

喀斯特山区不同生态恢复下石灰土钙形态特征

陈青松, 舒英格, 周鹏鹏, 陈忠柳

(贵州大学农学院, 贵阳 550025)

摘要:以喀斯特高原峡谷区典型石灰土草地、退耕还草、林草间作等不同生态恢复模式为研究对象, 分层采集整个剖面土壤, 采用改进的 BCR 提取方法, 通过冗余分析(RDA)等方法分析不同生态恢复模式下土壤钙的形态特征及其影响因素。研究表明: 在不同生态恢复状态下, 林草间作地土壤全钙、水溶态钙和酸溶态钙质量分数最高, 草地土壤交换态钙质量分数最高; 有机态钙含量在不同生态恢复模式土壤中没有显著差异; 钙形态占全钙比均存在交换态>酸溶态>有机态>水溶态含量的顺序。在垂直方向, 耕地和退耕还草地土壤全钙及有效钙、酸溶态钙含量表现为表层<底层, 而林草间作地和草地则为表层>底层; 有机态钙含量在剖面上变化波动不大, 平均值为 0.33 g/kg; 有效态钙及酸溶态钙在不同生态恢复下均具有空间差异性和表聚性, 且与土壤 pH、有机质、CEC、全氮、速效氮等土壤基本理化性质呈极显著正相关关系, 通过冗余分析得出, 土壤 CEC、氮素和 pH 为影响钙素形态分布的主要因素。研究结果有助于深刻认识喀斯特山区土壤钙迁移转化规律, 为喀斯特生态脆弱区生态环境恢复重建和水土保持等方面提供科学依据和理论指导。

关键词:喀斯特山区; 石灰土; 钙形态特征; 生态恢复模式

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)04-0048-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.008

Calcium Components of Calcareous Soil Under Different Ecological Restoration Patterns in Karst Mountainous Area

CHEN Qingsong, SHU Yingge, ZHOU Pengpeng, CHEN Zhongliu

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Taking the typical lime soil grasslands, returning farmland to grass, forest and grass intercropping in karst plateau canyon areas as research objects, hierarchical collection of the entire profile soil and the improved BCR extraction method through redundant analysis (RDA) were used to analyze the morphological characteristics of soil calcium and its influencing factors under different ecological restoration models. Studies showed that under different ecological restoration states, the soil calcium, water-soluble calcium, and acid-soluble calcium had the highest mass fractions in the intercropping forest and grass, and grassland soil had the highest exchangeable calcium mass fraction. The organic calcium content was not significantly different in soils under different ecological restoration models. The calcium form to total calcium exists in the order of exchange state>acid soluble state>organic state>water soluble state. In the vertical direction, the contents of total calcium, available calcium, and acid-soluble calcium in the cultivated land and returning cultivated land in surface layer were smaller than those in the bottom layer, but surface layer>bottom layer for the forest and grass intercropping land and grassland. The organic calcium content did not change much on the profile, and the average value was about 0.33 g/kg. Available calcium and acid-soluble calcium had spatial differences and surface aggregation under different ecological restorations. There were very significant positive correlations among the basic physical and chemical properties of the soil such as pH, organic matter, CEC, total nitrogen, and available nitrogen. Through redundant analysis, it could be concluded that soil CEC, nitrogen, and pH were the main factors affecting the distribution of calcium forms. These research

results are helpful for understanding the rules of soil calcium migration and transformation in karst mountainous areas. It could provide scientific basis and theoretical guidance for the restoration and reconstruction of ecological environment and soil and water conservation in karst ecologically fragile areas.

Keywords: karst mountainous area; calcareous soil; calcium morphology; different ecological restoration mode

喀斯特地区生态环境脆弱、植被少,而且高温多雨、降雨季节集中,因而土壤淋溶强烈,水土流失严重,土层稀薄,土壤养分含量低^[1-2],生态系统对外界干扰显得脆弱和敏感,系统的抗逆能力、稳定性和自我恢复能力较低。土壤环境与植被演替之间存在互动响应,其变化对喀斯特生态环境变迁与演化有着重要的影响,而植被演替影响到土壤养分循环,从而影响植物可利用养分变化^[3-5]。目前对喀斯特山区的研究主要集中在土壤养分、土壤微生物、细菌活性^[6]、土壤抗蚀性^[7]、土壤质量^[8]、生态安全^[9-10]等方面。土壤中钙含量的增加(尤其是活性钙)可有效促进有机碳转化,增强微生物(尤其是好养微生物)活性,加速土壤有机质降解,提高植物体内钙含量^[11-12]。在喀斯特区域,钙是碳酸盐岩的主要构成元素,土壤中钙的形态分布特征对土壤中元素的沉积、溶解、土壤理化指标及水化学特征等有着重要影响,驱动并制约着岩溶环境的元素迁移和生物有效性。目前部分学者对喀斯特区域土壤钙进行了研究,如 Wei 等^[13]研究广东省岩溶洼地石灰土全钙、水溶性钙;倪大伟等^[14]研究云南省岩溶区盆地石灰土表层裸地、林地、旱地、水田及湿地 5 种土地利用类型下可提取态钙、可还原态钙、可氧化态钙和残渣态钙;胡乐宁等^[15]研究广西斜坡地带石灰土表层灌丛和林地水溶态、交换态、酸溶态和有机态钙;Yang 等^[16]研究桂林石灰土表层坡地、平原、垭口和洼地等不同地貌下酸溶态钙、可还原态钙、可氧化态钙和残渣态钙;陈同庆等^[17]研究广东省石灰土灌丛、砂糖橘林、洼地半人工竹林、洼地水田(稻田)、洼地旱地(菜地)和积水洼地 6 种不同土地利用方式下水溶性和交换性钙等。但从土壤表层至母质的整个剖面对喀斯特高原峡谷区退耕还草、草地、林草间作地等最主要的几种生态恢复阶段进行土壤钙素的研究未见报道。本文通过改进的连续浸提技术,以喀斯特高原峡谷区退耕还草、草地、林草间作地等不同生态恢复状态为研究对象,分水溶态、交换态、酸溶态、有机态等形态对土壤钙的赋存形态进行研究,从水平尺度和垂直剖面尺度上探讨喀斯特山区不同生态恢复模式土壤钙素形态分布特征及变化趋势,为深刻认识喀斯特山区土壤钙迁移转化规律、喀斯特生态脆弱区土壤管理和土地利用对策、生态环境恢复重建和水土保持等方面提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晴隆县为典型的喀斯特高原峡谷山区,全县地形起伏大,具有“山高坡陡谷深”的特点,全县山地及丘陵占国土总面积的 95.30%,地理坐标为 25°33′—26°11′N, 105°01′—105°25′E,位于贵州省西南部、黔西南布依族苗族自治州东北角,地处云贵高原中段。属温凉湿润的高原亚热带季风气候,冬无严寒,夏无酷暑,年平均气温 14.7℃,夏季降雨丰富,年降水量 1 500~1 650 mm^[18]。

