DOI: 10.5846/stxb201610142074
蒋勇军，刘秀明，何师意，何丙辉，谢建平，罗维均，白晓永，肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. 生态学报，2016，36(22)：7092-7097.
Jiang Y J, Liu X M, He S Y, He B H, Xie J P, Luo W J, Bai X Y, Xiao Q. Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7092-7097.

喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发

蒋勇军[1,*]，刘秀明[2,3]，何师意[4]，何丙辉[5]，谢建平[6]，罗维均[2]，白晓永[2]，肖 琼[4]

1 西南大学地理科学学院，西南大学岩溶环境开放实验室，重庆 400715
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，贵阳 550081
3 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站，普定 562100
4 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，桂林 541004
6 西南大学资源环境学院，重庆 400715
6 西南大学生命科学学院，三峡库区生态环境与生物资源省部共建国家重点实验室培育基地，重庆 400715

摘要: 深入揭示流域尺度水-土-生资源格局和研发因地制宜的水-土-生治理技术是“十三五”石漠化治理工程的主要瓶颈。国家重点研发计划——“喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范”项目(2016YFC0502300)针对槽谷区特点，锁定两个关键科学问题和五个关键技术，从过程机理研究-技术研发-应用示范 3 个层面解剖区域水/土/生物资源分布格局与地质地貌之间的关系，阐明石漠化过程中的相关生态变化机理，因地制宜地研发水土资源高效利用、土壤地上/下流/漏失阻控与生态恢复技术；研发野生砧木及经济树种互作效应与优化配套技术，构建槽谷区可持续的生态系统和生态产业模式并示范推广，为区域生态改善和贫困问题解决提供科技支撑。

关键词: 土地石漠化；综合治理技术；生态恢复；喀斯特槽谷区

Research and development of comprehensive rehabilitation measures for land rocky desertification in karst trough valley area

JIANG Yongjun[1,*], LIU Xiuming[2,3], HE Shiyi[4], HE Binghui[5], XIE Jianping[6], LUO Weijun[2], BAI Xiaoyong[2], XIAO Qiong[4]

1 *School of Geographical Sciences & Karst Environment Laboratory, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*
2 *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Guiyang* 550081, *China*
3 *Chinese Academy of Sciences, Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding* 562100, *China*
4 *Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources & Guangxi, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin* 541004, *China*
5 *College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*
6 *State Key Laboratory Breeding Base of Eco-Environment and Bio-Resource of the Three Gorges Area, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*

Abstract: The bottleneck of the “Thirteenth-five” Program of Rock Desertification Control is to unveil the watershed scale water-soil-biology pattern and develop water-soil-biology restoration technologies corresponding to local conditions. The National key research and development program of China (2016YFC0502300) integrates multi-disciplinary teams to explore the land rocky desertification landscape restoration and for pilot test in the karst trough valley, two key scientific questions

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502300)
收稿日期: 2016-10-14
* **通讯作者** Corresponding author. E-mail: jiangjyj@swu.edu.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

and five technologies are the foci of this program. The project will probe the relationships between the distributions of water-soil-biology and landscape and geology, and elucidate the mechanism of the ecological deterioration during the land rocky desertification process, and develop high efficient techniques on soil and water resources utilization and the soil flow/loss prevention upon/underground. Appropriated technologies for better combination the advantages of aboriginal wild rootstocks and economic tree species will be developed, with special aim to reconcile the seemingly conflicting interests between economy development and ecological protection, a sustainable ecosystem and eco-industry model in karst trough valley will be established, which will provide a scientific and technological support for regional ecosystem restoration and poverty elimination.

