石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前沿理论与对策

吴清林[1,2]，梁 虹[3]，熊康宁[1,2]，李 瑞[1,2]

(1.贵州师范大学喀斯特研究院,贵阳 550001;
2.国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,贵阳 550001;3.贵州师范大学地理与环境科学学院,贵阳 550001)

摘要：石漠化环境水土综合整治走向产业化,其技术体系与山地混农林业模式及技术研发耦合。通过对158篇相关文献的统计分析,结果表明:(1)时间序列的文献发表数量呈现峰丛状曲线分布,说明该研究有进一步加强的需要;(2)研究内容主要针对试验监测研究、运用技术研究、理论与机理研究、模式构建、示范推广和效益分析6个方面进行,其中以试验监测为主,监测混农林业对土壤理化性质的改良作用以及对生态效益、经济效益和社会效益的影响;(3)研究区域主要分布在中国的北方地区和南方喀斯特地区,说明水土综合整治与山地混农林业相结合的研究主要在干旱半干旱地区和工程性干旱的喀斯特地区。还从理论研究、技术研发、模式构建、试验示范、监测评价5个方面揭示石漠化环境水土综合整治与山地混农林业的前沿理论。最后发现石漠化水土综合整治与山地混农林业耦合的综合性理论研究和重大关键技术研发显得滞后,应该加强“五水”赋存动力转化、地表地下空间水土资源联合调配、坡面水土漏失阻控技术、节水增值产业技术、林—粮—草立体空间优化配置技术等方面的研究,以综合性水土整治技术发展混农林业,实现石漠化地区生态修复并带动区域经济产业的发展。

关键词：石漠化环境；水土综合整治；混农林业；理论前沿；对策

中图分类号:S157.2；F323.22 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-2242(2018)02-0011-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.002

Frontier Theories and Countermeasures for Integrated Regulation of Soil and Water Loss and Mountainous Agroforestry in Rocky Desertification Environment

WU Qinglin[1,2], LIANG Hong[3], XIONG Kangning[1,2], LI Rui[1,2]

(1. *School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001;
2. *State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang* 550001;
3. *School of Geography and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang* 550001)

Abstract: As the industrialization is becoming a trend for soil and water integrated regulation on rocky desertification control, its technology system is coupled with mountainous agroforestry models and techniques. The results from statistically analyzing 158 related literatures were: (1) The literature shows a peak cluster curve by years of publication, which indicates necessity of further studies. (2) The previous researches involved several aspects, including experiment monitoring, applied technology research, theory and mechanism study, model construction, demonstration and benefit analysis. Among these studies, a priority had been given to experimental testing by monitoring the physical and chemical improvement of soil properties under the agroforestry as well as its influence on ecological, economic and social benefits. (3) The researched areas were mainly distributed in northern China and the karst area in southern China. The combining studies on the soil-and-water-integrated treatment and the mountainous agroforestry were mainly conducted in the arid/semi-arid regions and the karst areas with engineering droughts (droughts caused by the special geological conditions in Karst areas). This paper also revealed the frontier theories about agroforestry and the comprehensive soil-and-water governess of rocky desertification from five aspects: theoretical research, technological

收稿日期:2017-10-30
资助项目:国家“十三五”重点研发计划项目“喀斯特高原石漠化综合治理生态产业模式与技术集成示范”(2016YFC0502607);贵州省研究生教育创新计划项目(黔教研合 GZS 字[2016]04 号);贵州省林业厅科研课题(黔林科合[2017]13 号)
第一作者:吴清林(1977—),男,贵州毕节人,博士研究生,主要从事喀斯特环境演变与生态建设研究。E-mail:wuqinglin2007@126.com
通信作者:熊康宁(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事喀斯特地貌与洞穴、喀斯特环境演变与生态建设研究。E-mail:xiongkn@163.com

research and development, model construction, test demonstration, monitoring and evaluation. It is finally concluded that the previous researches lag behind in the areas of comprehensively theoretical study and the significant technology development. Studies on the following areas should be further strengthened: 'five water' on storage and dynamic conversion; joint operation of water and soil resources from both surface and underground space; technology research and development in preventing water and soil leakage from slopes; industrial technology for saving water and adding value; optimizing allocation technology research, on forest-crops-grass stereoscopic space; developing agroforestry with technology of integrated regulation on soil and water loss to achieve ecological restoration in rocky desertification regions and boost the development of regional economy.

Keywords: rocky desertification environment; integrated regulation of soil and water loss; agroforestry; frontier theories; countermeasures

喀斯特石漠化环境下,由于独特的水文地质作用,形成山高水深、地表水缺乏、地下水丰富但难以利用的水资源分布特点。土层薄,土壤肥力低,生物覆盖率小,水土流失严重,生态系统恢复难度系数大。石漠化地区水土流失有其自身的特征,高原山地水土流失严重,高原盆地水土流失量小,高原峡谷山高坡陡,前期水土流失最为严重,发展到后期,已经达到无土可流的地步[1]。

混农林业(Agroforestry)在不同的文献里翻译不同[2],有混农林[3]、复合农林业[4]、农林复合经营[5]、立体林业[6]、农林间作[7]等等。其概念也有多种说法,比较公认的是:"混农林业是一个说明土地利用及方法的综合术语,在这种土地上,多年生木本植物,如同农作物(或牲畜)一样,以不同的空间排列和时间顺序,在同一块土地培育,各部分之间具有生态的及经济的联系"[8]。

