

李 颖,刘秀明,周德全. 中国南方喀斯特地区 SOC 空间异质性及其对碳储量估算的指示意义[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):256-264.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.08.060

# 中国南方喀斯特地区 SOC 空间异质性及其对碳储量估算的指示意义

李 颖<sup>1,2,3</sup>, 刘秀明<sup>2,3</sup>, 周德全<sup>1</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550081;  
3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州普定 562100)

**摘要:**土壤有机碳(soil organic carbon, 简称 SOC)作为土壤碳库的重要组成部分,在地球表层碳循环中起着不可忽视的作用。SOC 储量的正确评估对研究全球环境变化和碳循环具有重要意义。喀斯特地区由于其特殊的地质背景和人类活动等因素,导致其土壤有机碳易于积累,有机碳含量较高,在全球碳循环中具有重要影响。通过文献检索收集近 10 年来已经公开发表的关于南方喀斯特地区土壤有机碳密度和储量估算研究中的数据,总结分析南方喀斯特分布区的 SOC 空间分布特征,认为喀斯特地区 SOC 空间分布具有高度的空间异质性,并由此导致喀斯特地区的 SOC 储量估算存在很大的不确定性。研究分析不同因素制约下的 SOC 的空间异质性特征,认为地质背景、土壤自身因素、人类活动等是影响土壤 SOC 空间异质性分布的主要原因。基于喀斯特 SOC 空间异质性的特征及影响因素,提出适合喀斯特地区土壤有机碳储量估算的研究思路和方法,旨在为今后喀斯特地区 SOC 研究工作提供科学的支撑。

**关键词:**喀斯特;土壤有机碳(SOC)空间异质性;影响因素;碳储量

**中图分类号:** S153.6;X144 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)08-0256-09

随着近十几年来经济的高速发展,我国同时成为全球能源消费和碳排放大国,不可避免地受到国际社会的广泛关注,在国际碳减排外交谈判工作中,我国面临着前所未有的外交压力和碳减排的任务。因此,进一步摸清我国的碳库、碳排放和碳收支的情况,估算我国生态系统的碳汇能力,揭示碳生物地球化学循环及对气候的响应机制,成为目前国家应对气候变化和温室气体减排的长久之策。学术界认为,在全球生态系统的碳循环过程中,土壤有机碳(soil organic carbon, 简称 SOC)库是其中重要组成部分,全球土壤碳储量(约 2 500 Pg)比大气碳库(约 750 Pg)和陆地植被碳库(约 500~600 Pg)的总和还要高出很多<sup>[1-3]</sup>。其中, SOC 储量在 1 395~2 200 Pg 之间<sup>[4-7]</sup>,占据了土壤总碳库的 1/2 以上。SOC 的损失对全球大气 CO<sub>2</sub> 含量升高的贡献率为 30%~50%<sup>[8]</sup>,同时土壤有机碳含量及其动态平衡是反映土壤质量和土壤肥力的 1 个重要指数<sup>[9]</sup>。

我国几乎各省份都有不同面积的石灰岩分布,出露地表的总面积约有 130 万 km<sup>2</sup>,约占全国总面积的 13.5%,其中南方地区的石灰岩成片分布,面积达到 90.7 万 km<sup>2</sup><sup>[10]</sup>,以滇、黔、桂为主要分布省份,形成全球三大典型喀斯特分布区域之

一(图 1)。喀斯特区域是 1 个复杂的二元空间异质体结构<sup>[12-13]</sup>,它的土壤空间变异性很大。同时,喀斯特地区的地形地貌条件、水热条件、植被立地条件、土壤发育条件以及强烈的岩溶作用等都不同于非喀斯特地区,因此喀斯特地区的 SOC 循环和空间分布具有独特的特征<sup>[14-16]</sup>。加上研究方法的不同,使得南方喀斯特地区 SOC 密度和碳储量的研究存在很大的不确定性。鉴于上述情况,本研究通过文献检索收集近 10 年来公开发表的关于南方喀斯特分布区土壤有机碳密度和碳储量估算研究数据,并统计分析南方喀斯特地区的 SOC 空间分布特征,研究总结其影响机制及对土壤有机碳储量估算的指示意义,最后对未来工作进行展望,旨在提出更加适合我国南方喀斯特地区土壤 SOC 储量估算的方法和思路,为今后喀斯特地区土壤碳库和碳平衡研究工作的开展提供科学支撑,为评估喀斯特生态系统的碳截留能力提供参考。

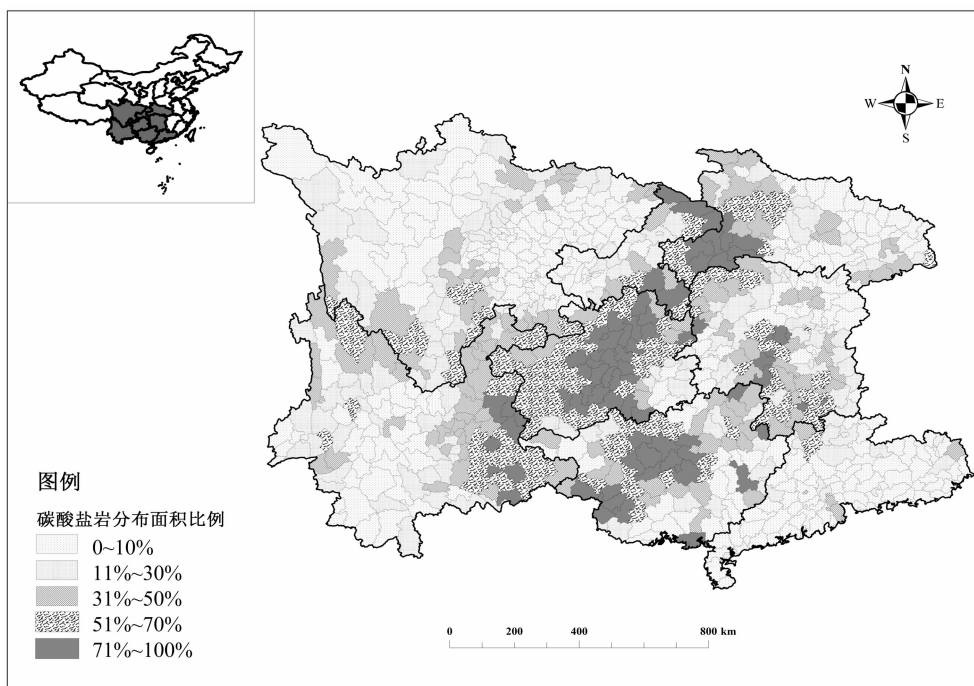
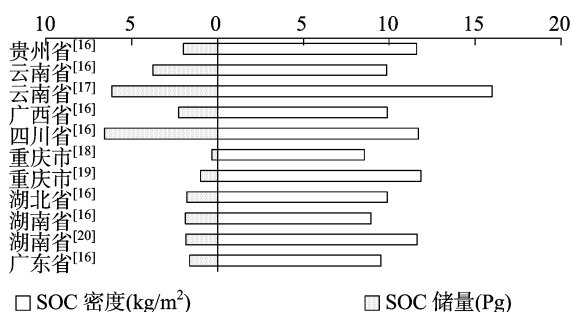
## 1 南方喀斯特地区 SOC 空间分布特征

