

李菁,杨程,靳振江,等.断陷盆地不同土地利用方式土壤钙形态分布特征[J].中国岩溶,2019,38(6):889-895.
DOI:10.11932/karst2019y14

断陷盆地不同土地利用方式土壤钙形态分布特征

李菁¹,杨程²,靳振江¹,朱同彬³,曹建华³

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018; 3. 中国地质科学院岩溶地质所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:选择云南省蒙自市西北勒乡碧色寨村具有典型岩溶地貌特征的草地、人工林地、玉米地(由草地开垦种植玉米2年)和火龙果地(由草地开垦种植火龙果5年)作为研究对象,采用连续浸提(BCR)提取方法测定不同形态钙含量,以探讨岩溶区不同土地利用方式下石灰性土壤钙形态特征及其影响因素。结果表明:土地利用方式显著影响了土壤全钙含量及其形态分布;草地土壤全钙和各形态钙含量均高于其他土地利用类型,玉米地最低;4种土地利用方式土壤钙的赋存形态主要为交换态(占总量的59.4%~74.8%),有机结合态钙含量最低(占总量的0.5%~1.0%);全钙和各形态钙与有机碳、全氮、全镁、阳离子交换量(CEC)、pH呈显著正相关,说明全钙和各形态钙与土壤物理化学性质是互相影响的。

关键词:断陷盆地;土地利用类型;BCR提取方法;石灰性土壤;钙形态

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)06-0889-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

钙是碳酸盐岩的主要构成元素之一,也是所有植物的固定组分,不但起重要的生理作用,还可通过调整土壤的酸碱性直接影响植物的生长^[1],并影响各种营养元素以及重金属元素的可溶性^[2]。占中国土地总面积约1/3的岩溶区,是受岩溶环境制约的生态系统^[3-4],各圈层均体现了富钙特征,钙在无机元素中占据着数量上的优势^[5]。土壤中元素的总浓度不能反映元素在土壤中存在的实际状态,因而不能更深入地给出元素的化学活性、生物有效性等^[6],而钙对植物的有效性不仅取决于土壤中钙的总量,还依赖其存在的化学形态^[7]。

因耕地资源匮乏,岩溶区大多数峰丛洼地缓坡和峰林平原坡麓及峰间洼地被开垦为经济林和耕地,在人类强干扰下,自然生态系统演变为自然—人工复合生态系统^[1],人为干扰导致土壤全钙和各形态钙含量发生显著变化。基于钙元素在岩溶生态系统中的重要性,目前已开展的大量研究工作,主要关注于钙对重金属吸附及微生物、植物等的影响^[8-11],环境因子对钙形态分布的影响^[12-13]等,且主要开展于峰丛洼地等区域^[14-15],而研究断陷盆地不同土地利用类型对土壤钙元素的影响较少。

云南断陷盆地地区位于珠江、长江中上游,属国家“两屏三带”生态安全屏障区。相对于峰丛洼地、

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502503);中国地质科学院基本科研业务费专项经费资助(YYWF201637, 201724)

第一作者简介:李菁(1994—),女,硕士研究生,研究方向岩溶生态系统土壤碳氮循环。E-mail:306862384@qq.com。

通信作者:朱同彬(1983—),博士,副研究员,主要研究方向为岩溶生态土壤氮循环。E-mail:ztb@karst.ac.cn。

收稿日期:2019-02-19

高原和槽谷等其他岩溶类型区,断陷盆地具有独特的水文、地质和气候等特点,例如,盆一山共存的环境地质结构分异、光照强烈,蒸发量远大于降雨量,盆一山区温差大、地下河深埋,植被立地条件差等^[16-17]。由于其特殊性,断陷盆地区不同土地利用类型土壤钙形态分布特征可能展现出与其他地区不一致的特点。本研究选择云南省蒙自市西北勒乡碧色寨村具有典型岩溶地貌特征的草地、人工林地、玉米地和火龙果地作为研究对象,通过研究典型岩溶区不同土地利用类型土壤钙形态的分布特征,探讨不同土地利用方式对钙形态的影响及其引起的土壤理化性质的差异,以期深入了解钙元素在岩溶环境

