

曾发明,吴泽燕,章程,等.峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J].中国岩溶,2018,37(1):67-73.
DOI:10.11932/karst20180103

峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展

曾发明^{1,2},吴泽燕¹,章程¹,杨奇勇³

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力重点实验室,广西 桂林 541004;
2. 中国地质大学(武汉)环境学院,武汉 430074;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西 桂林 541004)

摘 要:根据峰丛洼地区石漠化治理碳汇的现有研究文献,系统总结了峰丛洼地区石漠化治理过程中的碳储量空间格局及其动态过程、不同模式下的碳汇评价与定量化等方面的研究进展与不足,提出了峰丛洼地区二期石漠化治理应关注碳汇稳定性、受气候变化制约等问题,从而优化资源配置的思路;展望了峰丛洼地区二期石漠化治理工程中碳汇研究的趋势:一方面,将土壤分布格局、碳汇耦合机理研究和增加当地经济效益相结合,提高当地农民参与石漠化治理的积极性,推广和发展第一期石漠化治理工程的成果和经验;另一方面,将遥感技术与石漠化治理碳汇研究相结合,构建更多碳汇估算模型,为二期石漠化治理碳汇定量化服务。

关键词:石漠化治理;峰丛洼地;碳汇;岩溶关键带;中国西南

中图分类号:P642.25; X171 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2018)01-0067-07

0 引 言

IGCP379“岩溶作用与碳循环”(1995—1999)项目揭示了岩溶作用消耗 CO₂,对大气碳库具有重要的增汇作用^[1-2]。此后,岩溶区的碳汇过程、影响因素和耦合机理等方面成为应对全球变化的研究热点。石漠化的综合治理不仅能增加地表植被碳汇,稳住土壤碳库,而且恢复后的生态环境还增强了土下的岩溶作用,从而使得岩溶石漠化区成为我国固碳增汇最具潜力的地区之一。因此,岩溶区石漠化治理过程中的碳汇研究意义重大^[3]。

石漠化是上万年的自然过程与千百年的人类活动共同的结果,因土壤流失,岩石裸露,呈现类似荒漠景观的土地退化的过程,它与沙漠化同为生态环境恶化的两种极端形式^[4-5],主要发生在云南、贵州、广西、湖南、湖北、四川、重庆、广东等西南八省(区、市)。21 世纪以来,国家将西南岩溶地区石漠化综合治理

作为国家目标,纳入了国民经济和社会发展规划,岩溶石漠化重点治理工程已扩展至西南的 314 个县。同时,国家其他部门和地方政府也将有关的生态修复和环境治理项目与石漠化治理进行联合攻关^[6]。然而,相关学者发现诸多已实施的石漠化治理项目多注重基岩裸露率的减少和地表植被覆盖率的增加^[3],很少结合固碳增汇技术对石漠化进行小流域尺度的综合研究和分区研究。

在中高山岩溶、岩溶高原、断陷盆地、岩溶槽谷、岩溶峡谷、峰丛洼地、峰林平原和岩溶丘陵等八大岩溶地貌类型中,峰丛洼地区面积最大(12.5×10⁴ km²),约占西南岩溶区域总面积的 1/4,主要位于贵州高原向广西丘陵过渡的大斜坡地带。该区的石漠化防治与脱贫、资源开发与生态保护的矛盾更为突出,在首批石漠化综合整治工程中建有望果果化、马山弄拉、环江古周等峰丛洼地区生态恢复示范区^[7],形成了特定的石漠化治理模式^[8]。2016 年 7 月,国

资助项目:广西科技厅广西重点实验室建设项目(16-380-13);广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 1598016-11);中国地质科学院基本科研业务费项目(YYWF201508;YYWF201639)