由有喀斯特分布的南方 8 省份 SOC 密度和碳储量的空间分布情况(图 2)可知,不同省份的 SOC 密度和储量都存在较大差异;同一省份,不同研究者的结果也存在很大出入。分析认为,不同地区间 SOC 空间分布差异是因为地形、气候、植被、成土母质、土壤本身性质及人类活动等诸多因子都会对 SOC 密度及空间分布产生影响;而同一地区不同研究结果的不确定性主要是由不同研究者采用的数据源和研究方法不同导致的。喀斯特地区复杂的土壤环境和理化性质进一步加剧了土壤碳库研究的不确定性,因此探清喀斯特地区影响 SOC 空间分布的主要因素,确立适合喀斯特地区的土壤有机碳储量估算是目前准确预测喀斯特碳库的首要任务。

收稿日期:2017-12-03

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502301);贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目[编号:黔科合平台人才(2016)5648]。

作者简介:李 颖(1992—),女,河北石家庄人,硕士,主要从事自然地理学、喀斯特土壤有机碳研究。E-mail:1209813215@qq.com。  
通信作者:周德全,教授,主要从事地质学、喀斯特地形地貌、喀斯特土壤等方面研究。E-mail:1460176514@qq.com。

图1 我国南方喀斯特地貌分布情况<sup>[11]</sup>图2 我国南方 8 省份 SOC 密度和储量分布<sup>[17-21]</sup>

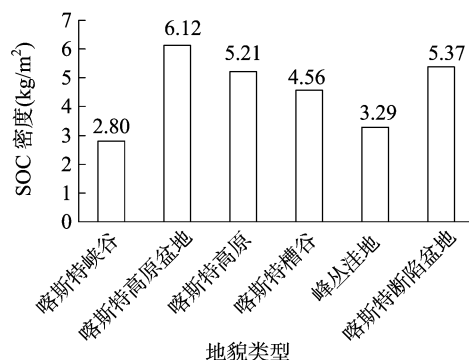
## 2 喀斯特地区 SOC 空间异质性的影响机制分析

### 2.1 地质背景对 SOC 空间异质性的制约

在构造运动上,我国南方喀斯特地区主要受加里东运动和喜马拉雅运动的影响,形成了西部地槽区、中部扬子准地台区和东南部华南加里东地槽区<sup>[22]</sup>。在岩性上,以广泛分布的深厚、古老的碳酸盐岩(主要包括石灰岩和白云岩)为特色。在地质、气候、水文、植被等的综合影响下,以地层岩性为基础,地质构造为主导,水动力为决定条件,形成了喀斯特地区复杂的组合地貌类型<sup>[23-24]</sup>。主要的喀斯特地貌类型有中高山、断陷盆地、峰丛洼地、岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶高原、峰林平原和溶丘洼地等<sup>[25]</sup>。由于强烈的岩溶作用,使得原本就破碎的地表更加破碎,在小尺度范围内就形成了以出露整体基岩为主体构成的石面、石台,以土体不连续构成的土面、石土面,以岩石溶蚀沟为主体的石槽、石沟,以岩石裂隙为主体的石缝,以岩层或岩石水平突出构成的石洞,以及以岩石溶蚀凹地为主体的石坑等小生境类型<sup>[26-27]</sup>。

**2.1.1 不同地貌单元下 SOC 的空间异质性** 地貌单元的分布受控于构造运动、气候、水文等因素,同时不同地貌单元所表现出来的区别之处也在于地质构造、水文水动力、气候、植

被以及土被覆盖等方面。不同的地貌单元在各自水文水动力、气候、植被和土壤类型等的长期共同作用下,形成了不同厚度、不同养分和不同质地的土被覆盖,这就导致了不同地貌单元下 SOC 的空间分异。以 SOC 密度为例,不同地貌单元表层土壤(0~20 cm 深)SOC 密度存在很大的空间异质性。由图 3 可知,不同地貌单元表层土壤 SOC 密度表现为喀斯特高原盆地>喀斯特断陷盆地>喀斯特高原>喀斯特槽谷>峰丛洼地>喀斯特峡谷。喀斯特盆地 SOC 密度明显高于其他地貌类型,这可能与盆地地貌单元内更有利于有机物质的沉积与集聚有关。

图3 不同地貌单元表层土壤(0~20 cm深) SOC 密度空间分布<sup>[18-19,28-30]</sup>

**2.1.2 岩性制约下 SOC 的空间异质性** 喀斯特地区典型的特征之一就是广布的碳酸盐岩,喀斯特地区的成土速率与喀斯特发育的物质基础,即碳酸盐岩沉积建造中的酸不溶物含量密切相关<sup>[31]</sup>。我国南方地区的土壤与基岩之间具有继承性的关系<sup>[32]</sup>,所以岩石岩性不仅影响土壤的成土速率,对于土壤中的元素及物质的含量也有很大的影响。不同岩性下的成土母质是影响土壤类型的重要因素,成土母质的差异往往是土壤分异的主要原因<sup>[33]</sup>。

通过对贵州省普定县后寨河流域 SOC 含量和密度的空间分布特征(图 4)分析认为,发育土壤的母岩岩性差异对土壤 SOC 的空间分布存在明显的制约作用。不同岩性发育的土壤表层和剖面的 SOC 含量变化趋势一致:石灰岩 > 白云岩 > 泥灰岩 > 第四纪黄黏土 > 砂页岩,且差异明显;不同岩性发育的土壤表层和剖面的 SOC 密度则存在不同变化趋势,

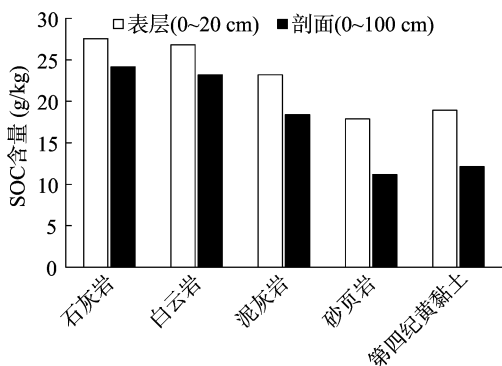


图4 后寨河流域不同岩性发育的土壤 SOC 含量和密度空间分布<sup>[34]</sup>

2.1.3 地形因素制约下 SOC 的空间异质性 地形因素主要包含海拔高度、坡位、坡向、坡度等因子。地形因素主要通过影响水热分布及过程、植被及微生物的生长、土地管理利用方式等来影响土壤碳含量和空间分布。邱虎森等以贵州省清镇市王家寨为试验场,通过协方差分析证明,海拔高度对 SOC 的方差贡献率为 53.946%,达到了显著影响水平 ( $P <$

