

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181106.001

杨慧,梁影,徐觉明,等.岩溶区钙与土壤有机碳关系的研究进展[J].广西科学,2018,25(5):505-514.

YANG H,LIANG Y,XU J M,et al. Research progress of the relationship between soil calcium and soil organic carbon in karst area[J]. Guangxi Sciences,2018,25(5):505-514.

岩溶区钙与土壤有机碳关系的研究进展*

Research Progress of the Relationship between Soil Calcium and Soil Organic Carbon in Karst Area

杨慧^{1,2},梁影³,徐觉明³,曹建华^{1,2**}

YANG Hui^{1,2},LIANG Ying³,XU Jueming³,CAO Jianhua^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所,国土资源部广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004;2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心,广西桂林 541004;3. 恭城瑶族自治县科技情报研究所,广西桂林 542500)

(1. Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. The International Research Center on Karst (IRCK) under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi, 541004, China; 3. Science and Technology Information Institute of Gongcheng Yao Autonomous County, Guilin, Guangxi, 542500, China)

摘要:土壤碳库在全球碳循环中占有重要的地位,土壤有机碳的稳定程度直接影响到其对大气 CO₂ 产生碳汇的潜力,土壤钙不仅是盐基离子,能影响土壤 pH 值,而且对土壤有机碳的稳定性和吸收大气 CO₂ 的能力产生影响。本文综述了土壤有机碳稳定机制研究方法,钙对土壤有机质稳定性影响研究进展,以及岩溶区富钙偏碱的地球化学背景下土壤大量钙存在对有机碳稳定性影响的研究进展。

关键词:土壤钙 土壤有机碳 稳定性

中图分类号:S714 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2018)05-0505-10

Abstract: Soil carbon pools play an important role in the global carbon cycle. The stability of soil organic carbon directly affects its potential to generate carbon sinks from atmospheric CO₂. Soil calcium is not only a salt based ion, affecting soil pH value, but also affects the stability of soil organic carbon and the ability to absorb atmospheric CO₂. This article reviewed the research methods of mechanism of soil organic carbon stability, calcium effect on the stability of soil organic matter, and the research progress of the influence of soil calcium on the stability of organic carbon under the geochemical background of a large number of calcium in karst area.

Key words: soil calcium, soil organic carbon, stability

收稿日期:2018-01-29

作者简介:杨慧(1981-),女,副研究员,主要从事岩溶区土壤固碳机理研究,E-mail: yanghui-kdl@karst. ac. cn.

* 国家自然科学基金项目(41402326),广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198153)和广西科学研究与技术开发项目(桂科能 1598023-1)资助。

** 通信作者:曹建华(1963-),男,研究员,博士生导师,主要从事岩溶区生态系统碳循环及生物地球化学研究,E-mail: jhcaogl@karst. ac. cn.

0 引言

土壤是仅次于海洋的第二大有机碳库,是陆地上最大的有机碳库,库存量超过 1 550 Pg^[1],是大气碳库的 3.3 倍,是生物碳库的 4.5 倍^[2]。土壤碳库的变化直接影响生态系统碳汇、碳源的性质^[3],是全球生物化学循环中极其重要的生态因子^[4]。因此,土壤碳储量的变化对陆地生态系统的碳储存和碳释放起着

关键的作用^[1,5],其较小的变幅即能引起 CO₂ 浓度较大的波动^[6]。

土壤有机碳在生态环境变化和全球变化下的稳定性是认识土壤碳库对于全球变化的长期效应的基本问题,已成为土壤碳研究的热点^[7-8]。决定陆地生态系统中土壤碳生物地球化学行为的关键因素是土壤中碳固持特性^[9-10],其焦点是土壤碳库的分配、结合和稳定性的差异^[10]。因此,土壤有机碳的转化过程、保护过程和矿化过程都是涉及土壤有机碳固定与稳定的基础过程。而土壤固碳作用及其机制研究的分子有机化学已经成为土壤碳循环研究的新领域^[8]。土壤固碳机制的研究已经深入到土壤颗粒层面的土壤物理-化学-生物学的相互作用及其对有机碳的保护、结合、转化与利用的影响上,而对于物理保护作用、化学稳定作用对不同更新速率的库的影响及其在土壤碳固定上的相对重要性还认识不足^[10]。

岩溶区石灰土是在热带、亚热带地区碳酸盐岩经溶蚀风化后的产物。岩溶环境的独特性,赋予了石灰岩土独特而复杂的成土过程,虽然成土机理至今尚未完全清楚,但多数人认为石灰岩土是由碳酸盐岩被溶蚀后不溶物残留风化堆积的结果^[11-12],也有人认为是溶蚀交代的结果^[13]。无论何种观点,岩溶作用对石灰土的形成和演变产生了深远的影响已成为共识。岩溶区石灰土富钙偏碱的地球化学特点使得土壤腐殖质的形成和特征也具有富钙性^[14],比如腐殖酸与钙凝聚,形成比较稳定的腐殖酸钙。但是岩溶区石灰土中土壤有机碳稳定机制尚不明确。

1 土壤有机碳稳定性机制研究方法概述

土壤有机碳的稳定机制主要有 3 种,即物理保护、化学稳定性和生物化学稳定性^[15]。物理保护机制是指土壤有机碳通过形成土壤团聚体或被包裹在团聚体内部,从而减少矿化分解,提高稳定性的过程^[16]。团聚体中的物质组成及其有机碳结合机制已成为土壤学的基础科学问题^[17]。土壤中固定新碳的团聚体归宿和分配是研究有机碳固定机制的重要内容^[18]。研究认为有机碳的团聚体物理保护在有机碳积累中有重要意义^[19],并且土壤有机碳固定中团聚体的保护机制可以用以说明土壤有机碳的固定效应^[20]。有机碳被团聚体包裹后或者以颗粒形式存在孔隙中,或者直接与组成微团聚体的矿物颗粒密切联系,所以土壤团聚体过程决定了土壤有机碳被保护的程 度^[21],而土壤团聚体结构是土壤多次团聚体的产物^[22],因此,对团聚体内部微观结构特征的研究有助于揭示有机碳的物理保护机制。而团聚体内孔隙的

