

张鹏,胡晓农,杨慧,等.云南蒙自断陷盆地石漠化区土壤钙形态特征[J].中国岩溶,2020,39(3):368-374.
DOI:10.11932/karst20200305

云南蒙自断陷盆地石漠化区土壤钙形态特征

张鹏^{1,2},胡晓农¹,杨慧²,任梦梦^{1,2},周孟霞²,陈梁茵²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,桂林 541004)

摘要:以云南蒙自断陷盆地区为研究区,沿盆地、坡地到高原面分别采集不同石漠化程度下的土壤,采用连续浸提(BCR)提取方法测定不同形态钙含量,以探讨断陷盆地不同地貌部位不同石漠化程度石灰性土壤钙形态特征及其影响因素。结果表明:研究区土壤中钙以交换态钙含量最多,表明断陷盆地石灰土中钙的生物有效性高,各形态钙的大小顺序为交换态(61.04%)>残渣态(18.53%)>酸溶态(17.44%)>水溶态(1.63%)>有机结合态(1.36%)。地貌部位和石漠化程度对钙形态分布均具有重要影响,地貌部位的影响主要是通过影响温度、降雨等气候条件而影响土壤钙形态含量,而石漠化程度越强的土壤中钙含量尤其是交换态钙含量相对较高,这主要是由于裸露岩石的“聚集效应”造成的。

关键词:断陷盆地;地形;石漠化;钙形态

中图分类号:S153.61 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)03-0368-07 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

岩溶生态系统极其脆弱,与黄土、荒漠、高寒并列为中国四大生态环境脆弱区^[1]。由于生态环境脆弱,人地矛盾突出,社会经济活动不合理,石漠化在我国西南岩溶地区广泛发生^[2]。而岩溶断陷盆地作为我国西南岩溶地区一种独特的地貌形态,相对于其它岩溶类型,流域面积巨大,盆-山地地形变化剧烈,气候反差大,植被立地条件差^[3],从而导致不同程度石漠化的发生,当前,石漠化治理已成为我国西南岩溶区社会经济建设的组成部分,然而,岩溶区尤其是断陷盆地的石漠化治理的理论研究远远落后于石漠化治理实践,严重制约着石漠化区的生态恢复与重建^[4]。

岩溶生态系统是受岩溶环境制约的生态系统,钙是组成岩溶环境的主要元素^[5]。岩溶区石灰土具

有富钙偏碱的特征,因此,在岩溶区石灰土中普遍认为钙在各种营养元素中具有重要的地位,这主要是因为土壤中的钙不仅作为盐基离子影响着土壤的pH值,而且钙作为重要的阳离子键桥^[6],对岩溶区土壤有机碳的稳定性具有重要作用,同时钙离子对土壤的物理稳定性和保水性能等均具有重要的作用。上述研究除了与土壤全钙含量有关外,也必然是不同形态的钙在产生不同的作用。在岩溶地区随着石漠化发育程度的不同,除植物群落的逆向演替外,土壤质量(如物理、化学和生物性质)也发生了显著变化^[7]。一般来说,植物群落的正向演替有利于土壤养分的积累,而植物群落的逆向演替则会加剧土壤退化^[8]。随着石漠化程度的加剧,土壤退化程度可能进一步发展。值得注意的是,岩溶断陷盆地不同地貌中的土壤具有不同的理化性质,因此,断陷盆地土壤

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502501);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198153)

第一作者简介:张鹏(1995—),男,硕士研究生,研究方向:岩溶生态学。E-mail:1205441712@qq.com。

通信作者:杨慧(1981—),女,博士,副研究员,研究方向:岩溶生态学。E-mail:yanghui-kdl@karst.ac.cn。

收稿日期:2019-06-14

钙形态可能同时受到石漠化和地形的影响,并且可能展现出与其他地区土壤不一致的特点。而目前对断陷盆地土壤钙形态受石漠化和地形变化的影响程度还不清楚。本研究以云南省蒙自市断陷盆地区不同地貌部位不同石漠化程度的土壤为研究对象,探究其土壤钙形态分布特征,以期为深入了解钙元素在岩溶生态环境中的分布特征,指示岩溶地区土壤质量及生物有效性提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省蒙自市境内,它以典型的岩溶地貌为特征,地形以山地和盆地为主,构成了“盆—山”耦合的地质环境特征。气候上属亚热带季风

