

梁建宏, 崔旭东, 文来艳, 等. 桂林典型岩溶区和非岩溶区土壤剖面钙镁形态迁移对比[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 220-227.

DOI: 10.11932/karst20220204

桂林典型岩溶区和非岩溶区土壤剖面钙镁形态迁移对比

梁建宏¹, 崔旭东², 文来艳^{3,4}, 刘鼎⁴, 伊晨旭⁴, 黄可尊⁴, 王俊⁵

(1. 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, 广西 桂林 541004;

2. 山东建勘集团有限公司, 山东 济南 250031; 3. 广东省云浮市罗定市廷锜纪念中学,

广东 罗定 527200; 4. 广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541006;

5. 山西农业大学(山西省农业科学院)玉米研究所, 山西 忻州 034000)

摘要:文章以桂林典型岩溶区和非岩溶区土壤剖面为研究对象,采用改进的 Tessier 元素形态连续提取法,测定岩溶区和非岩溶区土壤钙(Ca)和镁(Mg)元素离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机质结合态(包括部分硫化物)和残渣态等形态,探讨岩溶区和非岩溶区土壤 Ca、Mg 形态在土壤剖面中的迁移变化特征。结果表明:(1)岩溶区石灰土剖面中,随剖面深度加深,pH 值增大,而土壤有机质、全氮(N)、全磷(P)含量减少,Ca 元素主要以交换态存在且在各土壤剖面中含量相近,Mg 元素主要是以残渣态赋存在土壤剖面中,随着土壤剖面深度腐殖酸结合态百分比减少,存在累积现象;(2)在非岩溶地区酸性土壤中,土壤总钙较低。在土壤剖面 0-60 cm 以强有机结合态为主,深层剖面(大于 60 cm)以残渣态为主;Mg 元素有效态含量较低,非岩溶区土壤 Mg 元素以腐殖酸结合态和残渣态为主,与岩溶区土壤类似,非岩溶区 Mg 元素在土壤中也存在一定累积。

关键词:石灰土;酸性土;Tessier;形态连续提取法;淋溶

中图分类号:S153 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2022)02-0220-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

全球裸露岩溶面积约 1 790 万 km²,主要分布在中国、越南、法国、斯洛文尼亚、美国等国家。我国南方岩溶区是世界上岩溶集中连片分布面积最广的地区,主要分布在云南、贵州和广西大部分地区,以及湖南、湖北、重庆、四川、广东等 8 省(区、市),总面积 78 万 km^{2[1]},以桂林为代表的南方岩溶

区是我国典型的岩溶地区。岩溶区土壤是碳酸盐岩经过物理、化学和生物作用形成的地域性土壤。基于岩溶区土壤成土母质的碳酸盐岩含有丰富的钙和镁,岩溶区土壤具有富钙镁元素、偏碱性的特点;非岩溶区主要是碎屑岩地区,土壤主要以酸性土壤为主。

土壤中钙元素是植物生长必需的营养元素,对植物的生长发育及新陈代谢起着重要作用。土壤中

基金项目:广西自然科学基金项目(2020GXNSFAA238034);中国地质调查项目(DD20221758);中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务项目(2017008)

第一作者简介:梁建宏(1982—),男,博士,主要从事岩溶环境地球化学研究。E-mail: liangjianhong@mail.cgs.gov.cn.

通信作者:崔旭东(1983—),男,高级工程师,主要从事水文与水资源研究。E-mail: 13589148713@163.com.

收稿日期:2021-08-20

的钙及其形态的变化影响着土壤的物理、化学性质,也影响着植物对钙及其它养分的吸收。钙可以一定程度上解除土壤中铝、锰等元素的毒性^[2]。镁是仅次于氮、磷、钾的植物第四大必需元素,植物所需的镁主要来自土壤,对镁的吸收利用很大程度上依赖于土壤中镁的含量及供应机制。镁一般只有溶解在水溶液中才能进行迁移,所以土壤中矿物态镁、代换态镁和有机态镁只有转变为水溶态镁后才会土壤中迁移。镁在土壤中的移动速率与土壤质地、降雨量、石灰施用量、化学肥料的施用有关^[3]。一般认为,镁在中性至酸性土壤中易于迁移,而在黏性土壤中难以迁移;随着降雨量增大,土壤中水溶性镁含量增多,镁的移动性增大;土壤中施用石灰、过磷酸钙等则会降低镁的移动速度^[4]。土壤中镁离子的外围包有很厚的水化层,负电荷对它的吸引力较弱,造成镁土壤中的镁容易淋失,因此,镁是土壤中极易淋失的元素之一^[5]。有研究表明,钙、镁流失量与微生物量和降雨量的变化具有相关性^[6],此外,除了石灰土土壤腐殖质组成和含量^[7],土地利用方式^[8]、成土母质^[9]也影响着土壤中钙含量及赋存形态,同时,钙总量和形态又影响着土壤营养元素的有效性^[10]。因此,土壤剖面是研究元素迁移的理想研究对象。本文选取典型岩溶区土壤剖面和非岩溶区土壤剖面进行对比,采用改进的 Tessier 元素形态连续提取法,测定岩溶区和非岩溶区土壤 Ca 和 Mg 元素离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机质结合态(包括部分硫化物)和残渣态等形态,探究岩溶区和非岩溶区土壤中钙元素和镁元素在土壤剖面中的迁移特征,为岩溶区和非岩溶区土壤改良和提质增效、评价土壤中钙、镁元素的淋溶风险提供科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