分布模式以及孔隙内水分和空气的分布,决定了土壤中微生物的生存空间与生存环境,因此,团聚体内部孔隙的分布直接影响团聚体中有机物与微生物的接触,从而影响土壤有机碳的稳定性^[16]。

获取反映团聚体中土壤有机碳分布的数据,对理解团聚体动态变化及其有机碳固定至关重要^[23],而数据的获取在很大程度上依赖于采用的方法。因此,有效的研究方法是获取土壤结构与土壤有机碳之间相互关系的前提,过去对土壤团聚体结构的研究主要集中于其稳定性(水稳定性、力稳定性)方面,由于研究方法的限制,对团聚体结构的直接研究较少^[24]。近年来,断层射线扫描(Computed tomography, CT)技术开始广泛应用于土壤科学研究中,结合数字图像处理技术可以定量研究土壤结构^[16,24-25]。国内外很多学者利用 CT 技术对土壤的孔隙结构、孔隙大小分布及其与优先流关系等方面进行了大量的研究^[24-28]。相比于普通的医用 CT,显微 CT 技术拥有获取快速、成像对比度强、分辨率高的优点,能够捕获到更多的细节特征,因而更适用于团聚体尺度微结构的研究^[24]。学者们^[24,29-30]利用显微 CT 来研究团聚体的微结构,进一步揭示了土壤微结构与土壤团聚体形成等物理过程之间的关系。相关研究表明,岩溶区土壤团聚体的稳定性受母岩^[31]、土地利用方式^[32-34]和植被类型^[35]等影响,并且通过与同纬度同微气候环境下的地带性红壤相比,岩溶区石灰土团聚体稳定性要高^[33]。但是对岩溶区石灰土团聚体微结构的特征尚缺乏了解。

土壤有机质某些特定的化学抗性被认为是有机质稳定性的一个重要机制^[36],即土壤有机质的化学结构在碳循环及其稳定性中具有重要的贡献^[37]。土壤有机质的主要化学组分包括:10%的碳水化合物、10%的含氮化合物(包括蛋白质、缩氨酸、氨基酸、嘌呤、嘧啶和杂环族化合物)、10%的脂类(烷烃、烯烃、脂肪酸和酯)以及大约 70%的腐殖物质^[38]。这些化学组分的比例可随着特定环境的变化而变化。由植物组织的微生物降解或合成所产生的疏水性组分越来越多地被固定在腐殖质的亲水性组分中,从而可抑制其进一步降解^[39]。较稳定的腐殖质主要含有脂肪类或烷基类的化合物,有机质的疏水性组分可以加强和维持土壤团聚体的稳定性^[40]。有机质中的糖类物质(氧烷基碳)多为不稳定、易分解的碳组分,而富含脂肪类物质(烷基碳)或木质素(芳香族碳)的土壤有机碳由于内在的分子特性而表现为相对稳定且不易分解^[41-42]。因此,土壤碳是否能够稳定地固持,更取决于土壤碳的化学组成和结构^[41,43]。随着近年来激

光分解光谱、固态¹³C核磁共振波谱、红外光谱和热解质谱测量等土壤原位和非破坏性分析技术和手段等应用,可以在分子水平上更深入地阐明土壤碳固持的状态和过程^[37,44-45]。这些现代分析技术包括固体交叉极化魔角自旋¹³C核磁共振技术(CPMAS ¹³C-NMR)和热裂解(四甲基铵氢氧化物)-气相-质谱联用光谱测定技术(Pyr-TMAH-GC/MS)^[36-37]。CPMAS ¹³C-NMR能够对有机质中不同碳原子的信号^[46]及不同化学结构的相对数量进行非破坏性的评估,从而检测出有机质降解或腐殖化过程中各碳原子(烷基碳、烷氧碳、芳香碳和羧基碳)的相对变化^[47]。TMAH热裂解技术能够较好的保存样品大分子结构中羧基和羟基团的原始结构,并保护这些功能团不受热裂解反应的影响^[48-49]。这两种技术可以提供互补的信息,它们的结合对测定有机碳结构非常有利^[8]。

土壤有机碳分解释放CO₂的过程称为碳矿化,土壤有机碳的矿化受土壤微生物驱动,由土壤酶介导,是土壤中重要的生物化学过程,直接影响到土壤中养分元素的释放和供应、土壤质量的维持以及温室气体的形成等^[50],土壤微生物量碳和溶解有机碳是有机质转化为活性碳的主要形式,其与土壤酶类是反映土壤有机质转化过程特征的敏感指标^[51]。土壤微生物呼吸熵是衡量微生物活性的重要指标^[52],三者均是反映土壤有机质周转的参数^[53]。通常微生物熵变大说明土壤碳库正在积累,微生物对土壤碳库的利用效率提高,土壤质量得到改善^[52]。土壤酶是由微生物、动植物活体分泌及动植物残骸分解释放于土壤中的一类具有催化能力的生物活性物质^[54],是生态系统物质循环和能量流动中最为活跃的生物活性物质,土壤中的一切生物化学过程都是在土壤酶系统的作用下进行的^[55]。土壤有机碳形态的转化大部分也依赖于土壤酶的作用。不同的土壤酶对于土壤有机碳形态的转化具有不同的作用,土壤蔗糖酶、纤维素酶、β-D-葡糖苷酶以及多酚氧化酶和过氧化物酶都是参与土壤有机质转化与循环的重要酶类^[56]。蔗糖酶、纤维素酶以及β-D-葡糖苷酶可以酶解土壤中的大分子的糖类使其变成小分子的、具有相对活性的有机碳。多酚氧化酶和过氧化物酶则能够酶促或氧化芳香类物质的转化而对土壤腐殖质碳的形成起重要作用。酶活性的高低则可以作为预测有机碳形态转变趋势的预警指标^[57]。目前,对土壤有机碳矿化的研究大多集中在土壤水分^[58-59]、施肥方式^[60]、土地利用方式^[61]等,不同的耕作方式^[62-63]、施肥方式^[64]和施肥量^[65]以及氮素对于土壤有机碳含量和酶活性的作用方面的研究^[51]也较多,但是对于土壤团聚体中

