

二、中国石漠化地区碳流失原因与固碳增汇技术原理探讨

白晓永^{1,2} 王世杰^{1,2*} 刘秀明^{1,2} 容丽^{1,2} 苏以荣³

(1.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, 贵阳 550002; 2.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 普定 562100; 3.中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南长沙, 410125)

摘要: 石漠化的发生发展和迅速扩张, 是导致中国喀斯特生态系统碳流失的主要原因, 而石漠化地区固碳潜力约占全国陆地生态系统的 30%左右, 增汇潜力巨大, 是国家固碳增汇的主战场之一。为了显著增加石漠化地区生态系统的固碳能力, 基于喀斯特小流域是石漠化治理的基本生态水文地质单元的科学认识, 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, 对中国南方喀斯特生态系统进行了小流域类型的划分与剖析。针对区域社会经济的优先发展方向和环境承载力, 提出了不同类型小流域石漠化治理和固碳增汇的设计方案, 建立了喀斯特“高原集雨灌溉型高效生态农业模式”、“峰丛洼地人工种草替代型草食畜牧业模式”、“峡谷型发挥光热资源优势的特色林果模式”、“槽谷型发挥水土资源优势的竹果产业模式”, 为石漠化地区发展现代农业、推进区域经济发展和生态文明建设提供了借鉴和参考。

关键词: 喀斯特 石漠化 碳流失 固碳增汇

我国碳酸盐岩的出露面积约 91 万平方公里(李大通,1985; 袁道先等,1998), 主要分布在以贵州高原为中心的西南地区, 北起秦岭山脉南麓, 南至广西盆地, 西至横断山脉, 东抵罗霄山脉西侧的岩溶地区, 面积 107.1 万平方公里, 喀斯特面积 45.2 万平方公里(图 1)(国家林业局, 2012)。我国西南地区不仅是全球喀斯特发育最典型、最复杂、景观类型最丰富的片区之一, 也是珠江的源头, 长江水源的重要补给区, 是南水北调水源区、三峡库区, 生态区位十分重要, 同时, 该区更是世界上面积最大、最集中连片的生态脆弱区(袁道先等,1998)。由于人类在这些生态脆弱和敏感区的不合理社会经济活动, 造成人地矛盾突出、植被破坏、水土流失、土地生产能力衰退或丧失, 地表呈现类似荒漠景观的“石漠化”现象(Wang S J, et al, 2004), 且日趋严重, 影响着珠江、长江的生态安全, 严重制约着区域经济社会的可持续发展。加快推进石漠化治理已成为当前我国生态文明建设的重要内容和紧要任务(国家林业局, 2012)。目前, 在西南地区实施的诸多喀

斯特石漠化治理项目，多通过增加植被的覆盖率进行生态修复，却很少结合固碳增汇对石漠化进行综合研究和治理。因此，开展喀斯特石漠化地区植被恢复与固碳增汇技术试验、示范，系统提炼总结，形成一套石漠化地区植被恢复增汇技术体系与防治模式，对于支撑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。