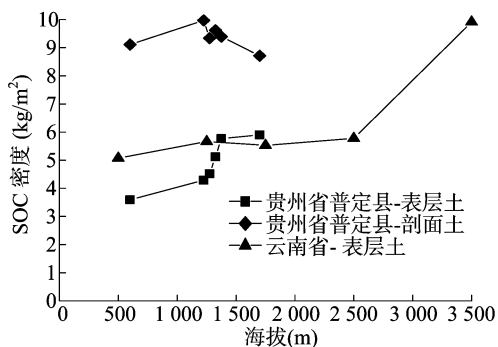
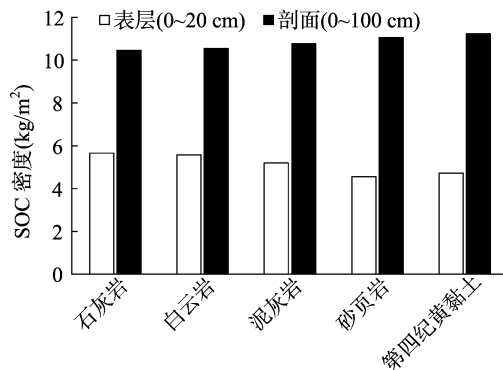


图5 不同海拔高度下 SOC 空间分布特征<sup>[20,33,35]</sup>

有研究结果证明,不同坡位 SOC 含量大小表现为上坡 > 坡顶 > 中坡 > 下坡 > 坡脚 > 洼地<sup>[34]</sup>,分析认为,上坡、中坡和坡顶处多为林地,植被覆盖度高,有机物质输入丰富,且人为干扰度小,有利于有机质的贮存,而坡脚和洼地等处多为农用地,植被覆盖度小,人为干扰多,不利于有机物质的贮存。不同坡向的 SOC 含量表现为南坡 > 北坡 > 西坡 > 东坡 > 无坡向;不同坡度的 SOC 含量及 SOC 密度大致随坡度增大而增加<sup>[34,37]</sup>。分析认为,坡向和坡度对于 SOC 含量的制约机制和坡位相似,都是通过土壤厚度、植被覆盖度、有机物质输入量以及人为干扰程度来制约和影响 SOC 的贮存。喀斯特峰丛洼地区域存在典型的“养分倒置”规律,所以,在研究喀斯特峰丛洼地景观单元的土壤有机碳分布特征时,须考虑不同坡位土壤有机碳的异质性<sup>[38]</sup>。受研究区特殊地形以及在此基础上土地利用结构的影响,SOC 在洼地短轴方向的变异程度大于长轴方向,表现出明显的带状各向异性特征<sup>[39]</sup>。

表层 SOC 密度表现为石灰岩 > 白云岩 > 泥灰岩 > 第四纪黄黏土 > 砂页岩,且石灰岩和白云岩发育的土壤 SOC 密度相差并不大;剖面 SOC 密度表现为第四纪黄黏土 > 砂页岩 > 泥灰岩 > 白云岩 > 石灰岩,出现表层 SOC 密度和剖面密度差异的原因可能与不同岩性发育的土壤土层厚度有关,第四纪黄黏土发育的土壤土层厚度最大,而石灰岩发育的土壤土层厚度最薄。



0.05)<sup>[35]</sup>。对贵州省普定县、云南省和湖南省的土壤 SOC 研究结果(图 5)表明,海拔越高,土壤表层的 SOC 密度总体上越大,土壤 SOC 含量也越高;但普定县的剖面土 SOC 密度随海拔高度的增加呈现出先增加后减少的趋势,分析认为,出现这种情况的原因是随着海拔高度的增加,土壤厚度变薄,导致剖面 SOC 密度减小。

## 2.2 土壤本身因素对 SOC 空间异质性的制约

我国南方喀斯特地区的土壤类型分布既有地带性的红壤、黄壤和黄棕壤,也有非地带性的石灰土、粗骨土、紫色土、山地草甸土、水稻土等。土壤类型对 SOC 的影响一方面体现在成土母质背景有机质含量有所不同,另一方面体现在土壤自身的理化性质影响有机碳的含量<sup>[40]</sup>。

### 2.2.1 南方喀斯特地区不同土壤类型 SOC 空间分布特征

以云南、广西、贵州和重庆等省份的不同土壤类型表层 SOC 密度(图 6)为例,从趋势线走势可知,不同土壤类型间 SOC 密度分布具有很大的异质性,大小顺序整体表现为暗棕壤 > 山地草甸土 > 棕壤 > 黄棕壤 > 石灰土 > 黄壤 > 水稻土 > 红壤 > 赤红壤 > 砖红壤 > 紫色土 > 粗骨土。分析认为,其原因可能与不同土壤发育的环境条件和土壤自身的理化性质有关,暗棕壤主要发育在温暖湿润的混交林下,大量的有机物质归还土壤,微酸性环境又可以抑制微生物的活动,凋落物分解缓

慢,因此它的表层土壤 SOC 含量高于其他土类。紫色土区域由于农业开发较早,加上植被稀疏,水土流失严重,使得 SOC 含量较低。而粗骨土由于发育地形的原因,水土侵蚀严重,土壤有机质流失严重,导致 SOC 含量较少<sup>[43]</sup>。对柱状图(图 6)

