

邓艳,曹建华,蒋忠诚,等.西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议[J].中国岩溶,2016,35(5):476-485.
DOI:10.11932/karst20160503

西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被 关键技术进展与建议

邓艳^{1,2},曹建华¹,蒋忠诚¹,周晓东¹,岳祥飞¹

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

摘要:石漠化综合治理关键技术研发是石漠化综合治理工程的关键步骤。本文根据第一期石漠化治理工程的进展,分析了岩溶水资源特征与开发利用技术、土壤资源维持与质量提升技术、植被恢复与功能提升技术和水-土-植被耦合模式的研发进展和不足,对第二期石漠化综合治理提出了一些建议,认为第二期石漠化综合治理关键技术研发应以“结构-过程-服务”为指导框架,加强岩土组构等地质环境背景、水土过程和石漠化过程以及关键服务功能维持和提升机理的基础研究,加强功能型植被、关键共性和个性技术研发以及关键技术的配套和优化,加大石漠化综合治理关键技术的适用性评价和推广应用,完善流域内生态系统服务主体功能区评估和生态补偿,有效准确的治理石漠化,以促进西南岩溶石漠化地区生态、经济和社会的可持续发展。

关键词:岩溶石漠化;关键技术;水土流失/漏失;生态系统服务功能;“结构-过程-服务”框架

中图分类号:X171;Q948

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2016)05-0476-10

石漠化是指碳酸盐岩岩溶作用过程与人类不合理的经济活动相互作用而造成的植被退化、岩石裸露,具有类似荒漠景观的土地退化过程。石漠化造成了西南岩溶区土壤侵蚀严重、基岩大面积裸露、土地退化、生物多样性下降、居民贫困等,成为制约我国西南地区可持续发展的重大生态环境问题^[1]。国家对西南石漠化问题高度重视。2012年,中国共产党第十八次全国代表大会工作报告中将生态文明建设融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设的全过程,2013年,生态文明建设写进《中国共产党章程(修正案)》,2015年发布的《全国生态功能区划》中,将石漠化作为区划4个敏感性因子之一。习近平2016年1月5日在重庆召开推动长江经济带发展座谈会上强调:长江经济带发展要共抓大保护,不搞大开发,实施好长江防护林体系建设、水土流失及岩溶地区石漠

化治理等工程。石漠化综合治理成为国家的目标和社会的需求。

石漠化综合治理关键技术研发是石漠化综合治理工程的关键步骤。由于西南岩溶区基岩裸露,岩土出露面积比例不一,土体浅薄,洼地和山体相对高差大等地质结构背景,造成地表地下水交换过程频繁且迅速,生态环境容易逆向发展形成石漠化,且社会经济发展水平低,教育文化落后,贫困面广、贫困程度深、农民生计仍以粗放式耕作高度依赖土地资源。受自然、社会经济多方面条件的约束,在第二期石漠化治理过程中,关键技术研发应在了解岩溶生态系统结构和过程的基础上,同时满足生态服务功能提升和民生改善的双重需求。目前,第一期石漠化综合治理工程已经完成,在石漠化综合治理关键技术研发方面取得了很大的进展。本文通过总结前人的研究成果,分

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502506);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(YWF201401)

第一作者简介:邓艳(1978-),女,副研究员,主要从事岩溶环境学研究。E-mail:dydesk@karst.ac.cn.

通信作者:曹建华,男,研究员,博士研究生导师,主要从事岩溶生态学研究,E-mail:jhcaogl@karst.ac.cn;蒋忠诚,男,研究员,博士研究生导师,主要从事岩溶水文地质与环境地质研究,E-mail:zhjiang@karst.ac.cn.

收稿日期:2016-07-26

别阐述了水、土、植被资源的石漠化治理关键技术研发进展,为第二期石漠化治理工程的开展提供成功经验和建议,为西南岩溶石漠化区实现生态和经济的可持续发展提供技术支撑。

1 岩溶水资源特征与开发利用技术

水资源是岩溶生态系统形成、发展、演化和稳定的基础和依据,水资源短缺是石漠化地区的关键问题,解决了缺水问题,可以带动和促进农、林、副、渔业发展,当地居民收入增加,减少开垦砍伐,使生态环境良性循环。由可溶岩组成的非均匀、透水性能不一的

含水介质,构成了岩溶区特有的地表、地下双层空间系统。地表子系统主要由溶沟、溶隙、石芽、峰丛、天窗、漏斗、溶水洞及溶洼等组成;地下子系统主要由溶洞、管道及地下河等组成。地表是岩溶径流的形成场和分配场,地下是岩溶径流的输移场和调蓄场^[2]。由于下垫面的“三维”立体型,岩溶区“五水(雨水、地表水、土壤水、表层岩溶水和地下水)”转换过程显得更复杂(图 1)。降雨补给地下水主要有两种方式,一是通过天窗、竖井等快速集中的补给形式,二是通过裂隙和孔隙等缓慢的补给形式。前者主要是由通过竖井和管道补给的快速流和扩散流组成,形成了高度复杂的时空变异输入信号。