1.2 样品的采集

1.2.1 样品采集 于 2017—2018 年在晴隆县选取典型的石灰土草地、退耕还草、林草间作、耕地等生态恢复模式为研究对象,其中耕地均为旱地,长期进行耕作并常规施肥;草地植被覆盖率较高,草被茂盛且类型丰富;退耕还草样地恢复之前多为有长期耕作历史的坡耕地,水土流失较严重,退耕还草模式实施后,生态环境恢复良好;林草间作模式多为草本与乔木相间生长,乔木散生,植株较高;退耕还草和林草间作模式的年限 10 年左右,其中耕地为对照,其生态环境特点见表 1。

选取典型地块设置不同生态恢复模式土壤剖面,自下到上采用沟槽方式采集距地面 0—10, 10—20, 20—40, 40—60, 60 cm—母岩层,剖面深度根据土体深度确定,以开挖到母岩(基岩)为止。本研究共采集 55 个剖面 199 个土样,其中耕地 7 个剖面 21 个土样,荒草地 12 个剖面 48 个土样,林草间作地 14 个剖面 42 个土样,退耕还草地 22 个剖面 88 个土样。采集后带回实验室自然风干,研磨过 2, 0.149 mm 的筛子,用样品袋密封保存,供试土壤理化性质见表 2。

1.2.2 土壤性质与测定方法 样品分析于 2018 年 8 月至 2019 年 6 月在贵州大学农业资源与环境专业实验室进行,土壤样品室内分析方法:pH 采用电极法(水土比为 1:1)测定;阳离子交换量(CEC)采用 1 mol/L 的 NaOAc—EDTA 交换法—火焰光度计测定;有机质含量采用硫酸—重铬酸钾外加热—容量滴定法(丘林法)测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用 HClO₄—H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比色法测定;全钾含量采用 NaOH 消煮—火焰光度法测定;有效氮、有效磷、有效钾含量分别采用碱解扩散法、碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法和乙酸铵浸提—火焰光度法测定;全量钙采用 HNO₃—HCl—HClO₄ 消

解,原子吸收分光光度计测定;土壤钙形态采用改进 的连续提取法浸提^[19]—原子吸收分光光度计测定。

表 1 样点生态指标

生态恢复 类型	坡度/ (°)	地理 位置	海拔/ m	植被 类型	植被 特征	植被 覆盖率/%	岩石 裸露率/%	Shannon 指数 <i>H</i>	Simpson 指数 <i>D</i>	均匀度 指数 <i>ε</i>
耕地	23	25°50′11″N,105°12′05″E	1501.20	萝卜、玉米	—	—	23	—	—	—
退耕还草	25~30	25°49′55″—25°50′32″N,105°11′36″—105°12′04″E	1414.95	青蒿、牙毛草	群落层次只有草本层,高约 0.5 m,盖度达 50%	46.22	39.17	1.04	0.51	0.88
草地	23~32	25°49′54″—25°50′10″N,105°11′37″—105°12′05″E	1540.00	三叶草、毛草	群落层次只有草本层,高约 1 m,盖度达 60%	55.00	44.00	1.36	0.59	0.85
林草间作	26~40	25°49′54″—25°50′10″N,105°11′37″—105°12′04″E	1537.50	蕨类、楸树	群落层次由草本和灌木组成,高度 1~6 m,盖度达 67%	64.50	33.75	1.54	0.68	0.74