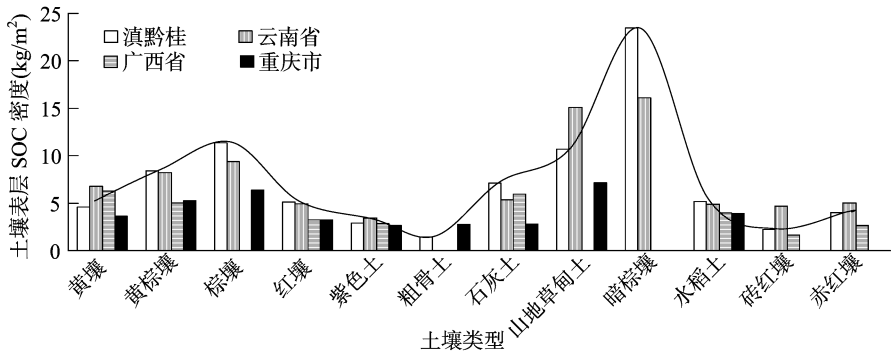


图6 中国南方喀斯特地区不同土壤类型表层 SOC 密度分布<sup>[18-19,41-42]</sup>

2.2.2 土壤理化性质对 SOC 空间分布的影响 土壤理化性质主要包括土壤容重、砾石含量、厚度、结构和质地等。土壤理化性质在局部范围内影响 SOC 的含量<sup>[44]</sup>。通过土壤理化性质与 SOC 含量的相关性分析可知,全氮含量、水解氮含量、速效钾含量、总孔隙度、自然含水量、毛管持水量、田间持水量、上层渗透性等与 SOC 含量呈显著正相关关系;而容重与 SOC 含量在  $\alpha=0.01$  水平上呈显著负相关关系;全磷含量、下层渗透性与 SOC 含量在  $\alpha=0.05$  水平上呈显著正相关关系(表 1)。有研究认为,土壤 SOC 的稳定性受到土壤金属氧化物、黏粒含量以及黏土矿物种类等的影响<sup>[45-46]</sup>。土壤交换性  $\text{Ca}^{2+}$  是喀斯特地区 SOC 的主要控制因素<sup>[47]</sup>,有机质腐殖化后的胡敏酸易与  $\text{Ca}^{2+}$  形成能稳定土壤有机质的胡敏酸钙,从而有利于土壤有机质的积累<sup>[48-49]</sup>。土壤的结构和质地可以通过影响土壤的容重和土壤的干湿度、松紧度等来影响 SOC 的含量及碳密度。喀斯特地区不同粒径颗粒的土壤中 SOC 含量差异明显,表现为砂粒 > 粉砂粒 > 黏粒<sup>[37,50]</sup>。土壤团聚体结构与 SOC 之间存在着密切的关系,不同粒径大小团聚体的有机碳性质存在差异<sup>[51]</sup>。Jastrow 等研究认为,微团聚体中 SOC 比大团聚体中 SOC 形成时间更早,大团聚体比微团聚体中有机碳含量多<sup>[52]</sup>。

表 1 土壤理化性质与 SOC 含量的相关性分析<sup>[45]</sup>

土壤理化性质	与 SOC 含量的相关系数	土壤理化性质	与 SOC 含量的相关系数
全氮含量	0.834 **	自然含水量	0.335 **
水解氮含量	0.749 **	毛管持水量	0.497 **
速效钾含量	0.427 **	田间持水量	0.544 **
全磷含量	0.270 *	上层渗透性	0.376 **
容重	-0.504 **	下层渗透性	0.292 *
总孔隙度	0.355 **		

注: \* 表示在  $\alpha=0.05$  水平上显著; \*\* 表示在  $\alpha=0.01$  水平上显著。

土壤的容重、厚度、砾石含量、有机质含量等均是在估算 SOC 储量中必不可少的属性因子,因此,我国南方喀斯特地区 SOC 储量估算研究离不开对土壤因素的考虑,只有在探清土壤类型和土壤理化性质对喀斯特地区土壤 SOC 空间异质

分析可知,同一种土壤类型的 SOC 密度也存在很大的地区差异性。在 SOC 储量估算过程中,既要考虑土壤类型的异质性也要考虑区域空间异质性。

性的影响关系时,才能准确地估算出喀斯特地区的 SOC 储量。

2.3 人类活动对 SOC 空间异质性的制约

人类活动对土壤 SOC 的影响主要表现在通过改变土地利用方式或者施用化肥农药以及过度开垦利用导致的石漠化,影响土壤 SOC 的排放和增汇效应,进而增加或者减少土壤 SOC 的含量,改变其空间分布。日益增强的土地利用加速土壤碳呼吸,导致动植物残体和有机碳分解增强,土壤储存碳大量减少,通过水土、大气输出成为重要碳源<sup>[53]</sup>。在喀斯特地区,林地、灌木林地、草地不仅具有保持土壤有机碳的功能,而且可以提高土壤  $\text{CO}_2$  浓度,降低 pH 值,加快碳酸岩盐的溶蚀反应,而当这些土地利用类型发生变化后,土壤碳含量就会降低,pH 值增高<sup>[22,54]</sup>。

2.3.1 土地利用方式对 SOC 蓄积量的影响 人类活动对 SOC 蓄积量的影响远超过自然变化,其中,土地利用变化导致陆地生态系统碳元素的释放是大气  $\text{CO}_2$  浓度不断升高的主要原因之一<sup>[55]</sup>。土地利用方式的变化会直接影响 SOC 的含量和分布,同时通过影响与 SOC 形成和转换有关的环节间接影响 SOC 分布<sup>[56]</sup>,此外,土地利用变化可通过改变土壤有机质的分解速率来影响 SOC 蓄积量。从南方喀斯特几个代表区域的研究结果(图 7)可知,不同土地利用方式下土壤 SOC 含量差异很大,不同研究区之间也存在差异。广西桂林不同土地利用方式下 SOC 含量依次为水田 > 弃耕地 > 旱地 > 园地 > 林地 > 易涝地 > 草地,重庆金佛山的研究结果为竹林 > 耕地 > 林地 > 草地 > 灌草,贵州普定的研究结果为水田 > 灌草 > 退耕 15 年草丛 > 旱地 > 退耕 3 年草丛,贵州晴隆地区为次生林 > 人工林 > 灌草 > 草地 > 水田 > 旱地。桂林和普定地区的水田 SOC 含量高于旱地及其他土地利用类型,原因可能是水田长期处于湿润环境,减少了 SOC 的矿化分解,加上有机物输入充足,从而有利于 SOC 的累积<sup>[61]</sup>。晴隆地区次生林、人工林的 SOC 含量较高,主要是由于林地凋落物较多,同时树木有大量根系的脱落物和分泌物,有机质易于积累。

2.3.2 人类干扰对 SOC 空间分布的影响 在人为干扰对喀斯特地区植被多样性和土壤养分的影响研究中,有人认为,人

为干扰会增加土壤容重、降低土壤含水量、增加 PH 值,使得土壤碳含量降低<sup>[62]</sup>。人类干扰一般包括土地利用方式的人为改变、农业化肥施用、退耕还林以及其他形式的人为干扰等。不同的农业管理措施对土壤固碳的影响主要通过对土壤微团聚体更新与转化的改变,使有机碳的保护机制发生变化实现<sup>[63]</sup>。

农业化肥施用一方面可以提高农作物的产量,另一方面会影响土壤微生物和土壤酶的活性,进而影响土壤中有有机质的矿化和土壤养分的有效性<sup>[64]</sup>,所以化肥施用必然会影响农田土壤 SOC 的含量和空间分布。有学者认为,施肥能够使得

土壤 SOC 含量增加 4.71% ~ 34.84%,其中施用有机肥可以使 SOC 含量增加 6.24% ~ 20.08%<sup>[65]</sup>。施用有机肥显著提高了土壤剖面有机碳储量,长期耕作及施用有机肥在增加土壤剖面 SOC 储量方面具有突出效应<sup>[66]</sup>。不同施肥方式影响喀斯特地区农田 SOC 含量变化趋势,且在施用有机肥后,第 2 季农田土壤 SOC 含量显著高于第 1 季,说明有机肥的连续施用能够显著增加土壤 SOC 含量<sup>[67]</sup>。农业灌溉同样会影响土壤 SOC 的含量和空间分布,有研究认为,农田水分变化对 SOC 含量存在增加、降低或不显著影响等多种可能,不同气候、土壤类型下灌溉对土壤 SOC 含量变化存在明显不同<sup>[68]</sup>。

