

段华超, 郑鑫华, 李世民, 等. 云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 137-146.

DOI: 10.11932/karst2021y13

云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议

段华超¹, 郑鑫华¹, 李世民¹, 李燕燕¹, 叶 澜¹, 井卉竹¹, 罗润文², 唐 永³, 董 琼¹

(1. 西南林业大学林学院, 云南昆明 650224; 2. 广南县坝美林业站, 云南广南 663300;

3. 罗平县林业局, 云南罗平 655800)

摘 要: 云南省区域内石漠化面积广布, 严重制约着当地社会经济的可持续发展。文章概括了云南石漠化研究现状, 主要从石漠化区划, 治理模式和石漠化区植被恢复种类三个方面, 综述了云南石漠化研究成果。云南石漠化区划分为2个大区和5个小区; 经过多年的探索形成了4类23种石漠化治理模式, 435种可用作石漠化地区生态恢复的植物物种, 其中乔灌木376种, 草本59种。结合地理位置、气候和海拔对适宜恢复植被进行了初步总结, 指出了石漠化研究治理中存在的不足, 为后续的石漠化植被恢复治理研究提供重要参考。

关键词: 云南; 石漠化; 治理模式; 植被

创新点: 论述了云南石漠化治理成果, 探索出4类23种石漠化治理模式和435种植物物种可用于石漠化区生态恢复。

中图分类号: S728.9 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0137-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

石漠化概念是20世纪80年代末提出的, 是一种土地退化的极端现象^[1], 是指我国南方湿润地区, 在碳酸盐岩发育的岩溶脆弱生态环境下, 由于人为因素, 造成植被持续退化, 乃至丧失, 导致水土资源流失, 土地生产力下降, 基岩大面积裸露于地表, 呈现类似荒漠景观的土地退化过程^[2]。它经常发生在喀斯特地区, 形成沙漠般的景观^[3]。

云南地处中国西南边陲, 地理位置处于东经97°31'39"~106°11'47", 北纬21°08'32"~29°15'08"之间, 全省东西长864.9 km, 南北宽990 km, 全省国土总面积39.41万km²。石漠化面积达23 519.39 km², 占全省土地面积的5.97%^[4]。云南省石漠化面积是

全国最多的省份之一, 石漠化面积居全国第2位, 在全省129个县(市、区)中, 有65个县存在石漠化问题^[5]。在云南较纯的碳酸盐岩区石漠化发生严重, 次纯和不纯碳酸盐分布区石漠化比较微弱^[6-7], 以滇东南石漠化发生最为严重^[8]。严峻的土地石漠化问题, 给当地人民的生产和生活和社会发展带来了严重的影响, 恶劣的生态环境, 直接威胁着当地人民的生存和发展。因此, 进一步开展对石漠化的研究治理工作已成为新时代的重要任务之一。“十二五”期间, 国家发改委、国土资源部、国家林业局、环保部、农业部、财政部六部委就联合发布全面开展《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015)》^[3]。国务院2016年12月15日印发并实施了《推进青藏高原、黄土高原等关系国家生态安全核心地区生态修复治理

基金项目: 国家自然科学基金(31260191); 云南省教育厅科学研究基金(2019Y0125)

第一作者简介: 段华超(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 植被恢复与保持。E-mail: 1916134612@qq.com。

通信作者: 董琼(1973—), 博士, 副教授, 研究方向: 植被恢复与保持、生物多样性。E-mail: dqyeam@swfu.edu.cn。

收稿日期: 2021-02-20

纲要(2016-2020)》,在“十三五”期间推进青藏高原、黄土高原、云贵高原、秦巴山脉、祁连山脉、大小兴安岭和长白山、南岭山地地区、京津冀水源涵养区、蒙古高原、河西走廊、塔里木河流域、滇桂黔喀斯特地区等关系国家生态安全核心地区生态修复治理。该文将从石漠化分区、治理模式和植被三个方面对云南石漠化治理展开论述,为云南石漠化地区植被恢复提供理论参考。