岩溶区土壤剖面取自桂林市潮田乡毛村岩溶生态试验站,非岩溶区土壤剖面取自桂林市潮田乡赖村林地。其中,岩溶区地层主要由上泥盆统融县组 and 上古生界中泥盆统东岗组碳酸岩盐及一套含铁砂岩组成,其中上古生界中泥盆统东岗组、上泥盆统融县组主要为浅海相碳酸盐岩沉积^[11],非岩溶区地层为第四系覆盖和沉积层^[12]。两个样地相距约 1 km,

均位于广西壮族自治区桂林市灵川县潮田乡,距桂林市中心 30 km。气候属于中亚热带湿润季风气候,4-7 月降雨量占全年的 70%,多年平均降雨量为 1 915.2 mm,多年平均水面蒸发量为 1 378.3 mm,年平均气温为 18.6 ℃。据桂林市气象站多年观测资料统计和文献记录^[13],一般雨季为每年 3 月份到 8 月份,最大降雨量连续出现在 4-7 月份;每年 9 月份到次年 2 月份一般为枯季。

1.2 研究方法

两个样地植被类型均为林地,土壤采集均使用剖面土采集方法,挖宽 1 m、长 2 m、深 1.5 m 土壤剖面,从表层至 140 cm 对剖面分层,每 20 cm 为一个层,共分为 7 层,然后自下而上逐层采集土样。石灰土剖面土壤采深至 105 cm,每 15 cm 为一层,共采集 7 个土样。放入保鲜袋带回实验室进行分析测定。从野外带回的土壤样品,在实验室内自然风干→粗碎→去碎石、根茎→过 20 目塑料筛(测 pH 用)→细磨→过 100 目筛,备用。测试土壤基本理化性质方法参考文献 [14],全氮采用半微量凯氏定氮法;全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 法;pH 采用测定采用水土比 4:1 电位法。

土壤元素形态的提取方法主要为连续提取法。该方法比单一提取法可提供更多的信息并具有更多优点,如符合土壤元素自然状态下所经受的作用,可以推测各形态的转化趋势以及可以自检回收率等^[15]。经典的连续提取法是 Tessier 五步提取法,该方法将土壤微量元素形态划分为:① 可交换态;② 碳酸盐结合态;③ 铁锰氧化物结合态;④ 有机质结合态和;⑤ 残渣态。该方法自 1979 年创立以来获得了广泛的应用^[16],但是 Tessier 五步提取法仍然存在重现性差、可比性差等缺点。随着分析准确度要求的提高,该方法表现出一定的局限性。本文对土壤中 Ca 和 Mg 形态分析所选择的方法是改进的 Tessier 五步提取法,更符合我国土壤元素形态分析的要求^[17]。该方法的形态划分和提取剂见表 1。土壤中 Ca 和 Mg 的总量和残渣态土壤消解后同各形态提取液使用 ICP-OES(PerkinElmer Optima 2000 DV,美国)测定。

1.3 数据分析方法

数据分析软件使用 IBM SPSS 19.0 (IBM SPSS Corp., Chicago, IL, USA)。数据由平均数和标准误差表示 (means ± SEs)。

表 1 土壤样品中元素的形态划分与相应提取剂

Table 1 Morphological classification of elements in soil samples and the corresponding extracting reagents

形态划分	提取剂
离子交换态(包括水溶态)	25 mL 1 mol·L ⁻¹ NH ₄ Cl 溶液 (pH 为 7.0±0.2)
碳酸盐结合态	25 mL 1 mol·L ⁻¹ NaAc 溶液 (pH 为 5.0±0.2)
腐殖酸结合态(松结有机结合态)	50 mL 0.1 mol·L ⁻¹ Na ₄ P ₂ O ₇ 溶液 (pH 为 10±0.2)
铁锰氧化物结合态	50 mL 0.25 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl-0.25 mol·L ⁻¹ HCl 溶液
强有机结合态 (包括部分硫化物态)	3 mL 0.02 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 溶液+ 5 mL φ=30% 的 H ₂ O ₂ (pH=2)+ 5 mL 1.6 mol·L ⁻¹ NH ₄ Ac-1.6 mol·L ⁻¹ HNO ₃ 溶液