表 2 供试石灰土基本理化性质

生态恢复 类型	土层 深度/cm	pH	有机质/ (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	0.002~0.02 mm (粉粒)/%	<0.002 mm (黏粒)/%
耕地	0—10	6.65	87.69	40.33	5.30	3.95	12.22	406.41	12.19	145.67	35.85	29.78
	10—20	6.80	71.13	38.41	4.46	3.54	12.92	346.40	8.00	65.47	36.18	33.16
	20—母质	6.96	51.22	35.72	3.60	3.46	13.83	252.83	5.66	56.16	36.26	40.62
退耕还草	0—10	6.51	55.94	27.03	3.15	2.63	12.60	238.20	6.12	74.11	37.03	30.55
	10—20	6.69	49.32	26.56	2.80	2.47	12.96	219.18	4.12	60.87	37.69	32.31
	20—40	6.96	50.65	27.53	3.03	2.48	12.05	212.60	3.65	63.01	36.77	30.42
草地	40—母质	6.63	41.23	27.87	2.13	2.66	9.64	188.23	3.01	49.42	37.26	32.91
	0—10	6.67	82.84	42.61	5.43	2.94	10.74	399.41	6.65	83.66	37.27	35.20
	10—20	6.75	62.27	37.82	3.96	2.64	11.03	313.57	3.13	60.17	38.26	38.16
林草间作	20—40	6.95	46.18	33.60	2.83	2.14	11.56	184.66	1.49	55.69	37.41	44.31
	40—母质	7.05	28.08	30.13	1.90	1.68	8.12	146.62	0.85	44.50	37.51	46.21
	0—10	6.94	106.14	44.90	6.39	3.39	10.71	452.02	5.99	90.13	37.43	34.20
林草间作	10—20	6.99	65.41	38.67	4.62	3.16	11.36	348.47	3.95	61.07	36.66	34.98
	20—母质	7.07	51.76	33.50	3.43	2.82	13.34	264.11	2.28	61.14	37.42	44.28

1.3 数据处理

所测的数据采用 Excel 2016、SPSS 23、Canoco 4.5 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同生态恢复模式土壤钙素变化

将不同生态恢复类型土壤 0—10,10—20,20—40,40—60 cm 土层的全钙、水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙、有机态钙质量分数平均值进行单因子分析并多重比较(表 3)发现,在植物较为茂密的林草间作地,其全钙和水溶态钙质量分数在 4 种生态恢复类型中最高,且水溶态钙质量分数具有显著差异,交换态钙、酸溶态钙也处于较高含量水平,与退耕还草地均具有显著差异;全钙质量分数在耕地和草地无显著性差异,与林草间作地土壤全钙质量分数之间相差 1.5~1.8 g/kg,作为生态恢复阶段的退耕还草地土壤全钙质量分数最低,相差达到 6.11 g/kg;水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙质量分数在 4 种生态恢复类型土壤中无较大差别,分别为 0.124~0.230,2.24~3.88,0.485~0.748 g/kg,有机态钙质量分数几乎无变化;退耕还草恢复模式土壤中各种钙形态含量质量分数均较低。由表 3 可知,研究区全钙质量分数为 7.20~

13.31 g/kg;从钙形态质量分数可以发现,在 4 种生态恢复类型中均为交换态钙所占比例最大,为 26.51%~33.05%,其中耕地最高,酸溶态钙次之,占比 4.35%~6.74%;有机态钙占比 2.36%~4.38%,均为退耕还草地最高;水溶态钙含量占比最低,为 1.57%~1.73%;林草间作地上占比最高。

喀斯特地区林草间作地生态恢复作为较为成熟的生态改善措施,其植被茂密,植物根系发达,分布较广,造成钙元素不易被淋溶流失,加上其土壤下岩溶作用强烈,碳酸钙分解补充钙元素,所以林草间作地土壤全钙质量分数最高,草地亦是如此;耕地作为长期耕作土壤,受人为施肥影响较大,致使其土壤全钙质量分数含量也较高;为防治水土流失,对坡耕地停止耕种,改为种草恢复植被,其土壤原为耕地土壤,受人为利用程度高,土壤元素流失量较大,所以其土壤钙也随着雨水冲刷流失,造成钙含量较低,且与其他 3 种生态恢复模式呈显著差异;土壤溶液组成易受土壤所处环境和季节气候变化影响,加之土壤水分等因素制约,造成水溶态钙含量极少,且占全钙的比例差异较小。土壤的交换性能反映土壤胶体的属性,影响土壤阳离子交换量的因素主要有:地表水文状况、土壤胶体类型、土壤质地、黏土矿物 SiO₂/R₂O₃ 的比率

及土壤溶液 pH,但主要是由土壤胶体表面的净负电荷量决定^[20]。

由表 3 可知,耕地、草地和林草间作地土壤交换态钙质量分数处于较高水平,其中耕地土壤交换态钙含量较高,可能是因为耕地常年反复施尿素、复合肥,多呈酸性,有助于碳酸钙溶解,加上其他形态的钙转化使耕地土壤交换态钙含量增高,造成其交换态/全钙的比值最高,退耕还草地占较高可能也受此因素影响,而林草间作和草地自然状态生长时

间长、施肥等人为活动影响小。在草地和林草间作、退耕还草地土壤酸溶态钙占全钙比例相差不大,为 5.60%~6.70%,而耕地土壤含量较低,占比也最低,这与其中碳酸盐结合态钙易在因施肥带来的酸性条件下释放成为活性钙关系较大,导致其酸溶态钙含量减少,交换态钙含量增加。有机结合态钙含量受生态恢复类型的不同影响较小,无显著差异。从表 3 可以看出,在不同生态恢复类型上其含量与全钙比例相差不大。