1 云南石漠化地区生态恢复治理区划

1.1 石漠化区划

目前我国对石漠化生态恢复治理区划尚无明确划分规定,广大石漠化治理研究者较为认可的是但新球^[9-10]的划分方法,将中国石漠化地区划分为4个一级区划单位和13个二级区划单位,云南属于一级区划单位中的云贵高原亚热带区;该学者从大流域、大地貌特征将云贵高原亚热带区划分为长江水系乌江流域黔西区,长江水系黔东、黔中、黔东南区,长江水系黔西北、东北岩溶区,珠江水系南北盘江等黔南岩溶区和滇东、滇东南高原岩溶区4个二级区划单位;该划分方法有利于石漠化区水文地理研究和大尺度空间景观生态研究;但由于地理位置和行政区划的不同,不便于石漠化生态恢复治理。部分云南石漠化生态恢复治理学者在此基础上对云南石漠化地区进一步划分。第一轮石漠化治理规划期间部分学者根据地理位置、行政区划,将云南石漠化地区划分为5个片区、65个县(市、区)^[11-12];但经过第一轮石漠化治理规划后,该区划方法存在石漠化治理区域零散,规模化效应低,区域协调困难,机构人员臃肿,无法统一调配资源,造成资金和人力浪费等问题。李乡旺等^[13]根据气候、土壤、水分、地形和地理位置,将云南石漠化地区划分为7个石漠化区和19个小区,提出了石漠化生态恢复治理应以小流域为基本单位;小流域小地貌的划分方法更有助于石漠化植被恢复治理,但存在生态景观混乱,石漠化植被恢复形式多样,难以统一,增耗资金等问题。结合以上学者的区划原则,以地形地貌、流域、地理位置和行政区划为划分原则,以哀牢山脉——红河为界线,将云南石漠化区划分为东部石漠化和西部石漠化两个大区。哀牢山、红河以东区域是云贵高原的主体,称之为滇东高原,区域海拔1 500~2 500 m。高原内

分布众多的断陷盆地、中生界盆地和湖泊,地表河流切割强烈。东部碳酸盐岩分布区岩溶发育,形态多样,根据地貌、海拔、地理位置和岩溶连片发育特征,可分为滇东南山原石漠化、滇中滇东高原石漠化和滇东北中山峡谷石漠化3个小区。哀牢山以西横断山系主脉和支脉纵横交错,该区地势北高南低,高差大,坡度陡峭,区域内江河峡谷纵横,干热河谷气候显著,石漠化分布呈点状分布^[14],该区分为滇西北高山峡谷石漠化和滇西南中山宽谷石漠化两个小区。如图1所示。

1.2 各类型区石漠化面积

云南石漠化各类型区都有不同程度的石漠化分布,滇东南石漠化区总面积为8 814.76 km²,以轻度和中度石漠化为主,包括文山和红河;滇中滇东石漠化区总面积为5 747.95 km²,包括昆明、玉溪和曲靖;滇东北石漠化区总面积为2 941.11 km²,以昭通为主;滇西北石漠化区总面积为4 552.5 km²,重度和极重度石漠化显著,主要是迪庆、丽江和大理北部;滇西南石漠化区总面积为1 463.07 km²,以临沧和保山为主,其他各类型石漠化面积见表1。

2 云南石漠化地区植被恢复治理模式及特点

2.1 云南石漠化植被恢复模式

石漠化植被恢复模式是指在岩溶石漠化区以生态恢复为目的,兼顾经济和社会效益,运用一个或多个植物物种促进开展石漠化地区植被恢复的技术集成。云南石漠化治理经过多年的探索和发展,根据气候和土壤条件,形成了许多各具特色的石漠化植被恢复模式。根据刘拓^[1]、胡培兴^[16]、祝列克^[17]等学者的著作,归纳总结出云南石漠化植被恢复治理模式共有4类23种(图2)。

2.2 模式特点

人工辅助促进类多实施于植被存在破坏现象或无植被,植被自我修复缓慢或者无法进行自我修复的地区,人为措施辅助,促进生态环境植被恢复,能有效提高治理成效和缩短生态环境恢复时间。生物工程类主要用于重度、极重度、高海拔和进行生态经济林生产等石漠化地区,进行去石保土和垒埂聚土^[17],为困难地段植被生长提供较适宜的土壤条件,为生态经济林提供便利的交通及降低管理成