2 结果与分析

2.1 岩溶区和非岩溶区土壤理化性质

岩溶区土壤为中性偏碱性石灰土壤,土壤 pH 随土壤深度的增加而增大,并且从表层往下依次增大,石灰土剖面的 pH 范围都在 6.6 以上,90~105 cm 土样 pH 为 7.3。石灰土剖面有机质、全氮随土壤剖面深度的增加而逐渐减少,并且在 15~30 cm 处变化较大,这与研究组前期研究结果一致^[18-19]。全磷随土壤剖面深度的增加而逐渐减少,据有关资料土壤全磷含量<0.04%。即为缺磷^[14],这表明岩溶区石灰土表层土 30 cm 以下的剖面土壤较缺 P。土壤中 P 的含量除与成土母质相关外,也和成土过程中的其它因素有关,其中生物积累和成土作用是较为重要的原因,P 的迁移能力较弱,加之石灰土可利用性较低^[20],不易从剖面中淋溶下移,所以土壤剖面表层 P 的含量高于下层^[21]。非岩溶区土壤的 pH 在 4.18~4.97 之

间,偏酸性。土壤有机质含量沿剖面自上而下逐层递减,全氮含量也自上而下逐层递减,土壤剖面各深度全磷含量基本持平(表 2)。

2.2 岩溶区和非岩溶区土壤钙元素形态

岩溶区 Ca 元素在石灰土中主要是以离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态和强有机结合态(包括部分硫化物态)存在,离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态和强有机结合态(包括部分硫化物态)分别占总全量的 87.1%、8.47% 和 2.26%。离子交换态在石灰土剖面各层中存在的含量相差不大,说明其迁移性很强,交换态 Ca 是吸附于土壤胶体表面的 Ca 离子,是土壤中主要的盐基离子之一;交换态 Ca 能被溶液中的交换性离子代换下来,因此和溶液态 Ca 保持着动态平衡^[21],显著突出了岩溶区石山富 Ca 的特点;其余三个形态之和占总含量的比例不到 3%。从图 1 可以看出,钙的离子交换态最大值出现在中层剖面 45~60 cm 处。

表 2 毛村岩溶区和狮赖非岩溶区样地土壤理化性质

Table 2 Physicochemical properties of the soil in Maocun karst site and Shilai non-karst site

	土壤剖面/cm	pH	有机质/%	全磷/%	全氮/%	总钙/g·kg ⁻¹	总镁/g·kg ⁻¹
毛村岩溶区	0~15	6.64±0.1	5.53±0.01	0.041±0.002	0.15±0.02	9.37±0.05	2.20±0.02
	15~30	6.94±0.2	3.34±0.01	0.033±0.003	0.09±0.005	8.85±0.01	6.26±0.05
	30~45	7.14±0.1	2.75±0.01	0.028±0.002	0.067±0.004	8.14±0.02	5.56±0.05
	45~60	7.24±0.2	2.64±0.01	0.026±0.001	0.064±0.005	9.28±0.04	6.74±0.06
	60~75	7.27±0.2	2.11±0.01	0.025±0.001	0.06±0.002	7.86±0.05	5.76±0.01
	75~90	7.28±0.2	1.89±0.01	0.021±0.001	0.047±0.001	7.49±0.05	5.64±0.04
	90~105	7.31±0.1	1.27±0.01	0.021±0.001	0.036±0.001	8.10±0.04	5.64±0.02
	狮赖非岩溶区	0~15	4.25±0.1	4.07±0.01	0.599±0.003	0.094±0.005	0.35±0.02
15~30		4.20±0.3	2.79±0.02	0.517±0.002	0.069±0.002	0.069±0.01	0.59±0.005
30~45		4.18±0.2	2.42±0.03	0.675±0.005	0.074±0.004	0.009±0.001	0.68±0.01
45~60		4.30±0.2	1.97±0.01	0.567±0.003	0.056±0.008	0.011±0.001	0.64±0.02
60~75		4.56±0.2	1.89±0.01	0.412±0.002	0.050±0.002	0.026±0.002	0.65±0.004
75~90		4.64±0.2	1.47±0.01	0.518±0.003	0.044±0.002	0.088±0.001	0.68±0.02
90~105		4.97±0.2	1.32±0.01	0.583±0.002	0.043±0.001	7.74±0.05	0.72±0.01