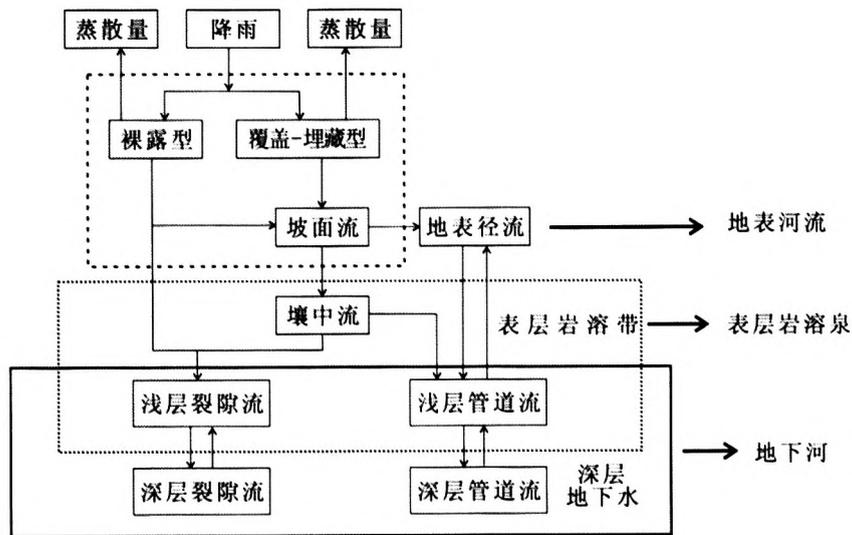


图 1 岩溶系统“五水”循环概略框图

Fig. 1 Block diagram showing karst system with "five water" cycle

工程性缺水和水资源利用效率低是岩溶石漠化区水资源的两个主要问题。据 2006 年前完成的西南区 1:5 万水文地质调查面积 23 万 km²,发现地下河 2 783 条,可开发利用水资源量 615 亿 m³/a,但开采程度仅 16%^[1]。在勘察岩溶区地质发育条件、岩溶作用规律、水文地质结构和水文过程,掌握岩溶地下水含水介质特征、地下水赋存及运移规律的基础上,对不同类型的地下水资源采取相应的开发技术(图 2)。近几十年来,我国西南岩溶区石漠化治理为解决地表缺水问题,探索了多种技术、积攒了许多宝贵的经验^[3]。

1.1 表层带岩溶水的开发利用技术

西南岩溶区表层带岩溶水资源量总量不大,仅为总降水量的 8.06%左右^[1],但对于山区分散的居民居住点,表层岩溶带的供水意义相当重大,适合小规

模分散式开采。对表层岩溶水资源开发主要通过洼地水柜山塘蓄水、山腰水柜蓄水,灌渠引水、山麓开槽截水、水柜山塘储蓄,灌渠引水、泉口围堰,灌渠引水和洼地底部人工浅井提水等方式^[5]。例如广西平果化陇何地区布尧村东南坡的散流状表层岩溶水,采取开槽截水、水柜山塘储蓄、灌渠引水等技术,解决周围农田灌溉和村民的引水问题^[5]。广西马山弄拉屯通过对 4 个表层岩溶泉水的“引、蓄”开发,解决了全屯人畜饮用水及部分经济作物和苗圃的灌溉问题^[1]。

1.2 高位地下河及岩溶大泉开发利用技术

地下河是岩溶山区地下水的主要赋存形式,其资源量大,水资源量占天然资源量 40%以上。有效开发利用地下河水资源,不仅可以改变地表土地利用方式,转变农田产业结构,具有显著的经济效益及社会效益。在西南地下水资源丰富的地区,直接利用地下

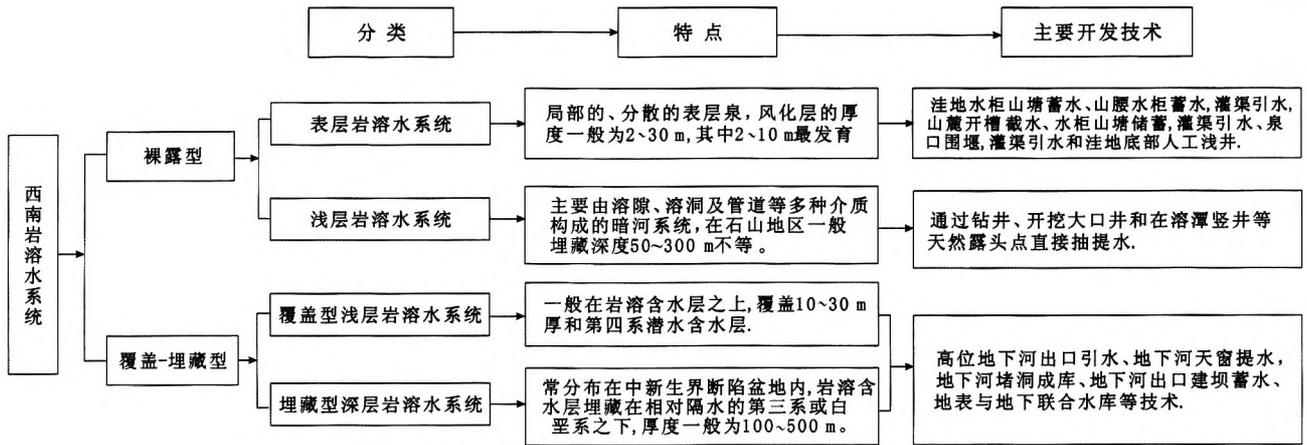


图2 西南岩溶水系统分类及主要开发技术(据[1]修改)

Fig. 2 Classification and main development technologies of karst water system in southwestern China

河和岩溶大泉。如贵阳市汪家大井,为一上升泉,该泉口建成了日供水量 10 万 m³ 的自来水厂,成为贵阳市城市供水的主要水源之一。

1.3 浅埋地下河天窗、溶潭竖井等提水技术

对岩溶蓄水构造及富水块段区域主要通过钻井、开挖大口井和在溶潭竖井等天然露头点直接抽提水。如广西平果果化陇何屯,安装抽提设备直接抽提竖井的地下水,引到高位水柜中,配套输水管道系统,解决了龙河屯世代挑水的引用和灌溉的问题^[5]。云南广南珠琳苏都库暗河截流工程(图3),在暗河天窗的中间部位设置高 12 m 的混凝土堵体,拦截暗河水流,将其水位壅高溢出地表,实现自流引水开发^[6]。

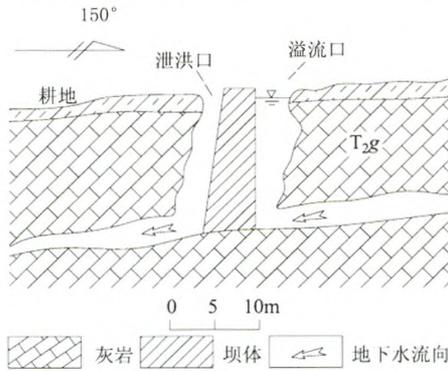


图3 云南广南珠琳苏都库暗河截流剖面图^[6]