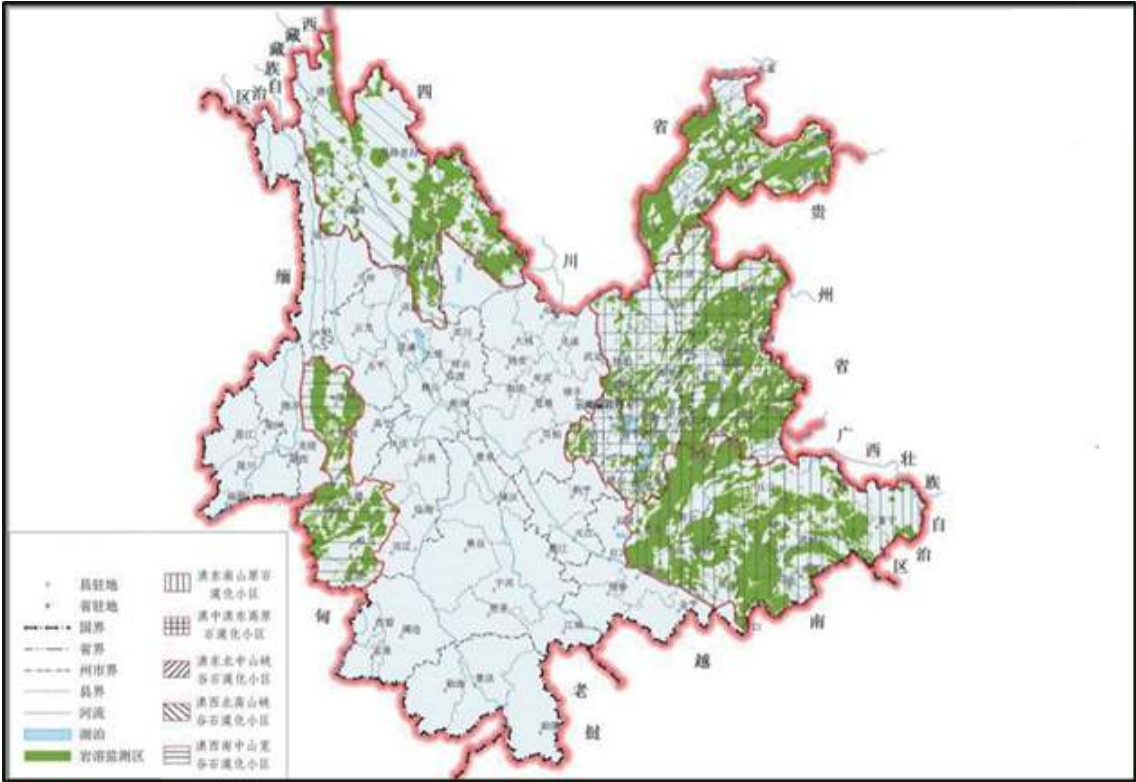


图 1 云南石漠化及区划分布图
Fig. 1 Rocky desertification and zoning map of Yunnan

表 1 云南各地不同地貌类型和石漠化分布面积
Table 1 Different geomorphic types and distribution areas of rocky desertification in various regions of Yunnan

类型分区	石漠化土地面积/km ²			
	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	极重度石漠化
滇东南山原石漠化	3 638.10	4 030.89	1 055.02	90.75
滇中滇东高原石漠化	3 313.62	1 978.38	323.79	132.16
滇东北中山峡谷石漠化	1 194.68	1 448.16	209.65	88.62
滇西北高山峡谷石漠化	2 453.10	1 559.39	281.25	258.76
滇西南中山宽谷石漠化	711.19	709.09	37.56	5.23
小计	11 310.69	9 725.91	1 907.27	575.52
石漠化面积总计			23 519.39	

注：数据来源于云南省林业与草原厅^[15]。
Note: The data is derived from Forestry and Grassland Department of Yunnan Province.