石漠化治理主要是水土流失的治理,必须有水土综合整治的工程性措施和生物性措施作为保障,而混农林业是在有限的立地空间内追求最大的生态效益和经济效益,是治理石漠化地区水土流失的理想模式。近年来,二者的耦合研究取得了一定成果,混农林业在发挥水土保持作用的同时,也带来了一定的社会经济效益,但还没能很好地走向产业化,其根本原因是二者耦合的综合性机理研究不足,还存在一些有待加强的地方,应从系统论的视角研究区域水循环各子系统之间的相互转化,研发石漠化水土综合整治与山地混农林业的重大关键技术,推动石漠化地区生态和经济走向良性循环的轨道。

1 文献的获取与论证

本文以 CNKI 中国学术期刊、CNKI 中国博士学位论文、CNKI 中国优秀硕士学位论文 4 个中文全文数据库以及 EBSCO 全文期刊数据库、外刊资源服务系统、SpringerLink、CALIS 4 个外文期刊网站为检索平台,检索时间到 2017 年 7 月 13 日下午 15:20 止。中文全文数据库按"主题+精确"条件查找,由于混农林业有多个同义词,将这几个同义词分别和"水土"组合搜索,水土综合整治与混农林业相关的期刊文献为 105 篇,博士论文 7 篇,硕士论文 19 篇。4 个外文数据库按照高级模式搜索,以"TI 标题+TI 标题+TI 标题"形式输入 Agroforestry+soil+water,共搜出外文文献 27 篇,其中 SCI 文献 22 篇。

文献主要分布在 1963—2017 年,分为 3 个阶段:第 1 阶段为 1990 年以前,28 年间总文献 9 篇,全是国内期刊文献;第 2 阶段为 1991—2007 年,17 年间文献数为 98 篇,硕士论文 11 篇,中文期刊论文 74 篇,外文期刊文献 13 篇,其中 SCI 文献 10 篇;第 3 阶段为 2008—2017 年,共发表文献 51 篇,中文文献 37 篇,其中期刊文献 22 篇,硕士论文 8 篇,博士论文 7 篇;外文期刊文献 14 篇,其中 SCI 文献 12 篇。虽然文献主要分布在第 2 阶段,但从第 3 阶段开始才出现博士论文,且第 3 阶段外文文献较第 2 阶段多。从时间序列上来看,文献数量呈现峰丛状分布,与全部期刊文献趋势线(虚线)的离散性较大(图 1),可以看出石漠化环境水土综合整治与山地混农林业的研究不稳定,有待进一步加强。

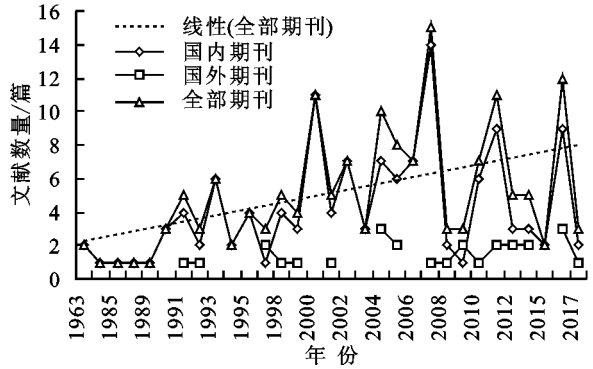

图 1 国内外研究文献年度分布

文献研究内容分为试验监测研究、运用技术研究、理论与机理研究、模式构建、示范推广和效益分析 6 个方面。试验监测研究 83 篇,占总数的 52.53%,说明以试验监测研究为主;理论与机理研究 78 篇,占总数的 49.37%;运用技术研究共 64 篇,占总数的 40.51%;效益分析 55 篇,占全部文献的 34.81%;模式构建的文献 29 篇,占全部文献的 18.35%;示范推广 5 篇,仅占总文献的 3.16%。

涉及区域研究的文献共 102 篇,主要分布在贵州、四川、陕西等 24 个省(直辖市、自治区)。其中,中国南方喀斯特地区(包括云南、贵州、四川、重庆、广西、广东、湖南、湖北 8 个省区)文献数量 54 篇,占 52.94%;黄土高原(包括山西、陕西以及青海、甘肃、宁夏、河南等省区的部分地区)的文献数 23 篇,占 22.55%,表明干旱半干旱区和工程性干旱的喀斯特地区水土流失最为严重,学术研究最为活跃。