与碳转化相关的酶活性的研究则相对较少^[56]。对不同土壤团聚有机碳组分及酶活性进行研究,可以发现有机碳组分和与碳组分转化相关的酶活性在土壤团聚体中的分布状况,预测土壤团聚体中有机碳组分的变化趋势,结合土壤有机碳在团聚体中的相对含量状况,进而推测当地土壤结构的变化。

2 钙对土壤有机质稳定性影响研究进展

在一些土壤中,钙会影响土壤有机质含量的报到也不少见。钙与有机物质相互作用形成腐殖酸钙,使有机质得到积累、土壤结构稳定性增加的机制,已被早期很多研究所证实^[66-69]。团聚体形成作用被认为是土壤碳固定的最重要机制^[19],特别是对土壤活性碳库的物理保护。Muneer和Oades^[70]通过一系列的研究证实土壤有机质是>250 μm团聚体稳定性的主要因子,并且在有钙和有机质共同存在的条件下比单纯有机质存在的条件下>2 000 μm稳定团聚体的数量多(图1)。这说明有机物质的分解和溶解性钙之间的相互作用是影响>2 000 μm团聚体稳定性的主要原因^[70]。张宁等^[71]对腾格里沙漠3种土壤有机质和碳酸钙的关系进行研究,结果表明土壤有机质的分布格局与碳酸钙的分布格局大体相同,土壤碳酸钙含量与土壤有机质含量均呈显著的正相关关系,且变化趋势相同;土壤碳酸钙空间异质性的变化与有机质空间异质性的变化具有一致性。王晖^[72]通过对南亚热带4种人工林型的研究发现,其凋落物叶和细根的

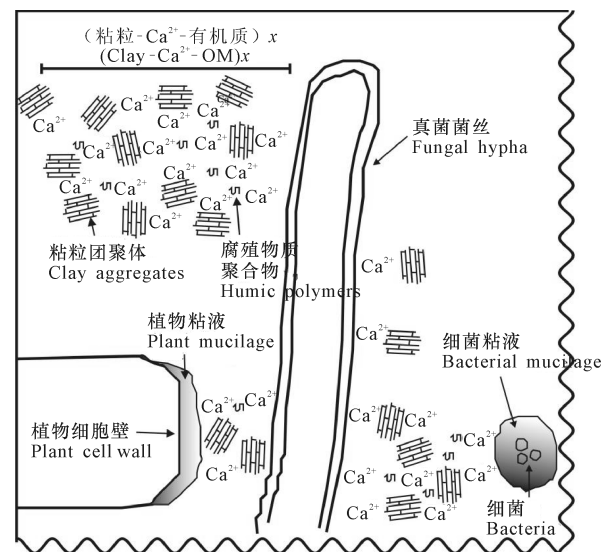


图1 >250 μm团聚体中(粘粒-Ca²⁺-有机质)_x关系模型(引自Muneer和Oades^[70])

Fig. 1 Model of aggregation in soils showing a portion of an aggregate greater than 250 μm(From Muneer and Oades^[70])

分解速率均与其初始的 Ca 含量存在显著正相关关系,并且凋落物叶和细根间的 Ca 和氧烷基碳含量呈现显著的正相关关系。Silver 等^[73]的研究同样表明 Ca 浓度和 C/N 在凋落物分解速率模型中是两个最重要的参数。

土壤有机矿质复合体是形成土壤微团聚体的基础^[74], Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 等多价金属离子可以充当粘土矿物与腐殖物质之间的键桥,在土壤有机无机复合体形成过程中起着重要的作用^[22],Clough 等^[75]对草地土壤的研究表明,团聚体物理保护下的有机碳通过钙-金属桥键结合为稳定的有机-矿质复合体,即使施用 N 肥下土壤微生物活性提高,微生物仍不能有效分解之。虽然目前钙与有机质相互作用的机制没有被定义,但 Edwards 和 Bremner^[76]所假定的“阳离子架桥”机制被得到一致的认可。他们提出粘粒-多价阳离子-有机质(C-P-OM)团聚成(C-P-OM) $_x$,进一步团聚生成[(C-P-OM) $_x$] $_y$ 。

近年来关于钙(碳酸钙)对土壤有机碳的转化与积累关系研究受到关注,Bertrand 等^[77]用 ^{13}C 示踪的方法,对酸性、碱性和施石灰的农业土壤进行 C、N 的矿化试验,这对研究土壤无机碳分解量与有机碳矿化量的关系起到重要作用。Oren 等^[78]对石灰土 $CaCO_3-CO_2-H_2O$ 平衡进行了研究。但土壤中钙对有机碳积累与转化的影响机理仍没有形成统一的认识。