本^[18]。生态农业类是以农林作物物种为石漠化治理恢复植被，以经济效益为主，辅之以生态效益的农林生产活动，此类模式能有效解决当地居民收入，为社会提供充足的生产资源，如木材、药材、水果等。封山育林类主要适用于轻度和中度石漠化区，江河峡谷两岸水土保持林、中高山地区的水源涵养林多用此类模式，能显著提高水资源储备和降低水土流失等作用^[19]。

云南石漠化植被恢复模式繁多，但大部分适宜

范围小，缺乏综合治理原则，且部分方法基础调查和观测不足，科学合理性较差。能否进行模式整合或相互借鉴，从云南现有的模式中筛选或集成一种或几种模式作进行石漠化综合治理有待相关学者的进一步研究验证。

3 云南各石漠化区生态恢复模式及植被

多位学者在各地的科研与实践中，经过多年的

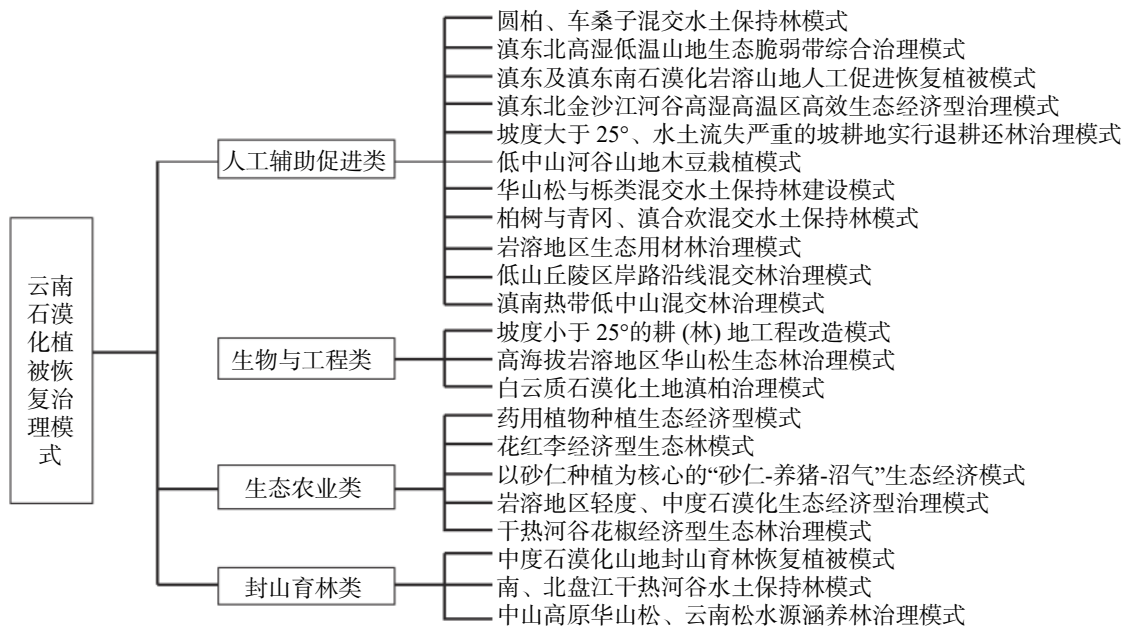


图2 云南石漠化植被恢复治理模式

Fig. 2 Restoration and control model of rocky desertification vegetation in Yunnan

探索,在云南石漠化区,获得了 435 种可用做石漠化区生态恢复的植物物种,其中乔灌木有 376 种,草本有 59 种^[10-11,13,15]。

3.1 滇东南山原石漠化小区

3.1.1 区域环境

滇东南山原石漠化小区包含整个文山和红河大部分地区,根据云南三次石漠化监测报告,该区是云南省石漠化面积最大、最严重的地区,石漠化面积约占全省石漠化面积的三分之一。该区主要成土母岩是碳酸盐岩中的石灰岩、白云岩等^[20-21],岩石坚硬抗风化能力强,成土困难,溶蚀作用强烈,形成了洼地、溶丘、山间盆地、溶洞、裂隙、溶沟、溶槽等地貌类型^[22],形成了多种多样的土壤类型,包括红壤、褐红壤、石灰土、黄壤、黄棕壤、黄红壤等。区域内地表水系不发育,水土流失严重,水资源受季节性影响大,地下水位较深,主要以碳酸盐岩类岩溶水为主^[23]。当地破碎地貌和季节性干旱加剧了石漠化的发生,阻碍着当地与外界的交流,落后的交通和经济水平,为石漠化的治理增添了难度。