中的分布特征和运动特征,指示岩溶地区土壤质量及生物有效性提供参考。

1 研究区概况

采样点位于云南省蒙自市西北勒乡碧色寨村,属亚热带季风气候,海拔为1 800~2 400 m,年均气温为13.6℃,年均降雨量为900~1 000 mm,属岩溶地貌。由于20世纪50年代大面积砍伐,造成区域石漠化比较严重,90年代末实施了退耕还林等生态工程,但植被恢复缓慢。近十年仍存在对石漠化山地进行土地整治种植农作物和经济林的现象,由此发展出多种利用方式的山地(图1)。

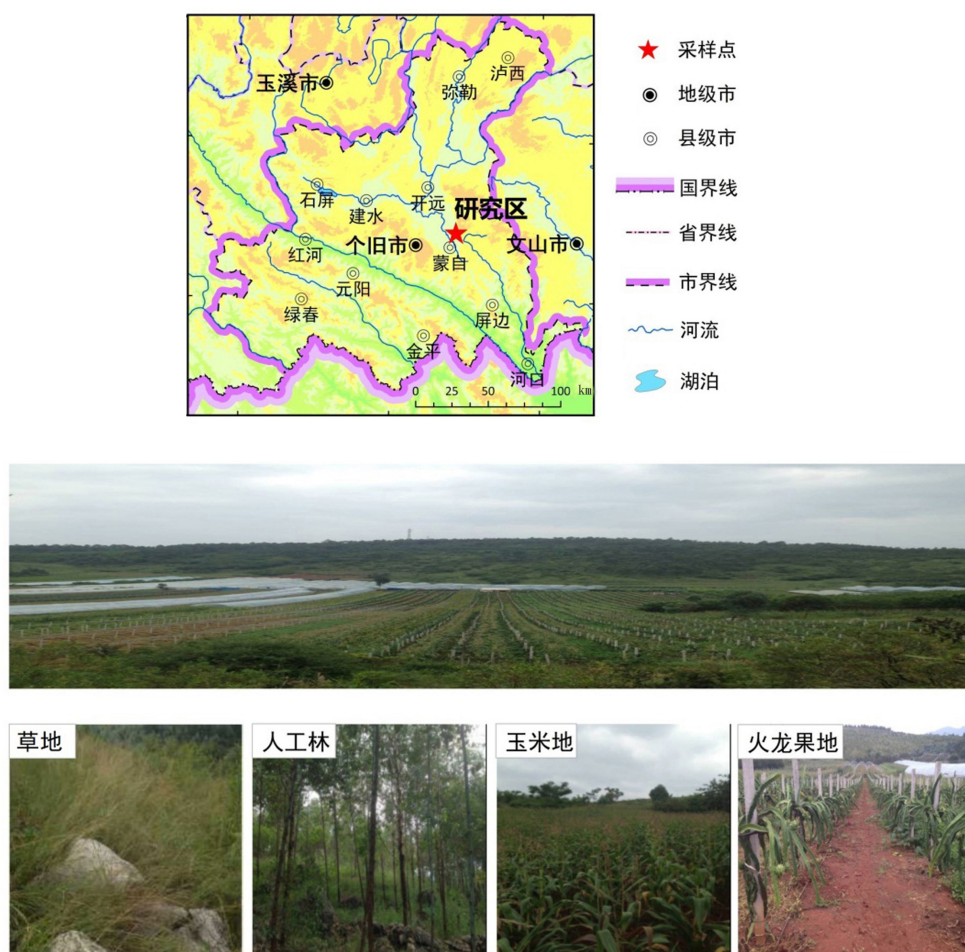


图1 研究区概况及样地类型

Fig. 1 Outline of study region and land use types

本研究选择草地、林地、玉米地和火龙果地作为研究对象。草地为石漠化区封育自然演替至草丛阶段的样地,植被类型主要包括黄花蒿、荨麻和黄背草等,玉米地、火龙果地和林地分别为临近草地整治种

植玉米、火龙果和桉树的样地。其中,桉树树龄为3年,种植时不施肥;玉米地种植年限为2年,土地整治后每年种植一茬玉米,年施肥量 N 、 P_2O_5 和 K_2O 均为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;火龙果为5年生树龄,每年施用腐熟牛粪

25 000 kg·hm⁻² (全氮 3.2 g·kg⁻¹, 全磷 2.5 g·kg⁻¹, 全钾 1.6 g·kg⁻¹) 做基肥, 同时追施 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别计 150、300 和 75 kg·hm⁻²。4 种土地的土壤类型均为石灰性土壤。

