

DOI: 10.5846/stxb201712132242

喻阳华, 王璐, 钟欣平, 秦仕忆. 贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Yu Y H, Wang L, Zhong X P, Qin S Y. Evaluation of soil quality of Chinese prickly ash artificial orchard at different altitudes in Guizhou karst mountainous area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价

喻阳华^{1,*}, 王璐², 钟欣平², 秦仕忆²

¹ 贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

² 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025

摘要: 阐明贵州喀斯特山区花椒人工林的土壤养分含量及其质量综合指数至关重要。以不同海拔样地的土壤为研究对象, 采用土壤农业化学、环境矿物学技术对矿质元素等进行分析。结果表明: 不同样地土壤的 pH 值呈显著差异, 随海拔增加表现为升高—降低的变化趋势; 最低海拔(594m, HJ1)与最高海拔(884m, HJ5)样地的土壤有机碳、总氮、速效氮总体显著高于中间 3 个海拔样地(660m、705m、778m, HJ2—HJ4), 总磷与速效磷的变化则相反; 除大量元素外, 矿质元素在不同海拔花椒林地之间变化规律不明显, 其中总硫、铅、镉、硒等元素表现为最高海拔样地急剧升高的趋势; 氮、磷与其他矿质元素之间表现出一定的显著性相关, 表明其关系密切; 土壤质量综合指数为 HJ5(2.16) > HJ3(0.43) > HJ4(0.19) > HJ1(-0.21) > HJ2(-2.60), 表明高海拔花椒林地表层土壤质量总体优于低海拔, 揭示了土壤养分随海拔变化表现出分异规律。土壤管理上应同时施用有机肥和矿质元素肥料, 提高土壤养分供给能力和利用效率。以上结论可为贵州喀斯特山区花椒林养分管理和可持续经营工作提供借鉴和参考。

关键词: 喀斯特; 花椒人工林; 土壤质量; 主成分分析; 矿质元素

Evaluation of soil quality of Chinese prickly ash artificial orchard at different altitudes in Guizhou karst mountainous area

YU Yanghua^{1,*}, WANG Lu², ZHONG Xinping², QIN Shiyi²

¹ School of Karst Science/State Engineering Technology Institute for Karst Decertification Control, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China

² School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China

Abstract: We examined the soil nutrient content of a Chinese prickly ash artificial orchard in the Guizhou karst mountainous area; its comprehensive quality index is of great significance. In this study, soils at different altitudes have been collected from Guizhou karst mountainous area and samples were analyzed by using techniques of agricultural soil chemistry and environmental mineralogy. The study results indicated that the pH values of soils at different altitudes had significant differences, with a trend of increasing—decreasing with increased altitude; the soil organic carbon, total nitrogen, and available nitrogen of soil in the sample plots at the lowest altitude (594 m, HJ1) and the highest altitude (884 m, HJ5) were all significantly higher than those of the three sample plots at the middle altitudes (660 m, 705 m, 778 m, HJ2—HJ4), while the trend in the total phosphorus was exactly opposite to that of the available phosphorus. However, there is no significant differences among concentrations of mineral elements in the Chinese prickly ash orchards at different altitudes was not obvious; the contents of total sulfur, lead, cadmium, and selenium with the highest altitude have been determined. There were significant correlations among nitrogen, phosphorus, and other mineral elements, suggesting a close relationship. The soil quality comprehensive index was HJ5 (2.16) > HJ3 (0.43) > HJ4 (0.19) > HJ1 (-0.21) > HJ2 (-2.60), suggesting that the surface soil quality of Chinese prickly ash orchard at high altitudes is better than that at

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2016]2610号)

收稿日期: 2017-12-13; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuyanghua2003@163.com

low altitudes, comprehensively speaking, revealing that soil nutrient content changed along with the change in altitude. As a result, it is suggesting that organic fertilizer and mineral element fertilizer could be used simultaneously to improve the soil nutrient supply capacity and utilization efficiency. This study could be helpful for the nutrient management and sustainable management of Chinese prickly ash orchards in the Guizhou karst mountainous area.

Key Words: Karst; Chinese prickly ash artificial orchard; soil quality; principal component analysis (PCA); mineral elements