3.1.2 生态恢复模式及植被

滇东南地区从 20 世纪 80 年代初就开始进行石漠化治理,是云南最早开始石漠化治理的地区之一;区域内中度和重度石漠化面积分布较大,环境恶劣,

经济落后,治理措施多以生态农业和人工促进为主,包括圆柏、车桑子混交水土保持林模式、低中山河谷山地木豆栽植模式、热带低中山混交林治理模式、金银花生态经济型模式、花红李经济林生态模式、以砂仁种植为核心的“砂仁—养猪—沼气”生态经济模式等。该区地处南亚热带与北热带交汇带,年均温较高,石漠化中低海拔区恢复植被多以喜热和热带植被为主,如加勒比松 (*Pinus caribaea*)、沉香 (*Aquilaria sinensis*)、柚木 (*Tectona grandis*)、榕树 (*Ficus microcarpa*)、清香木 (*Pistacia weinmannifolia*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*)、蛇藤 (*Colubrina asiatica*)、象草 (*Pennisetum purpureum*)等;石漠化山区则是耐旱耐瘠薄植被为首选,如墨西哥柏 (*Cupressus lusitanica*)、铁橡栎 (*Quercus cocciferoides*)、白枪杆 (*Fraxinus malacophylla*)、清香木 (*Pistacia weinmannifolia*)、矛叶荩草 (*Arthraxon lanceolatus*)等。

3.2 滇中滇东高原石漠化小区

3.2.1 区域环境

该区包括昆明、玉溪和曲靖三地;属滇东高原,成土母岩主要是可溶性的白云岩、白云质灰岩、灰岩和不可溶性的玄武岩、砂岩等,在不同岩性的作用下^[24],区域内岩溶断陷盆地发育,地势起伏平缓,集中了云南全省近一半的山间盆地。断陷盆地周边山

区及斜坡地带是石漠化发生的主要地貌部位^[25]。土壤类型主要以红壤为主, 部分地区为黄壤, 石灰土等^[13]。可溶性碳酸岩地区, 地下水补给容易, 主要是岩溶水, 不可溶性岩地区, 地下水补给困难, 主要通过岩层孔隙和裂隙补充, 以松散岩类孔隙水、裂隙水为主^[24]。该区处于北纬低纬高海拔亚热带高原山地季风气候区, 降雨量充沛, 气候温和, 夏无酷暑, 冬无严寒, 主要植被为常绿阔叶树种^[26]。

3.2.2 生态恢复模式及植被

区域内气候、土壤、植被垂直分布明显^[27], 根据适地适树原则, 区域内石漠化治理层次分明。山体中上部主要以针阔混交, 南、北盘江干热河谷及中山高原针叶水源涵养等水土保持林建设模式为主; 山体中下部则主要采用岩溶地区生态用材林治理模式, 白云质石漠化土地滇柏治理模式及岩溶地区轻度、中度石漠化生态经济型治理模式等。但该小区中曲靖地区由于矿产资源丰富, 长期以来采矿和人为活动强烈, 地表植被破坏严重, 石漠化植被恢复多以封山育林为主, 当地大部分地区以中度石漠化山地封山育林恢复植被模式为首选。该区山体中上部水土保持林常用植被常采用云南松(*Pinus yunnanensis*)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、冲天柏(*Cupressus duclouxiana*)、华山松(*Pinus armandii*)、高山锥(*Castanopsis delavayi*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、窄叶青冈(*Cyclobalanopsis augustinii*)、急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)、高山柏(*Sabina squamata*)、牛筋条(*Dichotomanthus tristaniaecarpa*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、嵩草(*Kobresia myosuroides*)等, 山体下部则以核桃(*Juglans regia*)、板栗(*Castanea mollissima*)、杨梅(*Myrica rubra*)、石榴(*Punicagranatum*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、油桐(*Vernicia fordii*)滇杨(*Populus yunnanensis*)、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)、滇润楠(*Machilus yunnanensis*)、云南樟(*Cinnamomum glanduliferum*)、常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)、三叶地锦(*Parthenocissus semicordata*)等经济林树种和园林绿化植被为主。