Key Words: land rock desertification; comprehensive rehabilitation measures; ecological restoration; Karst trough valley area

土地石漠化是不同时期在全球热带和亚热带喀斯特地区普遍发生的现象[1-2],在中国南方喀斯特地区分布最为广泛、程度最为严重,受到国际喀斯特研究学界的广泛关注[3]。石漠化不仅造成生态系统退化,而且被称之为"灾害之源、贫困之因、落后之根",严重制约着经济社会的发展[4-5]。第一期(2006—2015 年)石漠化治理工程取得明显效果但问题依然不少[6]。随着我国经济的发展,石漠化治理目标从早期以解决农户生计问题为主转向协调考虑生产和生态服务能力的提升[7]。这在美国田纳西流域和地中海沿岸国家已经有成功的治理模式[8-10]。喀斯特地区的表生系统强烈受地质背景制约,是"地质-生态"复合系统[11-12]。地表的水-土-生资源的分布格局与地质背景发育特点密切相关,在流域尺度上表现得更为明显[13]。但如何深入地解剖水-土-生资源格局与地质背景特点之间的关系,避免当前石漠化治理过程中存在的治理措施雷同、实效有待提高、针对性不强等问题?如何构建与自然环境相适应、可持续发展的人工生态系统?如何研发因地制宜、适合不同喀斯特地貌单元特点的水-土-生治理技术与体系?依旧是"十三五"石漠化治理中亟须攻关的难题和关键。

喀斯特槽谷区是中国南方喀斯特分布面积最大的"老、少、边、山、穷"地区,槽谷区石漠化区域水资源高效利用[14-15]、土壤漏失和肥力保育[16-17]、困难立地造林、生态经济型树种、草种筛选、坡耕旱地系统整治等一些关键性技术问题亟待解决。科技部重点研发计划——"喀斯特槽谷区土地石漠化过程及综合治理技术研发与示范"项目针对槽谷区紧密式箱型背斜/向斜构造发育、岩层倾角大、碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层、高位蓄水构造频繁出露、干谷区旱涝灾害频发等特点,加强对喀斯特槽谷地区"三水"转换过程、生境高度异质性的认识和改造、植物适应性及适生物种的筛选、物种搭配及群落构建等研究和技术研发,最后构建稳态喀斯特生态系统和绿色产业发展机制与生产和生态服务能力协同的流域适应性管理体系。

1　项目研究内容

1.1　研究思路

针对喀斯特槽谷区石漠化治理的主要问题,聚焦两个关键科学问题:(1)背斜/向斜型槽谷区水土资源分配格局及动态差异机制?(2)野生砧木及经济树种与土壤生态环境互作机制?拟解决 5 个关键技术问题:(1)干谷雨洪"拦-引-蓄-用"与防洪排涝技术;(2)"篱-埂-路-沟-池(窖)"顺层坡土壤侵蚀控制与蓄水技术;(3)土壤大团聚体重塑与根系构型改良的"根-土复合体"阻隔逆层坡土壤漏失技术;(4)野生砧木及经济树种互作效应与优化技术;(5)近自然群落-经济植物复合种植与生态恢复技术,提出研究思路(图 1):以喀斯特槽谷区土地石漠化过程的空间格局及驱动力研究为出发点,通过对典型槽谷的解剖,揭示水资源时空变化过程及特点,研发相应的利用技术并示范;揭示土壤流/漏失过程及特点,研发相应的防治技术并示范;揭示植物群落退化过程与特点,研发相应的调控与恢复技术并示范;构建与喀斯特槽谷生态系统生产力维持机制相匹配的生态产业示范体系;评估中国南方喀斯特槽谷区小流域主要类型对不同治理模式的适应性,提出槽谷区小流域主要类型综合治理优化方案的系列咨询报告。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 主要研究内容