表 3 不同生态恢复下石灰土钙质量分数

生态恢复类型	耕地	退耕还草	草地	林草间作地
全钙/(g·kg ⁻¹)	11.510±1.950a	7.200±3.760b	11.870±2.480ac	13.310±4.510c
水溶态钙/(g·kg ⁻¹)	0.180±0.056a	0.124±0.066b	0.186±0.053a	0.230±0.091c
ExCa(g·kg ⁻¹)	3.800±0.535a	2.240±0.913b	3.880±0.730a	3.530±0.540a
酸溶态钙/(g·kg ⁻¹)	0.500±0.183a	0.485±0.210a	0.747±0.184b	0.748±0.247b
有机态钙/(g·kg ⁻¹)	0.344±0.100a	0.316±0.141a	0.314±0.153a	0.314±0.135a
水溶态钙/全钙/%	1.60	1.72	1.57	1.73
ExCa/全钙/%	33.05	31.10	32.68	26.51
酸溶态钙/全钙/%	4.35	6.74	6.29	5.62
有机态钙/全钙/%	2.99	4.38	2.65	2.36

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示各恢复类型间差异显著(P<0.05)。

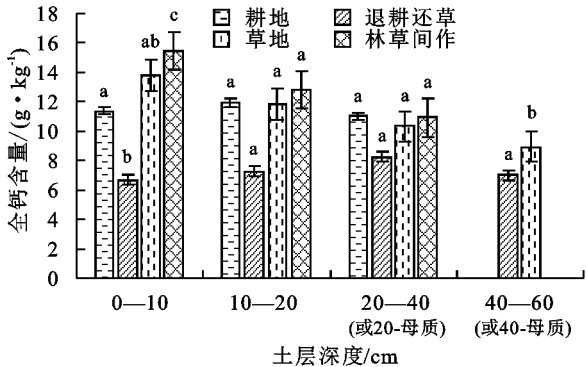
2.2 不同生态恢复模式土壤钙素空间变化

2.2.1 土壤全钙变化趋势 由图 1 可知,在同一层次内,0—10,10—20,20—40 cm 土层上 4 种生态恢复类型下全钙最低平均含量为退耕还草地,平均含量最高为林草间作地,尤其在 0—10 cm 土层,林草间作地全钙含量与其他 3 种生态恢复类型间呈显著性差异,主要原因是高原峡谷区退耕还草生态恢复地多处斜坡,植被覆盖度低,土壤易受雨水冲刷导致钙元素流失,而全钙最高含量分别为林草间作地和草地,说明植被的密集程度能有效阻止土壤全钙淋溶损失。

整体来看,研究区石灰性土壤全钙含量在剖面自上而下呈逐渐减小趋势,但退耕还草地和耕地土壤剖面全钙含量先随土层的增加而增大,最大值出现在亚表层,再往下缓慢减小,这多是受农作措施的影响,比如土地的翻耕与农作物的轮作、有机肥的施用等都会影响耕地土壤钙离子的聚集程度。林草间作地和草地土壤钙含量垂直分布受植物根系、土壤环境等影响明显,剖面分布差异较大,均为表层>底层。

2.2.2 水溶态钙变化趋势 水溶态钙在土壤中含极少,一般只有几十到几百微克(克)不等,研究区土壤 0—10 cm 土层水溶态钙含量变幅为 0.04~0.47 g/kg,平均值为 0.19 g/kg。0—20,20—40 cm 土层水溶态钙含量相对较低,平均为 0.15,0.17 g/kg,最大值出现在 0—10 cm 土层。从图 2 可以看出,在不同生态恢复类型 0—20 cm 土层上,水溶态钙含

量大小为林草间作地>草地>耕地>退耕还草地,且林草间作地土壤水溶态钙含量与其他模式差异显著;20—40 cm 土层生态恢复类型间含量大小有差异,但差异不显著。



注:图中不同字母表示不同生态恢复模式下差异显著(P<0.05)。下同。

图 1 不同生态恢复下土壤全钙含量空间分布

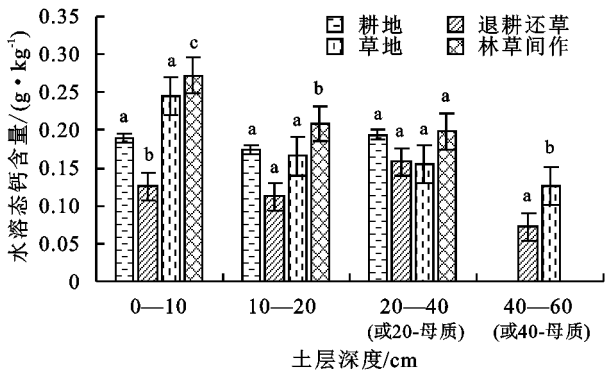


图 2 不同生态恢复下土壤水溶态钙含量空间分布

在整体的垂直分布上,研究区土壤水溶态钙含量在剖面上随土层的加深而减少,在 0—20 cm 处减幅较为明显,为 0.19~0.10 g/kg。从图 2 可以看出,耕地和退耕还草地土壤自上而下先变小,最后在 20—40 cm 处增加,退耕还草地在 40—60 cm 处又减小,这可能是因为植物根系深度只达到 0—20 cm 处,造成这一土层钙离子被吸收,从而减小较为明显;林草间作地、草地土壤水溶性钙含量多聚集于表层和亚表层,土层越深,含量减小幅度越大,主要是由于草本植物根系较浅,多集中在表层,水分在表层被截留,而且土层深部生物呼吸作用产生的 CO₂ 较少,从而造成水溶态钙大多聚集在表层。