3.3 滇东北中山峡谷石漠化小区

3.3.1 区域环境

该区主以昭通为主, 属金沙江下游, 坐落在四川

盆地到云贵高原抬升的过渡地带, 地势西南高、东北低, 属典型的山地构造地形^[28]。区内地貌错综复杂, 有岩溶高原、岩溶丘陵、岩溶盆地、断陷河谷坝等, 降水较充沛, 但是南北分布不均衡, 北湿南干, 洪涝和干旱时有发生, 山区容易发生冷害和冻害, 具有高原季风立体气候特征^[29-30]; 成土母岩主要是砂岩、页岩、泥质灰岩、灰岩、白云质灰岩、白云岩、石灰岩等^[31-32]; 土壤类型主要是红壤、黄壤, 岩溶地区广泛分布石灰土, 地下水在纯灰岩等碳酸盐地区以岩溶水为主, 非碳酸岩或碳酸岩不纯地区以裂隙水为主, 且具有多层含水的特性^[33]。区域内气候多变石漠化治理难度大, 生态恢复植被选择困难。

3.3.2 生态恢复模式及植被

滇东北由于复杂的气候条件, 区域内不同地区开展石漠化治理需充分考虑局部小气候, 以提高生态恢复成效。中低海拔干旱区, 可选用墨西哥柏(*Cupressus* sp.)、白桦(*Betula platyphylla*)、苹果(*Malus pumila*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、漆(*Toxicodendron vernicifluum*)、木棉(*Bombax malabaricum*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、白三叶(*Trifolium repens*)、红三叶(*Trifolium pratense*)等植被, 中低海拔湿润半湿润区, 植被可选用湿地松(*Pinus elliotii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、香桂(*Cinnamomum subavenium*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、猕猴桃(*Actinidia chinensis*)、龙眼(*Dimocarpus longan*)、臭荚蒾(*Viburnum foetidum*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)等, 中高山区温度低, 可选用抗寒植被, 如高山松(*Pinus densata*)、丽江云杉(*Picea likiangensis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)、苹果(*Malus* sp.)、小叶栒子(*Cotoneaster microphyllus*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)、亮绿藁草(*Carex finitima*)等。区域内石漠化植被恢复治理以人工促进为主, 生态农业为辅, 常见的治理模式有滇东北高湿低温山地生态脆弱带综合治理模式、滇东北金沙江河谷高湿高温区高效生态经济型治理模式和干热河谷花椒经济型生态林治理模式等。

3.4 滇西北高山峡谷石漠化小区

3.4.1 区域环境

该区包含云南西北部的迪庆州和丽江市的全部,

大理州北部的鹤庆县等县市;滇西北地区地处横断山脉的核心地区,金沙江、澜沧江和怒江从北向南穿流而过,为世界著名景观三江并流的中心地带区,形成了闻名于世的高山深切地貌^[34]。该区以可溶性碳酸岩为主,包括灰岩、白云岩和石灰岩等,非可溶性岩为页岩、砂岩和玄武岩等^[34]。岩溶地貌主要以岩溶盆地和断陷河谷为主,土壤类型包括燥红土(干热河谷)、红壤、黄棕壤、棕壤、暗棕壤和高山草甸土等^[11,13],岩溶地下水资源丰富,主要以泉水的形式向周边江河湖泊汇聚^[35]。滇西北受低纬度高海拔的影响,雪线以上高、中山山顶和山脊石灰岩地区,存在常年或季节性积雪,植物不能生存,石漠化无法治理,治理范围主要是雪线以下,恢复植被以温性和寒温性为主^[36]。