第一作者简介:曾发明(1987—),男,博士研究生,从事岩溶环境遥感、石漠化与碳循环研究。E-mail: famingzeng@126.com。

通信作者:章程(1965—),男,研究员,主要从事岩溶与全球气候变化研究。E-mail: chzhang@karst.ac.cn。

收稿日期:2017-01-10

国家重点研发计划项目“岩溶峰丛洼地石漠化综合治理与生态服务功能提升技术研究示范”的正式立项,更加体现了峰丛洼地区在石漠化综合治理过程中的重要性^[9]。因此,选取峰丛洼地区作为提炼石漠化生态系统的固碳增汇技术的对象,对评估前期石漠化治理成效及其存在的问题,构建业务化运行的石漠化动态监测与防控决策支持系统,支撑第二期石漠化综合治理工程,推进我国生态文明建设具有重要意义。

1 峰丛洼地区碳空间格局及其动态过程

1.1 峰丛洼地区碳空间格局

峰丛洼地区由于独特地形因素(陡坡与洼地),峰丛顶部土壤在重力作用下容易沿着陡坡向洼地底部迁移,从而导致肥沃的、较厚的土壤集中在洼地底部,贫瘠的、较薄的土壤分布在峰丛四周的坡面上^[7]。相关研究表明峰丛洼地区的碳格局与土壤的分布呈正显著相关关系,其主要特征表现为:

(1)非石漠化地区的岩溶生态系统中总碳储量按大小排序为:草地 < 灌丛 < 次生林 < 原生林。其中,土壤碳储量远大于植被碳储量,在总碳储量中占绝对比例^[10];植被碳储量仅占总碳储量的3.75%~23.04%,并随植被的正向发展而增加^[11]。

(2)局部土地的平均碳密度与石漠化等级程度呈显著的负相关关系,平均碳密度大小按石漠化等级排列为:非石漠化土地>潜在石漠化土地>石漠化土地;在石漠化土地中其大小排列为:轻度石漠化土地>中度石漠化土地>重度石漠化土地>极重度石漠化土地^[12]。

(3)峰丛洼地岩溶生态系统中植被和土壤碳密度在人为干扰下变化较大。总碳密度按大小排列为:自然林>人工林>草地>灌丛>旱地>水田。其中,植被碳密度表现为:人工林>自然林>灌丛>草地>旱地>水田,且水田和旱地的植被碳密度无显著差异;土壤碳密度表现为:草地>自然林>旱地>水田>人工林>灌丛,并且,退耕还林地的表层土壤有机碳含量比退耕还草地高,固碳增汇效应更好^[10]。

(4)在同一气候区域,岩溶碳汇主要受土壤中CO₂浓度控制,其变化趋势与土壤中CO₂浓度变化一致^[11]。不同土地利用类型的土下CO₂浓度从高到低排序结果为:原生森林>次生乔木林>草本灌丛>草丛;并且,周期性喷灌的人工草坪下CO₂浓度最大,无植被耕地中土壤CO₂浓度最小^[12]。

1.2 峰丛洼地区碳变化动态过程

近几十年来,峰丛洼地区人口压力超过了土地承载力,洼地耕地资源严重不足,人地矛盾异常突出^[13];为了生计,当地农户不得不进行陡坡垦殖、过度放牧、毁林开荒、火烧和樵采等人类活动,从而导致植被遭到破坏,继而发生水土流失,使得山坡上的土地发生中度甚至极强度石漠化^[14]。陡坡开垦、过度樵采、过度放牧和不合理开发建设活动造成的石漠化分别为36.2%、44.9%、8.2%和10.7%^[15]。从土地利用变化来看,石漠化的演化过程主要可分为:山区有林地→灌丛草地→荒草坡→石漠化状态;山区有林地→坡耕地→石漠化;坡耕地→石漠化;山地→矿山型石漠化土地等几个类型^[16]。其中,相关研究表明中国西南地区在1990—2000年期间,因林地转变为草地后,土壤碳储量损失了2.04 Tg^[17]。同时,毁林开垦(山区有林地→坡耕地→石漠化)导致的土地石漠化,也是峰丛洼地区最主要的碳流失方式。植被生物体减少和土壤大量流失后,会导致生物和土壤碳库迅速减少,在顶级(极强度)石漠化区,植被完全丧失,植被碳库接近0 t·hm⁻²,土壤碳库也不足10 t·hm⁻²^[18]。峰丛洼地区的土壤碳库在石漠化过程中,流失量存在差异,相关研究表明不同地貌部位土壤的流失比大小为:陡坡>缓坡>峰坡>垭口>坡麓>洼地,因此,陡坡开垦更容易导致石漠化,造成土壤碳流失^[19]。