2.2.3 交换态钙变化趋势 土壤中交换态钙含量是反映土壤钙供应能力的一个重要指标,所以明确土壤中交换态钙含量及其变化具有重要意义。石灰土 0—10 cm 土层交换态钙含量为 1.12~4.96 g/kg,平均为 2.90 g/kg。40 cm—母岩层交换态钙含量为 1.99~4.68 g/kg,平均为 3.02 g/kg。由图 3 可知,同一土层下,交换态钙含量大小为耕地>草地>林草间作地>退耕还草地,耕地土壤作为长期农作土壤,施用的各种有机肥和植物残屑遗留,造成其交换态钙含量较高,且与林草间作地间呈显著差异。整体来看,研究区土壤交换态钙含量在剖面上变化差异不大。从图 3 还可看出,除林草间作地土壤剖面交换态钙含量从上到下变小外,耕地、草地、退耕还草地在 0—40 cm 土层交换态钙含量变化均逐渐增多,在趋近于母岩处又逐渐减小,结合图 2 可知,这与水溶态钙的逐渐减小相关。在一定条件下,水溶态离子与交换态离子之间可以相互转化^[21],说明喀斯特地区林草间作生态环境能阻止土壤交换态钙离子向土层深处移动,而耕地则有钙素向土层深处淋失的风险。

2.2.4 酸溶态钙变化趋势 酸溶态 Ca 分为可交换态钙与碳酸盐结合态 Ca,碳酸盐结合态 Ca 在酸性条件下易释放为活性 Ca 成分^[22]。研究区不同生态恢复类型土壤 0—10 cm 土层酸溶态钙的变幅分别为 0.03~1.45 g/kg,平均为 0.64 g/kg,40 cm—母岩为 0.42~0.87 g/kg,平均为 0.63 g/kg。酸溶态钙含量在同一土层上呈现波动变化,且每一层次含量较高的均出现在草地和林草间作地,并且在 0—20 cm 土层存在显著性差异;而耕地和退耕还草地则比较低,在 0—20 cm 土层呈显著差异。因为在酸性和中性条件下酸溶态钙可以相互转化,是与有效钙含量的分布关系较大。从垂直空间看,研究区土壤酸溶态钙含量在剖面上变化不大,从图 4 可以看出,在林草间作地和草地浅层含量明显大于土壤深层,耕地和草地则有向深层迁移的迹象,酸溶态钙作为潜在活性钙,其含量

空间变化受土壤酸碱度和植物需求量的影响较大。

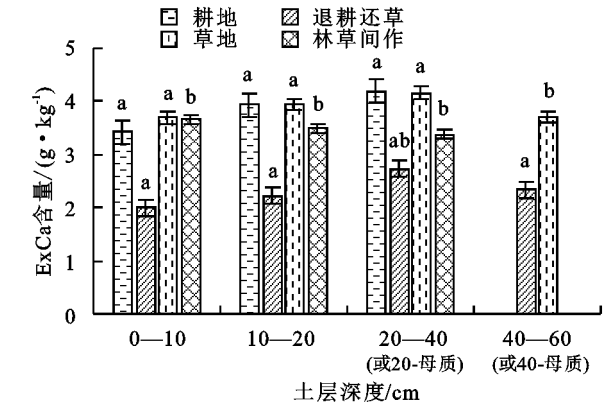


图 3 不同生态恢复复下土壤 ExCa 含量空间分布

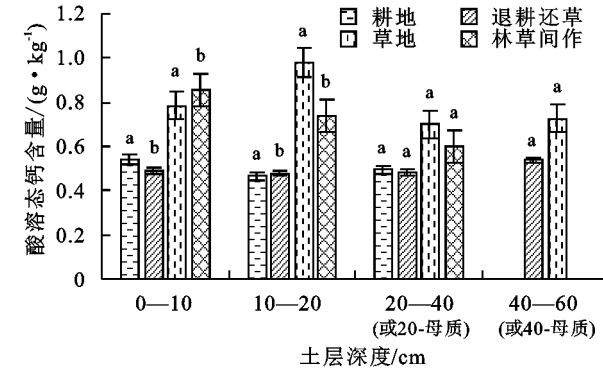


图 4 不同生态恢复复下土壤酸溶态钙含量空间分布

2.2.5 有机态钙变化趋势 有机态钙指土壤中与有机质结合的钙,主要来自于动植物残体中,占全钙的 0.1%~1.0%,除了结合在有机成分中尚未分解外,多数以络合或吸附形态存在,是植物难以利用的钙。有机态钙含量较低,几乎与水溶态钙含量一样。从图 5 可以看出,在同一土层有机态钙含量最低,均出现在退耕还草地,而耕地土壤有机态钙离子较林草间作地高,4 种生态恢复类型之间存在差异性,但差异不显著。在 0—10 cm 土层有机态钙含量为 0.12~0.74 g/kg,平均为 0.32 g/kg,在 40 cm—母岩层有机态钙含量为 0.13~0.85 g/kg,平均 0.36 g/kg。整体来看,垂直面上无显著差异,但从图 6 还可看出,耕地多聚集于表层,而退耕还草地和草地土壤则呈先减小后增大的变化趋势,林地有机态钙含量自上而下没有出现较大变异。