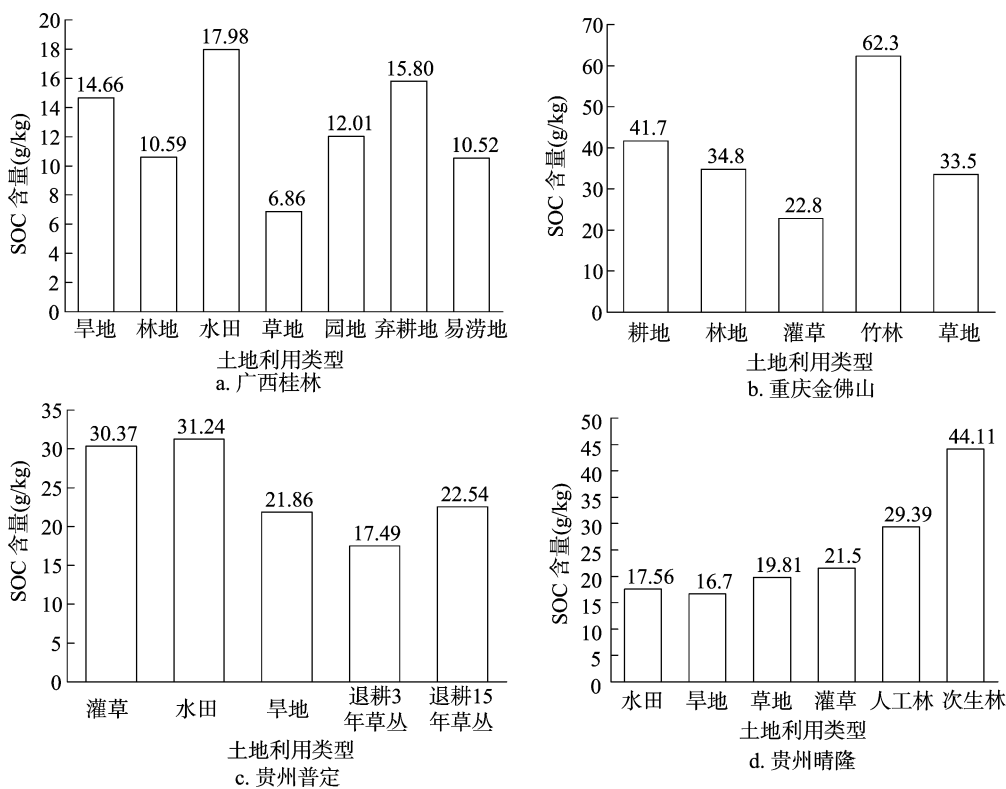


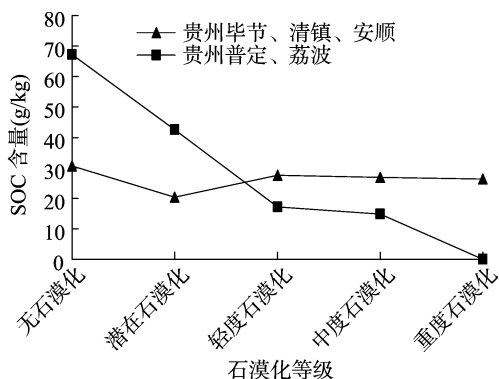
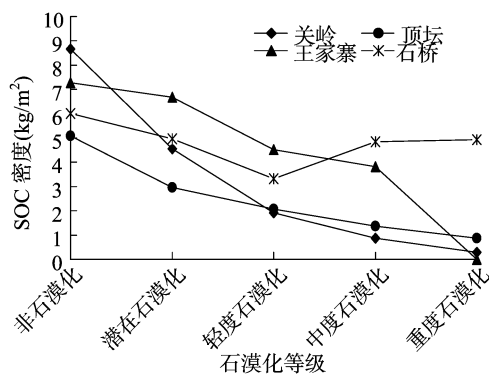
图7 不同土地利用方式对土壤表层 SOC 空间分布的影响<sup>[57-60]</sup>

喀斯特地区原本脆弱的生态环境加上越来越频繁的人类活动,导致了喀斯特地区生态环境的严重退化和严重的人口贫困问题。因此在国家政策的推动下,近年来,我国南方喀斯特地区普遍实行了退耕还林的生态保护措施。与耕地相比,退耕还林明显提高了 SOC 质量分数和密度( $P < 0.05$ ),SOC 密度表现为退耕还林地大于耕地,同时退耕还林还提高了土壤碳库管理水平<sup>[69]</sup>。广西毛南县典型喀斯特峰丛洼地区的研究结果为,退耕地 SOC 含量(75.5 g/kg)显著高于坡耕地(15.1 g/kg);半变异函数分析结果为,退耕地基台值(521.7)是坡耕地(25.7)的 20.3 倍,证明退耕还林能显著提高 SOC 累积量,且退耕地 SOC 空间异质性远大于坡耕地<sup>[70]</sup>。

**2.3.3 石漠化对 SOC 空间分布的影响** 石漠化是指在热带、亚热带湿润、半湿润气候条件和岩溶极其发育的自然背景下,受人为活动干扰,使地表植被遭受破坏,导致土壤严重流失,基岩大面积裸露或砾石堆积的土地退化现象,是岩溶地区土地退化的极端形式<sup>[71]</sup>。喀斯特充分发育的南方地区也是石漠化发生的重灾区,而石漠化的程度和石漠化过程对喀斯

特地区的 SOC 储量和碳密度具有不可忽视的影响作用。贵州石漠化地区的研究结果(图 8)表明,随着石漠化程度的加深,土壤有机碳含量和密度均有减少的趋势,尤其是在石漠化初期,SOC 含量和密度降幅较大。有研究认为,SOC 储量随石漠化程度加剧而急剧降低,且集中存储在土壤表层,任何水土流失情况都会导致 SOC 储量的减少<sup>[74]</sup>。另有研究发现,石漠化程度从轻度到中度的发展过程中,土壤厚度、土壤覆盖度同样呈现显著下降趋势,而且在石漠化发展后期的下降程度更为明显<sup>[75]</sup>。喀斯特地区土壤有机碳分组测试结果表明,随着石漠化程度增加,轻组有机碳、重组有机碳、可矿化碳、土壤微生物生物量碳和总有机碳含量均呈下降趋势,且轻组有机碳占总有机碳的比例也有减少趋势<sup>[72,76]</sup>。

石漠化直接导致喀斯特地区土层变薄,大面积的裸岩出露,土被覆盖呈现不连续、碎片化,因此在小空间尺度上,岩石裸露率是影响 SOC 空间分布的重要因子<sup>[28]</sup>。岩石裸露率关系到实际的土壤分布面积,土壤厚度关系到土壤剖面 SOC 密度,因此,在喀斯特地区的 SOC 储量估算中,岩石裸露率和土

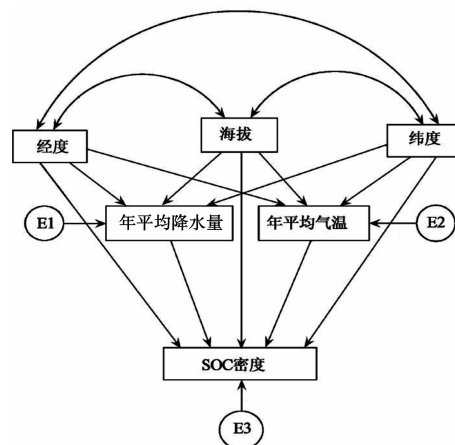
图8 不同石漠化等级下 SOC 含量和密度的空间分布特征<sup>[28,45,72-73]</sup>