2 研究方法

2.1 土壤样品采集

2016年9月在4种土地利用类型区内各选择3个代表性样地, 采集土壤, 共得到12个土壤样品。每个样地间距超过150 m, 每个样地间隔20 m 随机选取5个1 m×1 m 样方, 采用直径5 cm 的土钻采集0~15 cm 的表层土壤, 剔除石块和植物根系, 将新鲜土壤混合均匀组成一个样品, 过2 mm 筛, 将其保存于4℃冰箱。同时, 取出部分土样在室温下风干, 过2 mm 和0.25 mm 筛, 用于测定土壤理化性质及不同形态钙含量。

2.2 土壤理化指标和不同形态钙含量测定方法

土壤样品理化指标采用常规方法分析^[18-19], 其中: 有机碳采用重铬酸钾—硫酸消化法测定; 全氮采用半微量凯氏定氮法测定; 全磷采用 HClO₄—H₂SO₄ 消煮, 钼锑抗比色法测定; 全钾采用 NaOH 消煮, 火焰光度法测定; 全镁含量采用 EDTA 滴定法测定; 有效磷采用钼蓝比色法测定; 速效钾采用 1 mol·L⁻¹ NH₄OAc 溶液 (pH=7) 浸提, 火焰光度计测定; 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定; pH 采用电位法 (水土比 2.5:1) 测定。土壤钙形态含量采用改进的 BCR 连续提取法^[20]: 水溶态用蒸馏水提取, 交换态用 1 mol·L⁻¹ AlCl₃ 提取, 酸溶态用 3 mol·L⁻¹ HCl 提取, 有机结合态用 0.5 mol·L⁻¹ Na₂SO₄ 提取, 残渣态用硝酸—高氯酸—氢氟酸消解, 提取液用 ICP-AES 法测定。

2.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2010 程序进行数据整理, SAS 8.1 统计分析软件对实验数据进行方差分析, SPSS 13.0 软件进行作图。

3 结果与分析

3.1 理化性质

不同土地利用方式下土壤有机碳和全氮含量分别达到 10.5~51.0 g·kg⁻¹ 和 0.92~4.47 g·kg⁻¹, 均以草地最大, 玉米地最低 (表1)。全磷、有效磷及速效钾

含量以火龙果地最高, 显著高于其他3种土地利用方式。不同土地利用方式下土壤全钾含量无显著差异, 介于 7.75~9.89 g·kg⁻¹ 之间; 土壤全镁含量介于 3.81~6.50 g·kg⁻¹ 之间, 以草地最大, 火龙果地最低。土壤阳离子交换量 (CEC) 以草地最大 (33.7 cmol·kg⁻¹), 显著高于其他3种土地利用方式, 玉米地最小 (15.5 cmol·kg⁻¹)。火龙果地、玉米地、人工林地土壤 pH 呈酸性, 草地呈碱性。4 种利用方式土壤质地都为粉黏土。研究区土壤养分的变异系数 (*C_v*) 介于 0.12~1.76 之间, 土壤有效磷与速效钾的变异系数分别为 1.76 与 1.02, 属于高强度变异 (*C_v*>1.00); 其余土壤养分的变异系数介于 0.12~0.57 之间, 属于中等强度变异 (0.10≤*C_v*≤1.00), 这说明研究区不同土地利用条件下, 土壤养分水平有较大差异。

3.2 岩溶区不同土地利用方式钙形态特征

研究区土壤全钙含量介于 1.93~7.21 g·kg⁻¹, 平均值为 4.06±2.29 g·kg⁻¹, 草地显著高于其他不同土地利用土壤 (表2)。整个研究区土壤钙的赋存形态主要为交换态, 占总量的 59.4%~74.8%, 其次为残渣态, 占总量的 12.9%~27.4%, 其中玉米地残渣态钙占总量的比例显著高于其他3种土地利用方式土壤。4 种土地利用类型土壤有机结合态钙含量最低, 占总量的 0.5%~1.0% (图2)。总体来看, 水溶态钙具有较大的空间异质性, 变异系数为 91.7%, 显著高于其他形态。