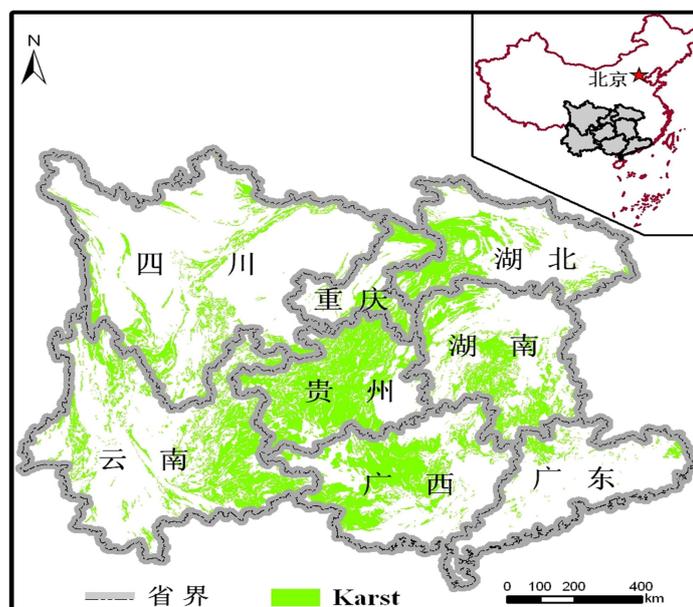


图 1 中国南方喀斯特空间分布图

Fig.1 The space distribution map of karst in South China

1. 石漠化地区碳流失原因分析

在生态环境脆弱的喀斯特地区，有机碳主要贮存于植物体和土壤之中。喀斯特石漠化问题，实质上是“环境—植被—人”三者之间的和谐关系被打破(Bai X Y, et al 2013)，植被生长所依赖的环境在人类的干预下被彻底破坏，植根于地质环境之上的植被生长受到了抑制，出现了生态退化。在无石漠化的喀斯特地区，特别是在森林植被良好的无石漠化区，生物和土壤有机碳储量非常丰富（图 2），如茂兰喀斯特区森林地上生物量约在 $150\text{-}200\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (朱守谦等, 1995)，黔中高原喀斯特次生森林的地上生物量一般也在 $100\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右，土壤碳库约为 $120\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (刘玉国等, 2011;刘长成等, 2011)，而在森林植被遭到破坏后的短期内，植被减少、地表裸露，土壤流失急剧增加，普定石人寨小流域 1979~1990 期间的坡地侵蚀速率每平方公里年流失量可能高达 7000 吨(Bai X Y, et al 2013; Zhang X B, et al 2010)。植被生物体减少和土壤大量流失后，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，植被碳库接近零值，土壤碳库也较少，不足 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (Liu C C, et al 2012)。因此，在我国西南喀斯特地区，因石漠化发生发展造成的生物碳库和土壤碳库流失量巨大，近年来已由碳“汇”区逐渐转为碳“源”区，成为我国的碳“欠账”区。

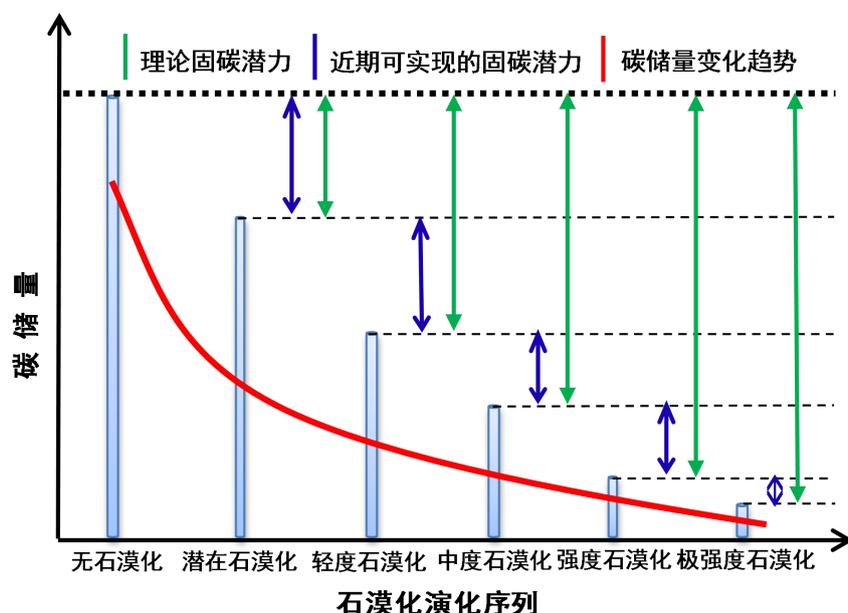


图 2 喀斯特石漠化地区生态演化与固碳潜力示意图

Fig.2 Ecological evolution and carbon sequestration potential in karst rocky desertification area

2. 石漠化地区增汇技术原理

石漠化是导致我国西南喀斯特地区碳流失的主要原因。要显著增加该区域的碳库，必须充分认识喀斯特生态系统形成、演化的地质地貌基础，通过地学、生物学和生态学多学科的交叉合作，结合当地社会发展的实际，恢复植被与环境生态系统，提升喀斯特石漠化生态系统的固碳增汇能力。

中国西南喀斯特地区不同于其它地区的最大特点就是广泛存在着小流域。这些小流域是在特殊地质构造和岩溶发育不均一性控制下发育起来的，是地表——地下水系的集水单元，是复杂的二元三维地质体，发育了不同特点的水土配置格局和地表生态系统，在大系统中构成了相对独立的生态系统。喀斯特生态系统中的水、土壤、植被等环境要素无不受控于这种地质结构特征，这是在该区开展石漠化治理及固碳增汇技术集成与示范的重要基础。每一种类型小流域的石漠化治

理措施只有匹配其地质结构特征,顺应自然的生态系统分布格局,才能取得事半功倍的治理效果。因此需要对喀斯特地区的小流域进行梳理和归类,根据共性特征构建西南喀斯特地区小流域主要类型的概念模型。