Fig. 3 Cross section of Zhulinsukudu river closure section in Guangnan City

1.4 地下河堵洞成库和地下河出口建坝蓄水技术

对地下水资源丰富的地区主要通过地下河堵洞成库、地下河出口建坝蓄水等技术。堵洞成库是目前地下河水开发利用最为常见的工程技术。通过对地下河主干管道的堵塞,可以大幅度提高水位。其典型

工程范例较多,如云南文山六郎洞地下河水库、云南曲靖水城暗河水库、湘西大龙洞地下河水库、贵州普定马关地下河水库等。如贵州独山新寨奋发洞地下水库(图4),其水位提高 26 m,在上游与地下河联通的红梅洼地和破屋西洼地相连蓄水成湖,地下库容达 22 万 m³,引流自流灌溉 100 hm²,解决了当地供水及灌溉问题^[3]。

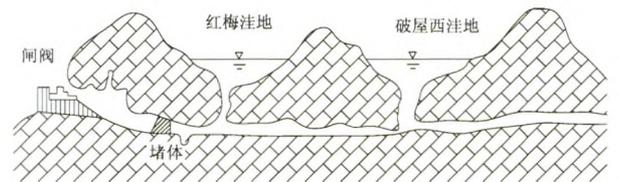


图4 贵州独山新寨奋发洞地下水库剖面示意图^[3]

Fig. 4 Sketch of underground reservoir profile at the Dushanxin village in Guizhou Province

1.5 农村小型水利水保技术

农村小型水利水保工程能有效的使农村生态环境、农业收成、自然灾害的抵御能力等改善和增强,是促进农业增产和农民增收的物质保障条件。农村小型水利水保技术主要包括修建蓄水池、水窖、山塘、排洪渠、截水沟、灌溉(引水)渠、沉沙池、具有排洪、蓄引水、拦沙等。农村小型水利水保技术在西南岩溶山区水土资源保护、促进作物增产和农民增收发挥了重要的作用。

1.6 水资源高效利用技术

在水资源开发利用的基础上,实施节水型农业,提高水资源的利用率。岩溶区节水技术,包括农艺节水技术,生物(生理)节水技术和节水灌溉技术等。农艺节水技术包括种植制度优化节水技术、抗旱品种的

筛选与引进、覆盖保墒技术、化学制剂保水技术等,生物(生理)节水技术有分区交替灌溉、局部灌溉和生育节水灌溉等技术。节水灌溉技术则有滴灌、微喷灌、涌泉灌和地下渗灌等技术^[5]。发展节水型农业,在“开源”的基础上同时实施“节流”,实现节水效率最大化,是岩溶山区农业生产带有方向性和战略性的重大问题。

虽然,从政府部门到研究人员一直意识到,“石漠化的综合治理要以治水为龙头”,但石漠化地区干旱缺水的问题仍然未能有效的解决,主要的原因有:①岩溶区“五水”循环过程基础研究不足是水资源高效利用关键技术研究的障碍。岩溶区的岩性、构造、地貌类型和生态环境等结构控制着“五水”转化过程和水资源补给方式,最终决定水资源的赋存、迁移和可开采量。对该地区的水资源开发利用必须在摸清岩溶区地质发育条件、岩溶作用规律、地下水含水介质特征、水文地质结构的基础上,掌握完整的岩溶含水系统的补、径、排等运移规律,研发相应的水资源开发技术,目前成功的技术都是在掌握流域结构和过程的基础上研发的,但是每个岩溶含水系统都具有特殊性,其岩溶地貌类型、发育程度与浅层地下水赋存的关系,岩溶水循环动力过程及其地表水文生态过程,岩溶浅层地下水的开发、利用潜力及其与土壤水(雨水)的排补关系等均不同,因此,对区域碳酸盐岩地质背景和水循环过程基础研究不足限制了水资源高效开发利用。②部分关键技术需要改进和革新。如深层岩溶地下水暗河管道的精确定位和区分充水物探技术、地下水水质原位修复技术、浅层地下水的水质保护技术、农村水柜水质过滤净化技术、基于生态系统健康的水资源优化调控技术、农田节水灌溉与土壤

保墒技术等亟待研发。③从管理角度上看,岩溶山区水利水保设施保护和管理有待加强,岩溶地区地表水与地下水转换迅速,需要稳定连续的水源供给蓄水池,同时岩溶区水库渗漏严重,水利设施寿命短;地表、地下水开发利用没有与地表农业灌溉水利工程相配套,导致水土资源缺乏高效合理利用。

2 土壤资源维持与质量提升技术

土壤流失/漏失严重和土壤质量易退化是岩溶石漠化区土壤资源的两个主要问题。与非岩溶区相比,岩溶区水土流失/漏失的特点是:(1)水土流失的易发性。主要表现在岩溶区土壤团聚体水稳性差,土壤缺少 C 层,岩—土界面亲和力和黏着力差,容易发生滑坡,成土速率慢和土壤资源分散等^[7];(2)岩溶区土壤侵蚀模数低,水土流失的隐蔽性。岩溶石山地区的允许土壤流失量应指土壤地面流失量,且应小于 1~10 t/(km²·a),远低于水利部的标准 200 t/(km²·a)^[8]。广西岩溶区的河流输沙模数为 61.5~129 t/(km²·a),平均 85.1 t/(km²·a),约是花岗岩区(315.7 t/(km²·a)和砂页岩区(188.6 t/(km²·a)的 1/4 和 1/2。(3)水土流失过程的双重性。与非岩溶地区以坡面流失为主的水土流失方式不同,岩溶区水土流失/漏失存在地表流失和地下漏失双流失过程(图 5),一方面泥沙在降雨过程中通过地表径流进入水流系统,另一方面泥沙随水流通过落水洞、竖井、漏斗进入地下管道和地下河^[9]。岩溶区土壤侵蚀以地下漏失为主,地下漏失模数占年均总土壤侵蚀模数的 70%~80%^[10]。