3.3 土壤钙形态含量与土壤基本理化性质之间的关系

除水溶态钙和残渣态钙外, 土壤交换态钙、酸溶态钙和有机结合态钙相互之间成极显著正相关 (*P*<0.01), 而与水溶态钙和残渣态钙无显著相关关系 (表3)。除水溶态钙外, 土壤全钙与其他4种形态钙含量均呈极显著正相关 (*P*<0.01)。土壤全钙、交换态钙、酸溶态钙、有机结合钙和残渣态钙含量与有机碳、全氮、全镁含量、CEC 和 pH 成显著正相关 (*P*<0.01), 而与全磷、速效磷、速效钾、黏粒、粉粒和砂粒无显著相关性 (*P*>0.05)。土壤水溶态钙含量与其他土壤基本理化性质无显著相关关系。

4 讨 论

岩溶区由碳酸盐岩发育而来的石灰性土壤具有富钙特点, 在不受人为扰动条件下, 土壤具有较高的

表 1 岩溶区 4 种土地利用下土壤基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties under four land uses in the karst region

	火龙果地	玉米地	人工林地	草地	变异系数
有机碳/g·kg ⁻¹	18.48±0.70C	10.50±3.92C	39.20±3.97B	51.00±6.95A	0.12
全氮/g·kg ⁻¹	1.90±0.10C	0.92±0.54D	3.38±0.32B	4.47±0.49A	0.55
全磷/g·kg ⁻¹	1.76±0.42A	0.59±0.01B	0.59±0.12B	0.82±0.10B	0.57
全钾/g·kg ⁻¹	8.71±0.78A	8.30±0.52A	7.75±0.17A	9.89±2.00A	0.14
全镁/g·kg ⁻¹	3.81±0.17C	4.15±0.20C	5.12±0.89B	6.50±0.31A	0.23
有效磷/mg·kg ⁻¹	56.20±25.30A	0.53±0.23B	1.90±0.61B	2.60±1.15B	1.76
速效钾/mg·kg ⁻¹	1 115±300A	148±10.50B	144±26.0B	310±46.6B	1.02
CEC/cmole·kg ⁻¹	20.90±1.13C	15.50±0.73C	26.60±3.53B	33.70±3.10A	0.30
pH	5.91±0.46BC	5.49±0.45C	6.32±0.27B	7.22±0.23A	0.12
黏粒含量/%	40.50±8.02B	54.40±2.94A	44.50±6.87AB	44.30±0.52AB	0.16
粉粒含量/%	52.40±6.64A	42.40±2.82B	46.90±6.46AB	49.30±1.97AB	0.12
砂粒含量/%	7.08±2.69A	3.19±0.82B	8.58±0.62A	6.46±1.46AB	0.39

注:表中同一行不同大写字母表示不同地区土壤各项指标差异性显著($P<0.05$),下同。

表 2 岩溶区 4 种土地利用下土壤钙形态分布特征

Table 2 Distribution of soil Ca forms under four land uses in the karst region

	水溶态钙	交换态钙	酸溶态钙	有机结合态钙	残渣态钙	全钙
	g·kg ⁻¹					
火龙果地	0.20±0.23A	2.36±0.03B	0.36±0.05B	0.02±0B	0.44±0.05A	3.38±0.26AB
玉米地	0.06±0.02A	1.14±0.13B	0.17±0.02B	0.02±0B	0.53±0.08A	1.93±0.21B
人工林地	0.09±0.01A	2.79±0.44AB	0.42±0.07B	0.02±0AB	0.62±0.12A	3.73±0.24AB
草地	0.20±0.10A	5.26±1.90A	0.77±0.24A	0.04±0.01A	0.95±0.24A	7.21±2.46A
平均值	0.14±0.13	2.89±1.77	0.43±0.25	0.02±0.01	0.63±0.24	4.06±2.29
变异系数	91.7%	61.2%	58.2%	33.0%	38.5%	56.3%