使用遥感和地理信息系统,运用 ArcGIS 软件的自动流域提取功能,分析小流域的特点,根据中国西南喀斯特地区不同流域系统的特征差异,采用三级分级体系对中国南方喀斯特生态系统进行了小流域类型的划分:第一级为区域性大地构造+地貌+气候,可分成八大类:高原型、峰丛洼地型、槽谷型、峡谷型、断陷盆地型、丘陵型、峰林平原型和中高山型;第二级为构造和岩性控制的小流域水文地质构造特点,如背斜、向斜、断块单斜结构等;第三级为在二级构造内的岩性组合特征,决定水资源和土壤资源的利用特征。

在此基础上,归纳和总结中国西南喀斯特地区小流域的共性和个性,分析地质结构特征与自然生态系统分布格局之间的关系,结合区域社会经济的发展规划和环境承载力分析,提出符合小流域地质结构特征的、具有可操作性的石漠化治理和固碳增汇设计方案,包括植被保护、退耕还林、封山育林育草、种草养畜、合理开发利用水资源、土地整治和水土保持、改变耕作制度、建设农村沼气、易地扶贫等措施,建立起与不同类型喀斯特小流域地质结构特征及其控制的自然生态系统分布格局相匹配的石漠化生态系统恢复途径,因地制宜地科学治理石漠化。

3. 固碳增汇技术示范与生态效应

3.1 增汇措施技术示范

3.1.1 增汇型植被恢复技术与固碳增汇经营技术

(1) 针对喀斯特地区岩性差异对树种选择的影响,在树种选择上应充分考虑喀斯特地区岩性背景的差异:在白云岩区,由于岩石整体性风化显著,土被分布较均匀,但土层很薄,因此在树种选择上重点考虑浅根系型的乔灌植物,如侧柏(*Platycladus orientalis*)、香椿(*Toona sinensis*)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)等;在石灰岩区,由于岩石差异性风化显著,土被分布很不均匀,局部分布于石沟、石缝的土层较厚,因此可以选择较深根系的乔木类群,如任豆(*Zenia insignis*)、