气候。根据蒙自断陷盆地的特点,本研究选取盆地、坡地和高原面三种不同地貌部位(后文用三种地貌来代替全称)土壤(图1)。三种不同地貌部位的年均降雨量分别为663 mm、575 mm和1 027 mm,年平均气温依次为19.0℃、15.6℃和13.7℃^[9]。由于20世纪50年代开展大面积砍伐树林造田等农业生产活动,水土流失严重,造成区域石漠化比较严重,虽然90年代末开始实施了退耕还林等生态工程,但植被恢复缓慢^[10],因此,蒙自断陷盆地区仍分布有不同程度的石漠化地区。

本研究选择不同地貌部位的不同石漠化程度(主要是轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化)的土壤作为研究对象,轻度石漠化类型的植被以人工种植的桉树、柏树等为主,中度石漠化土壤的植被以灌草丛为主,而重度石漠化类型的土壤上以低矮的草丛为主,有关植被类型的详细描述见文献[4]。

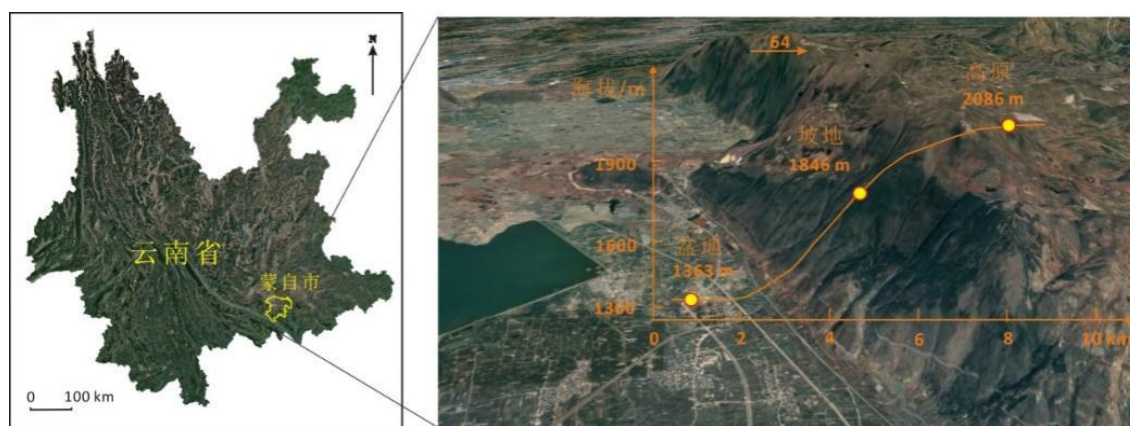


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1.2 样品采集与处理

2016年10月,在三种不同地貌部位,分别选取三种不同石漠化程度的土壤,并在不同石漠化程度土壤上分别选择至少3个不同的样地,每块样地间距超过100 m,采集土壤样品,共得到64个样品。取样原则为,每个取样点间隔20 m,随机选取5个1 m×1 m样方,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,在室温下风干,分别过60目和100目筛,用于测定土壤理化性质及不同形态钙含量。

1.3 测定内容及方法

土壤基本理化性质分析采用常规方法^[11],即测量pH值采用水:土为2.5:1,pHS-3C型pH计测

定;土壤有机碳采用重铬酸钾容量法测定;土壤全钙采用王水-高氯酸消解,ICP-OES法测定。土壤钙形态采用改进的BCR连续提取法^[12],将土壤中钙分为水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙、有机结合态钙和残渣态钙五种形态,具体操作步骤见表1。

1.4 数据处理

数据处理在Excel2010中进行,采用SPSS16.0进行描述性统计和单因素方差分析等,并用Canoco4.5进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 三种地貌部位土壤理化性质分析

表2为盆地、坡地、高原面地貌不同部位土壤基

表 1 钙形态提取方法
Table 1 Methods of extracting calcium forms

钙形态	浸提液	操作条件
水溶态 Ca	去离子水	200 次·min ⁻¹ 震荡 1 h, 3 000 r·min ⁻¹ 离心 30 min, ICP—OES 法测定
交换态 Ca	1 mol·L ⁻¹ AlCl ₃ 溶液	200 次·min ⁻¹ 震荡 2 h, 3 000 r·min ⁻¹ 离心 30 min, ICP—OES 法测定
酸溶态 Ca	3 mol·L ⁻¹ HCl溶液	80 ℃恒温水浴震荡 2 h, 3 000 r·min ⁻¹ 离心 30 min, ICP—OES 法测定
有机结合态 Ca	0.5 mol·L ⁻¹ Na ₂ SO ₄ 溶液	200 次·min ⁻¹ 震荡 2 h, 放置 24 h, 3 000 r·min ⁻¹ 离心 30 min, ICP—OES 法测定
残渣态 Ca	HNO ₃ +HF 溶液	烘干, 重新研磨, 同总钙的测定