土壤为植物生长提供养分供给和机械支撑,土壤质量是指土壤在生态承载阈值内,维持生物生产、环境保护质量及促进生物健康的能力,与生态安全、食品安全、人口代传质量和可持续发展密切相关^[1-2],能够敏感地指示土壤动态变化,揭示土壤退化的恢复能力,反映土壤管理水平^[3]。花椒(*Zanthoxylum bungeamun*)旧名秦椒,为芸香科(*Rutaceae*)花椒属(*Zanthoxylum*)的植物,原产中国,根浅、喜光、耐旱、嗜石灰性土壤,因其具有独特的食用、药用价值和生态功能,是我国分布广泛的经济树种^[4]。花椒属植物中顶坛花椒(*Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis*)为竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*)的一个变种,是贵州喀斯特地区特有的,生态、经济价值很高的香料植物,在该区生态与经济建设中发挥了举足轻重的作用^[5]。自1992年贵州省贞丰县大规模推广顶坛花椒种植以来,受独特的气候、土壤和地形等条件影响,形成了独具特色的花椒人工林。但是,由于管理较为粗放,特别是花椒种植后土壤有机碳存在“汇-源”的转换过程^[6],因此应注重长期管护,防止土壤质量衰退。开展花椒人工林土壤质量评价,对立地生产力和多目标森林经营的研究具有重要意义^[7],能够指导土地资源的科学利用^[8],抑制花椒衰老退化。

目前多以大量元素和生物类群构建土壤质量评价指标体系。张璐等^[9]以大量元素为主要指标体系,阐明自然恢复植被比人工植被更有利于土壤肥力的提高;王钰莹等^[10]采用大量元素评价得出厚朴群落土壤肥力随着林龄的增加而降低;刘艳等^[11]以大量元素为依据阐明土地利用方式的变化改变了喀斯特峰丛洼地土壤肥力特征;刘丽等^[12]采取化学和生物学指标评价杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林土壤质量演变,表明细菌和真菌可能是引起土壤质量变化的关键种群;吕真真等^[13]从土壤物理、化学、生物性质揭示了有机-无机肥配施对双季稻田质量的影响机制;邓绍欢等^[14]建立了我国南方冷浸田土壤质量评价的最小数据集,表明 Fe^{2+} 和有效锰等指标显著影响土壤质量。将中量、微量元素纳入评价指标体系,能够更全面地揭示土壤质量特征。海拔作为主要的地形因子,能够对土壤肥力产生多方面的影响。薛沛沛^[15]等以土壤理化性质、微生物性质和酶活性为因子,评价得出大岗山不同海拔毛竹(*phyllostachys pubescens*)林随海拔的升高而降低;麻泽宇^[16]等以土壤pH值、颗粒物和大量元素为指标体系,研究表明新疆阿尔泰山天然冷杉(*Abies Sibirica*)林地土壤质量变化随海拔分异规律不明显;焦润安等^[17]研究了白龙江流域海拔对油橄榄(*Olea europaea*)园土壤肥力的影响,总体随海拔的升高而降低。由此可见,不同研究区域得出的结论差异较大,研究不同海拔花椒人工林的土壤肥力有助于提升生产力。

综上,现有土壤质量评价时,对含量较低的矿质元素关注较少,而这些元素在调节渗透压、促进酶活性、合成蛋白质、提高光合作用及植物抗逆性等方面具有重要作用^[18]。必需矿质元素缺乏会影响植物生长发育,出现疾病和死亡,限制植物的生长和产量^[19]。因此,引入中量、微量矿质元素参与土壤质量评价,更能全面揭示土壤质量状况。基于此,本文以贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林为研究对象,采用土壤农化分析和环境矿物学的方法,揭示土壤养分随海拔的分异规律,探讨养分质量综合特征。主要回答如下3个问题:(1)土壤养分随海拔梯度表现出什么变化规律?(2)矿质元素之间的相关程度如何?(3)不同海拔花椒人工林地土壤质量特征?以期对喀斯特山区制定区域合理的花椒林经营措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

研究区位于贞丰县北盘江镇查耳岩村,生境具有明显的独特性,主要表现在以下3个方面:(1)干热气

候。年均降雨量 1100mm, 季节分配极不均匀, 冬春旱及伏旱严重; 气候类型主要为半亚热带湿润季风气候, 热量资源丰富, 年均温为 18.4℃, 年均极端最高温为 32.4℃, 年均极端最低温为 6.6℃, 年总积温达 6542.9℃, 冬春温暖干旱、夏秋湿热。(2) 河谷地形。区域内河谷深切, 地下水深埋, 海拔高度 370—1473m, 垂直高差约 1100m, 具有典型的河谷气候特征。(3) 石漠化发育。流域内森林覆盖率不足 30%, 基岩裸露率介于 50%—80%, 碳酸盐岩类岩石占 78.45%, 土壤以石灰岩、泥灰岩为成土母质的石灰土为主, 土层浅薄、地表破碎, 土体不连续, 发育有完整的石缝、石坑、石沟、土面和石槽等小生境类型, 多处于中度、重度石漠化等级。