围绕上述研究思路，项目设置 6 个课题，具体研究内容如下：

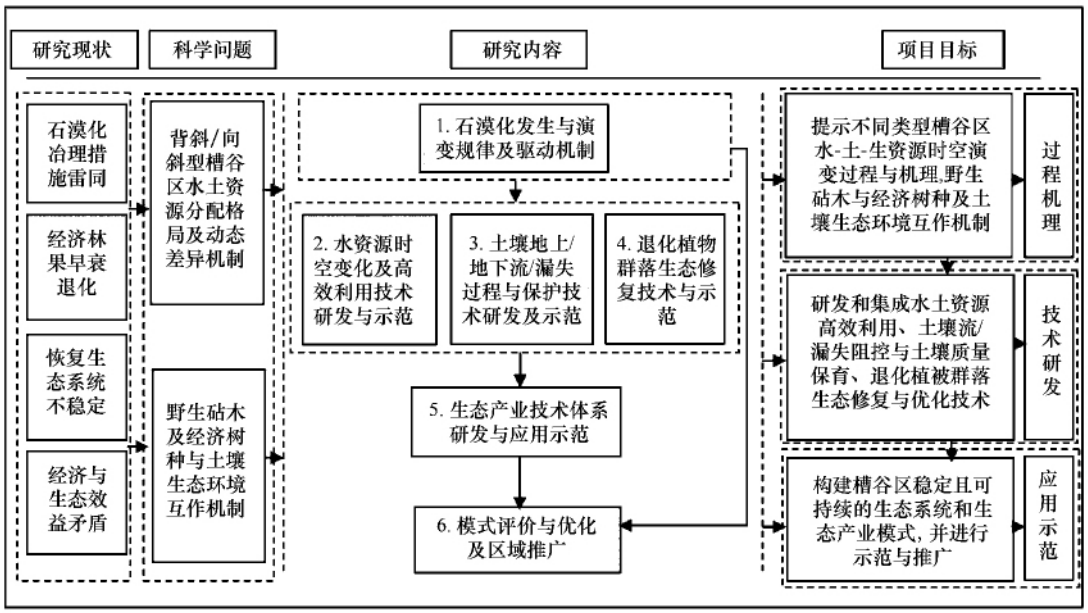

图 1 项目研究思路图

Fig. 1 Diagram of the project work flow

1.2.1 喀斯特槽谷区石漠化发生与演变规律及驱动机制

用多时相数据阐明区域石漠化演变的时空格局及地质背景制约的分异规律，解析重大人为活动的驱动机制[18]；用高分遥感数据精细刻画流域的地质背景、水-土-生资源配置、贫困空间分布格局及规律，揭示石漠化演变过程与规律，解析驱动力、关键因子交互关系并构建景观模型进行预景，为区域石漠化的分类治理决策、流域石漠化治理与精准扶贫的实施等提供科技支撑。

1.2.2 喀斯特槽谷区水资源时空变化及高效利用技术研发与示范

针对槽谷区干谷发育且降雨产汇流过程迅速、旱涝灾害频发、高位蓄水构造频繁出露但利用开发难度大、槽谷两翼山地水资源漏失严重以及高强度的人类活动带来日趋严重的水污染[13,19-20]等问题，通过地质调查、水文地质资料收集、定位动态监测、示踪与水文地球化学等技术手段，阐明水资源时空演化规律及形成机制；研发干谷雨-洪水资源的“拦-引-蓄-用”与防洪排涝技术；研发“路-沟-池(窖)”的坡面蓄水与净化处理技术体系、“蓄-引”的高位表层岩溶泉和接触泉开发利用技术，通过试验与示范，为坡地石漠化综合治理提供水资源保障；提出槽谷区水资源开发利用集成模式。

1.2.3 喀斯特槽谷区土壤地上/下流/漏失过程与保护技术研发及示范

针对喀斯特槽谷区特殊地质构造与水土流/漏失的特殊性，通过全坡面径流场结合多核素示踪技术，阐明喀斯特槽谷区土壤地上地下流/漏失过程与机理；研发顺层坡“篱-埂-路-沟-池(窖)”坡面土壤流失防控关键技术；研发逆层坡土壤大团聚体重塑及根-土复合体阻隔逆层坡土壤漏失技术；揭示不同石漠化阶段土壤化学侵蚀过程，研发养分均衡有机化的土壤保育技术。通过土壤内部调控与坡面控制工程相结合，集成量、质双增的土壤保育关键技术并进行示范。

1.2.4 喀斯特槽谷区退化植物群落生态恢复技术与示范

在样带调查、经济树种及野生砧木资源收集、先锋种和优势种的筛选、野外控制试验、室内培养试验的基础上，采用该领域比较先进的技术如稳定性同位素技术[21-23]、分子生物学、功能基因组学、宏基因组、宏转录组，Biolog 代谢板、NMR 代谢组学[24,25]等，阐明植被退化的生态过程与机制与土壤微生物特