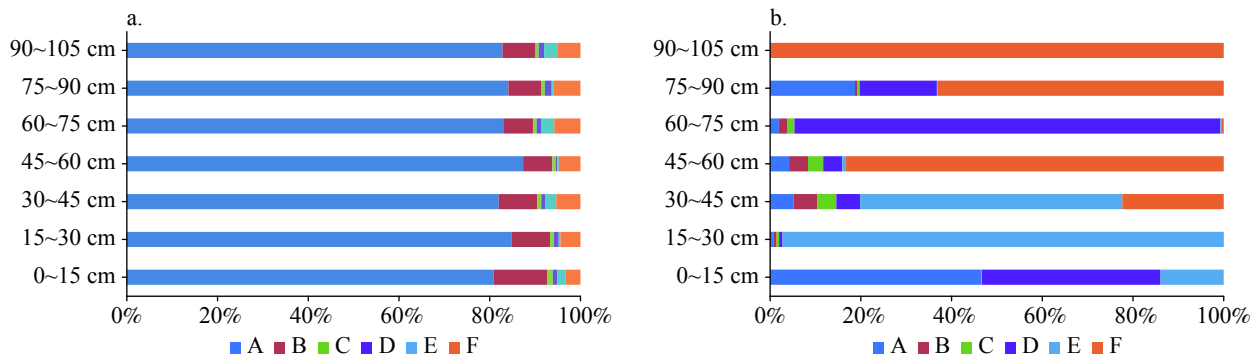


图 1 岩溶区 (a) 和非岩溶区 (b) 剖面土壤钙元素形态百分比

A-离子交换态 (包括水溶态) B-碳酸盐结合态 C-腐殖酸结合态 (松结有机结合态)
D-铁锰氧化物结合态 E-强有机结合态 (包括部分硫化物态) F-残渣态

Fig. 1 Percentages of Ca fractions in soil profiles in the karst area (a) and the non-karst area (b)

A-Ion-exchange fraction (including the water-soluble fraction) B-Carbonate-bound fraction C-humic acid-bound fraction D-Fe-Mn oxide-bound fraction
E-Strong organic-bound fraction (including some sulfide) F-residual fraction

非岩溶区土壤中 Ca 元素在表层土主要是以离子交换态 (包括水溶态)、铁锰氧化物结合态和强有机结合态 (包括部分硫化物态) 存在, 特别是以离子交换态 (包括水溶态) 的含量为主, 说明其迁移性相对较强, 可能为植物落叶等因素影响而造成。各层土壤的 Ca 元素在离子交换态 (包括水溶态)、碳酸盐结合态中含量均小于 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在腐殖酸结合态中的含量均小于 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 说明非岩溶区土壤 Ca 元素的迁移性很弱。剖面 0~45 cm 处 Ca 元素强有机结合态含量较高, 45~105 cm 强有机结合态含量均小于 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 75~105 cm 处 Ca 元素以残渣态存在; 最底层土 Ca 元素残渣态含量和总含量相对较高, 为 0.77%, 剖面最底层相比于其它剖面深度存在高差异的原因可能是该层接近基岩。其他各层 Ca

元素总含量很低, 均小于 0.1%。说明非岩溶区土壤含钙量低, 有效态含量少, Ca 元素迁移性很弱, 土壤有缺 Ca 倾向。

2.3 岩溶区和岩溶区土壤镁元素形态

从图 2 可以看出, 岩溶区 Mg 元素在石灰土剖面中以残渣态存在为主 (97.45%), 在离子交换态 (包括水溶态) (0.61%)、碳酸盐结合态 (0.11%) 和腐殖酸结合态中的含量不高 (三个形态占全量 1.80%), 说明 Mg 元素的迁移性很弱, 相对于 Ca 元素的强迁移性而言, 其在土壤中存在累积现象; Mg 元素的总含量很高, 但是有效态的含量却很低。Mg 总量最大出现处于 45~60 cm 剖面处, 石灰土剖面中的离子交换态 Mg 仅占总量的 0.99%。非岩溶区 Mg 元素在各层面

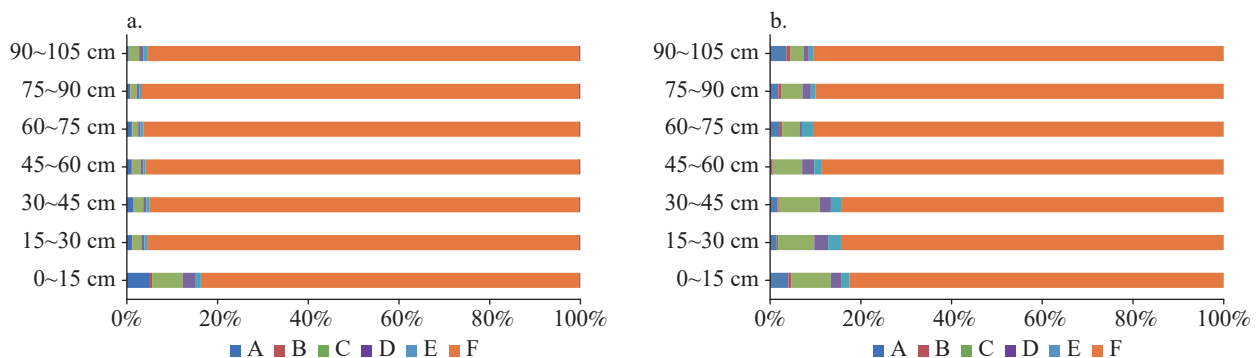


图 2 岩溶区 (a) 和非岩溶区 (b) 剖面土壤镁元素形态百分比

A-离子交换态 (包括水溶态) B-碳酸盐结合态 C-腐殖酸结合态 (松结有机结合态)
D-铁锰氧化物结合态 E-强有机结合态 (包括部分硫化物态) F-残渣态

Fig. 2 Percentage of Mg fractions in soil profiles in the karst area (a) and the non-karst area (b)

A-Ion-exchange fraction (including the water-soluble fraction) B-Carbonate-bound fraction C-humic acid-bound fraction D-Fe-Mn oxide-bound fraction
E-Strong organic-bound fraction (including some sulfide) F-residual fraction.