3 岩溶区钙与有机碳的关系研究进展

岩溶区石灰土是在热带、亚热带地区石灰岩经溶蚀风化形成的,岩溶区生境中的基岩多为碳酸盐岩类,其主要化学成分为 $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 等可溶性盐类。风化物中含钙物种的不断供给,延缓了土壤的脱硅富铝化速度,形成盐基饱和、岩性特征明显的土壤^[11],即使得上覆土壤形成高 pH 值、高钙和高 HCO_3^- 的特征^[14,79],并且阳离子交换量较高^[80]。除了总量上 Ca 相对丰富外,石灰土还具有较高的交换态钙含量,而且钙主要是以交换态存在的^[81]。姬飞腾等^[82]对贵州喀斯特地区石漠化程度不同的 4 个地区的土壤交换性钙进行测定发现,这 4 个地区的土壤平均交换性钙比我国非石灰岩地区土壤交换性钙含量高^[83-84]。在石灰土盐基离子中 Ca 占据了 90% 以上^[85]。根据对西南岩溶地区枯枝落叶化学组分的测定可知,同为常绿落叶阔叶混交林下,石灰土上的 CaO 含量要比酸性土上的高 3 倍^[14]。石灰土土壤有机质含量较丰富,根据第二次全国普查的资料^[11],一般石灰土的有机质含量在 40 g/kg 以上,高的可达

100 g/kg 以上,腐殖化程度也较高,腐殖质含量、胡敏酸含量以及胡敏酸与富里酸的比值等,大都较同地带的赤红壤、红壤、黄壤高。在钙质丰富的土壤环境中,细菌及放线菌等微生物活动异常活跃,使有机物不断分解形成腐殖质,并与钙、镁离子结合,形成高度缩合而稳定的腐殖酸钙,从而使石灰土普遍获得腐殖质钙积累,因而比红壤、黄壤的腐殖质积累量高。如贵州省茂兰地区石灰土的腐殖质含量比同一地区的黄红壤高出 3 倍以上。腐殖质组成中主要以钙结合的胡敏酸占优势(85.4%),积累了大量不易分解的腐殖质钙^[11]。广西的统计资料也表明,有机质平均含量高达 44 g/kg 以上,易被氧化部分较少,C/N 值较低(10:1),这些都可以证明腐殖酸钙起着明显的作用^[11]。黄黎英^[86]的研究表明,石灰土 DOC 含量远低于红壤,红壤中 DOC 平均含量为石灰土的 7.45 倍。曹建华等^[87]通过对桂林毛村岩溶地下河流域代表性的岩溶区石灰土、碎屑岩区红壤土壤呼吸排放 CO_2 速率、碳稳定同位素动态变化等监测,结果显示岩溶区石灰土的土壤呼吸排放 CO_2 速率明显低于碎屑岩区红壤。另外,由于 Ca^{2+} 对有机、无机胶体的凝聚作用,黏粒及粉砂粒紧密结合成团,不易湿胀或分散于水,一般结构较稳定。根据全国第二次土壤普查的结果显示,石灰土表土层 >0.25 mm 的水稳性团聚体达到 70%~80%,孔隙较多,孔隙度为 50%~60%。

岩溶区石灰土中固钙和固碳作用是互相作用、互相影响的过程,在岩溶湿润地区的石灰土中钙易受到淋溶作用而流失^[14,88],岩溶区土壤钙的流失可能是土壤有机碳含量下降的主要因素^[88]。在碳酸盐岩类地区,由于特殊的岩溶地貌条件及生物吸收与归还特点,制约着土壤中钙的迁移与富集。通常,土壤中同时进行着淋溶脱钙和富集复钙这两个相互矛盾的成土特征^[11]。岩溶湿润地区的土壤水热状况有利于土壤有机碳的矿化,而与土壤全土有机碳相比,钙键结合的有机碳更稳定^[89],也正是由于这部分钙以结合态存在,从而减弱钙的淋溶,在保存钙素方面起到一定的作用。胡乐宁等^[90]通过室内模拟实验从钙的形态对土壤有机碳的影响的角度对岩溶区黑色石灰土、棕色石灰土和一种对照土壤(红壤)进行了研究,结果表明,黑色石灰土的水溶态、交换态和有机结合态钙均与土壤有机碳呈现较好的相关性($P < 0.05$);棕色石灰土的交换态钙和有机结合态钙与土壤有机碳呈现较好的相关性($P < 0.05$),而红壤的 4 种钙形态与土壤有机碳均没有显著相关性。这说明岩溶区交换态钙和有机结合态钙可能是促进土壤有机碳积

累的主要钙形态。

笔者通过在桂林毛村选择 3 种不同演替阶段的石灰土(红色石灰土、棕色石灰土和深棕色石灰土),对 3 种石灰土中钙与土壤团聚体、化学结构和矿化等之间的关系进行了研究。结果表明(表 1),3 种土壤均以 >0.25 mm 粒径团聚体为主。水溶态钙分别与 >2 mm 粒径团聚体和 $0.25\sim 0.053$ mm 粒径团聚体呈极显著负相关关系和显著正相关关系;交换态钙与 >2 mm 粒径团聚体和 $2\sim 0.25$ mm 粒径团聚体呈显著负相关关系和显著正相关关系;酸溶态钙与 $2\sim 0.25$ mm 粒径团聚体呈显著正相关关系;而有机结合态钙与各粒径团聚体之间的相关关系均不显著;残渣态钙与 >2 mm 粒径团聚体和 $0.25\sim 0.053$ mm 粒径团聚体呈显著正相关关系和显著负相关关系。这说明各形态钙对土壤团聚体组成具有重要的影响,在土壤团聚体对有机碳的物理保护中具有重要的作用,但是各形态的作用不相一致。红色石灰土以烷基碳和烷氧碳占多数,而深棕色石灰土中则以芳香碳占优势。3 种土壤中铁铝键结合态有机碳平均值为钙键结合态有机碳的 14 倍(图 2)。钙键结合态有机碳仅与有机结合态钙呈显著正相关关系;铁铝键结合态有机碳与酸溶态钙和有机结合态钙均分别呈显著正相关关系。土壤有机碳矿化所释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的分配比例与水溶态钙呈极显著负相关关系,与残渣态钙呈极显著正相关关系;培养 90 d 累积矿化量与有机结合态钙呈显著正相关关系。培养前后,3 种土壤剖面