乌柏 (*Sapium sebiferum*)、女贞 (*Ligustrum lucidum*) 等。

(2) 针对石漠化困难立地类型，开展适应树种配置以及以增汇为目标的优化筛选，在树种配置上遵循仿自然群落树种配置原则、林灌草搭配，充分考虑生态位差异构建优化群落。

(3) 针对缺土少水困难立地类型，开展多方式提高植物生产力的建植技术，包括土壤肥力恢复技术、侧向根系引导施肥技术、保水保墒种植技术，局部整地适当密植技术等。

(4) 针对喀斯特区域森林生长特点，采用林分抚育管理技术，包括幼林期抚育管理；在中龄林、近熟林选择优势经济型个体重点抚育，提高单位面积生产力。

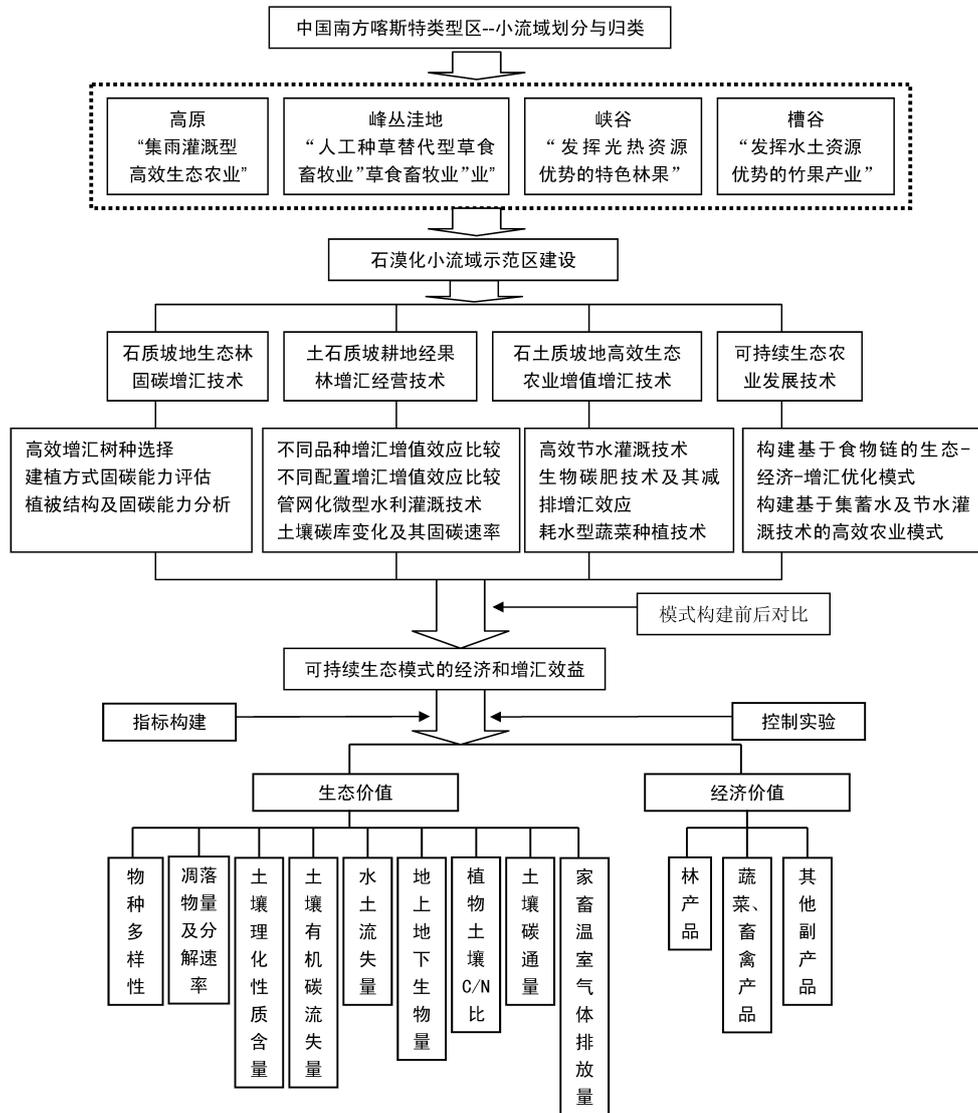


图3 中国南方喀斯特小流域划分和固碳增汇模式图

Fig .3 Karst watershed classification and carbon sequestration model in South China

3.1.2 石漠化山区高效生态农业增值增汇技术

考虑石漠化地区多为山地，坡耕地较多的特点，充分利用山体底部较为平坦的石土质耕地，进行高效生态农业建设与示范，采用管网状滴灌与土法滴灌相结合的高效滴灌技术提高植物水分利用效率；采用生物碳肥技术进行秸秆还田，实现土壤无机碳施入管控，提高土壤碳含量；通过增加截雨面，土壤覆盖保墒技术与土下设置集水装置实现耗水型蔬菜种植。

3.1.3 植被类型增汇能力评价与低效林分改造技术

针对原有低生产力林分，配置多层次多物种乡土阔叶植物，进行林分改造。在经果林建设中，同时进行林下植被经营与管理，充分提高土地生产力。通过对不同植被类型主要树种以及植被层、枯落物层、土壤层碳汇速率与增汇潜力的研究与评价，找出碳汇能力差别的原因，研究提高碳汇能力的技术。

3.2 增汇措施的固碳效应

在西南喀斯特地区，设置不同植被生态系统样地，对自然条件下的生态系统（自然林）、人类干扰强烈的生态系统（水田、旱地）以及不同植被恢复程度下的生态系统（人工林、灌丛、草地）的生物和土壤碳密度进行调查和分析，结果表明：不同干扰程度下的生态系统生物和土壤碳密度变化较大，并呈现一定的规律：植被碳密度表现为人工林>自然林>灌丛>草地>旱地>水田，且水田和旱地之间无显著差异；土壤碳密度表现为草地>自然林>旱地>水田>人工林>灌丛；结合植被、凋落物和土壤中的碳密度数据，三种扰动条件下的生态系统中总碳密度表现为自然林>人工林>草地>灌丛>旱地>水田，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）总碳密度的2-3倍^[13]。

表 1 峡谷型喀斯特不同生态系统碳分布格局

Tab.1 The carbon distribution pattern of different type ecosystem in canyon karst region

| 生态 系统 | 植物 | | 地被物层 | | | 土壤 | | 地上部分 | | 地下部分 | | 合计 (10 ³ kgC/h) |
|----------|-------|------|------|-----|--------|-----|-------|------|--------|------|--------|-------------------------------|
| | 碳贮量 | 比 | 碳贮量 | 比 | 碳贮量 | 比 | 碳贮量 | 比 | 碳贮量 | 比 | | |
| 水田 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112.26 | 10 | 0 | 0 | 112.26 | 10 | 112.26 | |
| 旱地 | 0 | 0 | 0 | 0 | 115.31 | 10 | 0 | 0 | 115.31 | 10 | 115.31 | |
| 草地 | 36.05 | 0.47 | 0.2 | 0.2 | 153.12 | 80. | 22.06 | 11.6 | 167.58 | 88. | 189.64 | |
| 灌丛 | 70.88 | 5.82 | 4.3 | 4.3 | 52.69 | 39. | 60.93 | 45.3 | 73.46 | 54. | 134.39 | |

| | | | | | | | | | | |
|----|--------|-------|-----|--------|-----|--------|------|--------|-----|--------|
| 人工 | 272.42 | 3.96 | 1.1 | 65.04 | 19. | 249.41 | 73.0 | 92.01 | 26. | 341.41 |
| 自然 | 229.61 | 18.34 | 4.9 | 126.11 | 33. | 234.99 | 62.8 | 139.07 | 37. | 374.06 |