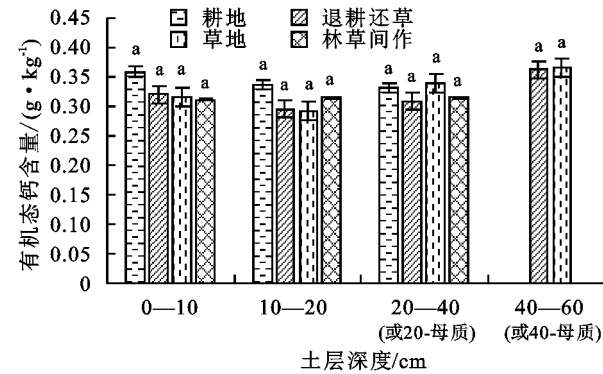


图 5 不同生态恢复复下土壤有机态钙含量空间分布

2.3 土壤钙形态影响因素分析

为探讨土壤钙迁移转化的影响因素,对土壤理化指标和土壤钙形态进行冗余分析(RDA)和相关性分析。冗余分析是约束化的主成分分析,作为直接梯度方法的 RDA,能从统计学的角度来有效评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系^[23-24]。本研究将 4 种生态恢复模式下土壤全钙及各形态钙作为物种数据,将 pH、有机质、CEC、全氮、全磷、全钾等理化指标为环境因子进行冗余分析,得到土壤理化性质对土壤全钙和钙形态影响的排序图(图 6)。从图 6 可以看出,箭头连线与排序轴的夹角表示与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越大^[25]。土壤钙形态指标用虚线表示,环境因子用黑线表示;箭头连线的长短表示土壤钙形态与环境因子关系的大小,2 个箭头连线的夹角是土壤钙形态和影响因素相关性大小。全钙作为各形态钙的总和,其与各形态钙之间必然存在一个动态平衡的关系。由图 6 可知,全量钙与有效钙、酸溶态钙、有机态钙之间的夹角均呈锐角,可见不同生态恢复类型对喀斯特地区土壤的钙全量及其形态含量有显著影响。不同生态恢复类型其环境、土壤性质均有所差异,间接影响钙离子含量的迁移转化。由表 4 可以看出,水溶态钙与 pH、有机质、阳离子交换量、全氮、全磷、速效氮、速效钾呈极显著

正相关关系;交换态钙与 pH、有机质、阳离子交换量、全氮、全磷、黏粒、速效氮呈极显著正相关关系,酸溶态钙与 pH、有机质、阳离子交换量、全氮、全磷、速效氮呈极显著正相关关系,与全钾呈极显著负相关关系,有机态钙与阳离子交换量、全氮、全磷、粉粒、速效氮呈极显著或显著正相关关系;从钙的形态与 pH、有机质、阳离子交换量呈极显著正相关关系来看,土壤类型不同影响钙形态含量;酸溶态钙在酸性条件下也会分离出活性钙,从而补充水溶态钙离子和交换态钙离子的含量,使其之间呈极显著正相关关系。

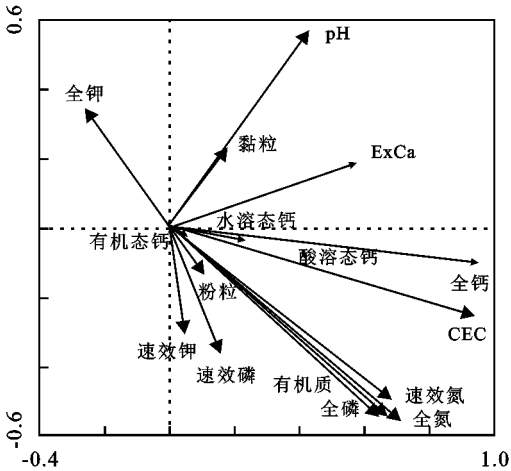


图 6 钙形态与土壤基本理化性质的 RDA 排序图

表 4 石灰土钙形态与理化性质的 Pearson 相关分析

项目	全钙	水溶态钙	交换态钙	酸溶态钙	有机态钙
全钙	1				
水溶性钙	0.628**	1			
ExCa	0.738**	0.493**	1		
酸溶态钙	0.578**	0.467**	0.498**	1	
有机态钙	0.235**	0.006	0.160*	0.077	1
pH	0.307**	0.270**	0.503**	0.188**	0.118
有机质	0.712**	0.551**	0.389**	0.420**	0.135
阳离子交换量	0.906**	0.594**	0.702**	0.615**	0.201**
全氮	0.777**	0.593**	0.435**	0.514**	0.179*
全磷	0.703**	0.455**	0.398**	0.456**	0.198**
全钾	0.260**	-0.117	-0.110	-0.257**	-0.050
黏粒	0.095	0.134	0.213**	0.054	0.023
粉粒	0.094	0.038	0.076	0.138	0.189**
速效氮	0.729**	0.477**	0.421**	0.407**	0.258**
速效磷	0.177*	0.102	0.024	0.128	0.103
速效钾	0.102	0.190**	-0.062	-0.091	-0.012