表 1 岩溶区各形态钙与有机碳的物理保护、化学保护和矿化等相关关系

Table 1 Correlation between calcium forms and physical protection, chemical protection and mineralization of SOC in karst area

项目 Item		水溶态钙 Water soluble calcium	交换态钙 Exchangeable calcium	酸溶态钙 Acid soluble calcium	有机结合态钙 Organic bound calcium	残渣态钙 Residue calcium	
水稳性团聚体级别 Soil water-stable aggregate	>2 mm	-0.475 **	-0.453 **	-0.197	-0.033	0.414 **	
	$2\sim 0.25$ mm	0.312	0.442 *	0.374 *	-0.038	0.269	
	$0.25\sim 0.053$ mm	0.459 *	0.137	-0.239	-0.073	-0.409 *	
	<0.053 mm	0.288	0.309	0.070	0.310	-0.246	
有机碳矿化 SOC mineralization	矿化碳分配比例 Ratio of mineralization carbon to SOC	-0.607 **	-0.348	0.086	0.189	0.603 **	
	累积矿化量 Cumulative mineralization	-0.388 **	-0.251	-0.012	0.483 *	0.064	
酶活性 Enzymatic activity	蔗糖酶 Invertase	原土 Original soil	-0.107	0.050	0.187	0.651 **	0.050
		矿化培养 90 d 后 Mineralization incubation for 90 d	-0.257	-0.220	-0.095	0.472 **	-0.072
	纤维素酶 Cellulase	原土 Original soil	-0.665 **	-0.568 **	-0.264	-0.159	0.703 **
		矿化培养 90 d 后 Mineralization incubation for 90 d	0.387 *	0.149	-0.059	0.170	-0.592 **

注: * 表示在 0.05 的水平上显著相关, ** 表示在 0.01 的水平上显著相关

Note: * indicates a significant correlation at 0.05 level, ** indicates a significant correlation at 0.01 level

上纤维素酶活性增加幅度较大,促进了土壤有机碳的分解。表明纤维素酶是参与岩溶区土壤有机碳分解

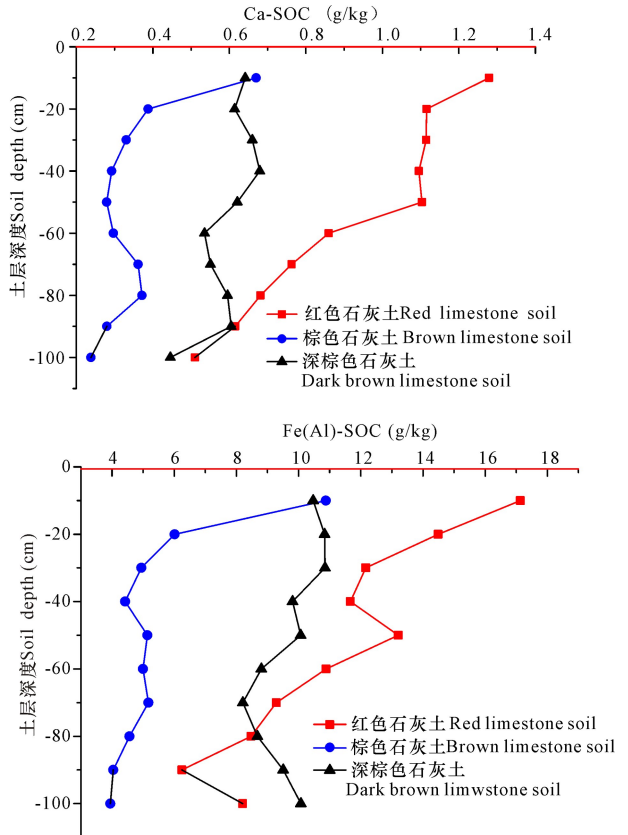


图 2 岩溶区不同演替阶段石灰土中 Ca-SOC 和 Fe(Al)-SOC 特征

Fig. 2 Characteristics of Ca-SOC and Fe(Al)-SOC in calcareous soil at different successional stages in karst area

的重要酶类。3种土壤剖面上土壤蔗糖酶活性在红色石灰土剖面上减少,而在深棕色石灰土剖面则表现为增加,在棕色石灰土剖面上既有增加也有减少,这说明土壤蔗糖酶活性在岩溶区土壤有机碳分解中的作用较为复杂。蔗糖酶在培养前后均与有机结合态钙呈显著正相关关系;纤维素酶活性在培养前与残渣态钙呈极显著正相关关系,而与水溶态钙及交换态钙呈极显著负相关关系;在培养后与残渣态钙呈极显著负相关关系。

4 展望

土壤各形态钙在岩溶区石灰土有机碳的物理保护、化学保护和矿化等方面均起到了重要作用,但是具体形成的腐殖酸钙具有怎么样的化学结构,使得土壤有机碳在土壤中能稳定存在多久仍有待进一步研究。另一方面, Ca^{2+} 对石灰土中的有机、无机胶体具有凝聚作用,会增加土壤团聚体的稳定性,但是在钙含量较高的石灰土中,在 Ca^{2+} 参与下团聚体的表面和内部结构如何对有机碳进行保护使得土壤有机碳的分解和转化与其他土壤不同等等,这些问题都是深入了解岩溶区石灰土土壤有机碳稳定性机理所急需回答的问题,有待后续工作的深入研究。

参考文献:

[1] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47:151-163.

[2] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677):1623-1627.

[3] 王洪岩,王文杰,邱岭,等.兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异[J].生态学报,2012,32(3):833-843.