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

征;筛选植被恢复的建群种和优先种,确定槽谷区干旱贫瘠土壤适生野生砧木和经济树种,阐明野生砧木及经济树种与土壤生态环境互作机制,建立近自然群落-经济植物复合种植与生态恢复技术;研发野生砧木和适生经济树种嫁接、种植与产量品质调控技术;筛选并优化促进野生砧木根系发育的微生物菌株,研制微生物菌剂,加快退化植被生态恢复。

1.2.5　喀斯特槽谷区生态产业技术体系研发与应用示范

解析喀斯特槽谷类型与生态产业发展的耦合关系,选取典型喀斯特槽谷构建和集成示范"特色经济作物高效栽培、产品精加工技术与生态农林产业体系"、"道地中药材高效丰产关键技术研发与精品生态药业产业体系"、"武陵山区(槽谷)生态游憩资源与商品开发产业体系"、"现代农业循环经济技术研发与产业链"等,全方位构建槽谷石漠化治理与经济效益相促进的多种生态产业体系,形成生态治理与生态产业协同技术方案,开展县域范围以上应用示范,建立符合科学逻辑和可演绎的喀斯特石漠化治理与生态产业模式。

1.2.6　喀斯特槽谷区石漠化综合治理模式评价与优化及区域推广

针对大型水利工程改变喀斯特地下水流场[26],生态系统效益与生态系统健康评价指标混乱[27-28],流域适应性管理缺乏有效集成[29-31],石漠化协同治理模式难以进行区域推广等问题,采用水文地球化学技术、PSR 模型[32-33]、PLM、ELM 模型与 DPSIR 框架发展决策支持系统等多种手段相结合的研究方法,揭示水利工程的生态效应特征及其规律,构建石漠化治理恢复生态系统服务与生态系统健康的指标体系,对不同类型槽谷石漠化治理模式进行优化,提出槽谷区石漠化协同治理模式。

1.3　研究方案与技术路线

在深入认识喀斯特槽谷区特点的基础上,详细分析槽谷区地质地貌背景和前期石漠化治理成效,进行槽谷类型和流域类型划分,剖析区域水/土/生物资源分布格局与形成机制,揭示流域尺度土地石漠化的时空格局演变过程与驱动机制,揭示典型槽谷流域喀斯特生态系统的运行过程与规律,因地制宜地研发水土资源高效利用、土壤坡面流失控制和地下漏失阻控、土壤保育与生态恢复技术体系,阐明经济作物生长的限制性因子与机制,研发野生砧木和经济树种互作效应与优化配套技术及其产业化体系,解决经济与生态效益之间的矛盾。同时构建槽谷区稳定且可持续的生态系统和生态产业模式,并进行示范推广,为区域生态改善和贫困问题解决提供科技支撑。具体技术路线如图 2 所示。

2　总体目标

2.1　项目目标

项目将在理论上阐明槽谷区水-土-生物资源的分配格局及形成的差异机制,揭示流域尺度土地石漠化形成演化过程及驱动机制,揭示顺层坡土壤流失与逆层坡土壤漏失过程及差异机制,阐明水文-生态系统对典型大型工程建设的响应过程,阐明土壤营养元素流失过程及经济林(果)退化早衰的土壤限制性因子,揭示生态系统退化及野生砧木-微生物根际互作的分子机理。在技术上研发干谷"拦-引-蓄-用"与防洪排涝技术、"路-沟-池(窖)"坡面水系利用技术、"引"为主或"蓄-引"并重的地下水利用技术、"路-沟-池"间"篱-埂"顺层坡水土流失控制技术、"根-土复合体"逆层坡土壤漏失阻控技术、经济林(果)早衰防控技术、定向培肥与养分均衡有机化土壤保育技术、野生砧木和适生经济树种嫁接、种植与产量品质调控技术近自然群落-经济植物复合种植与生态恢复技术、适宜且具槽谷特色的生物能源、生物医药、山地旅游等生态产业技术。最终建立水土资源高效利用模式与示范、稳定的生态系统与适宜槽谷特色生态产业模式与示范、退化植被生态恢复的经济树种产业开发配套技术模式与示范、不同类型槽谷石漠化综合治理模式与示范、槽谷区石漠化协同治理模式与区域推广等模式目标,为喀斯特槽谷石漠化区生态环境改善、长江中上游地区生态安全屏障建设提供科技支撑。