层实际厚度是不容忽视的 2 个因子。

#### 2.4 环境因素对 SOC 空间异质性的制约

环境因素主要是指海拔、经纬度等自然地理因素和降水量、气温等气候因素,其中,海拔和经纬度对 SOC 空间分布的制约也主要反映在通过控制降水和气温等因素上。滇黔桂地区的研究结果表明,环境因子对 SOC 密度的变异性解释能力大于 20%,是影响表层和剖面土壤 SOC 密度的主要因子,通过建立通径模型(图 9)可以反映各环境因素对 SOC 密度的制约关系<sup>[41]</sup>。

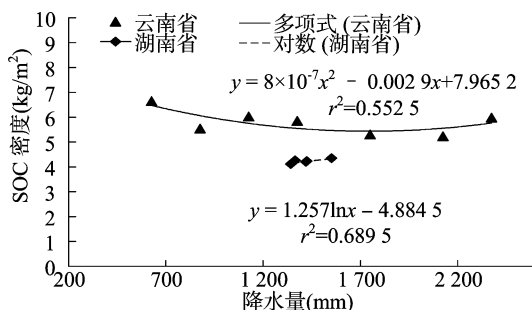
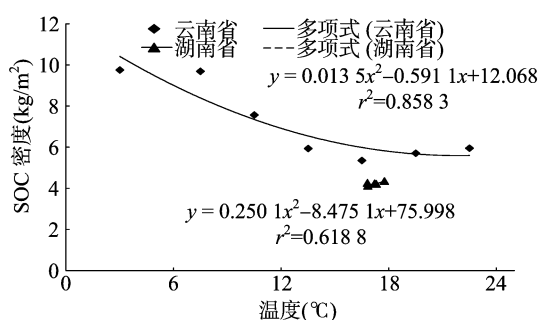
气候因素在 SOC 蓄积及消耗过程中起着非常重要的作用,其中降水量和气温是主要的影响因子<sup>[77]</sup>,云南省 SOC 密度与温度、降水量的相关系数分别达到 0.858 3、0.552 5,湖南省的 SOC 密度与温度、降水量的相关系数分别为 0.618 8、0.689 5(图 10)。降水量对土壤微生物的活性和有机质转换产生影响,降水量在一定范围内时,土壤水分可促进微生物的活性,但降水量过多,会导致土壤通气不良,抑制微生物活性,有机质分解速度缓慢,有利于有机碳的积累<sup>[36]</sup>。气温会对微生物和植物的初级净生产力同时产生影响,气温的变化可导致 SOC 的释放量发生变动<sup>[78]</sup>,气温升高,土壤微生物活动增加,有机质分解速率加快,SOC 含量降低,反之亦然<sup>[79]</sup>。但研究区域不同,不同环境因素对 SOC 的制约作用也不同,湖南



E1、E2 和 E3 分别表示年均降水量、年均气温和 SOC 密度的测量误差项

图9 环境因素对 SOC 密度的影响通径模型<sup>[41]</sup>

省的研究结果表明,气候因素不是影响 SOC 密度空间分布的主要因子<sup>[21]</sup>。而在云南省,降水量和气温都显著影响 SOC 密度空间分布,并且不同降雨带和不同温度带对于 SOC 密度空间分布的制约力不同<sup>[36]</sup>,广西 SOC 密度与年均温、经纬度、海拔等环境因素均存在显著的相关性( $P < 0.01$ )<sup>[80]</sup>。

图10 气候因素对 SOC 密度空间分布的影响<sup>[21,36]</sup>

### 3 总结与展望

#### 3.1 喀斯特土壤 SOC 空间异质性对碳储量估算的指示意义

高度的空间异质性是喀斯特地区土壤碳库研究中的一大难题,喀斯特地区地形地貌复杂、岩溶作用强烈等,导致土壤的空间异质性远比非喀斯特地区高。由石灰岩、白云岩和含有其他杂质的碳酸盐岩发育而来的喀斯特土壤,其土体连续性差、土层浅薄,有大面积的裸岩分布,土壤的剖面形态、理化

性质等都不同于地带性土壤<sup>[81-82]</sup>。喀斯特地区土壤高度的空间异质性决定了非喀斯特地区碳储量和碳密度的估算方法并不适用于喀斯特地区<sup>[83]</sup>。同时,由于喀斯特地区特殊的地质和气候环境,使得该地区生态系统抗干扰能力弱、稳定性差、自我调节能力低,加上土壤基岩出露、土壤存量少、分布不连续、地貌类型复杂等原因,导致喀斯特土壤有机碳储量估算存在许多的不确定性因素<sup>[84-85]</sup>。目前,有些研究者根据喀斯特地区土壤的特点,对已有的土壤研究方法进行了改进,例如

有研究者将裸岩的空间分布考虑在喀斯特地区土壤碳储量的研究中<sup>[74,86]</sup>。也有学者对喀斯特地区的土样采集方法进行了改进,如王世杰等认为,喀斯特土壤有机碳的空间异质性和代表性土样采集方法应以小生境面积为权重确定样地土壤样品组成<sup>[87]</sup>。

在对喀斯特地区土壤有机碳储量进行估算时,虽然已经有学者将岩石裸露率、土壤厚度等指标考虑在内<sup>[88-89]</sup>,但基本上均未考虑影响 SOC 储量估算的砾石含量和估算中其他指标的影响程度<sup>[84]</sup>。因此,目前确立 1 套适用于喀斯特地区 SOC 储量估算的研究方法是准确估算喀斯特土壤 SOC 储量的前提条件。

### 3.2 我国南方喀斯特地区 SOC 储量研究展望

传统的 SOC 储量估算方法主要有土壤类型法、土地利用类型法、生命带类型法、地理信息系统 (GIS) 估算法、模型法等<sup>[90-91]</sup>,各估算方法本质上一致,但限于数据获取的质量和来源,传统方法中有一些不适用于喀斯特地区。以应用范围最广的土壤类型法为例,根据喀斯特地区土壤空间异质性的特征,可对土壤类型法进行适当改进。

3.2.1 基于地貌单元对土壤空间异质性制约的土壤类型法的改进 因地貌单元对 SOC 含量的空间分布有很大影响,所以在对南方喀斯特地区 SOC 估算时,首先按照中高山、岩溶断陷盆地、岩溶高原、岩溶峡谷、峰丛洼地、岩溶槽谷、峰林平原和溶丘洼地等八大地貌类型<sup>[92]</sup>进行区域划分,再对不同地貌类型内进行土壤类型的划分,即基于地貌类型划分的土壤类型法。

3.2.2 基于地形坡度因素对土壤类型法的再改进 坡度大小对土地利用类型、水土分配、土壤养分分配、土壤理化性质等都有很大影响,南方喀斯特中心地区贵州省坡度大于 6°的面积占 84% 左右,因此,有必要根据坡度等级进一步精确划分 SOC 空间分布特征,以准确估算 SOC 储量。