WANG H Y, WANG W J, QIU L, et al. Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 833-843.

[4] 沈芳芳,袁颖红,樊后保,等.氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J].生态学报,2012,32(2):517-527.

SHEN F F, YUAN Y H, FAN H B, et al. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 517-527.

[5] DANIEL P B, JORGE Á F, CARLOS C M. Identifying soil organic carbon fractions sensitive to agricultural management practices[J]. Soil and Tillage Research,

2014, 139:19-22.

[6] 周莉,李保国,周广胜.土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J].地球科学进展,2005,20(1):99-105.

ZHOU L, LI B G, ZHOU G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1):99-105.

[7] 潘根兴,李恋卿,张旭辉.土壤有机碳库与全球变化研究的若干前沿问题——兼开展中国水稻土有机碳固定研究的建议[J].南京农业大学学报,2002,25(3):100-109.

PAN G X, LI L Q, ZHANG X H. Perspectives on issues of soil carbon pools and global change: With suggestions for studying organic carbon sequestration in paddy soils of China[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(3):100-109.

[8] 周萍.南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究——基于长期试验及跨区域统计分析[D].南京:南京农业大学,2009.

ZHOU P. A study on soil carbon sequestration fate in typical paddy soils from South China: Based on long-term agro-ecosystem experiments and cross-site analysis [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.

[9] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等.土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J].土壤学报,2008(5):901-914.

PAN G X, LI L Q, ZHENG J F, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008(5):901-914.

[10] 潘根兴,周萍,李恋卿,等.固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J].土壤学报,2007,44(2):327-337.

PAN G X, ZHOU P, LI L Q, et al. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2):327-337.

[11] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998.

National Soil Survey Office. Chinese soil[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1998.

[12] 广西土壤肥料工作站.广西土壤[M].南宁:广西科技出版社,1994.

Guangxi Soil and Fertilizer Workstation. Guangxi soil [M]. Nanning: Guangxi Science and Technology Press, 1994.

[13] 李景阳,王朝富,樊廷章.试论碳酸盐岩风化壳与喀斯特成土作用[J].中国岩溶,1991(1):32-41.

LI J Y, WANG C F, FAN T Z. Weathering crust of carbonate rocks and process of karst soil formation[J]. Carsologica Sinica, 1991(1):32-41.

[14] 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 J H, YUAN D X, PAN G X. Some soil features in karst ecosystem[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1):37-44.

- [15] SIX J, CONANT R T, PAUL E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [16] 陈晓侠. 东北黑土团聚体的结构特征研究[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2013.
CHEN X X. The characteristics of aggregates structure in black soils of Northeast China [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [17] PULLEMAN M M, MARINISSEN J C Y. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil[J]. *Geoderma*, 2004, 120(3/4): 273-282.
- [18] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I. 团聚体物理保护作用[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1063-1071.
ZHOU P, SONG G H, PAN G X, et al. SOC accumulation in three major types of paddy soil under long-term agro-ecosystem experiments from South China I. Physical protection in soil micro-aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1063-1071.
- [19] SIX J, ELLIOT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [20] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 等. 中国土壤有机碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 609-618.
PAN G X, LI L Q, ZHANG X H, et al. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(4): 609-618.
- [21] OADES J M, WATERS A G. Aggregate hierarchy in soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1991, 29(6): 815-828.
- [22] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
HUANG C Y. Soil sciences[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [23] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(6): 481-504.
- [24] 李文昭, 周虎, 陈效民, 等. 基于同步辐射显微 CT 研究不同施肥措施下水稻土团聚体微结构特征[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 67-74.
LI W Z, ZHOU H, CHEN X M, et al. Characteristics of aggregate microstructures of paddy soils under different patterns of fertilization with synchrotron radiation micro-CT[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 67-74.
- [25] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1226-1230.
ZHOU H, LI W Z, ZHANG Z B, et al. Characteristics of multi-scale soil structure with X-ray computed tomography[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(6): 1226-1230.
- [26] 冯杰, 于纪玉. 利用 CT 扫描技术确定土壤大孔隙分形维数[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(4): 26-28.
FENG J, YU J Y. Determination fractal dimension of soil macropore using computed tomography[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(4): 26-28.
- [27] 何娟, 刘建立, 吕菲. 基于 CT 数字图像的土壤孔隙分形特征研究[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 662-666.
HE J, LIU J L, LV F. Characterizing fractal characteristics of soil pores based on high-resolution digital CT images[J]. *Soils*, 2008, 40(4): 662-666.
- [28] 李德成, 李衷佩, VELDE B, 等. 不同利用年限的红壤水稻土孔隙结构差异的图像分析[J]. *土壤*, 2002(3): 134-137.
LI D C, LI Z P, VELDE B, et al. Image analysis of pore structure of paddy soil with different planted years[J]. *Soils*, 2002(3): 134-137.
- [29] WILDENSCHILD D, VAZ C, RIVERS M, et al. Using X-ray computed tomography in hydrology: Systems, resolutions, and limitations[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 267(3): 285-297.
- [30] PETH S, HORN R, BECKMAN F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 897-907.
- [31] 罗明, 周运超. 喀斯特地区碳酸盐岩发育土壤团聚体稳定性研究[J]. *农业现代化研究*, 2010, 31(4): 496-500.
LUO M, ZHOU Y C. Soil aggregate stability derived from different carbonate parent materials in karst area [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2010, 31(4): 496-500.
- [32] 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(1): 105-110.
CHEN J, CHEN H S, FENG T, et al. Anti-soil erodibility of different land use types in Northwest Guangxi karst regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(1): 105-110.
- [33] 杨慧, 张连凯, 于爽, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区不同土地利用方式对土壤水稳性团聚体特征的影响[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(3): 265-271.
YANG H, ZHANG L K, YU S, et al. Effects of different land-uses on the features of water-stable aggregates in karst and clasolite areas in Maocun, Guilin[J]. *Car-sologica Sinica*, 2012, 31(3): 265-271.
- [34] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. *应用生态学*