(数据来源: 中国科学院亚热带农业生态研究所宋同清研究员提供)

由于喀斯特石漠化生态系统中的生物量较少,一旦植被得到修复,就会形成明显的碳汇能力。随着植被的恢复,退化喀斯特生态系统的碳储量将迅速增加,由中强度石漠化土地的 $38.05\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 增加到无石漠化林地生态系统的 $350.65\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (Peng W X, et al 2012),表现出巨大的碳汇潜力。可以预见,整个区域喀斯特石漠化生态系统植被修复后的碳储量将是极为可观的。

因此,通过对南方喀斯特地区典型小流域环境生态系统进行管理措施干预,可显著改变流域内退化的植被生态系统,提高生物和土壤固碳增汇能力,遏制石漠化的扩展趋势,使该区生态环境得到明显改善,同时有利于提升该区域的固碳增汇效应。

4. 集成模式与典型示范

选择喀斯特高原型(贵州普定)、峰丛洼地型(广西环江)、槽谷型(贵州印江)、峡谷型(贵州晴隆)四大主要地貌类型区具有工作基础的4个小流域,探索出一套以喀斯特流域为基本单元,开展石漠化治理及固碳增汇技术示范的集成模式(图5),为南方喀斯特不同类型小流域的综合治理及固碳增汇提供技术支撑和模式导向,为石漠化地区发展现代高效农业、推进区域经济发展和生态文明建设提供了借鉴和参考。

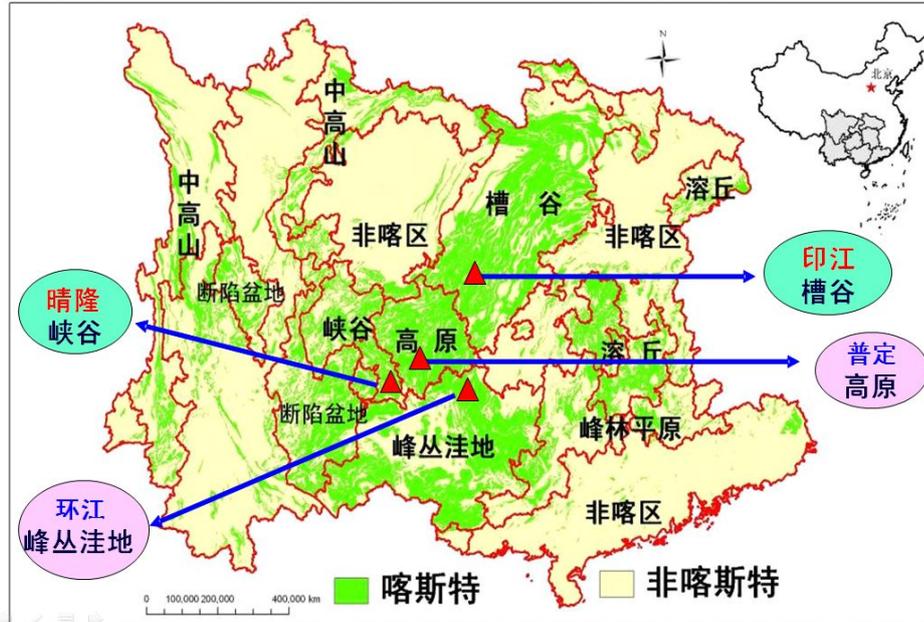


图 4 四个示范区在中国南方喀斯特类型图上的分布

Fig. 4 The distribution of four demonstration areas in the South China karst type map

4.1 高原型“集雨灌溉型高效生态农业”模式

4.1.1 高原型小流域特点

①垂直高差不大，温度变化不大，坡地较缓（坡度小于 25 度），坡地地面物质组成垂直分带明显（石质-土石质-石土质）。②区域内地下水位埋藏较浅，多小于 50 米，地下水露头较多，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。③流域浅碟形峰丛洼地与坝地相间分布，其中下游主要为较平坦坝地，为农耕区。④人口密度大（300 人/km²），坝区高产农田少，坡地中下部开垦严重，石漠化程度高。

可见，在喀斯特高原区小流域中，峰丛与坝地相交的坡地是石漠化的主要发生区，也是固碳增汇的潜力区。因此，喀斯特高原区小流域的石漠化治理及固碳增汇技术集成及示范工程主要以综合治理坡地为主，发展坝地高效农业为辅。