该区花椒种植均采用“见缝插针”的方式, 密度约为 1100—1300 株/hm²。由于石漠化深山区耕作成本较高且青壮年劳动力外出务工, 未对花椒林地进行深耕, 施肥以复合肥为主, 除草剂使用量大、频次高, 花椒苗圃地使用薄膜进行保温。花椒经营、管理较为粗放, 未采取整形修枝、水肥协同供应等措施。近年来, 花椒的产量和品质均呈现下降趋势, 不利于石漠化区、石山区和深山区生态文明建设。5 个样地由低海拔至高海拔依次命名为 HJ1—HJ5。样地的自然概况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 General characteristics of the sampling plots

样地 Plot	经度 Longitude/(°)	纬度 Latitude/(°)	海拔 Altitude/m	土壤厚度 Soil depths/cm	平均株高 Height/m	植被覆盖率 Coverage/%	密度 Density/m	平均胸径 Diameter at breast height/cm
HJ1	105°39'33.84"	25°40'0.84"	594	12	3	70	2.3×2.5	3.5
HJ2	105°39'4.32"	25°39'42.14"	660	10	2	40	4×4	1.8
HJ3	105°38'48.48"	25°39'35.64"	705	10	2.1	75	1.2×1.2	2.4
HJ4	105°38'35.52"	25°39'23.04"	778	16	2.6	70	2×1.8	2.5
HJ5	105°35'15.00"	25°39'16.92"	884	12	2.5	65	2.2×2	2.1

HJ1—HJ5: 花椒样地 1—5

1.2 研究方法

土壤样品采集与预处理方法: 每一海拔样地设置 3 个 10m×10m 的样地, 样地之间距离大于 10m, 每一样地采用 S 形土壤样品采集的布设方法挖取 5 个 20cm 的土壤剖面(不足 20cm 的以实际深度为准), 将每一个样地 5 个点的土样混合, 然后用四分法取出约 1kg 样品。土样带回实验室后, 剔除石砾、根系和动物残体等杂物, 自然风干, 研磨至 95% 样品通过 2mm 和 0.15mm 筛, 置于玻璃瓶中保存备用。

pH 值采用土水质量比 1:2.5 提取, 电位电极法测定; 有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热法, 全氮(TN)采用半微量开氏法, 速效氮(AN)采用碱解扩散法, 全磷(TP)采用高氯酸-硫酸消煮-钼锑抗比色-紫外分光光度法, 速效磷(AP)采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色-紫外分光光度法测定^[20]; 硼(B)、砷(As)、硒(Se)按照《区域地球化学勘查规范》(DZ/T0167—2006)进行测定, 二氧化硅(SiO₂)、氧化钙(CaO)、氧化镁(MgO)、氧化钠(Na₂O)、三氧化二铝(Al₂O₃)、三氧化二铁(Fe₂O₃)、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、钛(Ti)、镍(Ni)、钴(Co)、锶(Sr)、钼(Mo)、氯(Cl)、总硫(TS)依据《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T0258—2014)进行测定。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行计算, 使用 Origin 8.0 作图, 使用 SPSS 21.0 进行统计分析; 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)方法, 置信度为 95%, 检验土壤参数在不同海拔花椒林地之间的差异显著性; 运用 Pearson 相关系数法检验各土壤指标之间的相关性; 运用主成分分析法提取可以反映原来多个指标的综合性指标, 进行土壤质量评价。显著性水平平均设定为 $P=0.05$ 。

1.4 土壤综合质量指数

本研究以土壤 pH 值、SOC、TN、AN、SiO₂、CaO、Cu、Zn 等 27 项因子作为花椒林地土壤养分评价的基本指标。由于这些评价指标量纲不一致, 在数值上存在较大差异, 研究前对各指标值进行标准化预处理。通过主

成分分析,得到主成分公因子方差、载荷矩阵和贡献率;主成分特征向量为对应的载荷矩阵值除以该成分特征值的平方根^[21]。将主成分特征向量与标准化数据的乘积得到各样地的主成分得分。采用加权法计算土壤质量综合指数 (IFI),其表达式为^[22]:

$$IFI = \sum W_i \times F_i$$

式中, W_i 为各主成分贡献率, F_i 为各样地的主成分得分。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值

土壤 pH 值均 >7.0 (图 1), 呈碱性, 是石灰性土壤。pH 值由低海拔 (7.89) 向高海拔显著升高, 但最高海拔 (7.99) 却呈显著降低, 5 个样地之间均表现为显著差异。可见, 在碱度较强的贵州喀斯特干热河谷地区, 同一植物群落类型对于土壤 pH 值的响应因地形因子变化而变化。

2.2 土壤元素含量变化

2.2.1 大量元素

SOC、TN、AN、TP、AP 的含量见图 1, 其中 SOC、TN、AN 以 HJ1 和 HJ5 较高, TP、AP 则表现出相反的规律。HJ2、HJ3 和 HJ4 之间的大量元素多为不显著差异 ($P < 0.05$), 但这 3 个样地与 HJ1、HJ5 的大量元素多为显著差异。结果表明海拔是影响大量元素分异的因素之一。