2.2　考核指标

项目整体考核指标包括水土资源高效利用技术与模式 6 项、土壤流/漏失阻控技术 4 项、土壤质量保育技术 5 项、生态修复与优化配置技术 4 项、生态产业技术模式 8 项、开展县域范围以上应用示范,具体包括发表论文、专著 、研发专利、开发数据库、培养人才等,同时归纳总结石漠化土地综合治理模式 8—10 项、土壤流/漏失阻控技术 4 项、土壤质量保育

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

技术 5 项、生态修复与优化配置技术 4 项、生态产业技术模式 8 项，建立 2 个示范基地，为省部级以上政府部门采纳的战略咨询报告 2 份。

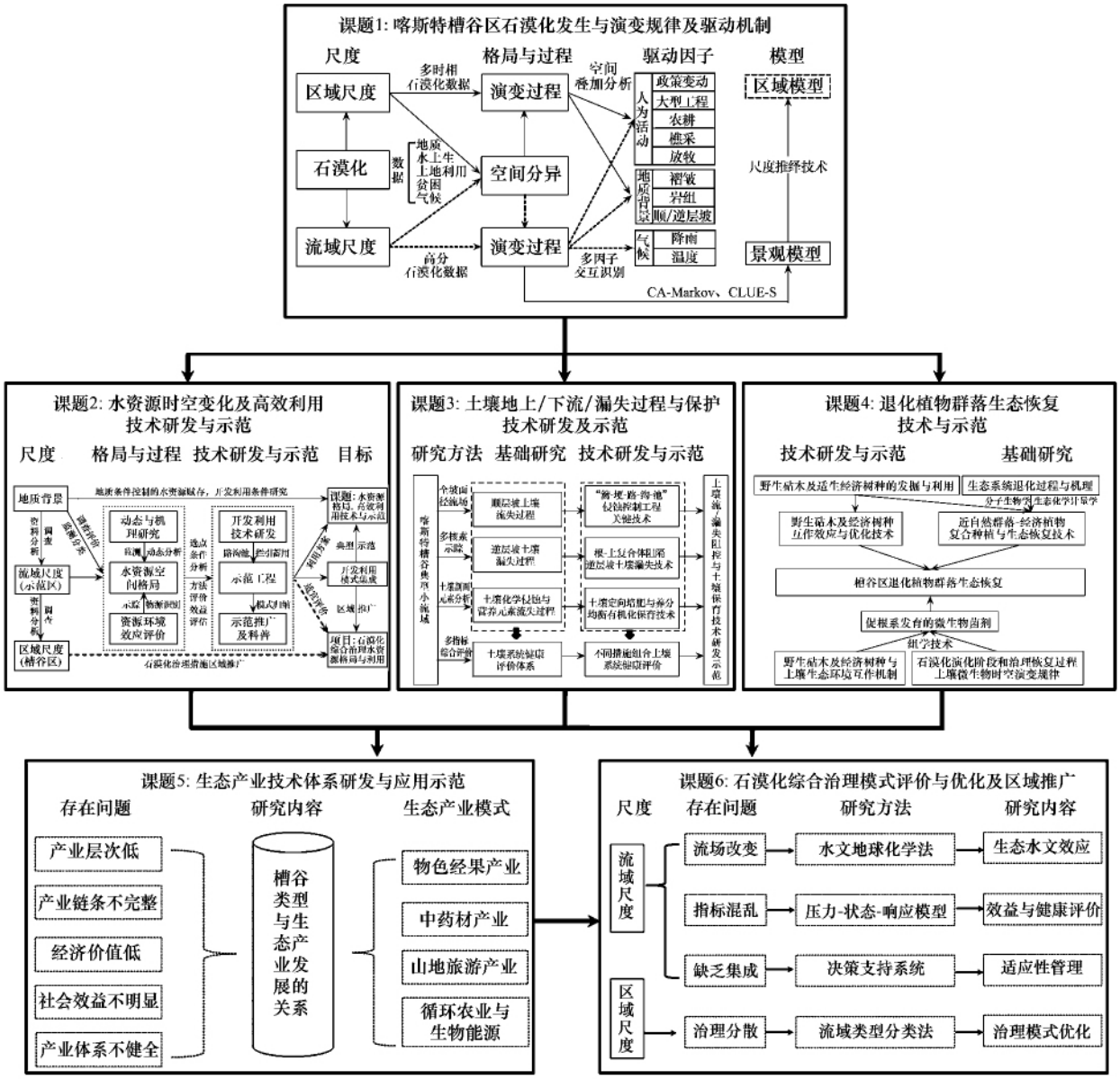

图 2 项目技术路线图

Fig. 2 Schematic representation of the technologies for this project

2.3 预期成果

科学方面：从流域尺度上揭示典型背斜/向斜型槽谷区水土资源分配格局、土壤流/漏失与土地石漠化形成的动力学机制，及野生砧木及经济树种与土壤生态环境互作机制，阐明槽谷区"地质-生态"复合系统的水-岩-土-气-生的相互作用与相互影响过程，为因地制宜进行石漠化治理提供科学依据。

技术方面：研发和集成具有槽谷特色的水土资源高效利用、土壤流/漏失阻控与质量保育以及生态修复与优化配置等技术，以及适宜的生态产业技术模式，并形成相应的示范区，推动槽谷区域社会、生态和经济的可持续发展。

3 结语

"天无三日晴，地无三尺平，人无三分银"，是喀斯特地区环境和社会的真实写照，本项目将形成具有典型示范价值的喀斯特槽谷石漠化区生态治理、生态产业、生态富民相结合的系统性技术解决方案，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实现生态、经济、社会等综合效益,对即将启动的第二期国家石漠化治理工程提供强有力的科技支撑作用。但是在项目实施过程中,石漠化发生与演变规律多时相数据、不同时空尺度遥感数据与监测数据耦合的理论和方法、石漠化生态系统恢复重建的关键技术能否成功突破;单项技术能否有效整合以及在喀斯特槽谷示范区有效集成需要各课题间加强合作与交流,及时总结成功经验,同时需要项目专家组实时实地对项目实施进行指导与评估。

参考文献(References):

[1] Yuan, DX. Rock desertification in the subtropical karst of south China. Zeitschrift fur Geomorphologie, 1997, 108: 81-90.

[2] Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N, Zhou Z F. How types of carbonate rockassemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: phenomena and mechanisms, Land Degradation & Development, 2004, 15: 123-131.