本理化性质,三种地貌中土壤 pH 值在 6.37~6.69 之间,平均值为 6.47,属中性偏碱。土壤有机碳和全氮含量在三种地貌部位的平均值规律一致,均表现为随海拔位置的升高而逐渐增大。土壤有机碳和全氮含量在三种不同地貌部位均有不同程度的差异,而土壤 C/N 在三种地貌部位之间差异不显著。坡地土壤有机碳 δ¹³C 最重,其次为盆地,高原部位的最轻。

表 2 三种地貌土壤理化性质(平均值±标准差)
Table 2 Physical and chemical properties of soil in three landforms (average±standard deviation)

地貌类型	pH	SOC/×10 ⁻³	TN/×10 ⁻³	C/N	δ ¹³ C _(V-PDB) /‰
盆地	6.49±0.17ab	24.97±2.53b	2.21±0.18b	13.37±1.02a	-18.90±0.90c
坡地	6.69±0.03b	35.09±2.65a	2.74±0.19ab	15.10±0.80a	-15.22±0.47b
高原	6.37±0.03a	39.16±1.72a	3.24±0.17a	14.78±0.69a	-21.14±0.21a

注:采用 LSD 检验,同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.2 三种地貌部位土壤中钙的形态分析

表 3 为三种地貌部位土壤钙含量空间分布特征。总体上,断陷盆地各形态钙中以交换态钙含量最多,平均为 2.24×10⁻³,占土壤全钙的 61.04%;有机结合态钙含量最低,平均为 0.05×10⁻³,仅占土壤全钙含量

的 1.36%。各形态钙含量的大小顺序为交换态 Ca(61.04%)>残渣态 Ca(18.53%)>酸溶态 Ca(17.44%)>水溶态 Ca(1.63%)>有机结合态 Ca(1.36%)。从不同地貌部位来看,盆地区各形态钙含量总和最低(为 2.98×10⁻³),坡地各形态钙含量总和最高(为 4.36×10⁻³),高原区各形态钙含量为 3.61×10⁻³。

表 3 三种地貌部位土壤钙形态分布特征(平均值±标准差)
Table 3 Spatial distribution characteristics of soil calcium content in three landforms (average±standard deviation)

地貌类型	水溶态钙/×10 ⁻³	交换态钙/×10 ⁻³	酸溶态钙/×10 ⁻³	有机结合态钙/×10 ⁻³	残渣态钙/×10 ⁻³
盆地	0.05±0.01a	2.04±0.24a	0.46±0.05c	0.04±0.00b	0.39±0.03c
坡地	0.10±0.01b	2.77±0.18b	0.76±0.04b	0.05±0.00ab	0.68±0.03b
高原	0.05±0.00a	2.07±0.10a	0.65±0.03a	0.06±0.00a	0.78±0.03a

注:采用 LSD 检验,同列不同字母表示各形态钙含量在不同地貌之间差异显著(P<0.05)。

地貌特征及取样部位对酸溶态钙和残渣钙的影响最为显著,这两种钙形态在三种地貌部位的差异性显著。而水溶态钙和交换态钙含量表现为在盆地和高原之间的差异不显著,这两种形态的钙在坡地部位的含量与其它两种地貌部位之间的差异显著。

2.3 不同石漠化等级土壤中钙的形态分布特征

图 2 是盆地、坡地和高原面地貌中重度、中度、轻度石漠化部位样品中各形态钙含量变化情况,三种地貌部位中,各形态钙含量均表现为重度石漠化程度的土壤中含量较高。比如,盆地区,水溶态钙、交