2　主要进展与标志性成果

2.1　理论研究

2.1.1　*土壤侵蚀整治与混农林业生态效益耦合*　土壤侵蚀指由水或风引起的地表物质移动[9]。根据侵蚀动力学分类,主要分为水蚀和风蚀等[10]。干旱半干旱地区,水蚀和风蚀 2 种形式同时存在,湿润半湿润地区则主要以水力侵蚀为主。侵蚀程度分级为无(地表没有明显的侵蚀痕迹)、轻(有少量鳞片状面蚀)、重(有严重鳞片状面蚀或有细沟侵蚀出现,地面裸露)[11],也有学者将其分为轻度、中度、强度、极强度和剧烈侵蚀 5 个级别[12]。控制土壤侵蚀,进行水土综合整治是实现保护耕地、缓解水土流失和保持土壤肥力的根本措施。土壤侵蚀整治不仅是土壤侵蚀控制,而且是土壤保护、改良及合理利用的综合体现。只有将工程性、生物性和管理性保水保土措施并举,才能有效治理已退化的土地。现代混农林业在治理土地退化中具有重要的作用,林草复合有利于疏松土壤,改善土壤结构,增加土壤含水量[13]。杨柳—草复合减少地表径流量 47.1%～58.7%,拦截径流中的泥沙 74.4%～86.3%、总氮 54.5%～68.1%、总磷 62.3%～77.5%[14],对减少水土流失和土壤养分流失起着积极作用。混农林业具有降低土壤水蒸发和植物蒸腾以减少水分流失的功能[15]。植物篱是一种特殊的混农林业模式[16],是农林间作技术的发展[17]。植物篱的种植与裸地相比,减流效率为 4%～60%,减沙效率为 15%～50%,减流减沙效率随坡度的增加呈幂函数形式减少[18]。土壤的抗侵蚀属性主要体现在抗剪切性、抗冲性及坡面分布,植物篱种植增强了土壤的抗剪强度和抗冲性[19]。在坡度 25°左右的陡坡沿等高线密植植物篱,篱间种植 4～5 行农作物,可以使水土流失量减少 98%,粮食产量提高 2 倍[20],植物篱作为混农林业的特殊模式之一,具有减水减沙和增强土壤抗蚀功能。中国南方喀斯特石漠化环境下林—草模式、林—粮—草模式具有保水保土效益。土壤侵蚀治理的目标在于减少水土流失量,与混农林业的生态效益耦合。

2.1.2　*水土综合整治措施的地域差异*　由于不同的气候条件和地形地貌特征,地理事物的分布往往呈现水平地带性和垂直地带性差异。水土流失具有区域性特征,岩溶区和非岩溶区水土流失有相当大的差别[21],水土综合整治措施也呈现出地域差异。黄土高原土层疏松,坡地植被覆盖较少的地方在雨水的冲刷下很容易造成水土流失,土壤随水一起流入地势较低的沟谷,由于土层厚,流失量大,通过打坝淤地可以将土壤拦截,形成肥沃的淤地坝。喀斯特地区由于土壤贫瘠,地形起伏大,山高水深,加上地表地下二元结构,坡地上侵蚀的土壤一部分流入地势较低的河流或洼地,一部分进入到地下管道,形成水土地下漏失,所以在喀斯特地表难以形成淤地坝。同是作为水土保持措施的梯田,在喀斯特地区和黄土高原地区也存在差异,黄土高原由于土多石少,梯田田埂多用土修筑,种植旱作庄稼,还需要地膜等地表遮盖物作为保水的附加措施;在喀斯特山区,石多土少,梯田的田埂多用石头修筑,即使是高差很大的山地,由于地下承压水的存在,从山顶露头流出的水供给整座山上的梯田,从而可以种植水稻。

2.2　技术研发

2.2.1　*水土综合整治技术*　提灌站和高位小水池技术是石漠化地区水土综合整治的工程技术,通过提水、蓄水和喷灌,供给农作物生长,解决石漠化地区的干旱[22]。山地沟垄种植技术是沿等高线方向培育沟垄,可以增加土壤接收雨水的面积,增加土壤水的入渗时间和渗透率,增加植物对水分的吸收,有效防治水土流失。沟垄种植技术在喀斯特地区和其他干旱半干旱地区具有一定的差异,由于喀斯特地形比较破碎,土层较薄,所以沟垄高差相对较小。水土综合整治技术还有耕作技术、梯田修筑技术等。混农林业种植技术是水土综合整治的生物技术,林—粮—草的立体配置,必须遵循适地适树原则,根据不同石漠化等级进行合理配置,例如:轻度石漠化地区可以采取藤+乔模式,中度石漠化地区采取藤+灌模式,重度石漠化地区采取藤+草模式,还要注意植物之间根深

与根浅结合，尽量减少物种间土壤养分和水分的争夺，喜阴植物与喜阳植物结合，提高光能利用率[23]。

2.2.2 水土综合整治的监测技术 遥感监测技术被广泛运用到城市景观监测[24]、水质监测[25-27]、海洋监测[28-29]、农作物生长状态监测[30-31]、生态环境监测[32-33]等。生产和生活中，遥感监测具有宏观性、整体性和快捷性特征，对监测对象发挥现代化高科技的功能，给科学研究和管理工作带来了极大方便。石漠化地区的水土综合整治生态监测，综合利用了“3S”技术对不同时间序列的石漠化地区遥感影像进行处理，提取岩石裸露率、生物覆盖度、水体面积、土地利用状况等，以达到监测石漠化治理区时间序列上的生态修复成效[34-36]。最近几年，由于小型无人机拍摄技术的发展，遥感监测中增添了新的成员，无人机对水土流失和水土保持措施的监测具有快捷灵活、携带方便、分辨率高且造价低廉的特点，现已广泛运用于水土保持监测项目中[37-41]。无人机的使用大大提高了水土保持的监测精度，实现了动态监测，但无人机用于水土保持动态监测技术还处于起步和摸索阶段，需要进一步的研究和推广。