在西南亚热带气候背景下,降雨对岩溶作用的贡献甚至要比气温更为重要,尤其是在旱季,土壤持水能力与土壤的供水强度是岩溶碳汇的关键因素^[20]。研究表明样地的石漠化程度越严重,土壤水分含量越低,不同发育程度的石漠化样地的土壤含水量大小顺序依次为:潜在石漠化>轻度石漠化>中度石漠化^[21-22],这就是石漠化程度能影响区域土地平均碳密度大小的原因。受土壤有机质和土壤CO₂浓度及土壤水分等理化性质的影响,退耕还林地土下溶蚀量和碳汇量表现为土下40 cm处最高,土下20 cm处和60 cm处相当^[12],说明非石漠化地区的岩溶碳汇更为稳定措施。

2 主要进展

《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015)》主要采取了林草植被的保护和建设、草食畜牧业发展、水土资源开发利用、基本农田建设、农村能源建设和生态移民等六个方面的岩溶石漠化综合治理

措施^[23]。其中,与石漠化碳汇效应有直接关系的措施主要是林草植被的保护和建设 and 生态移民;其他为间接碳汇。

2.1 直接碳汇及测算

植被建设和保护主要采取封山育林、退耕还林/草、乔灌防护林建设、人工/飞播造林等措施,侧重峰丛洼地生态系统自我恢复,推动植被生态系统的顺向演替;生态移民模式主要进行异地分流、城镇吸纳式生态移民,其核心基于生态承载力极限的生计重建和异地资源要素的重新配置,从而减少石漠化区的人为干扰,在局地形成山林封育区,促进生态恢复,如广西环江、贵州紫云生态移民模式等。这两者通过增加植被覆盖率,直接增加地表植被碳汇储量。同时,植被兼有固土保水的作用,不仅稳定了土壤碳库,而且还增强了岩溶作用,并且植被恢复工作已经取得了预期目标^[23]。

峰丛洼地石漠化区经过综合整治后,一方面石漠化整体扩展的趋势得到了初步遏制,石漠化面积从2000年的 $3.03 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少至2015年的 $2.38 \times 10^4 \text{ km}^2$,石漠化减少比例占21.3%^[6];另一方面,生态逐步恢复,固碳增汇能力显著提高。相关研究表明,生态恢复后(人工林)的总碳贮量是恢复前(坡耕地即旱地、灌丛)总碳密度2~3倍^[17]。张明阳等研究发现退耕还林(草),封山育林等石漠化治理措施使桂西北峰丛洼地区的植被碳储量增加显著^[24];刘淑娟等研究发现退耕还林还草、封山育林也对峰丛洼地区土壤碳汇产生了积极的生态效益,其中,退耕还林还草工程实施后研究区土壤碳储量提高了23.43%,退耕后单位面积土壤碳储量增至 $2\,938 (\text{t} \cdot \text{C}) \cdot \text{km}^{-2}$ ^[13]。谢元贵等在峰丛洼地区选取不同植被群落的样地进行固碳效益研究,发现不同模式下土壤碳密度变化不大,而植被碳密度存在明显差异,其大小顺序为:草本层>藤本层>灌木层>乔木层,并且草本层的碳增量在植被总碳增量中占有主导地位^[25]。

这两种石漠化治理模式下产生的植被碳汇和土壤碳汇具有直观性,计算的方法有样地法和模型法等:(1)样地方法已被广泛应用在林业碳汇调查领域,揭示了不同石漠化程度下的碳存储量的分布与分异规律^[26],其在石漠化治理的碳汇研究方面也发挥了很大作用,如陈伟杰等^[27]基于实地监测数据,对不同石漠化等级的典型样地进行多维度分析,揭示了岩溶区石漠化治理前后的碳汇效应,钟银星等^[28]分析了印江槽谷型岩溶石漠化地区11种植被碳储量的空间分布格局,并对区域植被固碳速率、碳储量进行了估