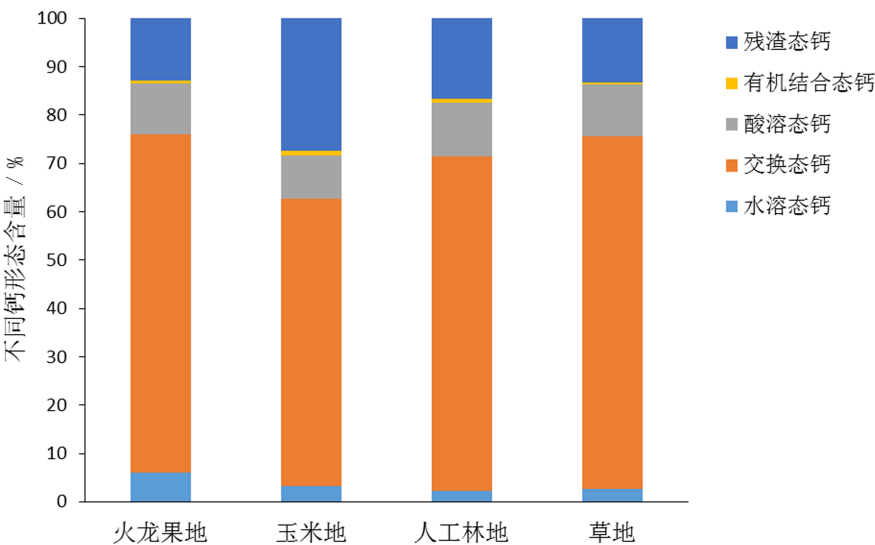


图 2 岩溶区 4 种土地利用下土壤各形态钙比例

Fig. 2 Soil different fraction Ca proportions under four land uses in the karst region

表3 土壤基本理化性质与全钙及不同钙形态含量相关性分析
Table 3 Correlations between soil physical and chemical properties and contents of total Ca and different Ca forms

	水溶态钙	交换态钙	酸溶态钙	有机结合态钙	残渣态钙	全钙
水溶态钙	1					
交换态钙	0.43	1				
酸溶态钙	0.45	0.99**	1			
有机结合态钙	0.18	0.65*	0.68**	1		
残渣态钙	−0.04	0.28	0.29	0.16	1	
全钙	0.48	0.99**	0.99**	0.66*	0.91**	1
有机碳	0.31	0.93**	0.93**	0.83**	0.89**	0.93**
全氮	0.35	0.92**	0.93**	0.83**	0.84**	0.92**
全磷	0.56	0.01	0.05	−0.26	−0.36	0.01
全钾	0.56	0.80*	0.79**	0.20	0.71	0.81**
全镁	0.16	0.76*	0.78*	0.89**	0.81**	0.76*
有效磷	0.12	−0.14	−0.10	−0.40	−0.52	−0.16
速效钾	0.58	−0.03	0.05	−0.26	−0.39	−0.03
CEC	0.44	0.95**	0.97**	0.82**	0.86**	0.90**
pH	0.10	0.88**	0.88**	0.74*	0.80**	0.86**
黏粒	−0.20	−0.35	−0.31	−0.26	−0.11	−0.33
粉粒	0.10	0.36	0.32	0.15	0.10	0.33
砂粒	0.39	0.23	0.23	0.47	0.11	0.24

注: *表示在 0.05 水平上相关性显著; **表示在 0.01 水平上相关性显著。

钙含量。相关文献表明,岩溶区石灰性土壤钙含量是非岩溶区的 4 倍以上^[21]。本研究中,4 个研究区虽然都是石灰性土壤,但全钙含量具有明显差异,这表明,除土壤母质外,土壤钙含量也受土地利用方式的显著影响。研究发现岩溶区石灰性土壤固钙和固碳作用是互相作用、互相影响的过程^[22-23]。土壤有机质与金属元素的结合是金属元素在土壤中存在的一种重要形式,土壤有机质能够与钙、镁离子结合,形成高度缩合而稳定的腐殖酸钙,从而有利于石灰性土壤钙元素的保持^[22,24]。当石灰性土壤受到人为扰动后,尤其是耕作,会破坏土壤钙元素的保持能力。与草地相比,3 种土地利用方式土壤全钙含量均显著下降,以玉米地最大。有研究表明长期单施化肥不利于土壤有机质的积累^[25],而有机肥本身含有大量的营养物质,有机肥与化肥配合施用能增加根系分泌物数量及根茬残留量,为微生物生长提供营养物质^[26]。玉米种植过程中只施用化肥,剧烈的人为干扰(翻耕)导致地表植被凋落物和根系分泌物减少,微生物活动减弱,加之坡地地表径流速度快,土壤中的钙元素极容易随地表水流失。与玉米地相比,火龙果施肥量大,尤其是有机肥施用量大,使得土壤全

钙含量高于玉米地。林地虽有扰动,但土壤表层大量的植被凋落物在岩溶区温润的气候条件下容易分解转化,故而全钙含量仍处于较高水平(表 1)。相关分析表明,研究区土壤全钙含量与有机碳、全氮和 CEC 呈显著正相关,表明有机物质是影响土壤钙含量的显著因素。随着人为扰动强度的增加,土壤有机碳和全氮含量下降,进而降低了土壤钙的保持能力,导致全钙含量显著减少。