换态钙和酸溶态钙含量均在重度石漠化区最高;坡地区,水溶态钙、交换态钙和残渣态钙含量均在重度

石漠化区最高;高原区交换态钙、酸溶态钙和残渣态钙含量均在重度石漠化区最高。

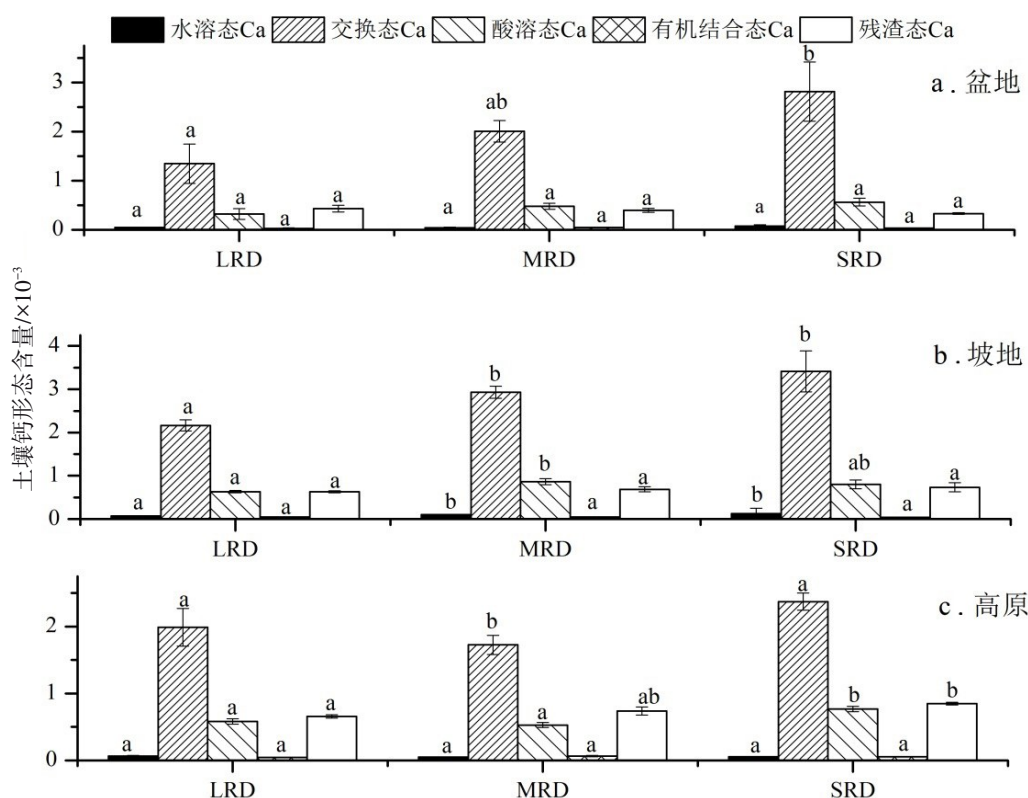


图2 三种地貌部位不同石漠化等级各形态钙特征

Fig. 2 Characteristics of calcium forms of different rocky desertification grades in three landforms

LRD—轻度石漠化 MRD—中度石漠化 SRD—重度石漠化。采用LSD检验,同一地貌部位不同石漠化程度不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

从同一地貌部位不同石漠化等级土壤各形态钙含量来看:盆地区,除交换态钙在轻度和重度石漠化区土壤中差异性显著外,其余各相同形态的钙含量在三种石漠化等级之间差异性均不显著。坡地区,水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙在重度与中度石漠化区之间差异不显著,但均与轻度石漠化区的上述钙形态之间存在显著性差异;有机结合态钙和残渣态钙在三种石漠化等级之间均不存在显著性差异。高原区,交换态钙、酸溶态钙、残渣态钙在重度与中度、重度与轻度石漠化区之间存在显著性差异,在中度与轻度石漠化区之间差异不明显;水溶态钙与有机结合态钙在三种石漠化等级之间均不存在显著性差异。

各形态钙含量分布与石漠化程度冗余分析结果如图3所示。在高原,石漠化程度与水溶态钙和有机结合态钙连线夹角均接近90°,表明石漠化与水溶态钙和有机结合态钙相关性不明显,石漠化程度与交换态钙、酸溶态钙和残渣态钙连线夹角均呈锐角,显

示为正相关关系;在坡地,除有机结合态钙外,其余各形态钙与石漠化连线夹角均为锐角,说明其余各形态钙与石漠化成正相关关系,有机结合态钙与石漠化成负相关关系;在盆地,除残渣态钙外,其余各形态钙与石漠化呈正相关关系,残渣态钙与石漠化呈负相关关系。