算,并预测了理论最大固碳潜力,吴敏等^[29]利用网格采样($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$),对比分析了典型岩溶坡耕地(长期耕作)和退耕地(自然恢复)表层(0—15 cm)土壤有机碳(SOC)的空间变异特征。(2)随着遥感技术的发展,越来越多的遥感模型也被成功的应用于测算植被碳汇^[30],如张明阳等^[31]基于CASA模型和TM/ETM⁺数据对桂西北岩溶区1990—2005年的植被碳储量及密度进行了分析,白晓永等^[3]提出使用遥感和地理信息系统,结合流域内物质组成结构与循环交换特征等,对中国南方岩溶生态系统进行了小流域类型的划分与剖析,宋贤威等^[32]提出利用ChinaFLUX数据—模型融合系统、陆地生态系统相关模型、涡度相关观测技术和遥感观测等多种技术手段联合对岩溶关键带碳汇进行多尺度监测与计算,以及多种方法的对比分析。

2.2 间接碳汇

草食畜牧业发展、水土资源开发利用、基本农田建设、农村能源建设等措施,主要功能是为植被的恢复提供配套服务,其中:(1)基本农田建设的坡改梯工程,重点在于减少水土流失;耕地地埂、沟渠等绿篱、生态防护林带及小型水保措施建设在于保证土地生产力,改善农业生产条件;(2)草食畜牧业以改良草地和建设高效人工草地为主,合理确定生态承载力配置,避免过度放牧;(3)农村能源工程碳汇功能在于因势利导,建立符合农村发展的新型能源结构体系,减少薪材在农村能源中的比重。总的来说,间接碳汇主要可分为两种模式,即:水土保持模式和生态农业模式。

①水土保持模式主要包括:小流域综合治理、坡改梯、改良耕作模式、水保林建设和砌墙保土等。该模式以治水为核心,通过物理工程措施,减少土壤侵蚀,达到固土保水。一方面保持土壤水分,促进岩溶作用;另一方面,防止土壤碳库流失,但岩溶区存在土壤地下漏失的情况。蒋忠诚等在广西平果县建立了峰丛洼地区立体生态农业模式,在峰丛洼地不同地貌部位种植水土保持林,修建薛荔植物篱、裸露石芽植物篱、砌墙保土地埂植物篱、隔坡式植物篱等,可形成一套完整的水土保持技术体系^[7-8,33-34];同时,筛选水源林植物种类,采取自然封育和人工造林2种方法构建水源林,能生态调控利用岩溶水,协调发展生态产业实现综合治理^[35];针对峰丛洼地区水土漏失的现象首次系统揭示了岩溶峰丛洼地不同地貌部位和不同生态环境的水土漏失定量差异和原因^[33-35]。在石漠化综合治理下,峰丛生态得到恢复,水土流失强

度在总体上有减弱的趋势^[36]。

②生态农业模式包括建立诸如猪—沼—椒、林/果—草—养殖—沼、粮—草—养殖—沼等以特色经济作物、牲畜 配备沼气池建设为基础的生物多层次循环利用的生态农业模式;开发牲畜圈养—牧草种植—作物秸秆综合利用、林下特色作物(如三七等喜阴药材)或经果林等特色作物(如茶叶、金银花等)配合传统农业种植等复合模式。生态农业的发展,一方面缓解材薪能源压力,促进了资源的重复利用,有效控制了植被碳库的流失;另一方面,带动了生态旅游、特殊民族文化旅游、特色茶或者果园休闲观光等项目的发展,增加了当地农民经济收入,从而加强了村民对生态环境的保护意识,减少了放牧、材薪获取等活动对植被和土壤的破坏,达到了生态系统自我恢复的目标。