土壤水溶态钙与植物关系密切,是植物最易吸收利用的一类钙,也是最易流失的一类钙。根据分类^[27],火龙果、草地属高钙土壤(土壤水溶性钙>120 mg·kg⁻¹),玉米地、林地属低钙土壤(土壤水溶性钙<90 mg·kg⁻¹)。交换态钙与酸溶态钙都为土壤中的有效态钙。交换态钙易于迁移和被植物吸收利用,当水溶态钙因被植物吸收或淋失而浓度降低时,交换态钙即释放到土壤中进行补充。酸溶态钙主要包括与碳酸盐、硫酸盐及铁、锰氧化物结合的钙,其中碳酸盐结合态钙在酸性条件下容易释放成为活性钙成分。有机结合态钙为铁锰氧化物结合态钙,一定条件下可被还原成为生物可利用态。研究区土壤中钙的赋存形态主要为交换态,占总量的 59.4%~74.8%,

交换态钙含量高说明土壤中的钙活度很高,处于活跃的迁移和生物利用状态^[12,28]。与草地和人工林地相比,火龙果地和玉米地交换态钙和酸溶态钙的含量较低,可能与耕地作物密度大、产量高、吸收能力强有关,其减少了土壤中有效态钙的含量。残渣态钙取决于矿物的天然组成,在自然条件下极难释放利用^[20]。研究区残渣态钙含量较高(12.9%~27.4%),其中玉米地最高,这表明草地经过2年翻耕种植玉米,且仅施用化肥,会显著降低土壤中的可利用性钙含量。本研究中,除水溶态钙外,各形态钙与土壤全钙之间均呈显著正相关,表明全钙是补充不同级分的基础。

许多研究已经证实,土壤基本理化性质,如有机质、全氮、CEC和pH也会显著影响土壤中钙元素形态的分布^[29-31]。本研究中,有机碳与交换态钙、酸溶态钙、有机结合钙和残渣态钙之间均呈极显著正相关。高含量的钙使得土壤有机碳中胡敏酸的含量比例较高,胡敏酸能与钙、铁和镁等元素形成难溶于水的盐,胡敏酸在土壤中存留的时间长,对土壤离子态养分保蓄的能力较强,因此石灰土高含量钙也有利于有机质的积累^[32]。CEC是指土壤胶体能吸附的各种阳离子的总量,其大小决定了土壤可能提供的速效盐分容量、土壤保肥能力、有机质及植物吸收的有效性,阳离子交换量大的土壤能保持较多的速效养分^[22]。在岩溶区,土壤胶体所能吸附的阳离子主要为钙镁离子,因此研究区的CEC与全钙及各形态钙之间均呈正相关。土壤pH主要受土壤盐基状况的支配。盐基饱和度大,对酸的缓冲能力大,土壤pH也较高^[33]。本研究中,pH与水溶态钙呈正相关,与交换态钙呈极显著正相关。而酸溶态钙与有机态钙在一定条件下可转化成交换态钙,因此也与pH存在极显著的正相关。与其他土地利用方式相比,草地土壤中高含量的钙使得有机碳、全氮有较高的积累,CEC、pH值也为最高。

5 结 论

研究区土壤全钙含量介于 $1.93\sim 7.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $4.06\pm 2.29\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤钙的赋存形态主要为交换态,这表明断陷盆地区石灰性土壤中钙的可利用性较高;除水溶态钙外,土壤全钙和其他4种形态的钙含量与有机碳、全氮、全镁、CEC和pH呈显著正相关,这表明土地利用能够通过改变土壤基本理化性质而显著影响土壤钙形态分布特征。在长期耕种