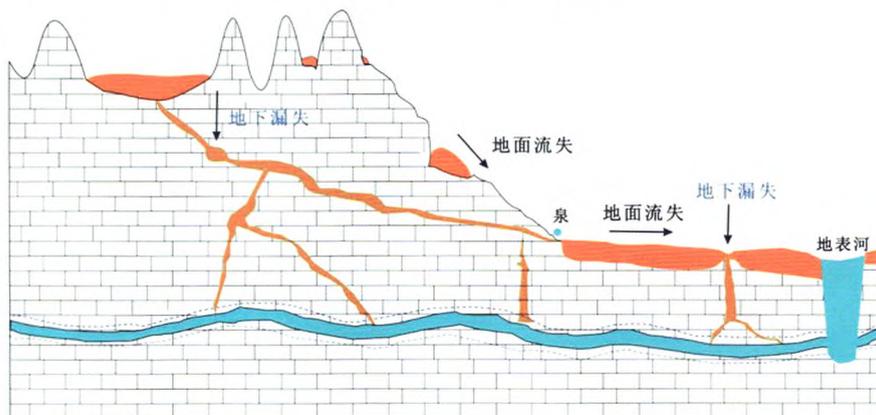


图 5 岩溶区水土流失过程模式图

Fig. 5 Model of karst soil erosion process

岩溶区土壤资源不仅稀少、层薄、分散,且在人为活动干预下,土壤质量容易下降。研究表明,随着石漠化程度的加剧,土壤颗粒向粗粒化发展,结构性变差,土壤容重增高,孔隙度和水分降低^[6]、水势下降^[11]、土壤 $>0.25\text{ mm}$ 和 $>2\text{ mm}$ 的水稳性团聚体数量呈下降趋势,土壤的抗蚀性变差,有机质、有效磷和有效钾含量降低、 SiO_2 含量增加、土壤 CaO 和 MgO 含量下降,土壤微生物种群数量呈逐步下降趋势,土壤质量下降,土壤生态系统物质和能量循环的能力减弱^[12]。

阻控水土流失/漏失和提升土壤质量是石漠化综合治理中土壤恢复的关键。土壤资源的维持和质量提升主要包括3个方面的内容。

2.1 促进成土速率技术

针对岩溶石漠化山区不同部位采用不同的技术措施:石峰的中上部重度石漠化区,封山育林配合人工造林,尤其是种植耐旱、耐瘠薄的灌木,加速碳酸盐岩的溶蚀和成土速率;石峰中下部中度石漠化,砌墙保土,培育经济林木在提高成土速率、减少土壤流失的同时,增加经济效益;石峰下部及山麓轻度石漠化区,去石还田,坡改梯,确保基本农田,选择具有强的生命力和活跃的新陈代谢速率的物种,可产生更多的侵蚀性有机物质,在发展粮食和经济作物的同时,兼顾加速碳酸盐岩溶蚀和成土过程。

2.2 土壤流失/漏失阻控技术

针对岩溶区土壤侵蚀由地表进入地下的关键部位——漏斗、落水洞和竖井,采取生物措施为主,辅以相应的工程措施^[1],遏制地表土壤颗粒进入地下系统。生物措施以不同地貌部位的水土保持林建设技术、裸露石芽植物篱技术、砌墙保土地埂植物篱技术、隔坡式植物篱技术、土+石组合微地貌单元水土保持技术、坡面植物梯化技术为主^[10],构建密植型植物篱、灌草高矮搭配型植物篱、间作型植物篱、间隔型植物篱、填充型植物篱等植物篱,植物篱主要有薜荔植物篱技术、洼地整地种植火龙果技术^[10]、牧草+金银花植物篱技术、牧草+任豆(银合欢)植物篱技术、刺梨+黑麦草植物篱技术等。水土保持工程措施主要有土地整理技术、坡改梯技术、洼地排水系统工程^[10]等。

2.3 土壤改良技术

针对石漠化区土壤质量下降的特点,需要根据地形地貌、石漠化程度、土壤分布特点等进行土壤改良,从而增加土层厚度,调节土壤沙—黏土比例和 pH ,改善土壤的物理性质,提高土壤蓄水保肥能力。主要

的改良技术有种植绿肥改良土壤和食用菌改良土壤^[5]。适宜的耕种管理方式,如减少田间作业,减少扰动,改变犁翻耕土壤等传统耕作方式,有利于改善土壤结构,减少水土流失。年年翻耕扰乱了土层结构、土壤团聚体被粉碎,耕层内有机质矿化速度加快,使得土粒间粘结力下降,水稳性团聚体减少,而长期免耕覆盖条件下,土壤免受人为破坏,使土壤各级水稳性团聚体在有机质、土壤动物等各种因素作用下形成并稳步发育^[13]。此外,作物秸秆覆盖技术在培肥地力的同时,可保持土壤微生物保持平衡,减少水分侵蚀和水分无效蒸发,保护土壤,保障土壤的生态可持续性^[14]。

国家主体功能区规划确定了西南岩溶石漠化防治区水土保持的生态服务功能定位,因此,水土保持是石漠化综合治理的关键任务。第一期石漠化综合治理在阻控水土流失/漏失和提升土壤质量维持方面做了很多工作,但是岩溶区水土漏失仍然严峻,主要问题有:①岩溶区水土流失/漏失的过程和驱动机制仍然不明确。地表水土通过裂隙、落水洞、竖井和漏斗进入地下管道和暗河,水土地下漏失面广和程度深,地下水漏失途径、比例和过程不明晰,极大限制了水土流失/漏失的防治和阻控。由于对其过程和机理尚不清楚,因此岩溶区水土流失/漏失措施带有盲目性。目前水土流失/漏失阻控主要通过坡改梯工程,未能有效的阻截水土向下漏失,因此,第二期石漠化综合治理工程中的水土保持措施,必须在水土流失/漏失的过程和驱动机制的基础上,采取针对性的措施,才能有效的阻控水土流失/漏失。②岩溶区地下水漏失阻控技术尚未解决。第一期石漠化综合治理水土保持工程主要以防控地表流失为主,针对峰丛洼地、岩溶高原、断陷盆地、峰林平原、岩溶槽谷、岩溶峡谷、岩溶中高山、溶丘洼地等重点关键地貌部位(高原面、陡坡、高原—盆地过渡带等)未进行有效的防控,落水洞固土防漏技术、浅层裂隙保水固土技术和裂隙土防固植物篱技术等尚未解决。③传统的田间耕作方式不利于水土保持。如用犁翻耕土壤等传统耕作方式,不利于土壤水稳性团聚体的发育和土壤肥力的累积,导致岩—土和土粒间黏着力更差,水土流失加剧,土壤肥力下降。