2.3 模式构建

2.3.1 水土保持型生态农业模式 生态农业(ecological agriculture)是生态学理论与农业生产的结合，1971 年由美国土壤学家 William Albreche 提出[42]，随后传入中国，在中国迅速推广并掀起了研究的新高潮。生态农业与有机农业的概念至今尚有异议[43]，但并不影响人们对其核心内容的理解。生态农业是以区域作为整体，强调物质的循环利用和生态保护，以水土保持为主要手段，通过水土流失综合治理实现农业区生态经济的发展，具有保持水土、生态恢复、合理配置土地资源、提高土地利用率和生产力的特点[44]。金沙江干热河谷设 4 个模式类型和 1 个对照组，“罗望子＋木豆”“罗望子＋象草”“罗望子＋木豆＋柱花草”“罗望子＋自然植被”等 4 个水土保持型生态农业模型，与对照组相比，土壤含水率、孔隙度都比对照组高，具有较好的水土保持效果[45]。湖南省慈利县于 1993 年被国家首批划为生态农业示范点之一，建立了“林＋经济作物＋粮＋旱地立体间套多熟制”种植模式、“稻＋萍＋鱼＋蔬菜”立体生态经济模式、“林＋牧＋茶＋果”模式、“猪＋沼＋果＋鸡＋鱼”庭院生态经济模式、“薪炭林＋用材林＋经济林＋牧＋粮＋庭院经济”等 5 个水土保持型生态农业模式，把种植业、养殖业和能源利用融为一体，促进生态经济的良性循环[46]。

2.3.2 石漠化治理的不同水土保持模式 石漠化治理经过几十年的探索和研究，其治理方法和理论日趋成熟，治理区生态环境和人民生活环境有了进一步的改善。基于石漠化地区自然环境的脆弱性，石漠化治理具有长期性和持续性特征，水土保持工程应该长期坚持下去，不能放松警惕。石漠化治理是水土保持的治理，是生态修复的治理，两者相互依存，互相转化。贵州省毕节市撒拉溪镇是贵州省石漠化治理示范区，选择封山育林模式、人工种草模式、经果林治理模式、农林混合模式等 4 种不同水土保持模式[47]。就整体而言，采取水土保持模式下土壤含水量、田间持水量、毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均高于对照组；土壤化学组成物质中有机质、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷、速效钾含量均高于对照组，说明该石漠化治理的水土保持模式具有良好的保水保土效果。

2.3.3 石漠化治理的生态经济模式 中国西南地区石漠化与贫穷同在，人多地少导致人地矛盾特别突出，有限的土地加之不合理的土地利用，人的生存与环境之间形成恶性循环。要解决石漠化环境退化问题，社会经济发展与环境治理必须同步，因而提出了石漠化治理的生态经济模式。该模式强调以生态经济型林(果、药)草为主的石漠化地区植被恢复，在岩溶石山地区利用封山育林模式，岩溶石山半石山区采用人工促进封山育林育灌植被恢复模式，岩溶半石山地区采用乔灌混交防护林模式；强调生物节水、农艺节水、工程节水、管理节水、沃土工程、坡改梯等高效合理利用石漠化地区水土资源工程，解决石漠化地区的生存问题；强调石漠化地区农村小城镇和市场建设、绿色产品的加工和特色石漠化旅游的发展，培植石漠化地区替代产业，解决人口压力大、经济落后、退耕还林后复垦等一系列问题[48]。

2.3.4 混农林业的保水保土模式 种间竞争研究是时下混农林业研究的热点，植物种间竞争使得在有限的立地空间和水土 2 种资源下不同物种之间呈现此消彼长的特征，一部分植物吸收和掠夺另一部分植物的有效土壤养分、水资源和光热，形成不和谐的共生关系。通过农林间作，选择合适的农作物和林木，调整农林种植距离以及立体空间的高矮配置，各物种之间合理地利用光能、水资源和土壤资源，达到协调共生并相互促进的目的，是混农林业可有效保水保土并带动经济和社会发展的理想模式。贵州省毕节撒拉溪石漠化治理示范区在坡度＞20° 的坡耕地上建立核桃＋黑羊茅/黑麦草＋白三叶、核桃＋刺梨＋高羊茅/菊苣/鸭茅、核桃＋土豆/玉米等模式，构成抗冻耐寒群落配置和物种多样性修复的生态诱导模式，发展特色经果林，带动区域畜牧业发展；在潜在—轻度石漠化区构建林(核桃)＋灌(刺梨)＋草(鸭茅、紫花苜

蓿混播)+牛(羊)+蚯蚓+鸡+沼+肥的耐旱性草地生产力维持与草畜配置平衡调控模式[49]。核桃+刺梨下种草的组合模式,可以充分利用光照资源,林下混播黑麦草、鸭茅、白三叶、红三叶等能够有效增加地表覆盖,减少水土流失[50]。