4.1.2 固碳原理与增汇措施

在小流域的坡地区，根据水资源状况，以集蓄水技术与管网化微型水利灌溉技术为核心引导坡地立体垂直带谱建设。在山体上部石质坡地开展生态林分改造固碳增汇技术示范，在山体中下部土石质坡地进行经果林增汇经营示范，在山脚石土质坡地发展高效农业增值增汇技术。同时，发展种草养鹅，林下养鸡等

低碳排放型养殖业，采用生物碳肥技术，将秸秆等有机碳转化为无机碳，并施入土壤中，改善土壤肥力，提高土壤有机碳含量；在小流域的坝地区域，发展高效农业，开展“种植—养殖—沼气”清洁循环利用、固碳增汇的高效农业与社区垃圾无害化处理试验示范，建立喀斯特高原型农村社区资源高效利用的固碳增汇模式。

4.2 峰丛洼地型“人工种草替代型草食畜牧业”模式

4.2.1 峰丛洼地地区小流域特点

①垂直高差较大（ ≥ 200 米），温度变化不大，坡地中上部很陡（ $\geq 35^\circ$ ），下部较缓（ $< 25^\circ$ ），漏斗型峰丛洼地与谷地相间分布，坡地地面物质组成垂直分带明显（石质—土石质—石土质）。②区域内地下水位埋藏较浅，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。③人口密度较小（150人/ km^2 ），耕地资源十分匮乏，农田主要集中于洼地、谷地底部，易遭涝灾。坡地中下部开垦严重，石漠化程度非常高，固碳增汇潜力巨大。④该类型小流域面积较小，多呈现底部小面积平坦耕地，四周山体底部坡地开垦的情况。

4.2.2 固碳原理与增汇措施

针对小流域内的独特海拔、地貌、水文、植被特征以及岩溶发育程度，在全流域内开展水资源开发利用，建立集（水面，针对坡面）、引（水沟，针对表层岩溶带）、蓄（水池、水窖）、堵（落水洞、地下河）四位一体的表层水资源利用模式，并在洼地底部开展高产草地建设。根据喀斯特峰丛洼地型地质构造、地貌、土壤、植被等条件，在西南喀斯特石漠化治理工程等已有生态恢复工程的基础上，针对生态系统类型与石漠化程度，研发提升农林生态系统碳汇的关键技术，开展喀斯特替代产业发展的碳增汇技术试验示范，在谷地洼地底部，将原有易涝的耕地改为以人工草地为特色的替代型草食畜牧业发展与固碳增汇技术、坡地保护性种植固碳增汇技术、退化植被人工诱导恢复的固碳增汇技术、喀斯特土壤有机质丢失阻控等技术的试验示范。

并加强与野外台站、地方林业设计规划部门、农业土壤监测系统合作，开展喀斯特生态系统植被和土壤有机碳积累过程的定位观测，结合区域调研和历史资料的收集，估算喀斯特生态系统固碳潜力，构建喀斯特碳循环研究平台；基于喀