土壤中的形态分布大致一样,都是以残渣态存在为主,在土壤中存在积累现象;在离子交换态(包括水溶态)和碳酸盐结合态(包括水溶态)和碳酸盐结合态中的含量不高,几乎为零,腐殖酸结合态含量不到总含量的10%,说明镁元素在该地土壤中迁移性较弱;腐殖酸结合态在上层土壤中的含量高于下层土壤。

3 结论与讨论

土壤钙含量主要受地球化学作用的影响,与成土过程和母质有关。在湿润地区的土壤,水热条件较好,受强淋溶作用的影响,土壤中钙的含量多在1%以下,有时低于0.1%。而在北方干旱和半干旱地区的石灰性土壤,钙含量在1%~10%,甚至超过10%,发生相对富集。在成土过程中,降水是影响土壤钙含量的主要因素,其次是母岩和生物作用^[22]。根据土壤中水溶性钙的含量,将土壤供钙水平分为三级^[22]:

低钙土壤:土壤水溶性钙 $<90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;

中钙土壤:土壤水溶性钙 $91\sim 120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;

高钙土壤:土壤水溶性钙 $>120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

岩溶区土壤钙元素主要以离子交换态赋存,石灰土中有效态Ca比例较大。土壤剖面中表层土的钙含量最高,这可能是因为石灰土壤中的Ca主要以离子交换态存在,容易被生长在其上的喜钙植物根系所吸收,最终富钙的枯枝落叶归还土壤可能是导致表层土壤钙总量最高的原因^[23]。岩溶区土壤剖面中离子交换态的最高含量出现在45~60 cm处,可能是因为主要Ca元素被淋溶后以离子交换态存在,使Ca离子从土壤表层往下层迁移,但随着土壤深度的增加,土壤的黏度增大,钙离子在土壤剖面中的迁移减弱,在45~60 cm处达到最大值,60 cm以下的土壤中钙离子的含量较少。从非岩溶区Ca元素在各层土壤中的赋存形态来看,最底层总含量为0.77%,在1%以下,其余各层低于0.1%。按照土壤供钙水平分级,狮赖村非岩溶地区土壤水溶性钙含量小于 $90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属低钙土壤。

土壤中镁的含量受成土母质、风化程度、淋溶作用和气候条件等影响。在水热条件较好的湿润地区,风化程度高,土壤中可溶性镁被淋溶较多;在水热条件较差的干燥寒冷地区,土壤中可溶性镁被淋溶较少,含镁较高。我国土壤含镁量呈现出一定的地域

性,自北向南、自西向东逐渐降低^[23]。岩溶区石灰土成土母质主要为含云母类等矿物,在风化过程中形成富含镁的黏土矿^[24]。研究表明,土壤pH在中性环境下,土壤中Mg离子交换能力降低;当土壤pH达到碱性条件时,土壤中一半以上交换性Mg离子转变成非交换态Mg^[25]。石灰岩的MgO平均含量为7.89%,风化为Mg含量较高的石灰土。土壤剖面中Mg的最高含量出现在45~60 cm,可能是因为土壤在45~60 cm处黏度增加,导致含Mg离子不易往下迁移。

非岩溶区Mg元素总含量在土壤剖面中有类似的变化规律,特别是根际土壤中Mg元素浓度较高^[26]。非岩溶区土壤剖面Mg元素赋存形态中,离子交换态(包括水溶态)在表层土和下层土壤中含量相对较高,分别为 $0.027\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.026\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,中间层土壤中含量均小于 $0.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。非岩溶区土壤中有机质与Mg元素有效态含量呈正相关关系^[27],土壤Mg元素腐殖酸结合态含量高于离子交换态(包括水溶态)、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态。土壤中Mg元素主要以残渣态为主,存在累积现象。土壤Mg元素有效态主要包括离子交换态Mg和水溶态Mg。通常有效Mg的主要形态主要是离子交换态Mg(包括水溶态),离子交换态Mg约占Mg总量的5%左右,是衡量土壤中Mg的丰缺程度的重要指标。矿物态Mg和有机态Mg,一般需经微生物分解后才能为植物利用,属难效态Mg,在土壤pH改变为酸性环境,释放出介于速效性和难效性镁之间的酸溶态镁,释放量随土壤种类和浸提液的酸浓度及浸提时间而异^[21]。土壤供Mg能力一般用土壤交换性Mg含量或交换性Mg饱和度来反映^[28]。一般认为土壤交换性Mg含量 $<0.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、交换性Mg饱和度 $<3\%$ 为供Mg能力低;土壤交换性Mg含量在 $0.02\sim 0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、交换性Mg饱和度 $3\%\sim 8\%$ 为供Mg能力中等;土壤交换性Mg含量 $>0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、交换性Mg饱和度 $>8\%$ 为供Mg能力高^[29-30]。一般认为土壤中交换性Mg含量若少于 $0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,作物就会出现缺Mg症状^[31]。在强淋溶作用下,狮赖村非岩溶地区土壤中有效Mg含量偏低,按照土壤可交换性Mg含量划分,说明狮赖村非岩溶区土壤供Mg能力低。