2.4　试验示范

国家"十一五"期间启动了中国西南 8 个省(区、市)100 个县作为石漠化治理示范点。其中贵州有 55 个县作为示范点,以小流域为单元探索石漠化治理技术和生态修复[51-52]。毕节撒拉溪朝营小流域为贵州喀斯特高原山地石漠化治理示范区,位于贵州省西北部,包括 2 个乡镇 9 个行政村,面积 86.27 km^2,石漠化面积 34.52 km^2,主要为潜在和轻度石漠化;关岭—贞丰花江顶坛小流域为高原峡谷示范区,位于贵州西南部,总面积 51.62 km^2,石漠化面积 42.95 km^2,其中潜在、轻度、中度和强度石漠化分别占 7.49%,28.87%,12.78%,12.17%[53];清镇王家寨—羊昌洞小流域是红枫湖示范区的核心区,红枫湖示范区是典型的贵州喀斯特高原盆地地貌,总面积 60.44 km^2,轻度、中度、强度石漠化面积分别为 9.47,5.83,0.19 km^2[54-55]。中国南方以贵州高原为中心的喀斯特地区石漠化严重,产业结构单一,贫穷问题突出。在国家"九五"到"十二五"科技计划研究成果基础之上,突破石漠化治理与生态衍生产业的科学问题和核心技术,开展混农林业、生态集约与规模经营、适宜生态产业发展等前沿理论研究与重大关键技术研发,在高原山地、高原盆地和高原峡谷典型治理区进行应用示范[56]。按照不同地貌类型和不同石漠化等级,通过洞穴滴水阳离子变化和洞穴沉积物反演石漠化环境的衍化过程[57-58],以生态产业技术推动石漠化治理示范区的生态效益和经济效益[59-61],强调保水保土功能较好的牧草种植,研发适合喀斯特地区的饲草青贮技术并带动畜牧业的发展[62-63]。石漠化治理与生态修复技术可以推广到其他环境退化区域的水土流失治理。

2.5　监测评价

2.5.1　*石漠化强度等级监测评价体系*　石漠化地区因不同的气候、岩性、土壤属性、植被类型、植被结构和覆盖度、水文特征、地貌结构等自然环境以及不同的土地利用模式、牧业发展模式等人类活动,导致石漠化环境退化的非一致性。石漠化强度等级监测是通过实地监测,结合遥感卫星影像解译,获得地表裸露基岩、植被、土地利用、土被、坡度等地理信息,根据不同的自然环境特征将石漠化分为 5 级(表 1)。

表 1　纯碳酸盐岩喀斯特区石漠化强度分级标准[64]

强度等级	代码	基岩裸露率/%	土被/%	坡度/(°)	植被+土被/%	平均厚度/cm	农业利用价值
无明显石漠化	11	<40	>60	<15	>70	>20	宜水保措施的农用
潜在石漠化	12	>40	<60	>15	50~70	<20	宜林牧
轻度石漠化	13	>60	<30	>18	35~50	<15	临界宜林牧
中度石漠化	14	>70	<20	>22	20~35	<10	难利用地
强度石漠化	15	>80	<10	>25	10~20	<5	难利用地
极强度石漠化	16	>90	<5	>30	<10	<3	无利用价值

2.5.2　*石漠化治理的生态监测与效益评价指标体系*　石漠化治理成果的最终体现在于生态环境的改善,诸如生物量的增加、水土流失减少、土壤理化性质改良、土壤肥力增强等。根据科学性、简洁性和可操作性原则,对贵州石漠化试验示范区潜在、轻度、中度、强度石漠化治理区的生物、小气候、土壤、水文 4 个方面效应的实地监测,分析相关监测数据特征,构建石漠化治理生态效益评价指标体系。体系中生物效益因子中包含:植被覆盖度、地上部分生物量、生物多样性指数、群落结构 4 个指标;土壤效益因子中包含:土壤质量指数、土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度、土壤酸碱度 5 个指标;小气候效益因子中包含:大气温度、林下干湿度、土壤温度、光照强度 4 个指标;水文效益因子中包含:土壤侵蚀模数、水土流失面积、地表径流状况。运用 SPSS 和 DPS 统计软件的矩阵计算和无量纲处理,得出各生态效益的指标权重(表 2)。

表 2　生态因子原始数据处理值和综合生态效益指数[65]

评价指标	权重	次序
土壤侵蚀模数/(t·km^{-2})	0.2041	1
植被覆盖率/%	0.1981	2
土壤质量指数/%	0.0885	3
中度以上水土流失面积/km^2	0.0825	4
生物多样性指数 H	0.0763	5
群落结构	0.0763	6
土壤含水量/%	0.0539	7
光照度 lx	0.0417	8
地表径流状况/%	0.0334	9
土壤容重/(g·cm^{-3})	0.0302	10
土壤孔隙度/%	0.0302	11
地上部生物量/(g·m^{-2})	0.0294	12
土壤温度/℃	0.0173	13
大气温度/℃	0.0161	14
林下相对干湿度/%	0.0161	15
土壤 pH	0.0062	16

2.5.3 水土综合整治效益评价指标体系 水土流失无处不在，人们对水土保持相关指标体系构建的研究也较多，诸如水土保持措施的适宜性评价[66]、水土保持植被工程评价体系[67]、水土保持治理效益评价体系[68]、河道生态水土保持指标体系[69]等。从整体来看，水土综合整治效益评价都从生态效益、经济效益、社会效益以及综合效益 4 个方面去构建。吉林省梅河口市吉兴小流域通过对 2004—2006 年的监测数据进行对比，结合数据整理和实际治理情况提出 22 个指标构成水土保持综合效益的评价指标体系。社会效益方面包括减轻土地退化、减少自然灾害损失、林草生态用地面积、农产品商品率、劳动生产率、农村年人均收入、恩格尔系数、贫困人口比例等 8 个指标；经济效益方面有粮食作物产值、典型果类产值、生产用地价值、生态用地价值、小型水利工程蓄水价值等 5 个指标；生态效益方面有减少侵蚀模数、土壤持水能力、径流量、有效土层厚度、土壤保肥能力、流域人水系水质、地面小气候、林草覆盖度、生物多样性等 9 个指标[70]。