斯特生态系统固碳机制，建立典型生态类型的固碳增汇模式与技术体系。

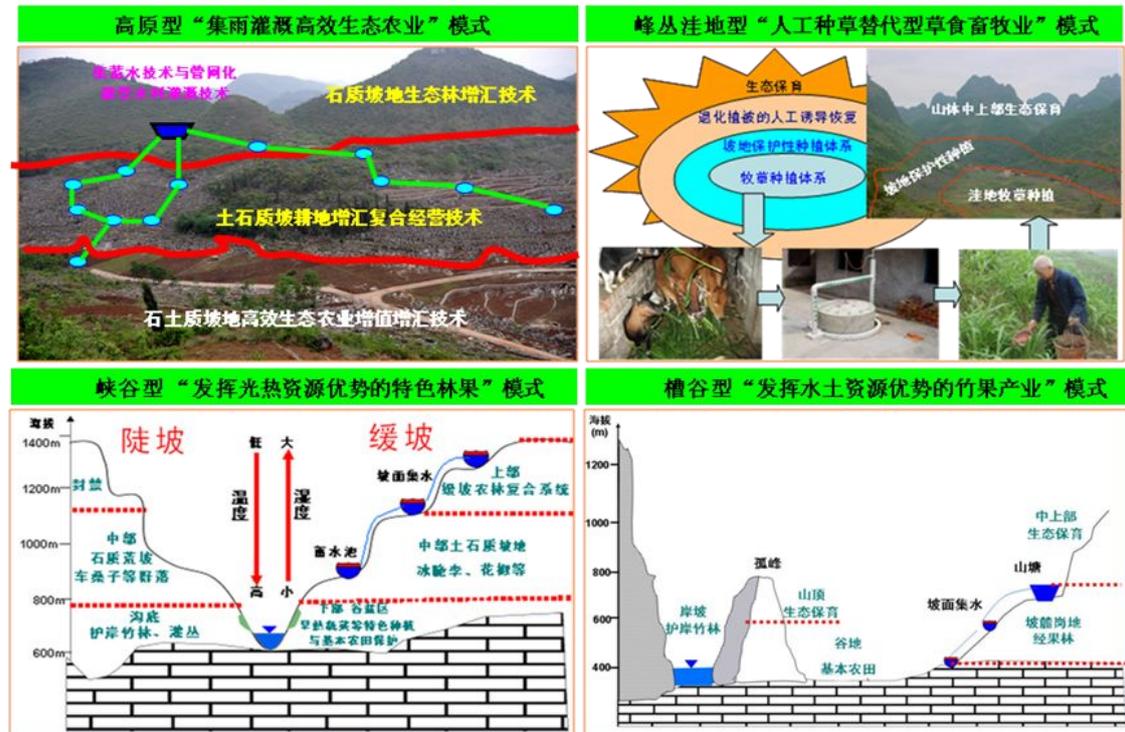


图 5 不同喀斯特小流域类型固碳增汇集成模式图

Fig. 5 The integrated model of carbon increases in different watershed

4.3 峡谷型“发挥光热资源优势的特色林果”模式

4.3.1 峡谷型小流域特点

①垂直高差大 (≥ 500 米)，峡谷中下部光热资源丰富，干热效应明显，坡向影响较显著，坡高谷深，坡地上部较缓 ($< 25^\circ$)、中下部陡峻 ($\geq 35^\circ$)，沟谷深窄，局部较宽，坡地地面物质组成以石质—土石质为主。②区域内地下水位埋藏深，坡地径流系数小，漏失严重，干旱缺水突出，坡地中上部表层岩溶带较发育。③人口密度较小 (130 人/ km^2)，耕地资源十分匮乏，高产农田零星分布于较宽谷地处，坡地开垦严重，中下部土壤流失殆尽，石漠化程度非常高，生物和土壤碳库很少。

流域自高原面向峡谷区深切，水热条件相差较大，高原面为温凉湿润气候类型，随海拔下降，呈现谷深干热的特征。石漠化治理及固碳增汇工程自上而下，充分利用其气候特点进行布置。

4.3.2 固碳原理与增汇措施

根据该类小流域山高水深，热量资源丰富，地下水埋藏深，水分匮乏的特点，

建设坡面集蓄水技术与管网化微型水利工程。充分利用峡谷区热量条件优势，种植喜热固碳增汇型特色植物，从峡谷底部至高原面，垂直差异显著，沟底种植护岸竹林、木本植物；山体中部土石质坡地种植花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)等特色经济作物，石质荒坡种植车桑子(*Radix Dodonaeae Viscosae*)、白花刺(*Crataegus*)等喜热耐旱植物；山体上部缓坡地种植楸树(*Catalpa bungei*)、核桃(*Juglans regia*)等喜温凉湿润植物，建设农林复合系统。有计划有目的地进行富余农村劳动力转移，减轻农业人口对土地压力。发展低碳排放型养殖业，如种草养鹅、羊，林下养鸡；采用生物碳肥技术；同时开展“种植—养殖—沼气”清洁循环利用、固碳增汇的高效农业与社区垃圾无害化处理试验示范，建立喀斯特峡谷型农村社区资源高效利用的固碳增汇模式。

4.4 槽谷型“发挥水土资源优势的竹果产业”模式

4.4.1 槽谷小流域特点

①垂直高差较大(≥400米)，槽谷宽阔，两侧坡地高陡，坡麓岗地断续分布，中下游河(沟)道深嵌于谷地，两侧岸坡较陡。线型褶皱发育，碎屑岩与碳酸盐岩相间分布，除陡崖地段外，坡地土壤保存较好，中下游河沟道两侧较陡坡地地面物质组成多为土石质-石质。岗地局部分布的土石质坡地多为正在耕种或弃耕地。②人口密度较大(300人/km²)，槽谷坝地多为高产稳产农田，岗地多为中低产田，水土流失严重。③坡地径流系数相对较高，但径流入渗仍很严重。

槽谷区受线形褶皱影响，除流域下游近河谷而水热条件略有差异外，小流域水平分异不明显，主要体现为自坡地顶部至槽谷底部的坡面分异，因此石漠化治理及固碳增汇工程布置于代表性地段，并充分考虑其水土配置。