2.4 各形态钙与土壤理化指标的关系

表4为土壤各钙形态与理化性质的相关关系,其中水溶态钙、交换态钙、酸溶态钙以及残渣态钙含量与土壤有机碳、全氮之间均呈极显著正相关关系,并且交换态钙和酸溶态钙与土壤C/N呈极显著正相关关系;而有机结合态钙除与有机碳稳定同位素值 $\delta^{13}\text{C}$ 呈极显著负相关关系外,与土壤其它理化性质之间的相关关系均不显著;交换态钙和残渣态钙与有机碳稳定同位素值 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别呈显著正相关和极显著负相关关系。

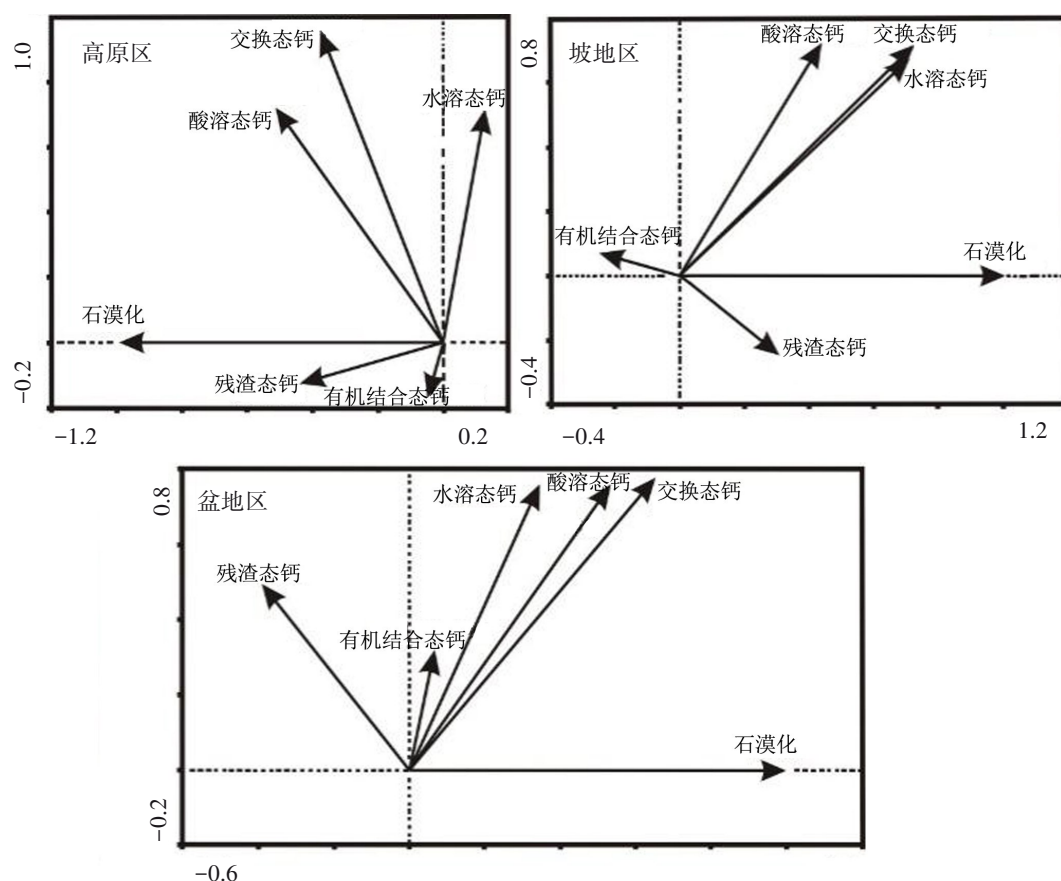


图3 三种地貌部位钙形态与石漠化程度冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of calcium form and rocky desertification degree in three landforms

表4 各形态钙含量与土壤理化性质的关系

Table 4 Relationship between various content of calcium forms and soil physical-chemical properties

	SOC	TN	C/N	TP	TK	$\delta^{13}\text{C}$
水溶态 Ca	0.385**	0.401**	0.042	0.035	0.156	0.167
交换态 Ca	0.702**	0.613**	0.399**	-0.074	-0.134	0.302*
酸溶态 Ca	0.798**	0.732**	0.376**	-0.093	-0.442**	-0.052
有机结合态 Ca	0.122	0.196	-0.118	0.141	-0.059	-0.375**
残渣态 Ca	0.376**	0.424**	0.019	0.057	-0.413**	-0.574**