3 植被恢复与功能提升技术

岩溶区植被演替过程受岩溶区生境异质性、地形、土壤理化性状的制约,同时与物种的生理生态特

性、其相互关系及微生物环境密切相关^[15-16]。岩溶区植被演替的主要驱动力是高度的景观异质性、地形、土壤理化性质和微生物环境、物种的生理生态特性及其相互竞争关系^[15-16]。西南岩溶区植被自然顺向演替需经过 6 个阶段:草本群落阶段→草灌群落阶段→灌木灌丛阶段→灌乔过渡阶段→乔林阶段→顶极阶段^[17-19]。从草本群落阶段→灌木灌丛阶段速度较快,约需 20 年,之后恢复速度减慢,从灌木灌丛阶段→乔林阶段则需约 47 年,至顶极阶段则需近 80 年(图 6)。因此,退化群落自然恢复 40—50 年可有较正常的组成、外貌和结构,但要恢复到有完善结构、功

能的岩溶森林生态系统需要一个更漫长的过程^[17]。植被恢复的实质是群落演替,而演替的实质则为物种的相互替代和对环境的适应性^[20]。植被顺向演替由先锋种、次先锋种、过渡种、次顶极种、顶极种 5 个适应种组间优势地位的依次替代^[18],这些阶段是可逆的,当干扰的强度、频度、持续时间超过一定的阈值时群落极易发生逆向演替,植被将产生双向的自然演替^[20],且逆向演替速度远比顺序演替快,退化容易恢复难^[19],因此,岩溶区植被抗干扰阈值低,易退化,恢复过程复杂、耗时长。

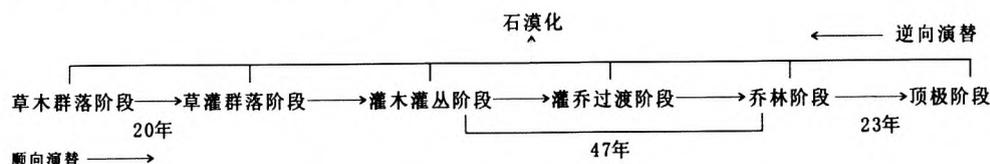


图 6 岩溶石漠化自然顺向演替阶段^[15]

Fig. 6 Natural succession evolution stages of karst rocky desertification

石漠化综合治理的首要任务是植被的恢复重建^[22],封山育林和人工造林(包括物种选择、种间优化和群落空间配置等)是植被恢复的两种主要方式。由于岩溶区植被自然恢复耗时长,需要人工干预加速石漠化的植被恢复过程。

3.1 自然封育技术

国家生态文明建设的指导意见中指出生态修复以自然恢复为主。基于石漠化地区山高坡陡,岩多土少等特点,封山育林仍然是石漠化区植被恢复最主要的方式^[5]。但是,由于岩溶区植被自然恢复时间长,仅仅依靠单纯的封山育林,速度慢,耗时长,因根据不同的立地条件,辅以人工促进措施。如选择有种子或无性繁殖体的地区,根据生态系统自身演替规律分步骤分阶段进行。因地制宜地补充种源、促进种子发芽、幼树生长、密度调控、结构调整等^[23-24]。

3.2 物种筛选和适地适树技术

选择适宜的物种是石漠化植被恢复成功的第一步。具有稳定生态功能和较高生产力的植被群落的关键在于适宜植物种类的选择^[5,22]。中国西南岩溶区是中国生物多样性分布中心之一,中国西南岩溶区有高等植物 225 科,1213 属,4 287 种^[25],分别占中国西南高等植物科的 90%,属的 60%及种的 30%,其中包括 140 种国家一级和二级保护植物^[19]。此外,云南、广西、贵州和四川是我国四大药材产区,是中

资源丰富的区域,其中,广西陆域中药物种 4 623 种,专门或多分布在石灰岩山地的药用植物有贯众(*Cyrtomium fortunei* J. Sm.)、剑叶龙血树(*Dra-caena cochinchinensis* (Lour.) S. C. Chen)、地枫皮(*Illicium difengpi* B. N. Chang et al.)、广豆根(*Cajanus cajan* (Linn.) Millsp.)等^[26],岩溶区丰富的物种为石漠化治理和恢复提供了更多的选择机会。在第一期石漠化治理中,已经筛选了 206 个石漠化治理植物物种^[27],分为生态功能型物种、生态经济型物种、药用植物物种、牧草物种、外来引进物种 5 大类型,其所占的比重分别为 56.3%、25.48%、9.13%、4.81%、4.33%^[28]。在 101 个石漠化典型治理模式中,石漠化治理植物物种选择以生态功能性物种(56.3%)为主,而有经济效益的生态经济型和药用物种(34.61%)较少,与西南岩溶区丰富的中药材不符,且难以激发当地居民治理石漠化的参与性和积极性,无法在面上推广和治理石漠化。

可溶岩地球化学背景通过岩溶作用驱动元素迁移,制约物种的分布。地道药材的地道性更是依赖于岩石的微量元素。贵州茂兰纯灰岩区土壤硅、铝和铁的含量比纯白云岩高,为后者的数十倍以上,相应的纯灰岩区的生物多样性大于纯白云岩区,大量元素对生物多样性的影响大于微量元素^[29]。纯白云岩区土壤微量元素含量普遍高于纯灰岩区,其中 Mn、Zn、Co

要高出1~2倍,广西弄拉的岩溶森林分布于泥盆系东岗岭组中段的泥硅质白云岩上,Mn、Zn、Cu、Co等微量元素的背景值略高,就是这在岩石中约1%的杂质含量,通过岩溶作用迅速溶解并以很高的浓度正向迁移,使弄拉水—土环境均具有较高的矿质营养含量,这是广西弄拉具有丰富的中草药资源的根本原因^[29-30]。矿物养分极有可能是限制石漠化地区(尤其是在裸露型岩溶区)植被恢复的最主要因素^[31],目前相关的研究结果还不够深入,涉及的也仅仅是少量的元素,未来应通过系统的分析和实验生态学研究,在不同的生境条件下开展生物地球化学方面的相关研究,揭示养分在植被恢复过程中的作用。