非岩溶区酸性土壤钙元素离子交换态、碳酸盐结合态和腐殖酸结合态含量较低,土壤Ca迁移性较弱,按土壤供钙水平分级属低钙土壤。酸性土壤

活性腐殖质含量较低,加之Ca含量较低,而土壤钙元素对植物的生长影响很大,建议非岩溶区应适量地补充Ca、Mg元素,如施用石灰石粉等,这样既可以为植物提供Ca和Mg营养元素,又可以调节土壤酸碱性。

本研究样地具有岩溶区石灰土和非岩溶区酸性土典型性,虽然取样数量和分析指标基本满足研究目标,但考虑到样地的异质性和影响因素,在后续的研究中应充分考虑土壤Ca、Mg元素迁移机理问题。

参考文献

- [1] 袁道先,蒋勇军,沈立成,蒲俊兵,肖琼. 现代岩溶学[M].北京: 科学出版社,2016.
YUAN Daoxian, JIANG Yongjun, SHEN Licheng, PU Junbing, XIAO Qiong. Modern karstology[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 吴刚,李金英,曾晓舵. 土壤钙的生物有效性及与其它元素的相互作用[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 319-322.
WU Gang, LI Jinying, ZENG Xiaoduo. Bio-availability of calcium in soil and the interaction with other elements[J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 319-322.
- [3] 孟赐福,傅庆林,水建国,吴益伟. 浙江中部红壤施用石灰对土壤交换性钙、镁及土壤酸度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(2): 129.
MENG Cifu, FU Qinglin, SHUI Jianguo, WU Yiwei. Effect of liming on acidity and exchangeable calcium and magnesium of red soil in central Zhejiang[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1999, 5(2): 129.
- [4] 王芳,刘鹏,徐根娣. 土壤中的镁及其有效性研究概述[J]. 河南农业科学, 2004, 33(1): 33-36.
WANG Fang, LIU Peng, XU Gendi. Overview of magnesium in soil and its availability research[J]. Henan Agricultural Sciences, 2004, 33(1): 33-36.
- [5] 李士敏,朱富强,刘方,何腾兵. 贵州黄壤旱地有效镁的含量与镁肥盆栽效果分析[J]. 贵州农业科学, 1999, 27(2): 31-33.
LI Shimin, ZHU Fuqiang, LIU Fang, HE Tengbing. Quantity of available magnesium of dry cultivated land and effects of applying Mg fertilizer on the crops in yellow earth areas of Guizhou[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 1999, 27(2): 31-33.
- [6] 李为,余龙江,贺秋芳,吴云,袁道先. 微生物及其碳酸酐酶对岩溶土壤系统钙镁元素淋失的影响[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 1-6.
LI Wei, YU Longjiang, HE Qiufang, WU Yun, YUAN Daoxian. Microbes and its carbonic anhydrase impact on the leaching to calcium and magnesium elements in calcareous soil system[J]. Carsologica Sinica, 2004, 23(1): 1-6.
- [7] 陈家瑞,曹建华,梁毅,杨慧. 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.
CHEN Jiarui, CAO Jianhua, LIANG Yi, YANG Hui. Relationship of the humus components and the calcium form with the development of limestone soil[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(1): 7-11.
- [8] 李菁,杨程,靳振江,朱同彬,曹建华. 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.
LI Jing, YANG Cheng, JIN Zhenjiang, ZHU Tongbin, CAO Jianhua. Characteristics of calcium fraction distribution in soil under different land use types in karst fault-depression basins[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 889-895.
- [9] 杨胜天,黎喜,娄和震,罗娅,李超君. 贵州茂兰喀斯特地区土壤全钙含量空间估算模型与迁移分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(3): 449-458.
YANG Shengtian, LI Xi, LOU Hezhen, LUO Ya, LI Chaojun. Spatial estimation model and migration analysis of soil total calcium content in the Maolan karst area, Guizhou Province[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(3): 449-458.
- [10] 梁建宏,曹建华,杨慧,黄芬. 钙、铁、铝形态对岩溶石灰土磷有效性的影响[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 211-217.
LIANG Jianhong, CAO Jianhua, YANG Hui, HUANG Fen. Effects of calcium, iron and aluminum fractions on the phosphorus bioavailability in limestone soil of karst region[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(2): 211-217.
- [11] 吴水木. 中国区域水文地质普查报告: 广西桂林幅[M]. 柳州: 广西地质矿产局, 1983.
WU Shumu. Report of the Regional Hydrogeological Census of China: Guangxi Guilin Area [M]. Liuzhou: Guangxi Geological Survey, 1983.
- [12] 丁梦凯,胡晓农,曹建华,吴夏,黄芬. 桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 924-933.
DING Mengkai, HU Xiaonong, CAO Jianhua, WU Xia, HUANG Fen. Spatial variability in soil respiration under different land use patterns in Maocun village, Guilin[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 924-933.
- [13] 张铮,孟广礼. 1988年两广地区春季酸雨观测和天气形势分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1992, 28(1): 86-95.
ZHANG Zheng, MENG Guangli. An observation of spring's acid rain and an analysis of weather situation at the Liangguang's area of China in 1988[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1992, 28(1): 86-95.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Rukun. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [15] Arabinda K Das, Ruma Chakraborty, M. Luisa Cervera, Migwel de la Guardia. Metal speciation in solid matrices[J]. Talanta, 1995, 42: 1007-1030.
- [16] Justyna Poledniok, Franciszek Buhl. Speciation of vanadium in soil[J]. Talanta, 2003, 59: 1-8.