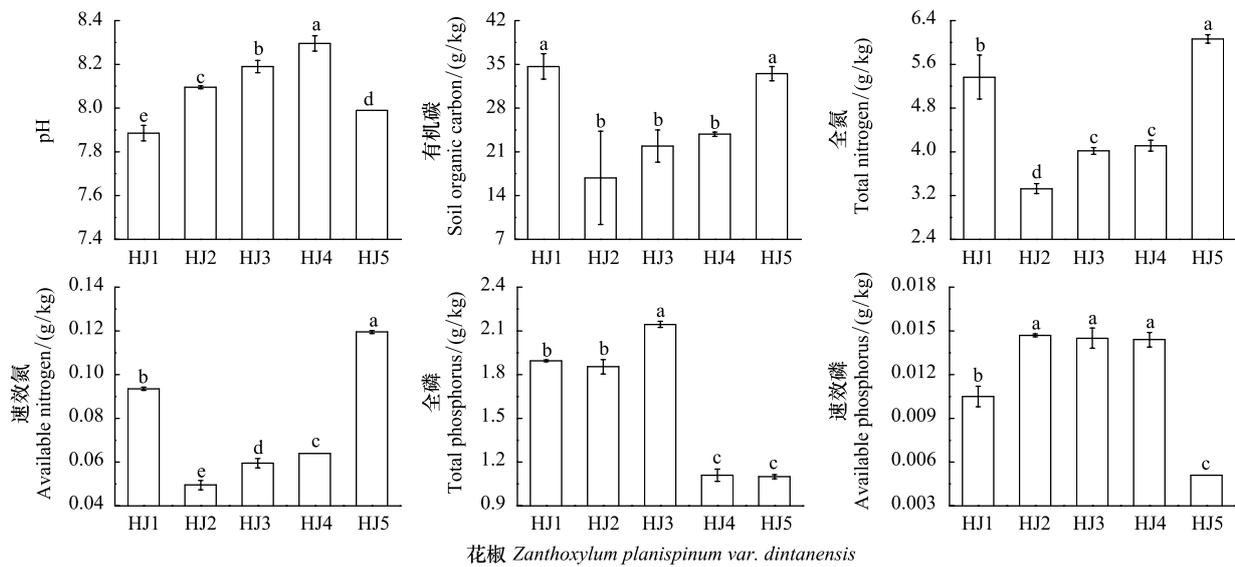


图 1 不同海拔花椒林地土壤 pH 值和大量元素含量

Fig.1 Chinese prickly ash orchard forest lands pH and content of macroelement in soil at different attitudes

HJ1—HJ5: 花椒样地 1—5

2.2.2 矿质元素

土壤的矿物质部分是土体的骨架,对土壤性质影响较大。花椒林地土壤矿质元素随海拔变化而变化(图 2、表 2),但是没有明显的变化规律,其中 TS、Pb、Cd、Se 等元素波动较大,表现为高海拔地区跃变升高的趋势。

2.3 土壤矿质元素的相关性分析

元素之间的相关性分析结果表明: Fe_2O_3 与 Al_2O_3 、As、Ni、Co 均为显著正相关,相关系数分别为 0.944、0.899、0.894、0.963、0.980; Ti 与 Mo、As 与 Co、CaO 与 Sr 均呈显著正相关,相关系数依次为 0.883、0.993、0.901。 Fe_2O_3 与 Ni、Pb 与 Se、Pb 与 Na_2O 、Cr 与 Na_2O 、TS 与 TN、TS 与 AN 均呈极显著正相关,相关系数为 0.980、0.999、0.968、0.977、0.975、0.977。Ti 与 MgO、Zn 与 Sr、 SiO_2 与 Cr、TN 与 AP、Se 与 AP、TS 与 AP 均呈显著负相