3.2.3 改进 SOC 储量估算基本公式 传统的非喀斯特地区 SOC 密度计算公式为

$$SOC D_i = C_{soc} \rho_i H_i / 10. \quad (1)$$

式中:  $SOC D_i$  表示第  $i$  类土壤的有机碳密度,  $kg/m^2$ ;  $C_{soc}$  表示第  $i$  类土壤的有机碳含量, %;  $\rho_i$  表示第  $i$  类土壤的容重,  $g/cm^3$ ;  $H_i$  表示第  $i$  类土壤的厚度,一般表层取 20 cm,剖面取 100 cm; 10 为单位转换系数。

传统的非喀斯特地区 SOC 储量计算公式为

$$SOC S_i = SOC D_i \times S_i \times 1\,000. \quad (2)$$

式中:  $SOC S_i$  表示第  $i$  类土壤的有机碳储量, t;  $S_i$  表示第  $i$  类土壤的面积,  $km^2$ ; 1 000 为单位转换系数。

喀斯特地区土壤空间异质性大,土壤有机碳含量、土层厚度、容重等指标空间变异性很大。因此,喀斯特地区的土壤有机碳密度须要先分层计算,再求和。此外,由于大部分喀斯特地区土层薄,土壤厚度不足 100 cm,甚至一些坡地上土壤平均厚度仅为 4.28 cm<sup>[93]</sup>,严重低于 100 cm,所以利用原公式计算的土壤剖面有机碳密度将远大于实际碳密度。因此,在对南方喀斯特地区 SOC 密度进行计算时,土壤剖面厚度 ( $H$ ) 取实际土壤厚度值。喀斯特地区土壤中多含有粒径大于 2 mm 的石砾,会使得单位体积内土壤的含量减少,因此在计算碳密度时应去除粒径大于 2 mm 的石砾含量。改进后的土壤有机

碳密度计算公式如下:

$$SOC D'_{ij} = C_{soc} \rho_{ij} H_{ij} (1 - \varepsilon_{ij}) / 10; \quad (3)$$

$$SOC D'_i = \sum_{j=1}^m C_{soc} \rho_{ij} H_{ij} (1 - \varepsilon_{ij}) / 10. \quad (4)$$

式中:  $SOC D'_{ij}$  表示第  $i$  类土壤的第  $j$  层有机碳密度,  $kg/m^2$ ;  $C_{soc}$  表示第  $i$  类土壤的第  $j$  层有机碳含量, %;  $\rho_{ij}$  表示第  $i$  类土壤的第  $j$  层土壤容重,  $g/cm^3$ ;  $H_{ij}$  表示第  $i$  类土壤的第  $j$  层土壤厚度,取实际厚度值, cm;  $SOC D'_i$  代表第  $i$  类土壤的有机碳密度,  $kg/m^2$ ; 10 为单位转换系数。

喀斯特地区由于石漠化原因导致的岩石裸露面积十分广泛,土壤覆盖度较低。因此在估算土壤有机碳储量时,应将岩石裸露率考虑在内。基于此对土壤有机碳储量计算公式进行改进,计算公式如下:

$$SOC S'_i = SOC D'_i \times S_i \times (1 - \delta_i) \times 1\,000; \quad (5)$$

$$SOC S' = \sum_{i=1}^n SOC S'_i. \quad (6)$$

式中:  $SOC S'_i$  表示第  $i$  类土壤有机碳储量, t;  $S_i$  表示第  $i$  类土壤分布面积,  $km^2$ ;  $\delta_i$  表示第  $i$  类土壤分布区域的岩石裸露率, %;  $SOC S'$  表示总的土壤有机碳储量, t。

### 参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon - storage potential of soils [J]. Nature, 1990, 348 (6298): 232 - 234.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304 (5677): 1623 - 1627.
- [3] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展 [J]. 中国沙漠, 2002, 22 (3): 220 - 228.
- [4] Eswaran H, Berg E V D, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 90 (4): 192 - 194.
- [5] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298 (5870): 156 - 159.
- [6] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1976, 40 (3): 468 - 470.
- [7] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65 (1): 10 - 21.
- [8] IPCC. In: climate change; the IPCC scientific assessment [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990: 81.
- [9] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility [J]. Nature, 1994, 371 (6500): 783 - 785.
- [10] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation & Development, 2004, 15 (2): 115 - 121.
- [11] Cao J H, Yuan D X, Tong L Q, et al. An overview of karst ecosystem in southwest China: current state and future management [J]. J Resour Ecol, 2015, 6 (4): 247 - 256.
- [12] 尹亮, 崔明, 周金星, 等. 岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11 (1): 51 - 58.
- [13] Zhou Y C, Wang S J, Lu H, et al. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: example from SW China [J]. Acta carsologica, 2010, 39 (1): 115 - 122.
- [14] Chen W, Zheng H, Zhang W, et al. Effects of land cover on soil organic Carbon stock in a karst landscape with discontinuous soil