3.4.2 生态恢复模式及植被

区域内高海拔地区多发生低温冷害和冰雪灾害,低海拔金沙江河谷地区多发生干旱^[11]。该区常见的石漠化植被恢复模式有高海拔岩溶地区华山松生态林治理模式、坡度大于 25°、水土流失严重的坡耕地实行退耕还林治理模式、干热河谷花椒经济型生态林治理模式等。区域内土地瘠薄、极端天气较多,生态恢复多以抗寒耐旱耐瘠薄植被为主,如华山松(*Pinus* sp.)、丽江云杉(*Picea* sp.)、德钦杨(*Populus haoana*)、锥连栎(*Quercus franchetii*)、刺柏(*Juniperus formosana*)、云南铁杉(*Tsuga dumosa*)、藏刺榛(*Corylus ferox* var. *thibetica*)、高山松(*Pinus densata*)、黄杉(*Pseudotsuga sinensis*)、木棉(*Bombax* sp.)、火棘(*Pyracantha fortuneana*)、刺芒野古草(*Arundinella setosa*)、高原早熟禾(*Poa alpigena*)等。

3.5 滇西南中山宽谷石漠化小区

3.5.1 区域环境

该区包含临沧西南部的沧源、耿马、永德、镇康和保山的隆阳和施甸等县区,地处横断山系怒山脉南延部分,属滇西纵谷区,地处怒江和澜沧江水系中下游。该区发育着较好的岩溶地貌,以溶蚀洼地、峰林和峰丛为主,成土母岩主要是石灰岩、花岗岩、砂岩、页岩、片岩和片麻岩等^[13,37]。该区由于成土母岩类型多样,土壤类型较多,主要有赤红壤、红壤、黄红壤、黄壤、紫色土、水稻土、石灰土和棕壤等^[13-14,38]。当地主要受西南季风的影响,四季不分明,

但干湿季明显,全年降水量充沛,加之大小河流纵横切割,岩溶地区断头河、地下河较发育,表土易流失,加剧石漠化现象^[39]。

3.5.2 生态恢复模式及植被

该区极端气候较少发生,植物资源丰富^[40-41]。区域内河谷纵横、坡度大,石漠化治理主要以坡度大于 25°、水土流失严重的坡耕地实行退耕还林治理模式、岩溶地区生态用材林治理模式、低山丘陵区岸路沿线混交林治理模式和坡度小于 25°的耕(林)地工程改造模式等人工和生物工程治理为主,部分干热河谷区以经济型生态林治理模式为首选,如橡胶(*Hevea brasiliensis*)、澳洲坚果(*Macadamia ternifolia*)、杧果(*Mangifera indica*)、泡核桃(*Juglans sigillata*)、核桃(*Juglans regia*)、思茅松(*Pinus kesiya* var. *langbianensis*)、红椿(*Toonaciliata*)、巨龙竹(*Dendrocalamus sinicus*)、秃杉(*Taiwania flousiana*)、墨西哥柏(*Cupressus lusitanica*)、苍山冷杉(*Abies delavayi*)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、蓝桉(*Eucalyptus globulus*)、直干桉(*Eucalyptus maideni*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、皇竹草(*Pennisetum sinense*)、西南野古草(*Arundinella hookeri*)等。

4 云南石漠化地区植被恢复存在的问题及优化建议

4.1 存在的问题

(1)云南石漠化地区区划类型较为混乱,划分依据不全面和统一,尚未形成权威的划分方法。相较贵州和广西等地而言云南石漠化治理多停留在植物物种的育苗速生、耐旱和钙适应性研究,对石漠化地区岩溶水文、地质状况和区域石漠化成因研究分析较少。云南石漠化植被恢复研究不够全面,多以实际治理项目为基础开展工作,学术性等国际前沿的研究工作缺乏,且在实际治理工作中存在植被恢复治理措施较落后、先进技术运用较少等问题。

(2)石漠化植被恢复模式存在土壤立地退化、生态农业产业链脱节、林分结构不合理,植被适应程度低下等问题^[42]。如花红李经济型生态林模式存在林分结构单一、养分供需不平衡、产量降低、林地地力衰退问题,中度石漠化山地封山育林恢复植被模式存在的问题是只重视乔木层、林分稳定性差,坡度小

于25°的耕(林)地工程改造模式存在的问题是破坏了原有植被层、水土流失、土壤立地退化,退耕还林还草治理模式存在的问题是植被生长缓慢或不生长、难以成林^[43-44]。上述问题都在不同程度上制约着石漠化治理措施的有效实施。