目前水土保持和生态旅游开发产生的碳汇效应没有直接计算的方法和模型,但区域内的岩溶作用产生的碳汇可以通过溶蚀试片法和水化学径流法来计算;生态农业模式下的种植业可以参考中国森林碳汇价格,转换成经济指标,从而与生态旅游等措施相比较,比如花椒林种植模式在岩溶石漠化治理中的碳汇效益为 $1.92 \times 10^4 \sim 2.56 \times 10^4$ 元 $\cdot$ hm⁻²^[37]。

2.3 石漠化治理的岩溶碳汇变化

岩溶区地表植被系统固碳增汇过程发生的同时,地下也同步发生着类似的增汇过程^[35]。不同估算方法得出我国的岩溶关键带每年通过岩溶作用捕获的 CO₂ 的通量约 $1.2 \times 10^7 \sim 2.4 \times 10^8$ t $\cdot$ a⁻¹^[38],碳汇效应十分可观^[39-40]。石漠化治理能显著地增强土下的岩溶作用强度,比如退耕还林地的土下溶蚀量及碳汇量约为耕地的 7 倍^[11];姜光辉等以桂林峰丛洼地区的丫吉试验场为例,检验植被恢复对岩溶碳汇的影响作用,发现石漠化治理后岩溶碳汇量增加的幅度可达 19%~23%^[41]。不同流域尺度的岩溶碳汇通量也有所增加,大流域尺度如珠江流域固碳通量增加到 2.14×10^6 t C $\cdot$ a⁻¹^[10];小流域尺度如桂林潮田流域的碳通量为 6 720.6 t C $\cdot$ a⁻¹^[42]。曾思博等^[43]总结了石漠化治理过程中不同土地利用/覆被变化对岩溶作用碳汇的影响,并对其机理进行了系统分析,发现土壤 CO₂ 浓度和径流量变化及外源酸(硝酸和硫酸)介入是影响岩溶碳汇过程的主要原因。赵瑞一等^[44]也提出农业化肥产生的其他酸(硝酸)参与到岩溶碳循环中将会减弱岩溶碳汇效应,导致通过水化学法测算的岩溶碳汇估算值偏高。

3 存在的问题

3.1 石漠化治理产生的碳汇不稳定

在未能解决当地村民眼前利益及水土支撑条件的情况下,植树造林的效果较差,成活率很低,边造边破坏的现象普遍存在。加之,岩溶石漠化区人工种植的树木不仅生长速度缓慢,而且在还林前期,因地表覆盖度低,保土保水效果不及还草区,极易加剧坡地上的水土流失,这样不仅使得植被固碳增汇作用不稳定,并且还可能造成现有的土壤碳库流失的现象。另外,桂西北峰丛洼地区石漠化治理对土壤的生态效应研究表明退耕还林还草模式下,林地(或草地)需要培育五年时间才能显著或极显著地提高土壤主要养分、水分和矿质养分含量^[45],而封山育林的自然恢复则需要较长的时间。因此,从碳汇效应的可持续性和稳定性出发,植被恢复和重建应采取封育与造林结合、造林与种草结合的模式:在封山育林保护现有碳汇的基础上,实施造林增大碳汇基数,并且采用种草方式防止造林前期土壤碳库的流失;另外,岩溶小生境的严酷性对种子的存活和萌发具有强烈的选择性,部分耕地杂草对生境的早期垄断,将抑制树苗的生长,因此人工造林在树草种选择、配置方面需要考虑当地生态环境;同时也应避免单一物种的大规模种植,因为单一治理物种不利于恢复植被形成稳定的碳汇结构与功能^[46]。

在水利资源开发方面,峰丛洼地石漠化地区地下水位埋藏较深,坡地径流系数小,漏失严重,表层岩溶带发育,季节性泉水较多,同时由于降雨较为集中,季节性干旱严重,土壤缺水且没有地下水的补给,严重抑制种子萌发和植物生长^[46]。因此造林需要注意季节的选择和水利资源开发项目的配套结合,保证造林植被生长的生态用水,保证石漠化治理的碳汇功能。