注: * 表示在 0.05 水平上(双尾)相关性显著; ** 表示在 0.01 水平上(双尾)相关性显著。

土壤阳离子交换量(CEC)是土壤基本特性和重要肥力的影响因素之一,是土壤保肥、供肥和缓冲能力的重要标志,对提高肥力和改良土壤有重要作用^[26],土壤交换性盐基离子含量和饱和度很大程度上反映盐基类元素的生物有效性、运移及循环情况。

因此,CEC 与交换态钙之间呈极显著正相关关系。由有效钙与全氮、速效氮呈正相关性可以看出,土壤中氮元素含量对有效钙的影响较大。由于土壤中有有机态钙含量较少,只占全量钙的 1/1 000 左右,且难以被植物直接利用,所以并未表现出太多关联性。为

进一步了解钙形态流动转化的主要影响因素,对钙形态、土壤理化指标进行冗余分析(RDA),得到土壤钙形态与土壤理化性质之间大多存在相关性,尤其是 CEC、氮素和 pH 对其影响较大。总体来说,不同生态恢复类型土壤理化性质的差异和钙形态的迁移转化有着紧密的联系,尤其与有效态钙之间。

3 讨论

喀斯特地区土层较薄,在不断受到雨水冲刷的情况下水土流失严重。从表 3 可以看出,石灰性土壤含钙离子丰富,研究区全钙质量分数为 7.20~13.31 g/kg,林草间作土壤最高,草地次之,退耕还草地最低;林草间作地植被茂密且根系发达,分布较广,造成钙元素不易被淋溶流失,加之其土壤下岩溶作用强烈,碳酸钙分解补充钙元素,所以林草间作地土壤全钙质量分数最高。不同生态恢复类型土壤钙形态中均为交换态钙所占比例最大,为 26.51%~33.05%,其中耕地最高,主要原因为耕地土壤长期施肥,碳酸盐溶解可以补充钙离子;酸溶态钙次之,占比范围为 4.35%~6.74%;耕地最低,与酸溶态钙在酸性或中性条件下转化为活性钙关系较大;有机态钙占比为 2.36%~4.38%,退耕还草地最高;水溶态钙含量占比最低,只有 1.57%~1.73%,林草间作地最高。

从土层深度看,林草间作地土壤、草地土壤全钙含量较耕地和退耕还草地高,耕地为常年翻作土壤,其通透性增加,保水性不强,所以水流的冲击使钙离子向更深层次流动,退耕还草地恢复模式进行时间较短,亦存在这方面的影响。从图 2 可以看出,在 0 cm—母质层草地土壤水溶态钙含量明显高于耕地土壤和退耕还草地土壤,联系草地植被较为密集这一因素,可以发现它们之间为相互促进的正相关关系,其中部分原因是在降雨溶蚀作用下,碳酸盐变为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,而在根系截留到的外源水不断补给下这种溶蚀过程会持续进行^[17]。交换态钙和水溶态钙合称为有效钙,是可以被植物直接吸收利用的钙。因为水溶态钙含量极少,所以交换态钙为有效钙的主要形式。钙形态在一定条件下可以互相转化,尤其是水溶态与交换态之间转化较为容易,比较图 2、图 3 和图 4 可以看出,在 4 种生态恢复类型下,0—10 cm 土壤水溶态钙含量较低时,其交换态离子含量均较高,而酸溶态钙含量则整体较低。由此可以看出,因钙素易受植物和水分运动等因素影响的特性,导致有效态钙和酸溶态钙之间保持着一定的转化关系。正常情况下,有机质多聚集于表层(表 2),相应的有机态钙也应如此,但从图 5 可以看出,有机态钙含量在

退耕还草、草地土壤剖面均随土层加深而增加,具体原因有待进一步研究。显而易见,生态恢复类型不同,其土壤的基本理化性质也不尽相同,从而对土壤中不同形态钙产生较大影响,这种影响主要体现在其空间分布上,这一结论与倪大伟等^[14]的研究一致。

4 结论

(1)研究区土壤全钙质量分数为 7.20~13.31 g/kg,林草间作地土壤含量最高,4 种生态恢复类型土壤中钙形态质量分数均为交换态钙占全钙的比例最大,为 26.51%~33.05%,其中耕地最高;酸溶态钙次之,占比为 4.35%~6.74%;有机态钙占比为 2.36%~4.38%,均为退耕还草地最高;水溶态钙含量占比最低,仅有 1.57%~1.73%,林草间作地最高。

(2)土壤中水溶态钙含量较低,同一土层下林草间作地土壤水溶态钙含量明显高于其他几种生态恢复类型土壤;在垂直方向上对照(耕地)和退耕还草生态恢复类型土壤水溶态钙含量有明显的淋溶现象,表现为表层<底层;而林草间作地和草地则为表层>底层,最大垂直变量为 0.09 g/kg,说明生态环境的恢复能有效阻止石灰性土壤水溶态钙的流失。

(3)交换态钙含量比水溶态钙含量高 20 倍左右,在同一土层上,交换态钙含量在耕地、草地、林草间作地土壤较高,且除了林草间作地、草地外,其他 2 种生态恢复类型土壤交换态钙含量均随土层加深而增加。相较而言,酸溶态钙含量较低,在不同生态恢复类型的含量与交换态钙基本一致,但相关系数在钙形态之间最高;有机态含量极少,空间变异性不明显。