- [17] 刘文长, 马玲, 刘洪青, 潘同应, 徐厚玲. 生态地球化学土壤样品元素形态分析方法研究[J]. *岩矿测试*, 2005, 24(3): 181-188.
LIU Wenzhang, MA Ling, LIU Hongqing, PAN Tongying, XU Houling. Research on Speciation Analysis of Chemical Elements in Soil Samples for Ecosystem Geochemistry Study[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2005, 24(3): 181-188.
- [18] 卢玫桂. 广西桂林石灰土的元素生物地球化学特征[D]. 桂林: 广西师范大学, 2005.
LU Meigui. The Biochemical Characters of Element in Limestone Soil in Guilin, Guangxi [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2005.
- [19] 梁建宏. 岩溶动力系统土壤钙元素迁移机理初步研究[D]. 桂林: 广西师范大学, 2010.
LIANG Jianhong. Preliminary Study on Migration Mechanism of Calcium in the Soil, Karst Dynamics System[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2010.
- [20] 陈浏寰, 覃英凤, 王紫莹, 黄德周, 张苑. 土地利用方式下岩溶湿地土壤无机磷形态特征及分析方法适用性探讨[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(6): 845-853.
CHEN Lihuan, QIN Yingfeng, WANG Ziying, HUANG Dezhou, ZHANG Yuan. Occurrence forms of inorganic phosphorus in soils of karst wetland under different landuses and comparison of two analysis methods[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6): 845-853.
- [21] 王敬国. 植物营养的土壤化学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1995.
WANG Jingguo. Soil chemistry of plant nutrition [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1995.
- [22] 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): 19-22.
ZHOU Wei, LIN Bao. Research progress on chemical behavior and bioavailability of calcium in soil[J]. *Soils and fertilizers*, 1996(5): 19-22.
- [23] 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.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing. Some soil features in karst ecosystem.[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 37-44.
- [24] 顾新运, 许冀泉. 中国土壤胶体研究: V. 滇桂地区石灰岩发育的三种土壤的粘土矿物组成和演变[J]. *土壤学报*, 1963, 11(4): 411-415.
GU Xinyun, XU Jiquan. Soil Colloid reseaches: V. Clay minerals and their transformations in rendzina, terra fusca and terra rossa of Yunnan and Kwangsi [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1963, 11(4): 411-415.
- [25] Barber S A. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach[J]. *Quarterly Review of Biology*, 1995.
- [26] Rengel Z, Robinson D L. Modeling Magnesium Uptake from an Acid Soil: I. Nutrient Relationships at the Soil-Root Interface[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(3): 785-791.
- [27] 王雅妮, 梁洪波, 王树声, 林琪, 陈爱国. 陇南植烟土壤交换性镁与烟叶中镁含量特征及关系分析[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(4): 50-54.
WANG Yani, LIANG Hongbo, WANG Shusheng, LIN Qi, CHEN Aiguo. The Characteristics and Relationship Between Magnesium Content in Flue-cured Tobacco Leaves and Exchangeable Magnesium Content in Soil in Longnan [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(4): 50-54.
- [28] 丁群英. 安徽沿淮地区土壤交换性镁含量及镁对大豆营养的影响[J]. *安徽农学通报*, 2002, 8(6): 60-62.
DING Qunying. Effect of exchange Mg²⁺ and Mg in soil along Huaihe river on soybean nutrition[J]. *Auhui Agricultural Science Bulletin*, 2002, 8(6): 60-62.
- [29] 黄鸿翔, 陈福兴, 徐明岗, 秦道株, 高菊生. 红壤地区土壤镁素状况及镁肥施用技术的研究[J]. *土壤肥料*, 2000(5): 19-23.
HUANG Hongxiang, CHEN Fuxing, XU Minggang, QIN Daozhu, GAO Jusheng. Status of magnesium and the techniques of application of magnesium fertilizer in the red earth region [J]. *Soils and fertilizers*, 2000(5): 19-23.
- [30] 李延, 刘星辉, 庄卫民. 福建山地龙眼园土壤镁素状况与龙眼缺镁调控措施[J]. *山地学报*, 2001, 19(5): 460-464.
LI Yan, LIU Xinghui, ZHUANG Weiming. Studies on magnesium status in mountain soils of longan orchards and on the control methods for longan magnesium deficiency in Fujian [J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(5): 460-464.
- [31] 杨力, 刘光栋, 宋国茜, 泉维洁, 卢桂菊, 丁光国. 山东省土壤交换性镁含量及分布[J]. *山东农业科学*, 1998(3): 8-12.
YANG Li, LIU Guangdong, SONG Guohan, QUAN Weijie, LU Guiju, DING Guangguo. Exchangeable magnesium content in soil and distribution in Shandong province [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1998(3): 8-12.