基本农田建设方面:(1)部分土地综合整治项目未很好地结合当地经济社会现状和村民意愿,投巨资进行炸石、砌坎和客土造梯地,但因种地产出效益远低于打工收入,新造地被撂荒,造成资源配置不合理,固碳增汇途径得不到可持续发展;(2)未结合峰丛洼地区坡地土壤漏失的客观事实,在漏失区或消水洼地周边陡坡造地,致使客土漏失严重,新造耕地不但难以持久,而且还造成土壤碳库的流失,如西畴县新街镇光山岩溶山区分水岭地带谷(洼)地周围陡坡上的梯地建设项目^[47]。

3.2 受气候变化制约

近年以来,受全球极端气候影响,西南岩溶区长

期处在旱涝交替状态^[48],自然灾害频发,植物在受到频繁的环境胁迫,导致林草建设遭到破坏,制约了碳汇效应的可持续性。峰丛洼地区耕地资源十分匮乏,农田主要集中于洼地、谷地底部。一方面峰丛洼地区降雨较为集中,雨季易遭涝灾,旱季季节性干旱严重。另一方面,大范围的极端气候影响加剧。如2009年至2012年西南地区发生连续4年发生大面积干旱灾害,区域林草植被生长受到严重影响,特别是人工幼龄林出现大面积死亡;同时森林火灾频发,森林病虫害等危加剧,森林资源严重受损,峰丛洼地区林草植被保护工作面临严峻挑战^[49]。因此,石漠化治理的模式配置需要考虑气候因素。

4 未来研究趋势:格局、机理与经济效益的结合

4.1 土壤空间分布与漏失机理研究

峰丛洼地区石漠化的演化,不仅取决于人类活动对土地的需求,还受制于地块的空间位置和适宜性^[50-52]。(1)土壤的空间分布与厚度制约着峰丛洼地区碳循环过程:一方面土壤决定着植被的生长,退化土地中碳氮转化过程及固持机理的研究离不开土壤层的地球化学性质;另一方面,岩溶区土壤碳储量远大于植被碳储量,土壤中CO₂的浓度,影响着土中岩溶作用的强度^[53],对岩溶碳汇起着决定性作用。因此,土壤是控制峰丛洼地区碳空间格局、碳氮转化过程及固持机理的关键因素。(2)峰丛洼地石漠化地区表层岩溶带发育,地下漏失严重,研究水土流失/漏失关键过程与主控因素,揭示水土流失/漏失发生机制,不仅有助于石漠化的防治,而且也是建立水土保持模式下土壤碳汇估算模型的关键。

4.2 遥感技术支撑

我国遥感技术的大力发展,涌现出了大量遥感数据源,这将是西南石漠化治理碳汇格局和机理研究的一项有力的数据支撑^[54-55]。遥感可大面积、长时间序列监测石漠化的动态变化^[56],也为石漠化碳汇的遥感模型研究开辟了新方向。因此,应在岩溶关键带研究框架下,加速岩溶关键带观测站数据共享平台建设,加大遥感数据的有效应用,构建多技术结合的模式,早日实现对石漠化治理碳汇进行定量的评估^[57]。

4.3 发展生态经济产业

峰丛洼地区人口压力大,且区域经济落后。石漠化治理不是简单的植被修复与造林项目,应充分考虑广大民众的长远生计,着重解决民生问题^[11,58],实现

“治石与治贫”相结合,否则,植被修复措施可能会因得不到当地居民的支持而难以有效实施。因此,二期石漠化治理工程需要推广和发展第一期石漠化治理工程的成果经验,结合峰丛洼地区碳汇格局和机理的研究,重点培育优质经果林、中药材及特色农业为主导的生态经济型产业,如毕节核桃、广西平果火龙果等生态经济型模式。