(4)土壤全钙、水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙与 pH、有机质、CEC、全氮、全磷、速效氮等均呈极显著正相关关系,有机态钙与 CEC、全磷、粉粒、速效氮间呈极显著正相关关系;通过冗余分析得出,CEC、氮素和 pH 是影响钙形态变化特征的主要因素。

参考文献:

- [1] 姜勇,张玉革,闻大中,等.沈阳市郊耕地土壤交换性铁含量的空间异质性[J].水土保持学报,2003,17(1):119-121.
- [2] 曾馥平,彭晚霞,宋同清,等.桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复 22 年后群落特征[J].生态学报,2007,22(12):5110-5119.
- [3] John G, Smith D. Human impact on the Cuilcagh karst areas[M].Italy: Università di Padova,1991:23-28.
- [4] 万军.贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展[J].地球科学进展,2003,18(3):447-453.
- [5] 马文翰.贵州喀斯特脆弱生态环境的可持续发展[J].贵州师范大学学报,2003,21(2):75-77.
- [6] 文小琴,舒英格,何欢.喀斯特山区土地不同利用方式的

土壤养分及微生物特征[J].西南农业学报,2018,31(6):1227-1233.

[7] 肖盛杨,舒英格,陈梦军.喀斯特高原峡谷区不同植被类型的土壤抗蚀性[J].水土保持通报,2019,39(4):30-35,81.

[8] 何秀,文小琴,舒英格,等.喀斯特石漠化区土地利用方式对土壤质量性状的影响[J].江苏农业科学,2017,45(9):234-238.

[9] 彭文君,舒英格.喀斯特山区县域耕地景观生态安全及演变过程[J].生态学报,2018,38(3):852-865.

[10] 彭文君,舒英格.基于 GIS 的石漠化山区县域土地利用空间变化的生态风险测度[J].水土保持研究,2018,25(1):342-348,355.

[11] Yuan G, Lavkulich L M. Sorption behavior of copper, zinc, and cadmium in response to simulated changes in soil properties[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis,1997,10(6):985-992.

[12] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. Solubility, sorption and desorption of native and added cadmium in relation to properties of soils in New Zealand[J].European Journal of Soil Science,2008,14(1):68-78.

[13] Wei X H, Liu S J, Müller K, et al. Urbanization-induced acid rain causes leaching loss of calcium from limestone-derived soil in South China [J]. Journal of Soils and Sediments,2019,19(11).

[14] 倪大伟,王妍,刘云根,等.典型岩溶小流域不同土地利用类型土壤钙分布及形态特征[J].西南林业大学学报(自然科学版),2018,38(2):83-88.

[15] 胡乐宁,苏以荣,何寻阳,等.西南喀斯特石灰土中钙的形态与含量及其对土壤有机碳的影响[J].中国农业科学,2012,45(10):1946-1953.

[16] Yang H, Liang J H, Chen J R, et al. Soil calcium speciation at different geomorphological positions in the Yajikarst experimental site in Guilin, China[J].Journal of Resources and Ecology,2015,6(4):224-229.

[17] 陈同庆,魏兴琥,关共凑,等.粤北岩溶区不同土地利用方式对土壤钙离子的影响[J].热带地理,2014,34(3):337-343.

[18] 史迎春,舒英格.喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析:以贵州晴隆县为例[J].林业资源管理,2017,38(1):135-143,152.

[19] 余海,王世杰.土壤中钙形态的连续浸提方法[J].岩矿测试,2007(6):436-440.

[20] 李天杰,赵烨,张科利,等.土壤地理学[M].3 版.北京:高等教育出版社,2004.

[21] 徐畅,高明.土壤中镁的化学行为及生物有效性研究进展[J].微量元素与健康研究,2007,24(5):51-54.

[22] 黄芬,胡刚,涂春燕,等.岩溶区不同土地利用类型土壤钙形态分布特征[J].南方农业学报,2015,46(9):1574-1578.

[23] 尹锴,崔胜辉,赵千钧,等.基于冗余分析的城市森林林下层植物多样性预测[J].生态学报,2009,29(11):6085-6094.

[24] 李强,李忠义,靳振江,等.基于典范对应分析的铅锌矿尾砂坝坍塌污染土壤特征研究[J].地质论评,2014,60(2):443-448.

[25] 李红林,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J].土壤学报,2015,52(6):1345-1355.

[26] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.

(上接第 47 页)

[20] 胡尧,侯雨乐,李懿.模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):62-67,72.

[21] 王杰,王妍,许晓梁,等.坡度对坡面降雨产流规律的影响[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(4):372-376.

[22] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):11-17.

[23] 李云飞,张立新,廖超英,等.粘土掺砂对烤烟氮、钾含量和光合特性及产量的影响[J].西北农业学报,2013,22(2):85-89.

[24] 宋日权,褚贵新,冶军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(增刊 1):109-114.

[25] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.

[26] 毛伟兵,王景元,孙玉霞,等.入田泥沙对黄河三角洲地区土壤物理性状的影响:以小开河引黄灌区为例[J].生态环境学报,2010,19(1):212-217.

[27] 李文斌,李新平,李海洋,等.不同掺沙比例对烟区黏质土壤微生态特征的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):85-90,96.

[28] 宋日权,褚贵新,张瑞喜.绿洲农田表层掺砂、覆砂对土壤水分入渗的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2010,28(3):360-365.