Comparison of soil calcium and magnesium fractions transport in classic karst and non-karst region, Guilin

LIANG Jianhong¹, CUI Xudong², WEN Laiyan^{3,4}, LIU Ding⁴, YI Chenxu⁴, HUANG Kezun⁴, WANG Jun⁵

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Shandong Construction and Survey Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China; 3. Luoding General Cai Tingkai Memorial Middle School, Luoding, Guangdong 527200, China; 4. College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541006, China; 5. Maize Research Institute, Shanxi Agricultural University /Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Xinzhou, Shanxi 034000, China)

Abstract The exposed karst area in the world is about 17.9 million km², mainly distributed in China, Vietnam, France, Slovenia, the United States and other countries. Covering a total area of 780,000 km², the karst are in south China is most widely distributed in the world, mainly in the most area of 8 provinces/cities such as Yunnan, Guizhou, Guangxi, Hunan, Hubei, Chongqing, Sichuan and Guangdong. The southern karst area represented by Guilin is a typical karst area in China, where soil is formed by the physical, chemical and biological effects of carbonate rocks in the geological background. Due to the richness of calcium (Ca) and magnesium (Mg) in carbonate rocks, alkaline soil rich in Ca and Mg is distributed in karst areas. But non-karst areas are primarily clastic rock, where soil mainly exists acidic. Besides, Ca in soil is an essential mineral nutrient for plant growth and metabolism. Soil Ca and its morphological changes affect the physicochemical properties of soil, and also affect the uptake of calcium and other nutrients by plants. Magnesium is also an essential mineral element for plant growth, ranking the fourth after nitrogen, phosphorus and potassium. Therefore, plants need to take in Mg, depending on the content and supply mechanism of Mg in soil.

With a modified Tessier sequential extraction procedure, soil profiles from typical karst and non-karst areas in Guilin are analyzed to determine different fractions of Ca and Mg, the ion-exchange fraction (including water-soluble state), carbonate-bound fraction, humic acid-bound fraction, Fe-Mn oxides bound fraction, strong organic matter-bound fraction (including some sulfides) and residual fraction. The migration characteristics of Ca and Mg elements in soil from these two types of areas are explored. The vegetation type of sampling sites is mainly forest. During the sampling, a soil profile with 1 m wide, 2 m long and 1.5 m deep was dug. The profile is stratified from the surface to 140 cm, and divided into 7 horizons at intervals of 20 cm. Then soil samples are collected from the bottom layer by layer. A total of 7 soil samples in the limestone soil profile are collected from the depth of 105 cm at intervals of 15 cm. The results showed that in the limestone soil profile of the karst area, the pH value increases with the depth of the profile, while the contents of soil organic matter, total nitrogen (N) and total phosphorus (P) decrease. Except the parent material, the P content of soil is related to other factors in the process of soil formation, among which bioaccumulation and soil formation are important. The weak migration of P, together with the limited availability of limestone soil makes the P content difficulty to leach down from the profile, hence the P content of the surface layer is higher than that of the lower layer. Calcium mainly exists in the exchange fraction and its content is similar in each soil profile, while Mg mainly exists in the residual fraction. There is an accumulation when the percentage of humic acid-bound fraction decreases with the depth of the soil profile. The maximum value of the ion-exchange fraction of Ca occurs in the middle profile at the depth of 45-60 cm. In the karst area, Mg is mainly present in the residual fraction (97.45%) in the limestone soil profile. But Mg content is low in the ion-exchange fraction including the water-soluble fraction (0.61%), the carbonate-bound fraction (0.11%) and the humic acid-bound fraction, accounting for 1.80% of the total amount in the latter three fractions.

Compared with the typical karst area, the total Ca content is lower in acidic soil of the non-karst area. The soil profile from 0 cm to 60 cm is dominated by strong organic bound fraction, and the deeper profile (>60 cm) by residual fraction. Calcium in the topsoil in non-karst areas is mainly present in the ion-exchange fraction (including the water-soluble fraction), the Fe-Mn oxide-bound fraction and the strong organic-bound fraction (including some sulfide). The dominance of the ion-exchange fraction (including the water-soluble fraction) indicates the relatively high mobility of Ca. In non-karst areas. The effective content Mg is low, mainly in humic acid-bound fraction and residual fraction. Similar to karst areas. Mg in non-karst areas also accumulates in the soil to some extent. In conclusion, the study explores the morphological migration of Ca and Mg in soil profiles in karst and non-karst areas, and provides scientific support for soil improvement and risk assessment of Ca and Mg leaching in soil.

Key words limestone soils, acid soils, Tessier, sequential extraction procedure, leach

(编辑 张玲 杨杨)