总体上,对石漠化区综合治理中物种的筛选应考虑七大原则:适地适树原则,乡土树种优先原则,经济效益与生态效益统一原则,按石漠化程度选择物种原则,多种乔木、灌木、草本植物相结合原则,为野生动物提供食物和庇护场所原则,良种选择原则^[32],为石漠化植被恢复和生态产业发展提供物种选择依据。

3.3 种间优化配置技术

在种间配置时,应考虑各个种群的生态位宽度,种群间的生态位相似性比例和生态位重叠,且充分利用种间互利互惠的关系,构建功能群植被。依据植物互补性原理和互惠互利原则,进行深根系和浅根系树种搭配、喜阴和喜阳树种配置、固氮和非固氮树种搭配、落叶和常绿树种组合、针阔叶林混交、乔灌藤草混交等。如深根系植物水分再分配作用可为自己和浅根系植物提供蒸腾用水,促进物种间的互利共生,从而维持生物群落的多样性和稳定性^[33],如深根系 *Artemisia tridentata* 植物能从湿润深层土壤吸收并提升水分释放到干燥表层土壤,所提升的水分可被根深1.3 m的沙生冰草(*Agropyron desertor un* (Fisch.) Gaertn)再吸收^[34-35]。西南岩溶不同演替阶段的环境不同,在石漠化土地重建过程中还应该考虑利用不同水分策略的植物,常绿、落叶和藤本木本植物混栽对于维持岩溶生态系统水分平衡有重要意义^[36]。

3.4 适合立地条件的群落空间配置技术

如何依据岩溶环境的高度空间异质性,在水平和垂直空间搭配合理的物种。因此,适合立地条件的群落空间配置技术是石漠化植被恢复中十分重要的一项技术^[5,22]。根据当地具体自然条件因地制宜、因时制宜,根据需求,通过人为设计,对群落进行镶嵌优化

组合,使其在整体上互补共生以充分利用光、热、水、土等自然资源,适应季节变化,形成高效、稳定、生态服务功能高的植物群落。根据不同的地貌类型,模拟天然植被进行乔—灌—藤—草生态系统的优化配置。如在干旱的岩溶山地顶部、阳坡选择耐旱性强、喜光的树种进行乔灌草混交;在阴坡、半阴坡选择耐荫蔽、对光照条件要求不严格的乡土树种混交;在缓坡和梯地进行乔灌藤草混交;崖口和山地中下部土层稍厚、土壤含水量高,营造竹子等经济林;谷地、洼地种植经济价值较高的果树等^[22]。

植被恢复是石漠化综合治理的直观表现,在生态系统的基本功能(能量流动、物质循环和信息传递)中,植被起着先导作用。但是,第一期石漠化综合治理在植被恢复和重建中还存在以下问题:①维持植被生态服务功能的生态学机理不清。目前,植被恢复物种单一,植被层次结构简单,生物多样性低,部分水保林和经果林的土壤保持作用远低于封禁治理的疏林地^[38]。众人对生物多样性对生态系统服务功能的影响持不同的意见^[39],且生物多样性尤其是植物多样性、植被覆盖度和生物量对生态系统服务整体功能的贡献率不清楚,流域内多大面积的植被覆盖率才能保证整个流域为人们提供足够而洁净的水资源?关键种群大小、数量和分布样性如何维持生态系统服务整体功能?且流域内过度的重视水资源的供给功能可能会导致其生态功能的丧失或退化;岩溶土壤有效态限制了物种的分布,岩溶作用驱动元素迁移如何影响植被恢复过程的机理不清;石漠化区先锋物种、名特优物种种间的互利和竞争关系机理不清,难以高效合理搭配层次复杂的功能群;石漠化治理筛选的物种,尤其是外来引进物种,往往注重其经济效益,未详细准确评估其对当地生态环境的改造能力以及对本地生物链的影响,就贸然大规模的推广和种植,对当地生态系统可能造成不确定的影响。②缺乏植被生态服务功能维持和提升技术。目前的植被恢复重建技术主要还是集中在提高造林苗木成活率技术上,如物种筛选和苗木繁育技术、营养袋苗种植技术、整地密植抚育技术等等,缺乏具有一定服务功能的植被功能群落的构建,如水源涵养型植被优化配置技术、水土保持功能群筛选和培育技术、土壤改良功能群搭配技术、特色经果林的栽培及品质稳定技术等等。③农民未能作为主体积极参与石漠化治理。目前,石漠化治

理管理模式仍以政府和科研院所为主导,投入成本高,长效可持续发展不足,推广和应用受阻。在石漠化治理的物质种筛选时应在兼顾生态效益的同时顾全经济效益,才能激发当地居民治理石漠化的主动性和积极性。

4 水-土-植被耦合技术集成

第一期石漠化综合治理工程中,在“水是关键,土是基础,植被修复是标志,产业结构优化和替代产业培植是保障”的理念指导下,在不同立地条件配套相应的水资源开发利用、水土资源高效合理利用、植被恢复演替人工诱导和特色经济植物栽培等关键技术,形成不同的国土资源高效利用模式,如增强水土保持的植被恢复模式,有生态工程技术治理模式^[27],小流域综合治理模式^[27]等;主要以经济效益为主的农村循环经济生态产业发展模式^[37]、三位一体(养殖-沼气-种植)模式^[5]等;以生态效益为主的有植树造林和封山育林模式^[40]、人工促进天然植被恢复模式、生态工程技术治理模式等;兼顾生态功能和产品供给功能的综合治理模式,如耦合表层岩溶水开发利用技术+竖井提水技术+牧草和金银花植物篱技术+整地种植火龙果技术等多种技术的复合型立体生态农业模式^[41]、集成了封山育林技术+坡改梯技术+核桃特色经济林培育技术+生态移民技术等的云南六子登科模式、以封山育林+人工造林技术+名特优中草药培育技术为主的弄拉模式、以生物篱技术+先锋群落配置技术+粮经作物套种技术等为主的恭城水土保持林-桃树-粮经作物模式^[42]、以种草养殖技术为核心的晴隆模式、以花椒种植技术+滴灌节水技术为主的顶坛模式、以金银花种植为核心的坪上模式、以岩溶景观+茶、果园绿化生态旅游休闲观光的模式^[43]等等,这些模式在解决当地缺水、遏制土地石漠化、森林退化和居民贫困等方面均取得了显著效果,成为石漠化综合治理的样板,但是这些模式的技术支撑体系还可进一步优化、补充和完善,如六子登科模式可相应的增加地下水开发利用技术和滴灌节水技术,以提高土地生产力等。下一步也应大力总结和研发石漠化治理关键技术,依据岩溶环境的地形地貌、岩土组构和光热条件将现有的关键技术进行优化、组装和配套,形成生态系统服务功能提升和生态富民的石漠化综合治理技术集成体系和模式。