- 报,2014,25(3):671-678.
- TAN Q J, SONG T Q, PENG W X, et al. Stability and organic carbon characteristics of soil aggregates under different ecosystems in karst canyon region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 671-678.
- [35] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-55.
- LI Y B, WEI C F, XIE D T, et al. The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on karst mountain areas[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 51-55.
- [36] 周萍, 潘根兴, PICCOLO A, 等. 南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 IV. 颗粒有机质热裂解-气相-质谱法分子结构初步表征[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 112-124.
- ZHOU P, PAN G X, PICCOLO A, et al. SOC enhancement in major types of paddy soil under long-term agro-ecosystem experiments from south china IV. Molecular characterization of particulate organic carbon by Tmah Thermochemolysis-GC/MS[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 112-124.
- [37] KÖGEL-KNABNER I. Analytical approaches for characterizing soil organic matter[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(7/8): 609-626.
- [38] Schnitzer M. Soil organic matter—the next 75 years[J]. Soil Science, 1991, 151(1): 41-58.
- [39] PICCOLO A. Humus and soil conservation[J]. Humic Substances in Terrestrial Ecosystems, 1996: 225-264.
- [40] PICCOLO A, CONET P, SPACCINI R, et al. Influence of land use on the characteristics of humic substances in some tropical soils of Nigeria[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(3): 343-352.
- [41] SHRESTHA B M C, FORTE G, SINGH C, et al. Soil organic matter quality under different land uses in a mountain watershed of Nepal[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(6): 1563-1569.
- [42] LORENZ K, LAL R, PRESTON C M, et al. Strengthening the soil organic carbon pool by increasing contributions from recalcitrant aliphatic bio (macro) molecules[J]. Geoderma, 2007, 142(1/2): 1-10.
- [43] WANG H, MO J M, WANG J X, et al. Soil organic carbon stock and chemical composition in four plantations of indigenous tree species in subtropical China[J]. Ecological Research, 2010, 26(6): 1071-1079.
- [44] SOLOMON D, LEHMANN J, KINYANGI J, et al. Long - term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems[J]. Global Change Biology, 2007, 13(2): 511-530.
- [45] FONTAINE S, BAROT S, BARR É P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007, 450(7167): 277-280.
- [46] CONTE P, PICCOLO A, LAGEN B V, et al. Quantitative differences in evaluating soil humic substances by liquid-and solid-state ¹³C-NMR spectroscopy[J]. Geoderma, 1997, 80(3/4): 339-352.
- [47] ZECH W, SENESI N, GUGGENBERGER G, et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics[J]. Geoderma, 1997, 79(1/2/3/4): 117-161.
- [48] DELRIO J C, MCKINNEY D E, KNICKER H, et al. Structural characterization of bio- and geo-macromolecules by off-line thermochemolysis with tetramethylammonium hydroxide[J]. Journal of Chromatography A, 1998, 823(1/2): 433-448.
- [49] SCHULTEN H R. Analytical pyrolysis and computational chemistry of aquatic humic substances and dissolved organic matter[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999, 49(1/2): 385-415.
- [50] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.
- LI Z P, ZHANG T L, CHEN B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544-552.
- [51] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.
- SHEN F F, YUAN Y H, FAN H B, et al. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 517-527.
- [52] 范跃新, 杨玉盛, 杨智杰, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5751-5759.
- FAN Y X, YANG Y S, YANG Z J, et al. Seasonal dynamics and content of soil labile organic carbon of mid-subtropical evergreen broadleaved forest during natural succession[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6844-6852.
- [53] 李玲, 仇少君, 檀菲菲, 等. 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响[J]. 生态学报, 2012, 33(21): 6844-6852.
- LI L, QIU S J, TAN F F, et al. Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6844-6852.
- [54] 陆欣. 土壤肥科学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.
- LU X. Soil fertilizer science[M]. Beijing: China Agricultural Sciences, Vol. 25 No. 5, October 2018