4.4.2 固碳原理与增汇措施

根据区域水土资源空间配置相对优越，但坡地径流系数相对较高，径流入渗严重的特点，搞好坡面集蓄水技术与小山塘建设，同时注意塘库底部防渗。鉴于槽谷两侧连绵山体顶部较为平缓，多为残丘，以封山育林、草为主；中上部的山体，较高陡，人工促进封育为主；山体下部的缓丘岗地，种植板栗、柑橘、核桃等经济林果，林下种植宽叶雀稗、白三叶、紫花苜蓿等草被；底部宽阔槽谷区，加强高产稳产基本农田建设与保护；中下游槽谷两岸坡地，多石质和土石质坡地，

种竹类等禾本植物。

重点加强基本农田保护与建设,局部有条件区域进行坡改梯工程,并配套相应的小水池、沉砂池等水利工程,提高土地生产力。区内实施可持续农业发展,包括区内发展低碳排放型养殖业,如种草养鹅、羊,林下养鸡;采用生物碳肥技术;同时开展“种植—养殖—沼气”清洁循环利用、固碳增汇的高效农业与社区垃圾无害化处理试验示范,建立喀斯特槽谷型农村社区资源高效利用的固碳增汇模式。

5. 结语

(1) 西南喀斯特石漠化山区是中国陆地生态系统固碳增汇的主战场之一,开展喀斯特石漠化植被恢复与固碳增汇技术试验、示范,对于支撑西南地区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。

(2) 石漠化的发生发展、加剧,导致植被和土壤急剧减少、土地资源不断丧失,是该区域生态系统碳流失的主要原因。

(3) 小流域是喀斯特地区基本的生态水文地质单元,该单元中的水、土壤、植被等环境要素都受控于这种地质结构特征,对我国南方喀斯特地区进行小流域类型划分是石漠化治理的重要前提和理论基础。

(4) 石漠化地区的固碳增汇技术需要根据喀斯特岩性差异、石漠化困难立地类型、缺土少水环境、植被生长特征与周期、地面物质组成结构等,匹配顺应自然的生态系统的关键技术。

(5) 根据小流域的地质结构特征、生境类型、生态系统退化程度、土地利用的方向等,建立了“高原集雨灌溉型高效生态农业模式”、“峰丛洼地人工种草替代型草食畜牧业模式”、“峡谷型发挥光热资源优势的特色林果模式”、“槽谷型发挥水土资源优势的竹果产业模式”。

致谢:感谢中国科学院战略性先导专项“典型石漠化地区植被恢复和增汇技术的试验示范”课题组成员提供的数据资料,感谢研究生秦罗义、李盼龙、张斯屿等同学行文过程中给以的协助。

参考文献:

1 朱守谦,魏鲁明,陈正仁,张从贵. 茂兰喀斯特森林生物量构成初步研究. 植物生态学报,1995,19(4): 358-367.

- 2 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学.重庆:重庆出版社,1998.
- 3 刘长成,刘玉国,郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性.植物生态学报,2011,35(10):1070-1082.
- 4 刘玉国,刘长成,魏雅芬,刘永刚,郭柯. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征.植物生态学报, 2011, **35**(10):1009-1018.
- 5 李大通.1:4000000 中国可溶岩类型图说明书.北京:地图出版社,1985.
- 6 国家林业局.中国石漠化状况公报.2012. (<http://www.forestry.gov.cn>)
- 7Zhang X B ,Bai X Y, Liu X M. Application of 137Cs fingerprinting technique to interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the catchment of the Guizhou Plateau, China. Science in China Series D: Earth Sciences,2010, **54**(3):431-437.
- 8Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst Rocky Desertification in southwestern China: Geomorphology, land use, impact and rehabilitation. Land Degradation & Development, 2004,**15**:115-121.
- 9Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N and Zhou Z F. How types of carbonate Rock Assemblages constrain the distribution of Karst Rocky Desertified land in Guizhou Province, PR China: Phenomena and Mechanisms. Land Degradation & Development, 2004, **15**:123-131.
- 10Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Du H, Lu S Y. Relationships between woody plants and environmental factors in karst mixed evergreen-deciduous broadleaf forest, southwest China. International Journal of Food, Agriculture & Environment, 2012,**10**(1):890-896.
- 11Liu C C, Liu Y G, Fan D Y, Guo K. Plant drought tolerance assessment for re-vegetation in heterogeneous karst landscapes of southwestern China. Flora,2012,**207**:30-38.
- 12Bai X Y, Zhang X B , Long Y, Liu X M, Zhang S Y. Use of 137Cs and 210Pbex measurements on deposits in a karst depression to study the erosional response of a small karst catchment in Southwest China to land-use change. Hydrological Processes,2013,**27**(6):822-829.
- 13Bai X Y, Wang S J , Xiong K N, et al. Aseessing Spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification and indications for restoration strategies. Land Degradation & Development,2013, **24**(1):47-56.