5 讨论和建议

尽管第一期石漠化治理研发了很多技术,但尚不系统,提供给管理者的信息极其有限,难以形成生态恢复-产业转型发展-精准扶贫-生态富民-全面建成小康社会的石漠化区科技支撑链条,今后,应从以下几点出发从而实现生态系统服务功能提升和民生改善的兼顾:

(1)加强岩溶生态系统“结构(碳酸盐岩地质结构背景)-过程(水土过程和石漠化过程)-服务(关键服务功能维持和提升)”耦合机理研究。石漠化会导致生态系统的水土保持、固碳能力、产品提供、气候调节等生态和生产功能受损或削弱,石漠化综合治理工程旨在恢复生态系统结构的完整性(保水保土和提高生物多样性等),从而维持和提高生态系统服务功能。生态系统服务功能依赖于生态系统的结构和过程^[39],岩溶生态系统是受碳酸盐岩地质背景制约的生态系统,在了解岩溶区水文地质结构、岩土比例和植被种类与结构的基础上,掌握区域“五水”补排关系和交换过程、水土流失/漏失途径和过程、植被逆向/顺向演替过程和石漠化时空演化过程规律,厘定关键种群大小、数量和分布对维持生态系统服务整体功能的贡献率,提出影响生态系统服务供给的关键因子,揭示关键驱动因子与关键服务功能维持之间的依赖性、弹性和权衡关系,揭示关键生态系统服务功能间的耦合关系和生态学机制,从而达到因地制宜的针对区域岩土结构和水土过程研发维持、保护和提高生态系统服务功能的新途径和新技术。

(2)加大功能型植被、关键共性和个性技术研发以及关键技术的配套和优化。依据不同的地质条件和社会需求研发具有调节气候、水源涵养、水土保持、土壤改良和产品供给等服务功能的功能群植被;依据类似的气候、地形地貌条件、岩土组构和水文过程条件等,针对同一类型研发和改进关键共性技术,如深层岩溶地下水暗河管道的精确定位技术、地下水的水质净化技术、农田节水灌溉与土壤保墒技术、农业管理节水一体化技术、落水洞固土防漏技术、物种筛选培育技术和营林技术等等;或者单个成熟的关键个性技术根据人们的需要,结合当地具体自然条件,因地制宜因时制宜进行镶嵌、优化、组合和配套,形成具有一定服务功能的技术组合,使立体空间上的光、热、

水、土等自然资源得以充分利用,高效利用有限的水土植物资源,达到生态恢复和经济效益的双丰收需求。

(3)加大石漠化综合治理关键技术的适用性评价和推广应用。第一期石漠化治理已经研发了多种关键技术,但是很多关键技术仅仅在点上示范成果,无法推广应用。例如薜荔植物篱技术、牧草+金银花植物篱技术等等。在关键技术研发时应该从地质背景方面考虑技术的差异性和适用性,形成不同地质背景条件下的关键技术的规范,为石漠化治理关键技术的推广应用提供科技支撑。

(4)完善流域内生态系统服务主体功能区评估和生态补偿。西南岩溶石漠化治理工程需要达到生态服务功能提升和民生改善的双重需求,但是由于资金和人力投入有限,从流域尺度难以同时兼顾生态和经济效益。需要在流域尺度上按照地形地貌、岩-土-水-植物系统特征和人口分布等自然和社会状况进行整合和分区,评价每个分区的生态功能和生产功能,结合社会经济发展需求,确定不同分区的主导服务功能,从而制定相应的石漠化综合治理措施以满足区域不同群体对不同生态系统服务功能的需求。如流域上游是水源涵养、径流形成和防洪等生态功能区,大多山高坡陡,地形起伏大,人口密度相对少,建议封山育林和生态移民。流域中下游社会发展和经济发展较高,主要为生产功能区,主要发展产业。在流域内构建“功能清单”,明确每一个分区的主要服务功能,以及其对群体功能贡献的重要性,同时界定生态补偿对象、标准、补偿形式和周期等,实现双方互利共生的自我生态补偿机制。

