重金属含量的分析与环境评估结果显示: pH 值对土壤重金属 (Cr、Cu、Zn) 的全态含量影响较大,当 $\text{pH} < 7.5$ 时,重金属全态含量随

pH 值的增加而显著提高。尽管 Cr^{3+} 是最稳定的氧化态,但在碱性土壤中易被氧化为 Cr^{6+} ,因此,碱性土壤中几乎只存在 Cr^{6+} ^[27]。

pH 值对土壤阳离子交换容量、颗粒结构、孔隙度、有机质含量等产生直接影响,也可通过改变土壤电荷影响重金属的吸附能力^[28-29]。大量研究表明:在较低 pH 范围内, pH 值越低,胶体溶出 Cr 的速率越快,加快了其在土壤中迁移和转化的速率;相反, pH 值越高,胶体溶出 Cr 的速率越慢,减缓了其在土壤中迁移和转化的速

率。因此, pH 值是影响土壤中 Cr 迁移和转化的主要因子^[30-31]。在 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 的土壤中, 土壤 pH 对 Cr 含量的影响依然显著。虽然本研究中土壤 Cr 含量没有超过标准值, 但其在许多区域的含量仅略低于标准值。因此, 对于 Cr 含量较高的地区, 应采取相应的措施以降低其含量。

4 结论

贵定县茶园土壤主要为强酸性, pH 值为 4.5~6.0 的样品占 74%, 适宜茶树生长。Cr 含量为 0~80 mg/kg, 处于安全水平。贵定县土壤 pH 值自西南向东北逐渐降低; 土壤 Cr 的空间分布自北向东南逐渐降低, 低值斑块多出现在东南区域, 高值斑块集中在中西部区域。在 $\text{pH} \leq 5.5$ 的茶园土壤中, 土壤 pH 对 Cr 含量的影响最大; 在 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 的茶园土壤中, 土壤颗粒对 Cr 含量的影响最大。土壤酸碱度对重金属含量存在不同程度的影响, 在实际生产中应重点关注土壤酸度变化, 以降低重金属的生态环境风险。

[参考文献]

- [1] 杜鹏. 我国茶产业亟需“走出去”[J]. 农经, 2021(5): 69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8573.2021.05.013.
- [2] 周巨根, 朱永兴. 茶学概论[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2007.
- [3] 梅艳, 崔文刚, 刘绥华, 等. 黔中喀斯特矿区周边农田重金属污染状况与人体健康风险评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(6): 1071. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).2022.05.027.
- [4] 程启坤, 倪铭峰. 茶叶百问百答[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
- [5] 叶宏萌, 李国平, 郑茂钟, 等. 武夷岩茶土壤铬、锌、镍元素的生物有效性及其影响因素[J]. 福建农业学报, 2019, 34(6): 711. DOI: 10.19303/j.issn.1008-0384.2019.06.013.
- [6] 彭叶棉. 外源六价铬在土壤中的老化动力学模型及小麦毒性效应[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2020.
- [7] 高海荣. 武夷岩茶与土壤中铅、铬的相关性[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3203. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0416.
- [8] 李晓林. 铅、铬对茶树生长的影响及其在茶树体内的吸收累积特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
- [9] 杨柳, 陈钰佩, 方丽, 等. 不同茶树品种吸收累积镉的差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 401. DOI: 10.13254/j.jare.2020.0336.
- [10] 朱忻钰. 砷、镉对茶树生长的影响及其在茶树体内的吸收累积特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
- [11] 王峰, 单睿阳, 陈玉真, 等. 闽中某县茶园土壤—茶树—茶汤中镉含量及健康风险评价研究[J]. 茶叶科学, 2018, 38(5): 537. DOI: 10.13305/j.cnki.jts.2018.05.011.
- [12] WEN X M, ZHANG Z M, HUANG X F. Heavy metals in karst tea garden soils under different ecological environments in southwestern China[J]. Tropical Ecology, 2022, 63(4): 495. DOI: 10.1007/s42965-022-00218-0.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 张珍明, 周运超, 黄先飞, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳密度及碳储量空间分布异质性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 184. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.02.031.
- [15] BREIMAN L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5. DOI: 10.1023/A:1010933404324.
- [16] GT 15618—2018. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].
- [17] 陈甫华. 环境化学[M]. 天津: 南开大学出版社, 1993.
- [18] 王海斌, 王裕华, 张奇, 等. 酸化茶园茶树根际土壤微生物蛋白质代谢图谱构建[J]. 中国科学(生命科学), 2020, 50(8): 849. DOI: 10.1360/SSV-2020-0008.
- [19] 张春蓓, 黄延政, 郭运辉, 等. 宜昌市茶园土壤养分状况调查与评价[J]. 中国茶叶, 2019(5): 37. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3150.2019.05.009.
- [20] 樊战辉, 唐小军, 郑丹, 等. 茶园土壤酸化成因及改良措施研究和展望[J]. 茶叶科学, 2020, 40(1): 15. DOI: 10.13305/j.cnki.jts.20200117.006.
- [21] 杨瑞娟, 王桥美, 龚婉莹, 等. 云南景迈山不同生境茶园及茶窖空气微生物群落分布多样性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(4): 659. DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201910014.
- [22] 中国农业科学院茶叶研究所. 中国茶树栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986.
- [23] 姚奋增, 高海荣, 刘晨, 等. 茶叶中铝、铅、砷、汞、铬、镉含量的分析及危害评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(1): 291. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2021.01.055.
- [24] 刘燕飞, 李荭荭, 黄幸然, 等. 镉和铅在茶园土壤—茶树系统中分布及迁移特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(3): 386. DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2019.03.017.
- [25] PENG Y A, WU L Q, WANG D H, et al. Soil acidification in Chinese tea plantations[J]. Science of the Total Environment, 2020, 715: 136963. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136963.
- [26] 张石棋. 北碚区菜地土壤重金属含量分析与环境质量评价[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [27] 王夔. 生命科学中的微量元素(下卷)[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [28] 张乃明. 重金属污染土壤修复理论与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [29] 杨文娜, 冉文秀, 李忠意, 等. 基于电解阳极酸化快速提高石灰性土壤铁、锰元素的有效性[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12): 156. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.12.016.
- [30] 杨向德, 石元值, 伊晓云, 等. 茶园土壤酸化研究现状和展望[J]. 茶叶学报, 2015, 56(4): 189. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4872.2015.04.001.
- [31] 杨帆, 喻君保, 武欣怡, 等. 黔西南露天煤矿废弃地重金属污染特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(3): 101. DOI: 10.11929/j.swfu.202303047.

责任编辑: 何承刚