条件下,土壤中有机质含量下降,降低了土壤钙保持能力,导致土壤全钙含量显著降低,尤以交换态钙和酸溶态钙下降最为明显。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Brandy N C, Weil R R. The Nature and Properties of Soil[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [3] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
- [4] Daoxian Y. Karst of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [5] 李小方. 岩溶环境中土壤-植物系统钙元素形态分析及其生态意义[D]. 桂林: 广西师范大学, 2006.
- [6] 蔡卓, 肖少荣, 郑海林. 元素形态分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 1996, 21(3): 242-246.
- [7] 杨慧, 陈家瑞, 梁建宏, 等. 桂林丫吉岩溶区土壤有机碳和pH值与钙形态分布的关系初探[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 1117-1126.
- [8] Wei L, Longjiang Y, Qiufang H, et al. Effects of microbes and their carbonic anhydrase on Ca^{2+} and Mg^{2+} migration in column-built leached soil-limestone karst systems[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 29(3): 274-281.
- [9] 申瑞玲, 郝云龙, 蒋士飞. 土壤重金属污染现状及其治理方法[J]. 西部资源, 2014(6): 137-139.
- [10] 魏兴琥, 雷俐, 刘淑娟, 等. 粤北岩溶峰林植物钙吸收、转运、返还能力及适应性分析[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 268-376.
- [11] Robert J, Christine A, Jörg P. Calcium Loss in Central European Forest Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(2): 588-595.
- [12] 陈家瑞, 曹建华, 梁毅, 等. 石灰土发育过程中土壤腐殖质组成及其与土壤钙赋存形态关系[J]. 中国岩溶, 2012, 31(1): 7-11.
- [13] Hui Y, Jianhong L, Jiarui C, et al. Soil Calcium Speciation at Different Geomorphological Positions in the Yaji Karst Experimental Site in Guilin, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2015, 6(4): 224-229.
- [14] 李忠云, 魏兴琥, 李保生, 等. 粤北岩溶峰丛自然坡面土壤钙元素的空间分布[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 62-68.
- [15] 李光超. 典型岩溶区板栗树下土壤钙元素的迁移及其生态效应[D]. 桂林: 广西师范大学, 2012.
- [16] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 等. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [17] 王宇, 张华, 张贵, 等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 283-295.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 余海, 王世杰. 土壤中钙形态的连续浸提方法[J]. 岩矿测试, 2007, 26(6): 436-440.

- [21] 赵仕花. 不同土地利用下土壤营养元素形态的研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2007.
- [22] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [23] 章程. 典型岩溶流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 165-169, 199.
- [24] 黄黎英. 毛村土壤溶解有机碳的季节变化及环境效应[D]. 桂林:广西师范大学, 2006.
- [25] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 298-303.
- [26] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292-304.
- [27] 周卫, 林葆. 土壤中钙的化学行为与生物有效性研究进展[J]. 土壤肥料, 1996(5): 19.
- [28] Dahlqvist R, Benedetti M F, Andersson K, et al. Association of calcium with colloidal particles and speciation of calcium in the Kalix and Amazon rivers [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(20): 4059-4075.
- [29] 谢丽萍, 王世杰, 肖德安. 喀斯特小流域植被—土壤系统钙的协变关系研究[J]. 地球与环境, 2007, 35(1): 26-32.
- [30] 王冬艳, 李月芬, 尚媛, 等. 吉林延边地区土壤钙元素生态地球化学[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 215-221.
- [31] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [32] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
- [33] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

Characteristics of calcium fraction distribution in soil under different land use types in karst fault-depression basins

LI Jing¹, YANG Cheng², JIN Zhenjiang¹, ZHU Tongbin³, CAO Jianhua³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR / Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Limestone soil in karst regions is characterized by high pH and calcium (Ca) content, which is one of the key elements in determining the structure and function of karst ecosystems, and is significantly affected by land use types. However, so far there are few studies on soil Ca fraction distribution under different land use types in karst fault-depression basins. This study chose four land use types including grassland, plantation, cornfield and dragon fruit landing the Bisezhai village, Xibeile country in Mengzi City, Yunnan Province as objectives, all of which are characterized by typical karst landforms. The BCR three-step sequential extraction method was used to determine the content of different Ca forms under different land use types in karst areas and influence factors. The results show land use types significantly influence soil total Ca content and its fraction distribution. Total Ca and various Ca forms in grassland soil are greatly higher than other land use types, and the lowest values appear in cornfield. The exchangeable Ca form is dominant in all soils, accounting for 59.4%—74.8% of total Ca, while the content of bound to organic matter-Ca is the lowest, accounting for 0.5%—1.0% of total Ca. The contents of total Ca and various Ca forms are significantly positively correlated with organic carbon, total N, total Mg, CEC, and pH. These data indicate that total Ca and various Ca forms interact with the physical and chemical properties of the soil to some extent.

Key words karst faulted basin, land use types, BCR three-step sequential extraction method, limestone soil, calcium speciation

(编辑 吴华英 黄晨晖)