- cultural University Press, 2002.
- [55] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
ZHOU K L. Soil emyze science [M]. Beijing: Scientific Publishing House, 1989.
- [56] 马瑞萍, 安韶山, 党廷辉, 等. 黄土高原不同植物群落土壤团聚体中有机碳和酶活性研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 104-113.
MA R P, AN S S, DANG T H, et al. Soil organic carbon and enzymatic activity in aggregates of soils under different plant communities in hilly-gully regions of Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 104-113.
- [57] 姜勇, 梁文举, 闻大中. 免耕对农田土壤生物学特性的影响 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 347-351.
JIANG Y, LIANG W J, WEN D Z. Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 347-351.
- [58] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响 [J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 342-350.
WANG Y, SONG X S, WANG J, et al. Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 342-350.
- [59] 陈香碧, 王媛华, 胡乐宁, 等. 红壤丘陵区水田和旱地土壤可溶性有机碳矿化对水分的响应 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 752-758.
CHEN X B, WANG Y H, HU L N, et al. Response of mineralization of dissolved organic carbon to soil moisture in paddy and upland soils in hilly red soil region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 752-758.
- [60] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响 [J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1068-1075.
MIAO S J, ZHOU L R, QIAO Y F, et al. Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long-term fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(6): 1068-1075.
- [61] 徐汝民, 李忠佩, 车玉萍, 等. 土地利用方式转变后灰色森林土有机碳矿化的温度响应特征 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1020-1025.
XU R M, LI Z P, CHE Y P, et al. Temperature sensitivity of organic C mineralization in gray forest soils after land use conversion [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1020-1025.
- [62] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
GUAN S Y. Soil enzymes and research methods [M]. Beijing: Agricultural Publishing House, 1986.
- [63] MELERO S, LÓPEZ-GARRIDO R, MURILLO J M, et al. Conservation tillage: Short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(2): 292-298.
- [64] 程东娟, 刘树庆, 王殿武, 等. 长期定位培肥对土壤酶活性及土壤养分动态变化影响 [J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(3): 33-36.
CHENG D J, LIU S Q, WANG D W, et al. The effect of long-term experiment improving soil fertility on the dynamical changes of soil nutrient and soil enzyme activities [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(3): 33-36.
- [65] 张鹏, 贾志宽, 路文涛, 等. 不同有机肥施用量对宁南旱区土壤养分、酶活性及作物生产力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1122-1130.
ZHANG P, JIA Z K, LU W T, et al. Effects of organic fertilization on soil nutrient, enzyme activity and crop productivity in semi-arid areas of southern Ningxia [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1122-1130.
- [66] PEELE T C. The effect of calcium on the erodibility of soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1937, 1(C): 47-58.
- [67] PETERSON J. Calcium linkage, a mechanism in soil granulation I [J]. Soil Science Society of America Journal, 1948, 12(C): 29-34.
- [68] MUNEEER M, OADES J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. I. Laboratory studies with ^{14}C -glucose, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [J]. Australian Journal of Soil Research, 1989, 27(2): 389-399.
- [69] MUNEEER M M, OADES J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. II. Field studies with ^{14}C -labeled straw, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [J]. Australian Journal of Soil Research, 1989, 27(2): 389-399.
- [70] MUNEEER M M, OADES J M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models [J]. Australian Journal of Soil Research, 1989, 27(2): 411-423.
- [71] 张宁, 何兴东, 郭畏. 腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征 [J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4094-4101.
ZHANG N, HE X D, WU W. Studies on the characteristics of soil organic matter and pedogenic calcium carbonate for three kinds of soil in the Tengri desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4094-4101.
- [72] 王晖. 南亚热带四种人工林土壤碳固持及其主要相关过程研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
WANG H. Soil carbon sequestration and the related processes in four subtropical plantations in southern China [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [73] SILVER W L, MIYA R K. Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects [J]. Oecologia, 2001, 129(3): 407-419.

- [74] 杨彭年. 石灰性土壤有机矿质复合体及其团聚性研究[J]. 土壤学报, 1984, 21(2): 144-152.
YANG P N. Studies on properties of organo-mineral complex and aggregate in calcareous soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 1984, 21(2): 144-152.
- [75] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38(5): 1005-1016.
- [76] EDWARDS A P, BREMNER J M. Microaggregates in soils[J]. Soil Science, 1967, 18: 64-73.
- [77] BERTRAND I, DELFOSSE O, MARY B. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed and calcareous agricultural soils: Apparent and actual effects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(1): 276-288.
- [78] OREN A, STEINBERGER Y. Coping with artifacts induced by $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ equilibria in substrate utilization profiling of calcareous soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(10): 2569-2577.
- [79] GUO F, JIANG G, YUAN D. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China[J]. Environmental Geology, 2007, 53(3): 533-541.
- [80] 何子平, 蒋忠诚, 吕维莉, 等. 岩溶动力系统对典型石灰岩土肥力特征的影响[J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 65-69.
HE Z P, JIANG Z C, LV W L, et al. Effect of karst dynamic system on fertility of typical calcareous soils[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(3): 65-69.
- [81] 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.
LI X F. Speciation of calcium in soil and plants' leaves in karst ecosystem and its ecological significance[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2006.
- [82] 姬飞腾, 李楠, 邓馨. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析[J]. 植物生态学报, 2009, 33(5): 926-935.
JI F T, LI N, DENG X. Calcium contents and high calcium adaptation of plants in karst areas of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(5): 926-935.
- [83] 熊德中, 蔡海洋, 张仁椒, 等. 福建烟区土壤中量和微量营养元素含量状况的研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 36-38.
XIONG D Z, CAI H Y, ZHANG R J, et al. Distribution of soil medium- and micro-elements in Fujian tobacco-growing soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(4): 36-38.
- [84] 李志安, 邹碧, 曹裕松, 等. 南方典型丘陵退化荒坡地土壤养分特征分析[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1648-1656.
LI Z A, ZOU B, CAO Y S, et al. Nutrient properties of soils in typical degraded hilly land in South China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1648-1656.
- [85] 曹建华, 袁道先, 裴建国, 等. 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.
CAO J H, YUAN D X, PEI J G, et al. Karst ecosystem in Southwest China restricted by geological conditions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.
- [86] 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.
HUANG L Y. The seasonal change and the environmental effects of dissolved organic carbon in soils of Mao village[D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2006.
- [87] 曹建华, 周莉, 杨慧, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区林下土壤碳迁移对比及岩溶碳汇效应研究 [J]. 第四纪研究, 2011, 31(3): 431-437.
CAO J H, ZHOU L, YANG H, et al. Comparison of carbon transfer between forest soils in karst and clastic areas and the karst carbon sink effect in Maocun village of Guilin[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(3): 431-437.
- [88] 章程. 典型岩溶泉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.
ZHANG C. Speciation of soil nutrient elements and their controlling factors in different land uses of typical karst spring watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 165-169, 199.
- [89] 李世朋, 汪景宽, 王开勇, 等. 土壤中钙键和铁/铝键结合的有机碳差异的比较[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 501-504.
LI S P, WANG J K, WANG K Y, et al. Comparisons of Ca-bound and Fe/Al-bound organic carbon in soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(6): 501-504.
- [90] 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.
HU L N, SU Y R, HE X Y, et al. The speciation and content of calcium in karst soils, and its effects on soil organic carbon in karst region of Southwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1946-1953.

(责任编辑: 符支宏)