参考文献

- [1] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶系统的碳循环及其生态效应[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 316-324.
- [2] 蒋忠诚, 袁道先. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境和资源意义[J]. 地球学报, 1999, 20(3): 302-308.
- [3] 白晓永, 王世杰, 刘秀明, 等. 中国石漠化地区碳流失原因与固碳增汇技术原理探讨[J]. 生态学报, 2015, 34(6): 1762-1769.
- [4] 王世杰. 喀斯特石漠化: 中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
- [5] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 31-35.
- [6] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 等. 21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.
- [7] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 岩溶峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究[J]. 地球学报, 2009, 30(2): 155-166.
- [8] 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 等. 论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术: 以广西平果果化示范区为例[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 50-55.
- [9] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 等. 喀斯特峰丛洼地石漠化治理与生态服务提升技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7098-7102.
- [10] Zhang L, Qin X, Liu P, et al. Estimation of carbon sink fluxes in the Pearl River basin (China) based on a water-rock-gas-organism interaction model [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(2): 945-952.
- [11] 蓝家程, 肖时珍, 杨龙, 等. 石漠化治理对岩溶作用强度的影响及其碳汇效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 244-249.
- [12] 梁福源, 宋林华, 王富昌, 等. 路南石林地区土壤空气中CO₂浓度分布规律与土下溶蚀形态研究[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 79-86.
- [13] Yan, X., Cai, Y. L. Multi-scale anthropogenic driving forces of karst rocky desertification in Southwest China [J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(2): 193-200.
- [14] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 等. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系: 案例研究[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2195-2207.
- [15] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究 [M]. 科学出版社, 2014: 435.
- [16] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [17] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990~2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 483-496.
- [18] Peng W, Song T, Zeng F, et al. Relationships between woody

- plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10(1):890-896.
- [19] 罗为群, 蒋忠诚, 韩清延, 等. 岩溶峰丛洼地不同地貌部位土壤分布及其侵蚀特点[J]. 中国水土保持, 2008(12): 46-49.
- [20] 章程. 不同土地利用下的岩溶作用强度及其碳汇效应[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2174-2180.
- [21] 夏雯, 黄代民, 崔晨, 等. 西南喀斯特地区土壤水分研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(23): 442-446.
- [22] 黄代民, 陈效民, 李孝良, 等. 西南喀斯特地区土壤水分变异性研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 207-212.
- [23] 但新球, 白建华, 吴协保, 等. 石漠化综合治理二期工程总体思路研究[J]. 中南林业调查规划[J], 2015, 34(3): 62-66.
- [24] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 生态恢复对桂西北典型喀斯特区植被碳储量的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2288-2295.
- [25] 谢元贵, 廖小锋, 赵晓朋, 等. 喀斯特峰丛洼地不同适生植物配置模式固碳能力及效益评价[J]. 广东农业科学, 2015, 42(20): 134-139.
- [26] 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.
- [27] 陈伟杰, 熊康宁, 任晓冬, 等. 岩溶地区石漠化综合治理的固碳增汇效应研究: 基于实地监测数据的分析[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 229-238.
- [28] 钟银星, 周运超, 李祖驹. 印江槽谷型喀斯特地区植被碳储量及固碳潜力研究[J]. 地球与环境, 2014, 42(1): 82-89.
- [29] 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.
- [30] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907.
- [31] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 等. 基于遥感影像的桂西北喀斯特区植被碳储量及密度时空分异[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1545-1553.
- [32] 宋贤威, 高扬, 温学发, 等. 中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估及其生态服务功能[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1926-1938.
- [33] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [34] 罗为群, 蒋忠诚, 欧阳然, 等. 典型岩溶峰丛洼地水土保持技术研究[J]. 中国水土保持, 2013(1): 37-41, 69.
- [35] 罗为群, 张辉旭, 蒋忠诚, 等. 岩溶峰丛洼地不同环境水土流失差异及防治研究: 以广西果化岩溶生态研究基地为例[J]. 地球学报, 2014, 35(4): 473-480.
- [36] 尹辉, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 西南岩溶区水土流失与石漠化动态评价研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 66-70.
- [37] 杨龙, 熊康宁, 肖时珍, 等. 花椒林在喀斯特石漠化治理中的碳汇效益[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 292-297.
- [38] Zhou G, Huang J, Tao X, et al. Overview of 30 years of research on solubility trapping in Chinese karst[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 146: 183-194.
- [39] 蒋忠诚, 覃小群, 曹建华, 等. 中国岩溶作用产生的大气 CO₂ 碳汇的分区计算[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 363-367.
- [40] 徐胜友, 蒋忠诚. 我国岩溶作用与大气温室气体 CO₂ 源汇关系的初步估算[J]. 科学通报, 1997, 42(9): 953-956.
- [41] 姜光辉, 张强. 峰丛洼地自然封育过程岩溶水溶解无机碳的变化: 以桂林丫吉试验场为例[J]. 中国岩溶, 2011, 30(4): 397-402.
- [42] Li L, Cao J, Huang F, et al. Distribution and magnitude of geologic carbon sinks: a water balance study of the Chaotian River basin, Guilin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(02): 913-920.
- [43] 曾思博, 蒋勇军. 土地利用对岩溶作用碳汇的影响研究综述[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 153-163.
- [44] 赵瑞一, 吕观福, 蒋建建, 等. 土壤 CO₂ 及岩溶碳循环影响因素综述[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4257-4264.
- [45] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [46] 郭红艳, 万龙, 唐夫凯, 等. 岩溶石漠化区植被恢复重建技术探讨[J]. 中国水土保持, 2016(3): 34-37, 73.
- [47] 王宇, 杨世瑜, 袁道先. 云南岩溶石漠化状况及治理规划要点[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 206-211.
- [48] Liu B, Chen C, Lian Y, et al. Long-term change of wet and dry climatic conditions in the southwest karst area of China[J]. Global and Planetary Change, 2015, 127: 1-11.
- [49] 国家发展与改革委员会, 国家林业局. 岩溶地区石漠化综合治理二期工程规划思路研究[R]. 2014.
- [50] 王媛媛, 周忠发, 魏小岛. 石漠化景观格局对土地利用时空演变的响应[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 307-313.
- [51] 白晓水, 熊康宁, 苏孝良, 等. 喀斯特石漠化景观及其土地生态效应: 以贵州贞丰县为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(4): 276-281.
- [52] 白晓水, 王世杰, 陈起伟, 等. 贵州土地石漠化类型时空演变过程及其评价[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 609-618.
- [53] Yang R, Liu Z, Zeng C, et al. Response of epikarst hydrochemical changes to soil CO₂ and weather conditions at Chenqi, Puding, SW China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 468: 151-158.
- [54] 岳跃民, 张兵, 王克林, 等. 石漠化遥感评价因子提取研究[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 722-736.
- [55] 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 等. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 243-247.
- [56] Li S, Wu H. Mapping karst rocky desertification using Landsat 8 images[J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(9): 657-666.
- [57] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.
- [58] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 生态功能优先背景下的西南岩溶区石漠化治理问题[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 464-472.

Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas

ZENG Faming^{1,2}, WU Zeyan¹, ZHANG Cheng¹, YANG Qiyong³

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. School of Environmental Study, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Institute of Karst Geology, CAGS/Ecosystem and Rocky Desertification Treatment Key Laboratory, MNR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The vulnerable environment and unreasonable human activities have resulted large scale of karst rocky desertification (KRD) in Southwest China, accompanying huge carbon stocks loss. To introduce the studies on carbon sink in the processes of KRD restoration projects in the peak cluster depression areas, Southwest China, this paper, based on literature analyzing, summarizes the progress and shortcomings on the carbon spatial distribution and its dynamic processes, as well as the evaluation and quantitative measurement of carbon sink under different patterns KRD restoration projects. In the next work, the second term of KRD restoration project should focus on water and soil conservation, rocky desertification prevention, and taking vegetation construction as a supplement. According to the available results on soil surveys, carbon sink mechanism, and local economic crops growing, it is a good chance to optimize the allocation of resources so that the government can make sure short-term benefits to local farmers. As a reward, more farmers will agree with the KRD restoration projects to create a sustainable and green industrial chain.

Key words karst rocky desertification, peak cluster depression, carbon sink, karst critical zone, Southwest China

(编辑 吴华英)