关, 相关系数为-0.887、-0.939、-0.956、-0.950、-0.909、-0.950。

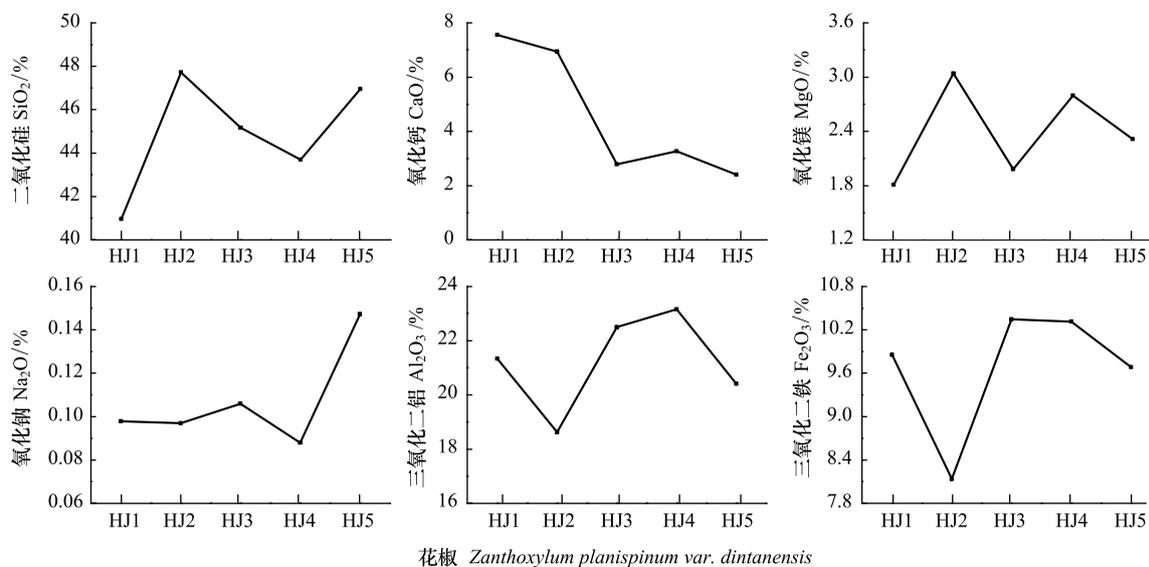


图 2 不同海拔花椒林地土壤无机化合物含量

Fig.2 Chinese prickly ash orchard forest lands content of inorganic compounds in soil at different attitudes

表 2 不同海拔花椒林地土壤矿质元素含量

Table 2 Chinese prickly ash orchard forest lands content of mineral elements in soil at different attitudes

因子 Factor	HJ1	HJ2	HJ3	HJ4	HJ5	因子 Factor	HJ1	HJ2	HJ3	HJ4	HJ5
Ti/%	0.91	0.76	0.82	0.75	0.81	As/(mg/kg)	37.13	24.36	38.88	45.75	22.79
Cl/%	0.007	0.007	0.006	0.006	0.008	Ni/(mg/kg)	76.54	57.64	87.60	83.17	79.35
TS/%	0.079	0.031	0.058	0.056	0.116	Se/(mg/kg)	1.26	0.38	0.99	0.64	168.11
Cu/(mg/kg)	40.87	26.16	40.14	25.09	45.96	B/(mg/kg)	58.03	77.04	93.90	96.66	83.55
Pb/(mg/kg)	68.33	48.17	71.02	58.47	483.25	Co/(mg/kg)	28.99	25.94	29.56	32.06	27.80
Zn/(mg/kg)	191.32	159.00	249.44	206.80	256.93	Sr/(mg/kg)	81.69	101.59	58.99	61.68	50.01
Cr/(mg/kg)	195.66	151.89	180.84	183.84	163.36	Mo/(mg/kg)	5.85	1.83	2.21	2.35	2.24
Cd/(mg/kg)	2.29	1.32	2.47	1.47	13.52						

2.4 贵州喀斯特山区不同海拔花椒林土壤综合质量

2.4.1 特征值和方差贡献率

按照特征值>1且累积贡献率>85%的原则抽取了3个主成分(表3),其特征值分别为11.38、7.72和6.17,特征值之和为25.27;累积贡献率达到93.56%,说明前3个主成分可以反映土壤全部指标提供信息的93.56%,表明因子分析用于评价土壤质量是可靠的。

表 3 主成分分析的特征根及其贡献率

Table 3 Eigen value and contribution rate in principal components analysis

主成分 Principal Component	特征根值 Eigenvalue	贡献率/% Variance Explained	累积贡献率/% Cumulative variance explained
1	11.38	42.14	42.14
2	7.72	28.56	70.70
3	6.17	22.86	93.56

2.4.2 因子载荷

主成分的初始因子载荷矩阵是原始指标与各主成分的相关系数,以绝对值为准,正负只是表征影响效应

的正负。由因子载荷矩阵得知(表4),第1主成分主要受TS、Cd、TN、AN、AP支配,除AP外均表现为正效应;第2主成分在 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、As、Co上的负载较大,对土壤性质的影响均为正效应;第3主成分主要受B、Mo的影响较大,其中B为正效应、Mo为负效应,表明Mo增加会导致土壤质量降低。