注:*代表在0.05的水平上显著相关;**代表在0.01的水平上极显著相关。

3 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,土壤具有较高的钙含量^[10]。本研究中,三个地貌部位的土壤虽然都是石灰性土壤,但全钙含量具有明显差异,表明,除土壤母质外,土壤中钙含量也受地形地貌和石漠化程度等因素的显著影响。地形地貌是岩溶地区土壤钙迁移富集的制约因素之一^[13]。在不同的地貌条件

下,植被、坡度、坡向及成土母质等都是有差异的,水热再分布也是完全不同的^[14],而断陷盆地的盆地底部区干旱少雨,周边山地及斜坡地带则降雨丰沛。地形地貌通过对水分和热量的重新分配以及母质类型影响成土过程,大的地形会影响雨量的分配,中小地形主要影响土壤的水热条件、养分含量、质地类别和土层的厚薄,使土壤呈现地域性分布规律^[15]。本研究中,盆地区各形态钙含量均最低,可能是由于盆地区降雨少,蒸发强烈^[9],水动力条件较差,碳酸盐岩

溶解较少,导致土壤中钙的积累量减少,而高原和斜坡区,水动力条件较强,易形成产汇流,碳酸盐岩溶解多,土壤被富钙离子的水溶液或洞穴水浇灌,因此,高原区和坡地上土壤中全钙含量较盆地的高。酸溶态钙主要是与碳酸盐、硫酸盐以及铁锰氧化物结合的钙,酸性条件下易释放为活性钙成分,水动力条件好的情况下,在补给区会溶解二氧化碳,使水溶液呈酸性,溶解大量酸溶态钙,下游在流经土壤时,溶液达到饱和会结晶出一部分酸溶态钙,因此在水动力条件好易形成产汇流的坡地和高原区钙含量较高,盆地区含量较少;水溶态钙和交换态钙也呈现类似的趋势,这主要是因为上述两种钙形态主要是受水动力条件的影响;土壤中有结合态钙和残渣态钙含量随海拔升高而升高,其可能原因是高海拔区光照更好,植被较发育,土壤腐殖质含量多,同时高原和坡地岩石矿物含杂质较多,不易溶解,因此有机结合态钙和残渣态钙较多。

本研究中,石漠化发生程度对土壤中钙的形态也具有重要的影响,三种地貌形态中均基本表现为土壤全钙含量在重度石漠化区最高。除了高原水溶态钙和有机结合态钙、坡地有机结合态钙、盆地残渣态钙外,其余各形态钙与石漠化均呈正相关关系。这主要是由于裸岩的聚集效应造成的^[16]。所谓裸岩的聚集效应是指裸露的岩石将大气沉降的养分及其岩溶产物汇聚到周围的土壤中。随着石漠化程度增加,裸岩聚集效应逐渐增强^[16]。尤其是在重度石漠化环境中,这种聚集效应非常明显。另外,石漠化程度越严重,地表微岩溶负地形越多,而分布于微岩溶负地形中的土壤较好的避免了侵蚀流失^[17],同时可以截留溶解了大量钙离子的地表径流,引起土壤中各形态钙含量升高。比如,易于迁移和被植物吸收的交换态钙在这种地表微岩溶负地形中,由于截留溶解有大量交换态钙离子的地表径流,且不易被淋滤而脱钙,使石漠化等级高的区域土壤更容易积累交换态钙离子。水溶态钙和酸溶态钙也主要受水动力条件的影响,随着水流的迁移而迁移,因此也随石漠化等级的增加而增加。有机结合态钙主要是受土壤有机质的影响,本研究区前期的研究成果发现,随着石漠化程度加剧土壤有机碳含量增加^[4],这一结果也与前人的研究结果一致^[18],因此,土壤中有机结合态钙含量是随石漠化的加剧而增加。土壤中残渣态钙主要取决于矿物的天然组成,主要受原位岩性的影响,在本研究中相同地貌环境下土壤中残渣态含

量差异性不显著。

4 结 论

研究区土壤中各种形态钙含量以交换态钙含量最多,表明蒙自断陷盆地石灰土中钙的可利用性较高。土壤全钙和各形态钙含量同时受地貌和石漠化程度的影响,研究表明地貌部位主要是通过影响温度和降雨等垂直气候条件而影响土壤中钙的存在形态。而石漠化程度主要是受裸岩的聚集效应影响而使得重度石漠化区土壤钙和各形态钙含量增加。