3 国内外拟解决的关键科技问题与对策

3.1 大气－地表－地下－土壤－生物中的水分赋存转化动力过程

水作为水蚀型水土流失的主动力，在环境治理和生态修复中扮演着重要角色。保水保土的目的在于保土，保住土壤及其土壤肥力并改良土地生产能力。水联系着水土综合整治的所有环节，治土的关键技术是治水。就水土综合整治而言，当前的研究主要集中于水土综合整治技术中水利工程的布设与生态修复措施实施后土壤孔隙度、有机质、容重等物理属性的改变，很少从大气、地表、地下、生物、土壤中的水分赋存转化动力过程进行探索，赋存动力转化中各承载体之间的水动量平衡、承载体的持水量和生物需水量等机理性研究较为欠缺。“大气水—地表水—地下水—土壤水—生物水”简称“五水”[71]，目前“五水”转化研究主要集中于水量关系平衡，通过相关函数计算和计算机软件分析，小尺度模拟大气降水作为总水量，在地表径流、地下径流、壤中流、植被截流中的分配[72]。“五水”相互转化构成了局地水循环，只有清楚局地水循环中各种形式水体的多少以及在相互转化的临界值，演绎“五水”赋存转化动力机制，对充分利用水资源、实现水土资源的可持续发展和利用大有裨益。

3.2 地表与地下空间水土有效调控与高效利用对策

地表径流不是水土流失的唯一驱动力，壤中流作为地下水流在土壤侵蚀中占有相当大的比例[73]。地表地下二元结构中，水土有效调控的主要对象是水资源。作为一种可再生资源，在工程性干旱的喀斯特地区显得尤为重要。面对严重的干旱和水土流失，从宏观上通过工程性调控减少地表和地下水土流失，促进正常生态供水，实现经济和社会可持续发展。依据自然生态环境下“五水”赋存转化动力过程及转化量，遵照研究区域水循环规律，实现地表与地下水资源的联合调度，以达到合理高效利用地表地下水资源的目的。水资源的高效利用是在保持区域生态系统健康和社会经济稳定发展的前提下，寻求工程经济合理与宏观经济最高的方案[74]。目前对水资源的高效利用的研究着眼于农业水[75-76]、城市水[77]，很少触及地表水、地下水、生物水、大气降水和土壤水的综合高效利用与调配。地表地下空间应从系统论视角出发，在较大规模尺度上对二元空间各水体相互转化进行量化研究，保证问题研究的完整性和全面性，以地表地下水土的有效调控和高效利用技术研发为导向，解决生产实际问题，防止水土流失，修复已退化的石漠化生态环境。

3.3 坡面水土漏失有效防治与阻控技术

水土漏失是发生在喀斯特地区的特殊水土流失形式[78-79]，由于喀斯特地区的地表地下二元结构，节理、裂隙、落水洞和洞穴发育，土壤容易顺着这些地貌单元进入地下，形成水土资源漏失。水土漏失主要发生在人类活动强、地表岩石裸露率高的地区[80]。目前的研究多集中于漏失机理的探讨，如何实行有效防治与阻控，在相关文献里仅仅是从宏观方面提出生物/工程协同阻控技术[81]，而没有切实可行的具体方案。另外，地下水土漏失的监测也是个难以解决的问题，从理论上可以通过^{137}Cs示踪技术示踪地下水土漏失，但此技术仅能示踪彼此之间存在联系，不能对水土漏失进行定量示踪。石漠化强度与坡面水土漏失呈正相关，不同等级石漠化地区需要不同的水土漏失阻控技术，结合研究区域特有的气候、地质、地貌、土壤、水文特点和水资源分布特征，构建水土漏失预报系统，研发综合性石漠化地区坡面漏失阻控技术，是石漠化治理的重大技术研发，也是石漠化治理亟需解决的重大关键科学技术问题。

3.4 工程－生物－农艺－管理节水增值高效产业技术

节水产业是国民经济系统中以提高用水效率、防治水污染、改善水生态和环境、保护水资源为目的所进行的技术研发、产品制造、资源利用、信息服务、工程承包等一系列活动的总称[82]。石漠化地区水土综合整治、防治水土流失其节水关键在于农业，农业耗水量大，在整个国民经济产业中占有量为 70%，农业节水技术紧紧围绕农艺节水、工程节水、管理节水等方面进行研究[83]。节水技术不是所有节水措施的累加，而是根据地区大气降水在各种水体之间的相互转

化,确切掌握区域水资源的分布特征,研究节水与作物干旱机制的耦合,选择适合于该区域自然环境的林—粮—草进行优化配置,发展节水增值高效产业,并做到洪水资源化、废水资源化、供水合理化,结合区域特征研发工程—生物—农艺—管理节水增值高效产业技术,研发自然节水为主、工程节水为辅的水资源高效利用体系,在石漠化地区发展农业节水增值产业,带动经济发展。