[3] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.

[4] 岩溶地区石漠化综合治理工程"十三五"建设规划. 国家发展改革委会同林业局,农业部,水利部. 2016.

[5] 周洁敏. 我国石漠化现状与防治对策. 林业资源管理, 2009, 3: 13-17.

[6] 岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015 年). 国家发展改革委会同林业局、农业部、水利部.

[7] Zhang J Y, Dai M H, Wang L C, Zeng C F, Su W C. The challenge and future of rocky desertification control in karst areas in southwest China. Solid Earth, 2016, 7: 83-91.

[8] Natasˇa R, Stanka S. The effectiveness of protection policies and legislative framework with special regard to karst landscapes: Insights from Slovenia, Environmental Science & Policy, 2015, 51: 106-116.

[9] Mitja K, Danijel I. Vanishing landscape of the "classic" Karst: changed landscape identity and projections for the future. Landscape and Urban Planning, 2014, 132: 148-158.

[10] Janet H, Peter S. Use of vegetation to combat desertification and land degradation: Recommendations and guidelines for spatial strategies in Mediterranean lands. Landscape and Urban Planning, 2012, 107: 389-400.

[11] 曹建华,袁道先. 受地质条件制约的中国两南岩溶生态系统. 北京: 地质出版社, 2005。

[12] 刘丛强,郎赟超,李思亮,朴何春,涂成龙,刘涛泽,张伟,朱书法. 喀斯特生态系统生物地球化学过程与物质循环研究:重要性、现状与趋势. 地学前缘, 2009, 16(6): 1-12.