表4 旋转前后各因子的载荷矩阵

Table 4 Component matrixes pre and post rotated

因子 Factor	主成分 Principal Component			因子 Factor	主成分 Principal Component		
	1	2	3		1	2	3
SiO ₂	-0.013	-0.709	0.656	B	-0.183	0.311	0.928
CaO	-0.377	-0.371	-0.836	Co	-0.084	0.917	0.209
MgO	-0.517	-0.528	0.504	Cr	0.063	0.874	-0.471
Na ₂ O	0.884	-0.311	0.289	Pb	0.897	-0.278	0.339
Al ₂ O ₃	-0.016	0.980	0.186	Sr	-0.629	-0.562	-0.534
Fe ₂ O ₃	0.296	0.945	0.137	Mo	0.212	0.310	-0.913
Ti	0.446	0.247	-0.823	Cd	0.913	-0.261	0.315
Cl	0.722	-0.629	-0.142	pH	-0.573	0.351	0.738
TS	0.990	0.103	0.006	TN	0.959	0.105	-0.204
Cu	0.860	0.119	-0.214	AN	0.971	-0.107	-0.142
Zn	0.682	0.425	0.468	TP	-0.418	0.008	-0.508
Ni	0.363	0.882	0.256	AP	-0.967	0.205	0.047
As	-0.385	0.905	-0.305	SOC	0.844	0.245	-0.416
Se	0.881	-0.312	0.350				

2.4.3 土壤质量综合指数

由各样地的主成分因子得分和方差贡献率加权得到土壤质量综合指数(表5),排序为HJ5(2.16)>HJ3(0.43)>HJ4(0.19)>HJ1(-0.21)>HJ2(-2.60),高海拔花椒林地表层土壤质量总体优于低海拔,表明土壤养分随海拔变化表现出分异规律。

表5 不同样地的因子得分及其土壤质量综合指数

Table 5 Factor scores and comprehensive evaluation of different microhabitats

样地 Plot	P1	P2	P3	P	排序 Sort
HJ1	0.99	1.05	-4.06	-0.21	4
HJ2	-3.41	-4.06	-0.01	-2.60	5
HJ3	-0.88	2.18	0.79	0.43	2
HJ4	-2.00	2.44	1.49	0.19	3
HJ5	5.30	-1.61	1.69	2.16	1

3 讨论

3.1 土壤质量特征

由表6可知,花椒林地土壤大量元素含量总体高于喀斯特高原山地区不同演替阶段的植物群落样地、喀斯特槽谷不同利用方式土地和全国平均水平,低于喀斯特峰丛洼地区不同土地利用类型样地,表明花椒人工林土壤大量元素处于相对较高的水平。这主要是由于各研究区水热条件存在差异,且受到不同程度的人为干扰所致。该区属于干热河谷石漠化地区,热量丰富、空气相对湿度较高,优越的温、湿条件极有利于生物的繁衍和生长,生物自肥作用强烈^[11]。花椒人工林经营过程中,为了通过最小的劳务投入获得高产,依靠大量施用复合肥,而该区土层浅薄,土壤保水蓄水能力较弱,因此水肥供应不同步,养分的吸收、利用效率较低,这可能也是导致土壤中大量元素较高的原因。此外,近年来花椒出现了以开黄花为典型标志的衰老退化,这也可能

能使花椒植株对养分的吸收能力减弱,导致外源添加的养分在土壤中聚集。但是,由于土壤中量和微量元素研究的公开报道较少,且缺乏全面、完整的质量评价标准,因而本文仅对大量元素进行了比较。

表 6 花椒林土壤大量元素与其他区域的对比

Table 6 Comparison of soil macroelements and other regions of Chinese prickly ash orchard

区域 Region	SOC/ (mg/g)	TN/ (mg/g)	AN/ (mg/kg)	TP/ (mg/g)	AP/ (mg/kg)	文献 References
喀斯特干热河谷区 Karst dry and hot valley area	16.84—34.66	3.33—6.07	49.51—119.52	1.10—2.15	5.11—15.32	本文
喀斯特峰丛洼地区 Karst peak cluster depression area	76.78—116.05	4.29—6.23	331.49—505.49	1.15—1.47	3.92—10.91	[11]
喀斯特高原山地区 Karst plateau mountain area	9.24—55.74	0.70—3.20	72.82—280.00	0.16—0.63	1.35—9.83	[23]
喀斯特槽谷地区 Karst valley area	13.37—28.22	1.62—2.83	103.48—177.38	0.51—0.94	3.58—15.33	[24]
全国 China	11.2	1.1	—	0.7	—	[25]