3.5　水土综合整治与林一粮一草立体优化配置技术

石漠化地区土地退化是水土流失的必然,在"五水"赋存动力转化机理研究基础之上,实现地表地下空间水资源立体优化配置,研发坡面水土漏失阻控技术,发展农业节水增值产业,利用综合性技术全方位地进行水土综合整治。林—粮—草立体优化配置的目的是在有限的立地空间产生更多的生物量,保证良好生态环境的前提下实现生态—经济双赢。生物优化配置技术的关键是解决物种间的竞争,既要产量最大化,也要生态效益最大化。林—粮—草立体种植之间的选种技术需要考虑多重因素,地表部分要考虑高—中—低搭配,行间距合理,喜阴植物和喜阳植物立体配置,保证各生物之间能够最大限度地获取太阳能和雨水;地下部分要注意深根和浅根相配,粗根和细根相达,保证每一种植物根部之间能吸收充足的水分和养分。

3.6　基于石漠化水土综合整治的混农林业模式与技术集成示范

混农林业模式在全国甚至全世界都在研究,但模式构建显得随意,研究者大多通过查阅相关文献和实地考察,凭直觉认为哪一种模式具有一定的水土保持能力,增加经济收入,就开始种植和监测,通过试验得出结论。然而大多数模式未能进行推广,关键问题在于模式的示范推广不具有普遍性。混农林业模式结合石漠化地区人多地少的实际,是能增加人民经济收入、减少水土流失、保持土壤肥力、使土地可持续利用的发展模式。种植模式的选取,应考虑当地百姓的利益,争取百姓的支持和理解,需要解决以下问题:首先是选种问题,主要选择当地物种,因为当地物种不用考虑它的适生性;其次是销售问题,种植出来的产品如果不能形成产业链,任何一个环节出了问题,百姓的利益都得不到保障。进一步的研究应该通过实地调研,综合考虑生态效益和经济效益的前提下,构建适合石漠化水土综合整治的混农林业模式,并将模式及技术推广。

参考文献:

[1] 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.

[2] 俞益武,王伟.混农林业:现状和问题[J].浙江林学院学报,1992,9(2):226-230.

[3] 王佑民,王忠林.黄土高原沟壑区混农林的结构以及防护效益研究[J].水土保持学报,1992,6(4):54-59.

[4] 张纪林,葛明宏.复合农林业技术创新的探讨[J].世界林业研究,2000,13(4):70-76.

[5] 郭颖,聂朝俊,向仰州,等.不同核桃农林复合经营模式对土壤肥力的影响[J].土壤通报,2016,47(2):32-38.

[6] 聂道平.立体林业经营若干理论问题的探讨[J].世界林业研究,1994(1):70-74.

[7] 袁玉欣,裴保华,王九龄.国外农林间作研究进展[J].世界林业研究,1990(5):26-30.

[8] 王礼先.农地林业与水土保持战略[J].世界林业研究,1989(1):77-81.

[9] Kirkby M J, Morgan R P C. 土壤侵蚀[M].王礼先,译.北京:水利电力出版社,1987.

[10] 金争平,史培军.内蒙古半干旱地区土壤侵蚀过程的研究:以内蒙古准格尔旗为例[J].干旱区资源与环境,1987,1(2):55-66.

[11] 王佑民.水土保持林标准的初步研究[J].干旱地区农业研究,1985(4):39-48.

[12] 张洪江.土壤侵蚀原理[M].2 版.北京:中国林业出版社,2008:4.

[13] 王红柳,岳征文,卢欣石.林草复合系统的生态学及经济学效益评价[J].草业科学,2010,27(2):24-27.

[14] 卜晓莉,王利民,薛建辉.湖滨林草复合缓冲带对泥沙和氮磷的拦截效果[J].水上保持学报,2015,29(4):32-36.

[15] Lin B B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2010,150(4):510-518.

[16] 孙辉,唐亚,赵其国,等.植物篱枝叶有机碳分解研究[J].土壤学报,2002,39(3):361-367.

[17] 牛红玉,赵欣,吴丽丽,等.植物篱技术在面源污染中的应用[J].现代农业科技,2011(6):283-288.

[18] 杨帅,李永红,高照良,等.黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究[J].农业机械学报,2017,48(8):270-278.

[19] 蒲玉琳,谢德体,倪九派,等.紫色土区植物篱模式对坡耕地土壤抗剪强度与抗冲性的影响[J].中国农业科学,2014,47(5):934-945.

[20] 朱可仁.陡坡山地农林混作技术:菲律宾山地农林业样板介绍[J].山西林业科技,1993,21(2):46-48.

[21] 蒋忠诚,曹建华,杨德生,等.西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):37-42.

[22] 高渐飞,熊康宁,吴克华.典型喀斯特石漠化小流域小型农田水利配套技术与模式[J].中国农村水利水电,2012(8):16-23.