参考文献

- [1] 蒋忠诚,夏日元,时坚,等.西南岩溶地下水资源开发利用效应与潜力分析[J].地球学报,2006,27(5):495-502.
- [2] 王腊春,史运良.西南喀斯特山区三水转化与水资源过程及合理利用[J].地理科学,2006,26(2):173-178.
- [3] 王明章.西南岩溶石山区地下水开发在石漠化防治中的地位[J].贵州地质,2006,(4):261-265.
- [4] 陈植华,陈刚,靖娟利,等.西南岩溶石山表层岩溶带岩溶水资源调蓄能力初步评价.中国岩溶地下水与石漠化治理[M].广西科学出版社,2003:88-64.
- [5] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清,等.广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M].北京:科学出版社,2011:195-233.
- [6] 王宇.云南泸西小江流域岩溶水有效开发模式研究[D].昆明:昆明理工大学,2006.
- [7] 蒋忠诚,裴建国,夏日元,等.我国“十一五”期间的岩溶研究进展与重要活动[J].中国岩溶,2010,31(4):349-354.
- [8] 刘仙,蒋勇军,况明生,等.西南岩溶石漠化区水土保持研究新进展[J].亚热带水土保持,2009,21(2):20-23.
- [9] 周念清,李彩霞,江思珉,等.普定岩溶区水土流失与土壤流失模式研究[J].水土保持通报,2009,29(1):7-11.
- [10] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等.岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J].地球学报,2014,35(5):535-542.
- [11] 邓艳,胡阳,马祖陆,等.广西不同石漠化等级下SPAC水势梯度及其环境效应[J].地球与环境,2014,(2):213-220.
- [12] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J].生态学报,2014,18:5328-5341.
- [13] 温美丽,刘宝元,叶芝茜,等.免耕与土壤侵蚀研究进展[J].中国生态农业学报,2006,14(3):1-3.
- [14] 赵建刚,王学勤,祁江燕.玉米秸秆覆盖在培肥地力作用上的初探[J].山西农业科学,2008,36(6):68-69.
- [15] Zimmerman J K, Aide T M, Rosario M, et al. Effects of land management and a recent hurricane on forest structure and composition in the Luquillo experimental forest, Puerto Rico [J]. Forest Ecology and Management, 1995, 77(1/3):65-76.
- [16] 李先琨,蒋忠诚,黄玉清,等.桂西南岩溶山地优势植物种群动态及其对岩溶作用的影响[J].地球学报,2008,29(2):253-259.
- [17] 喻理飞.退化喀斯特森林自然恢复评价研究[J].林业科学,2000,36(6):12-19.
- [18] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等.退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究[J].林业科学,2002,38(1):1-7.
- [19] 文丽,宋同清,杜虎,等.中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制[J].生态学报,2015,35(17):5822-5833.
- [20] 穆彪,杨立美,张莉.喀斯特植被恢复过程的群落演替特征[J].西南大学学报自然科学版,2008,30(6):91-95.
- [21] 马遵平,谢泽氢.南方岩溶区植被自然演替恢复研究综述[J].四川林勘设计,2006,(1):1-6.
- [22] 李先琨,苏宗明,吕仕洪,等.广西岩溶植被自然分布规律及对岩溶生态恢复重建的意义[J].山地学报,2003,21(2):129-139.
- [23] 朱守谦.喀斯特森林生态研究(Ⅲ)[M].贵阳:贵州科技出版社,2003:23-226.
- [24] 朱守谦.喀斯特森林生态研究(Ⅱ)[M].贵阳:贵州科技出版社,1997:55-118.
- [25] 文和群,许兆然,J. Villa-Lobos,等.中国南部石灰岩稀有濒危植物名录[J].1993,(2):110-127.
- [26] 广西植物所等编者.广西植物资源开发利用战略研究[M].南宁:广西科学技术出版社,1996:1-63.
- [27] 国家林业局防治荒漠化管理中心.国家林业局中南林业调查规划设计院.石漠化综合治理模式[M].北京:中国林业出版社,2012:1-158.
- [28] 张军以,戴明宏,王腊春,等.西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J].地球与环境,2015,43(3):269-278.
- [29] 侯满福.不同碳酸盐岩地球化学背景下的植物物种多样性和

- 物种组成[D]. 桂林:广西师范大学,2005.
- [30] 蒋忠诚. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移[J]. 中国岩溶,1997,18(4):24-32.
- [31] 郭柯,刘长成,董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J]. 植物生态学报,2011,35(10):991-999.
- [32] 龙永光,宋林. 黔东南石漠化治理主要植物种选择研究[J]. 资源与环境科学,2011,(7):330-332.
- [33] 刘美珍,孙建新,蒋高明,等. 植物-土壤系统中水分再分配作用研究进展[J]. 生态学报,2006,(5):1550-1557.
- [34] Richards J H, Caldwell M M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots[J]. *Oecologia*,1987,73:486-489.
- [35] Caldwell M M, Richards J H. Hydraulic lift: water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots[J]. *Oecologia*,1989,79:1-5.
- [36] 曹坤芳,付培立,陈亚军,等. 热带岩溶植物生理生态适应性对南方石漠化土地生态重建的启示[J]. 中国科学:生命科学,2014,(3):238-247.
- [37] 熊康宁,梅再美,彭贤伟,等. 喀斯特石漠化生态综合治理与示范典型研究[J]. 贵州林业科技,2006,34(1):5-8.
- [38] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.
- [39] 欧阳志云,郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展[J]. 生态学报,2009,29(11):6183-6188.
- [40] 肖华,熊康宁,张浩,等. 喀斯特石漠化治理模式研究进展[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(3):330-333.
- [41] 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.
- [42] 覃玲玲,宋书巧. 恭城县基于桃树生态种植的石漠化治理模式探讨[J]. 中国水土保持,2014,(1):8-10.
- [43] 张凤太,苏维词. 重庆三峡库区岩溶山区乡村生态农业发展模式与对策[J]. 农业现代化研究,2007,28(2):214-217.

Advancement in key technologies for comprehensive treatment of water, soil and vegetation resources in karst rocky desertification areas

DENG Yan^{1,2}, CAO Jianhua¹, JIANG Zhongcheng¹, ZHOU Xiaodong¹, YUE Xiangfei¹

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Control, Ministry of Land and Resources/Ministry of Land Resources and Guangxi Key Laboratory of Karst Dynamics, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract The karst area in southwestern China is one of the three largest concentrating karst regions in the world. Meanwhile, it suffers severe environmental problems, such as water shortage, ecological degradation and rocky desertification. In order to address these challenges, China has launched a National Project to control karst rocky desertification in an integrated way. Key technology research and development is the key step in the project of comprehensive treatment to rocky desertification. In this paper, we analyze the development and deficiency of karst water resources utilization technology, soil resources maintenance and quality improvement techniques and vegetation restoration and function upgrade technology in the recent advancement of the project at the first stage. As for the second stage of the project, we suggest that the research should be based on "structure (geological environment background)-process (soil and water conservation process and desertification process)-service (key service function to maintain and upgrade)", to strengthen key commonness and individuality technology research of soil, water and vegetation and key technologies of matching and optimization, to increase the applicability evaluation and application of the rocky desertification key comprehensive technologies, and to perfect the assessment and ecological compensation policy of priority ecosystem services on a basin scale. We hope that our recommendations can promote the balanced and sustainable ecological, economic and social development in the karst rocky desertification areas in southwestern China.

Key words karst rocky desertification, key technology, soil and water loss/leakage, ecosystem services, "structure-process-service" framework

(编辑 吴华英)