—:未找到相关数据

3.2 土壤质量随海拔的变异规律

本研究利用土壤质量综合评价法探讨了贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量状况,定性和定量评价了土壤质量特征。结果表明,花椒林地土壤随海拔变化表现出一定的分异规律,总体为高海拔地区优于低海拔。影响花椒林地土壤元素分异的原因可能有:一是由于该区气候垂直分带明显,海拔 850m 以下为南亚带干热河谷气候,900m 以上为中亚热带河谷气候^[6],花椒多种植在海拔 850m 以下的地区,但是近年来受到农村劳动力外出和花椒市场起伏不定等因素影响,人为对花椒林地的养分归还逐年降低,经营管理愈加粗放,导致低海拔花椒林地土壤质量下降;二是该区域人口密度以海拔 680—800m 区域最大,当地农户养殖有数量不等的畜禽,还土的有机肥多,耕作成本相对较低,人为管护更加精细,因而土壤质量更优;三是从坡度差异来看,中高海拔地区的坡度趋缓,排水通畅,土壤厚度大,养分蓄存空间大,有利于养分保持;四是中低海拔的花椒林地套种红薯现象较为普遍,在提高生物多样性和土壤水分含量的同时,是否加剧了养分竞争还有待深入研究。但是,影响土壤养分变异的因子包括母质、成土因素^[26]、地上植被^[27]和地形因子等,因此这些参数对土壤质量的综合影响效应是未来需要重点研究的内容,能够为土壤养分潜力挖掘奠定科学基础,指导贵州喀斯特山区土地资源合理利用和生态恢复重建。

3.3 土壤质量状况诊断与土壤管理

土壤质量是评价退化生态系统生态恢复功能的关键指标^[28],诊断土壤质量状况的目的是进行土壤养分高效管理。本文研究结果表明,高海拔花椒林地土壤质量状况更优,而调查发现低海拔地区花椒种植规模更大,尤其是海拔 550—800m 区间分布广泛,因此提高养分供给水平和利用效率具有重要的现实意义。HJ1 具有相对较好的土壤大量元素状况,但是花椒生长所需要的 B、Zn 等元素则较为缺乏,适量的 Zn 对不同年龄、不同海拔的顶坛花椒花粉活力及其寿命均有较大促进作用^[5],表明应注重补充矿质元素尤其是必需微量元素,以稳定花椒的产量和品质。HJ2 的大量元素和其他矿质元素含量均较低,调查发现该区域土壤石砾含量高、团聚结构被破坏、花椒长势较差、化肥施用量大,且偏离人口聚居区导致经营管理较为粗放,因此应注重施用有机肥,培育土壤团聚结构,营造土壤微生物活动及其物质与能量循环的主要场所^[29]。HJ3 的养分质量综合指数位列第 2(为 0.43),大量元素含量处于中等水平,但是土壤厚度约 10 cm,因此应当从土壤数量和质量两个方面同步改良,建议施用畜禽粪便等农家肥,改善养分蓄存能力和土壤保水性能,提高土地的生产 and 生态功能。HJ4 的氧化物和中量、微量矿质元素含量状况较好,但是大量元素亏缺,花椒植株表现出典型的缺素症状,主要原因可能是使用化肥导致花椒吸收养分能力受到限制,因而应调整该区域的肥料种类和比例。HJ5 的大量元素和 B、Mo 等必需矿质元素含量均较高,土层较厚,但是光照、热量相对较低,导致花椒种植规模小,

因而应当提高对生态因子的利用效率。

总体而言,该地区花椒种植存在土层浅薄、化肥施用量高、经营粗放、水肥供应不协调等问题,因此土壤结构破坏、必需养分含量较低,导致花椒的适应能力下降、生理活性减弱,已经影响到老百姓的种植积极性和石漠化治理成果的巩固。在该地区土壤管理上,应施用花椒专用有机肥和矿质元素肥料,提高土壤养分供给水平和速率。但是,水分和养分供应不协调是限制花椒生长的重要原因,水分胁迫导致花椒根系生长减少^[30]。水分和养分是植物生长过程中尤为重要的环境要素,也是最容易控制的两大因素,水肥管理是农林业生产中的核心问题^[31],是提高作物产量和品质的重要途径,且不能单纯依靠水分或肥料^[32-33]。下一步应结合土壤含水量动态变化状况及其保水蓄水能力,研究顶坛花椒的水肥耦合效应,提出适宜顶坛花椒生长的水分和肥料配比,解决花椒衰老退化、产量和品质降低的问题。

4 结论

(1)5个花椒人工林样地的土壤pH值呈显著差异,随海拔增加表现为升高—降低的变化趋势;HJ1、HJ5的土壤SOC、TN、AN总体显著高于HJ2—HJ4,TP与AP的变化则相反;除大量元素外,矿质元素在不同海拔花椒林地之间变化规律不明显。

(2)矿质元素之间表现出一定的显著性相关,表明其关系较为密切。

(3)土壤质量综合指数为HJ5(2.16)>HJ3(0.43)>HJ4(0.19)>HJ1(-0.21)>HJ2(-2.60),高海拔花椒人工林表层土壤质量总体较优。

(4)土壤管理上应注重养分的全面性,提高养分供给水平和利用效率。

参考文献(References):