[23] 苏维词,潘真真,郭晓娜,等.黔南 FAST 周边典型喀斯特峰丛洼地石漠化生态修复模式研究:以平塘县克渡镇刘家

湾周边为例[J]. 中国岩溶,2016,35(5):503-512.
[24] 邢治,郑丙辉. 城市景观生态遥感监测技术研究[J]. 环境科学,2002,23(增刊):99-102.
[25] 杨一鹏,王桥,王文杰,等. 水质遥感监测技术进展[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6):6-12.
[26] 崔爱红,董广军,周亚文,等. 水质关键因素光谱遥感监测技术分析[J]. 测绘科学,2016,41(11):61-65.
[27] 陈文召,李光明,徐竟成,等. 水环境遥感监测技术的应用研究进展[J]. 中国环境监测,2008,24(3):6-11.
[28] 李颖,朱雪瑗,曹妍,等. CNSS-R 海洋遥感监测技术综述[J]. 海洋通报,2015,34(2):121-129.
[29] 于五一,李进,邵芸,等. 海上油气勘探开发中的溢油遥感监测技术:以渤海湾海域为例[J]. 石油勘探与开发,2007,34(3):378-383.
[30] 蔡成静,王海光,安虎,等. 小麦条锈病高光谱遥感技术研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(增刊):31-36.
[31] 王连喜,秦其明,张晓煜. 水稻低温冷害遥感监测技术与方法进展[J]. 气象,2003,29(10):3-7.
[32] 谢品华,刘文清,魏庆农. 大气环境污染气体的光谱遥感监测技术[J]. 量子电子学报,2000,17(5):385-394.
[33] 黎刚. 环境遥感监测技术进展[J]. 环境遥感监测技术进展,2007,19(1):8-11.
[34] 陈起伟,熊康宁,兰安军. 基于 3S 的贵州喀斯特石漠化遥感监测研究[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(3):62-67.
[35] 刘国珍,白惠芳,李朝阳. 西南岩溶地区石漠化遥感监测特征分析[J]. 安徽农业科学,2010,38(16):8543-8546.
[36] 谭宗琨. 实施退耕还林政策对遏止喀斯特区域石漠化作用的遥感监测[J]. 水土保持研究,2006,13(1):35-37.
[37] 王志良,付贵增,韦立伟,等. 无人机低空遥感技术在现状工程水土保持监测中的应用探讨:以新建重庆至万州铁路为例[J]. 中国水土保持科学,2015,13(4):109-113.
[38] 文雄飞,张穗,张煜,等. 无人机倾斜摄影辅助遥感技术在水土保持动态监测中的应用潜力分析[J]. 长江科技学院学报,2016,33(11):93-98.
[39] 赵俊华,朱艳华. 无人机遥感在水土保持领域的应用[J]. 人民长江,2017,48(12):33-35.
[40] 张雅文,许文盛,韩培,等. 无人遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用:以鄂北水资源配置工程为例[J]. 中国水土保持科学,2017,15(2):132-139.
[41] 张雅文,许文盛,沈盛彧,等. 无人机遥感技术在生产建设项目水土保持监测中的应用:方法构建[J]. 中国水土保持科学,2017,15(1):134-140.
[42] 翟勇. 中国生态农业理论与模式研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
[43] 张春雄. 国外生态农业的兴起与展望[J]. 土壤肥料,1981(4):20-21.
[44] 周申立. 嘉陵江支流状元河流域水土流失与水土保持模式[J]. 四川师范学院学报(自然科学版),1999,20(2):156-159.
[45] 杨艳鲜,纪中华,沙毓沧,等. 元谋干热河谷旱坡地生态农业模式的水土保持效益研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):70-73.
[46] 李景保,谢炳庚. 论流域水土保持型生态农业模式设计与建设:以澧水流域慈利县为例[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):66-71.
[47] 颜萍,熊康宁,檀迪,等. 喀斯特石漠化治理不同水土保持模式的生态效益研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2016,34(1):1-7.
[48] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. 水土保持学报,2002,16(2):29-33.
[49] 崔雷. 基于植物多样性恢复和保护的石漠化土地整理技术与示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
[50] 池永宽. 石漠化治理中农草林草空间优化配置技术与示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2015.
[51] 陈起伟. 贵州岩溶地区石漠化时空变化规律及发展趋势研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
[52] 盈斌. 岩溶地区土地利用、石漠化与治理工程设计[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
[53] 刘洋. 喀斯特石漠化治理的水土保持效益监测评价研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2014.
[54] 王恒松. 贵州典型喀斯特单元生态治理区水土流失机理研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
[55] 刘云. 贵州典型小流域石漠化综合治理生态效益研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2009.
[56] 熊康宁,朱大运,彭韬,等. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究[J]. 生态学报,2016,36(22):7109-7113.
[57] 付超凡. 喀斯特石漠化地区洞穴滴水阳离子变化特征与环境响应[D]. 贵阳:贵州师范大学,2014.
[58] 王宏远. 基于洞穴化学沉积物记录的石漠化重要历史事件研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2014.
[59] 胡正伟. 喀斯特石漠化治理的生态产业发展模式与经济效益研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2014.
[60] 任笔墨. 石漠化治理适生中药材标准化种植及衍生产业技术与示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2015.
[61] 张梦. 石漠化地区农村经济合作组织生态产业集约规模化研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2015.
[62] 许留兴. 喀斯特石漠化环境饲草青贮与牛羊健康养殖[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
[63] 张俞. 喀斯特石漠化草地营养优化配置与牛羊健康养殖技术示范[D]. 贵阳:贵州师范大学,2016.
[64] 熊康宁,黎平,周忠发,等. 喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究[M]. 北京:地质出版社,2002.
[65] 陈洪云. 喀斯特石漠化综合治理生态监测与效益评价[D]. 贵阳:贵州师范大学,2007.
[66] 张玉斌,王昱,郭晋. 水土保持措施适宜性评价的理论与方法初探[J]. 水土保持研究,2014,21(1):47-55.

(下转第 33 页)