- distribution[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 774 – 781.
- [15] Liu T Z, Liu C Q, Lang Y C, et al. Dissolved organic carbon and its carbon isotope compositions in hill slope soils of the karst area of southwest China; implications for carbon dynamics in limestone soil [J]. Geochemical Journal, 2014, 48(3): 277 – 285.
- [16] Li L Q, Wang D, Liu X Y, et al. Soil organic carbon fractions and microbial community and functions under changes in vegetation; a case of vegetation succession in karst forest [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(8): 3727 – 3735.
- [17] Li Z P, Han F X, Su Y, et al. Assessment of soil organic and carbonate carbon storage in China[J]. Geoderma, 2007, 138(1/2): 119 – 126.
- [18] 包承宇, 曾和平, 张梦妍, 等. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 260 – 266.
- [19] 倪九派, 袁道先, 谢德体, 等. 重庆岩溶区土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6292 – 6301.
- [20] 黄雪夏, 倪九派, 高明, 等. 重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 54 – 58.
- [21] 陈仕栋. 湖南省土壤有机碳密度、储量的空间分布格局及其影响因子分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
- [22] 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.
- [23] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [24] 沈继方, 李焰云, 徐瑞春, 等. 清江流域岩溶研究[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [25] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 南方喀斯特石漠化分区的名称商榷与环境特点[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 18 – 24.
- [26] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 1 – 7.
- [27] 周游游, 黎树式, 黄天放. 我国喀斯特森林生态系统的特征及其保护利用——以西南地区茂兰、木论、弄岗典型喀斯特森林区为例[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2003, 20(3): 1 – 7.
- [28] 周文龙, 熊康宁, 龙健, 等. 喀斯特石漠化综合治理区表层土壤有机碳密度特征及区域差异[J]. 土壤通报, 2011, 42(5): 1131 – 1137.
- [29] 钟星银. 印江槽谷型喀斯特石漠化地区不同生态系统碳贮量及固碳机制[D]. 贵阳: 贵州大学, 2013.
- [30] 宋希娟, 王克林, 刘淑娟, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 655 – 659.
- [31] 李瑞玲. 贵州岩溶地区土地石漠化形成的自然背景及其空间地域分异[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2004.
- [32] 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D辑), 1999, 29(5): 441 – 449.
- [33] 王深法, 王人潮, 吴玉卫. 成土母质的概念及其分类——浙江省成土母质类型划分[J]. 浙江农业大学学报, 1989, 15(4): 389 – 395.
- [34] 李会. 喀斯特小流域土壤有机碳空间分布及影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [35] 邱虎森, 苏以荣, 陈香碧, 等. 喀斯特高原典型小流域土壤有机碳及其组分的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1956 – 1964.
- [36] 包承宇. 云南省土壤有机碳储量估算及空间分布分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [37] 田潇. 普定后寨河流域土壤有机碳储量估算[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [38] 夏银行, 黎蕾, 陈香碧, 等. 基于探地雷达技术估算喀斯特峰丛洼地不同坡位土壤有机碳密度的方法[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5): 920 – 927.
- [39] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1459 – 1463.
- [40] 宋莎, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. 土壤, 2011, 43(1): 44 – 49.
- [41] 张勇, 史学正, 赵永存, 等. 滇黔桂地区土壤有机碳储量与影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2314 – 2319.
- [42] 陈曦. 广西土壤有机碳储量估算及与全国部分省区的比较研究[J]. 地理科学, 2014, 34(10): 1247 – 1253.
- [43] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [44] 高岩红. 普定县农田土壤有机碳库演变特征及影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [45] 王霖娇, 盛茂银, 李瑞. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤有机碳的响应及其影响因素分析[J]. 生态科学, 2016, 35(1): 47 – 55.
- [46] 吴燕飞, 季宏兵, 褚华硕, 等. 黔东南施秉白云岩上覆土壤剖面理化特征与土壤有机碳含量关系研究[J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 267 – 276.
- [47] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 93 – 101.
- [48] 李龙波, 刘涛泽, 李晓东, 等. 贵州喀斯特地区典型土壤有机碳垂直分布特征及其同位素组成[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 241 – 247.
- [49] 邸欣月, 安显金, 董慧, 等. 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征[J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 697 – 708.
- [50] 廖洪凯, 龙健. 喀斯特山区不同植被类型土壤有机碳的变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2253 – 2258.
- [51] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618 – 623.
- [52] Jastrow J D, Boutton T W, Miller R M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60(30): 801 – 807.
- [53] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980 – 987.
- [54] Houghton R A, Skole D L, Lefkowitz D S. Change in the landscape of Latin America between 1850 and 1985: II. Net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere[J]. Forest Ecology and Management, 1991, 38(3/4): 173 – 199.
- [55] 李正才. 土地利用变化对土壤有机碳的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [56] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen L T. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响[J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 545 – 551.
- [57] 陈曦, 彭稳, 曹建华. 典型峰林平原土壤有机碳储量和分布特征研究[J]. 科技通报, 2012, 28(2): 167 – 173.
- [58] 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.
- [59] 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 等. 贵州喀斯特山区土地利用对土壤



- 有机碳及其周转速率的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1297–1303.
- [60] 谭秋锦, 宋同清, 彭晚霞, 等. 西南峡谷型喀斯特不同生态系统的碳格局[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5579–5588.
- [61] Liao Q L, Zhang X H, Li Z P, et al. Increase in soil organic carbon stock over the last two decades in China's Jiangsu Province[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 861–875.
- [62] 李胜平, 王克林. 人为干扰对桂西北喀斯特山地植被多样性及土壤养分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 20–27.
- [63] 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.
- [64] 郭永清. 云南干热河谷膏桐人工林生态系统碳库特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [65] 赵海超. 农作措施对春玉米农田土壤有机碳影响机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [66] 周建斌, 王春阳, 梁斌, 等. 长期耕种土壤剖面累积有机碳量的空间分布及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2540–2544.
- [67] 张亚杰, 邓少虹, 李伏生, 等. 喀斯特地区春玉米套作夏大豆下作物产量和农田碳储量对有机肥与化肥配施的响应[J]. 南方农业学报, 2015, 46(9): 1584–1590.
- [68] 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(9): 1764–1773.
- [69] 唐夫凯, 周金星, 崔明, 等. 典型岩溶区不同退耕还林地对土壤有机碳和氮素积累的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2): 44–50.
- [70] 吴敏, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1619–1627.
- [71] 国家林业局. 中国石漠化状况公报[EB/OL]. (2012–06–15) [2017–11–22]. <http://www.forestry.gov.cn/uploadfile/main/2012-6/file/2012-6-15-147e8ffa780643d68d6126b67ae60d7b>.
- [72] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 贵州省喀斯特地区石漠化土壤有机碳和全氮变异特征[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(4): 75–80.
- [73] 郭红艳, 崔明, 周金星, 等. 贵州岩溶峡谷区石漠化对土壤碳库的影响[J]. 林业科学研究, 2014, 27(6): 822–829.
- [74] 闫俊华, 周传艳, 文安邦, 等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. 热带亚热带植物学报, 2011, 19(3): 273–278.
- [75] 魏兴琥, 李森, 罗红波, 等. 粤北石漠化过程土壤与植被变化及其相关性研究[J]. 地理科学, 2008, 28(5): 662–666.
- [76] 卢红梅, 王世杰. 喀斯特石漠化过程对土壤活性有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 12–17.
- [77] Singh S K, Singh A K, Sharma B K, et al. Carbon stock and organic carbon dynamics in soils of Rajasthan, India[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(3): 408–421.
- [78] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming[J]. *Nature*, 1991, 351(6324): 304–306.
- [79] 代杰瑞, 庞绪贵, 曾宪东, 等. 山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1449–1458.
- [80] 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 282–291.
- [81] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055–1062.
- [82] 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.
- [83] Liu Y G, Liu C C, Wang S J, et al. Organic carbon storage in four ecosystem types in the karst region of southwestern China[J]. *PLoS One*, 2013, 8(2): e56443.
- [84] 张珍明, 周运超, 田潇, 等. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7647–7659.
- [85] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274–279.
- [86] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 306–314.
- [87] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 475–483.
- [88] Zhou Y C, Wang S J, Lu H M, et al. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: example from SW China[J]. *Acta Carsologica*, 2010, 39(1): 115–122.
- [89] Heilman J L, Litvak M E, McInnes K J, et al. Water–storage capacity controls energy partitioning and water use in karst ecosystems on the Edwards Plateau, Texas[J]. *Ecohydrology*, 2014, 7(1): 127–138.
- [90] 吴瑾, 吴克宁, 赵华甫, 等. 土壤有机碳储量估算方法及土地利用调控措施研究进展[J]. 中国土地科学, 2010, 24(10): 18–24.
- [91] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1007–1011.
- [92] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要[J]. 山地学报, 2015, 33(6): 641–648.
- [93] 严冬春, 文安邦, 鲍玉海, 等. 黔中高原岩溶丘陵坡地土壤中的<sup>137</sup>Cs分布[J]. 地球与环境, 2008, 36(4): 342–347.