- [1] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [2] 陈美军,段增强,林先贵. 中国土壤质量标准研究现状及展望. *土壤学报*, 2011, 48(5): 1059-1071.
- [3] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [4] 胡芳名,谭晓风,刘惠民. 中国主要经济树种栽培与利用. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [5] 陈训. 喀斯特地区顶坛花椒培育的生理生态特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [6] 廖洪凯,龙健,李娟,张文娟. 花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)种植对喀斯特山区土壤水稳性团聚体分布及有机碳周转的影响. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 106-113.
- [7] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,孙余丹,胡砚秋. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价. *生态学报*, 2014, 34(9): 2297-2307.
- [8] Marzaioli R, D'Ascoli R, De Pascale R A, Rutigliano F A. Soil quality in a Mediterranean area of southern Italy as related to different land use types. *Applied Soil Ecology*, 2010, 44(3): 205-212.
- [9] 张璐,文石林,蔡泽江,黄平娜. 湘南红壤丘陵区不同植被类型下土壤肥力特征. *生态学报*, 2014, 34(14): 3996-4005.
- [10] 王钰莹,孙娇,刘政鸿,乔亚玲,张泉将,李凤娇,郝文芳. 陕南秦巴山区厚朴群落土壤肥力评价. *生态学报*, 2016, 36(16): 5133-5141.
- [11] 刘艳,宋同清,蔡德所,曾馥平,彭晚霞,杜虎. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1561-1568.
- [12] 刘丽,徐明恺,汪思龙,张倩茹,王楠,潘华奇,胡江春. 杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化. *生态学报*, 2013, 33(15): 4692-4706.
- [13] 吕真真,吴向东,侯红乾,冀建华,刘秀梅,刘益仁. 有机-无机肥配比比例对双季稻田土壤质量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 904-913.
- [14] 邓绍欢,曾令涛,关强,李鹏,刘满强,李辉信,焦加国. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [15] 薛沛沛,王兵,牛香. 大岗山不同海拔毛竹林土壤肥力的灰色关联度分析. *浙江农业学报*, 2013, 25(6): 1354-1359.
- [16] 麻泽宇,王丹,戴伟,张毓涛,戴奥娜. 阿尔泰山不同海拔梯度天然冷杉林土壤特征及肥力综合评价. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 134-140.
- [17] 焦润安,李朝周,赵阳,焦健. 海拔对陇南白龙江流域油橄榄园土壤肥力的影响. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 360-365.
- [18] 江肖洁,耿春女,韩建秋,周玉梅. 增温对长白山苔原植物叶片和土壤矿质元素含量的影响. *生态学报*, 2016, 36(7): 1928-1935.

- [19] 李天才, 曹广民, 柳青海, 周国英, 师生波, 张德罡. 青海湖北岸退化与封育草地土壤与优势植物中四种微量元素特征. 草业学报, 2012, 21(5): 213-221.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2008: 74-271.
- [21] 张子龙, 王文全, 缪作清, 李世东, 杨建忠. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1636-1644.
- [22] Jin Z Z, Lei J Q, Xu X W, Li S Y, Zhao S F, Qiu Y Z, Bo X. Evaluation of soil fertility of the shelter-forest land along the Tarim Desert Highway. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S2): 125-136.
- [23] 秦仕忆, 喻阳华, 邢容容, 王璐. 黔西北不同演替阶段植物群落养分质量诊断与经营策略. 林业资源管理, 2017, (6): 27-33.
- [24] 张润甲. 重庆喀斯特槽谷土地利用模式的探讨[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [25] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in china's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [26] 孙向阳. 土壤学. 北京: 中国林业出版社, 2006: 69-72.
- [27] 龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云. 基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究. 环境科学, 2012, 33(6): 2131-2138.
- [28] 龚霞, 牛德奎, 赵晓蕊, 鲁顺保, 刘苑秋, 魏晓华, 郭晓敏. 植被恢复对亚热带退化红壤区土壤化学性质与微生物群落的影响. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1094-1100.
- [29] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 刘灵飞, 杨华, 张文娟. 基于组内-组间主成分分析的土地利用与团聚体有机碳关系的研究. 自然资源学报, 2015, 30(1): 141-151.
- [30] 刘淑明, 孙佳乾, 邓振义, 魏典典, 张刚, 孙丙寅. 干旱胁迫对花椒不同品种根系生长及水分利用的影响. 林业科学, 2013, 49(12): 30-35.
- [31] 李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 邓树元, 单杰, 雷震宇, 洪坚平, 王朝辉. 施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 212-220.
- [32] Al-Kaisi M M, Yin X H. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1475-1482.
- [33] Pirmoradian N, Sepaskhah A R, Maftoun M. Deficit irrigation and nitrogen effects on nitrogen-use efficiency and grain protein of rice. Agronomie, 2004, 24(3): 143-153.