参考文献

- [1] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical karst of south China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997, Supplement-band(108):81-90.
- [2] 李强,蒲俊兵,黄妮,等. 断陷盆地生态环境地质分异及石漠化演变机理的研究途径[J]. 地球科学进展, 2017, 32(9): 899-907.
- [3] 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. 生态学报, 2016, 36(22):7103-7108.
- [4] Yang H, Zhang P, Zhu T, et al. The Characteristics of Soil C, N, and P Stoichiometric Ratios as Affected by Geological Background in a Karst Graben Area, Southwest China[J]. Forests, 2019, 10(7):601.
- [5] 曹建华. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M]. 北京:地质出版社,2005.
- [6] Rowley MC, Grand S, Verrecchia ÉP. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. Biogeochemistry, 2018;137(1-2):27-49.
- [7] Li YB, Shao JA, Yang H, et al. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China[J]. Environmental Geology, 2008, 57(3): 621-627.
- [8] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [9] 王赛男,蒲俊兵,李建鸿,等. 岩溶断陷盆地“盆—山”耦合地形影响下的气候特征及其对石漠化生态恢复的影响探讨[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1):50-59.
- [10] 李菁,杨程,靳振江,等. 断陷盆地区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.
- [11] 鲍士旦. 土壤学[M]. 北京:中国土壤出版社, 2000: 30-34, 42-49.
- [12] 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.
- [13] 韦启璠,陈鸿昭,吴志东,等. 广西(山弄)岗自然保护区石灰土的地球化学特征[J]. 土壤学报, 1983(1):30-42.

- [14] 张美良,邓自强.我国南方喀斯特地区的土壤及其形成[J].贵州工学院学报,1994(1):67-75.
- [15] 杨扬,赵润野,黄浩育.土壤的形成与特性[J].农村经济与科技,2017,28(14):9-11.
- [16] 盛茂银,刘洋,熊康宁.中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的响应[J].生态学报,2013,33(19):6303-6313.
- [17] 魏兴琥,徐喜珍,雷俐,等.石漠化对峰丛洼地土壤有机碳储量的影响:以广东英德市岩背镇为例[J].中国岩溶,2013,32(4):371-376.
- [18] 王霖娇,李瑞,盛茂银.典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J].生态学报,2017,37(5):1367-1378.

Characteristics of soil calcium forms of rocky desertification areas in the Mengzi fault-depression basin, Yunnan

ZHANG Peng^{1,2}, HU Xiaonong¹, YANG Hui², REN Mengmeng^{1,2}, ZHOU Mengxia², CHEN Liangyin²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Calcium(Ca) is one of the main elements in the karst soil environment. Soil Ca is not only a base ion, which can affect the pH value of soil and the stability of organic carbon, but also has an important impact on the physical stability and water retention performance of soil; thus it is an important indicator of soil quality. The Mongzi fault-depression basin in the eastern Yunnan is one of the most serious rocky desertification areas of our country. It is of great significance to the rocky desertification control and ecological restoration to study the soil Ca forms distribution. This work focused on the soil in different landscapes of the rocky desertification area of the Mongzi basin (basin, slope and plateau). The improved BCR continuous extraction method was used to study the soil Ca forms and influencing factors in the basin. Results show that, (1) In the study area, the soil content of exchangeable Ca is the highest with large bioavailability. The order of all forms of Ca is exchangeable Ca (61.04%) > residual Ca (18.53%) > acid soluble Ca (17.44%) > water soluble Ca (1.63%) > organic bound Ca (1.36%). (2) The degree of rocky desertification has great impact on the morphological distribution of Ca. The higher the degree of rocky desertification, the higher the content of activated Ca, especially exchangeable Ca, which is mainly affected by the "aggregation effect" of exposed rocks. (3) The soil properties of organic carbon and total nitrogen content have significant influence on the Ca form, indicating that the Ca fixation and carbon fixation of lime soil in karst areas are processes of interaction and mutual influence. Therefore, in the process of rocky desertification control in the Mengzi basin, the influence of geological environment should be considered together with the climate factors, and species should be selected properly according to local conditions. All of these measures are of great significances to promote ecological restoration in rocky desertification areas.

Key words fault-depression basin, landform, rocky desertification, calcium form

(编辑 张玲 吴华英)