[13] Qin L Y, Bai X Y, Wang S J, Zhou D Q, Li Y, Peng T, Tian Y C, Luo G J. Major problems and solutions on surface water resource utilization in karst mountainous areas. Agricultural Water Management, 2015, 159: 55-65.

[14] 尹德超,罗明明,周宏,陈植华. 鄂西岩溶槽谷区地下河系统水资源构成及其结构特征. 水文地质工程地质, 2015, 3: 13-18+26.

[15] 刘声凯,周锦忠,卞兆津,刘亮. 湖南龙山洗洛地区岩溶地下水开发前景探讨. 地下水, 2012, 1: 58-60.

[16] 魏兴萍,袁道先,谢世友. 运用^{137}Cs 与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失. 水土保持学报, 2010, 6: 16-19.

[17] 魏兴萍,谢德体,倪九派,苏程烜. 重庆岩溶槽谷区山坡土壤的漏失研究. 应用基础与工程科学学报, 2015, 3: 462-473.

[18] Yan X, CaiY L. Multi-Scale Anthropogenic Driving Forces of Karst Rocky Desertification in Southwest China. Land Degradation & Development, 2015, 26: 193-200.

[19] 王宇. 西南地区岩溶水源地类型及开发技术条件. 中国岩溶, 2009, 4:370-374.

[20] 郭纯青,邓欢. 中国岩溶区水资源与环境可持续发展的策略与技术[J]. 环境科学, 2002, S1:121-124.

[21] Soong J L, Reuss D, Pinney C, Boyack T, Haddix M L, Stewart C E, Cotrufo M F. Design and Operation of a Continuous ^{13}C and ^{15}N Labeling Chamber for Uniform or Differential, Metabolic and Structural, Plant Isotope Labeling. Journal of Visualized Experiments, 2014, 83(e51117):1-8.

[22] Neufeld J D, Dumont M G, Vohra J, Murrell J C. Methodological Considerations for the Use of Stable Isotope Probing in Microbial Ecology. Microbial Ecology, 2007, 53: 435-442.

[23] 李增强,赵炳梓,张佳宝. ^{13}C 标记磷脂脂肪酸分析在土壤微生物生态研究中的应用. 中国生态农业学报, 2016, 24 (4): 470-478.

[24] 连腾祥,王光华,于镇华,刘居东,金剑,刘晓冰. 植物光合碳在根际土壤中的微生物转化与 SIP 技术. 土壤与作物, 2013, 2(2): 77-86.

[25] Deric R L, Michael W H, Cameron T, Ben T, Pamela M B, Scott R S, Andrew R M, Kenneth M H. Biogeochemical and Microbial Variation across 5500 km of Antarctic Surface Sediment Implicates Organic Matter as a Driver of Benthic Community Structure. Frontiers in Microbiology, 2016, 7(872): 1-11.

[26] 刘建. 岩溶隧道地下水环境负效应评价体系研究[D]. 西南交通大学, 2011.

[27] Katrine G T, Sharolyn A, Mauricio G C, Robert C, Sasha C, Tommy D, Estelle D, Ida K, Sue O, Luciana P, Nazmun R, Harpinder S, Paul C S, Jens-Christian S, Graham M T, Yann D V, Alexey V, Stephen W. A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration. Ecological Modeling, 2016, 319: 190-207.

[28] 袁兴中,刘红. 生态系统健康评价——概念构架与指标选择. 应用生态学报. 2001, 12(4): 627-629.

[29] Stewart J C, Julian H, Alexandra S, Mark P. Valuing the ecosystem service changes from catchment restoration: A practical example from upland England. Ecosystem Services, 2015, 15: 93-102.

[30] 罗跃初,周忠轩,孙轶,邓红兵,张萍,吴钢. 流域生态系统健康评价方法. 生态学报, 2003, 8:1606-1614.

[31] 赵庆建,温作民. 流域生态系统管理途径与模型研究. 吉林农业大学学报, 2010, 32(5): 538-543.

[32] 徐明德,李静,彭静,钮键,曹露. 基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价. 生态环境学报, 2010, 8: 1809-1814.

[33] 麦少芝,徐颂军,潘颖君. PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用. 热带地理, 2005, 4: 317-321.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net