(3)在石漠化治理过程中,物种的选取木本植物的用量和种类远多于草本植物,但由于木本植物产生经济效益的时间间隔较长,部分地区存在复垦复耕现象,植被从新遭到破坏,阻碍石漠化植被恢复进展。此外在植被选取过程中还存在一些其他问题,三七(*Panax pseudoginseng*)和橡胶(*Hevea sp.*)等经济作物和经济树种对土壤生态和土质损耗严重^[45-46];部分地区核桃(*Juglans regia*)栽培立地选择不合理,产量低^[47];某些引进生态恢复物种,如加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)、含羞草(*Mimosa pudica*)和空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)等,生态风险调查研究不充分,生态安全隐患较大等问题^[48]。

(4)石漠化治理项目区仍限于点状或线状分布,区域面貌改观不大,对行政区域及岩溶流域系统性考虑不够,治理方法存在不当等问题;且由于云南经济和社会发展相对广西、贵州等地较缓慢,调查监测方式较落后,导致综合治理无法有效落实^[12]。

4.2 优化建议

(1)对石漠化区进行科学、深入、细致和全面的研究,以水文、地质、地貌、形成原因和景观灯为划分依据,以行政区划为辅,区划出合理的石漠化区;在石漠化区植物物种适应性研究的基础上加强对其水文、土壤、地质和其他生态影响因子的研究,如重金属含量、碳汇、石漠化演变规律和生态服务功能等的研究^[49-52]。植被恢复过程中融合人工智能、大数据、3S等地空天一体化技术,多尺度、多要素、全方位实现石漠化长效治理^[53]。

(2)在立地调查、地力评价及土壤养分供应水平诊断的基础上,人为调控水、肥协同供应,实现水肥耦合效应^[54-55],解决水、肥供给不匹配的问题,促进植物生长和植被恢复建设,提高生产力水平,植被恢复治理过程中纠正传统单一树种种植局面,扭转过分追求经济效益的错误做法,适度开发生态产业及旅游,形成结构合理、功能完善的生态产业链,增加植被修复后的生态经济效益,提高生态系统的稳定性和自我调节能力;在林分结构配置时,选择适应性等

级高的物种,提高自适应能力,降低人为促进自然恢复过程的复杂程度和周期,促进林分自然恢复,对低适应型植物群落,从物种水平分析其适应能力低的原因,有针对性地采取群落结构优化调整措施,调整树种组成和配置^[44]。

(3)进行石漠化植被恢复的过程中,提高生态补助标准,拓展农民经济收入来源。由于草本植物产生经济收益时间短,在乡土树种开发利用的基础上,扩大对草本的研究利用,尤其是工业原料和药用草本,如青香茅(*Cymbopogon caesius*)、芸香草(*Cymbopogon distans*)、金钩如意草(*Corydalis taliensis*)、金铁锁(*Psammosilene tunicoides*)、马鞭草(*Verbena officinalis*)等^[56];解决工业和药物原材料来源紧缺的问题,增加农户经济收入,降低或消除复垦复耕现象。加强农林用地土壤机理研究,实行轮作制度,避免连作对土壤造成不可逆转的损耗破坏,对外来引进种慎重使用,在其生态特性保证安全时,可小面积或局部推广使用。

(4)石漠化植被恢复应坚持区域规划,以行政区域和岩溶流域为单元进行综合治理,大力发展经济,提高社会生产力,切实有效解决人口—经济—生态三者矛盾。石漠化植被恢复要认真落实调查研究和监测工作,保证恢复工作和效益评估的真实性和科学性,实现生态文明建设可持续发展。

参考文献

- [1] 刘拓,周光辉,但新球,等.中国岩溶石漠化:现状、成因与防治[M].北京:中国林业出版社,2009:73.
- [2] 王德炉,朱守谦,黄宝龙.贵州喀斯特区石漠化过程中植被特征的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2003,27(3):26-30.
WANG Delu, ZHU Shouqian, HUANG Baolong. Changes of vegetation features of rocky desertification process in karst area of Guizhou[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2003, 27(3): 26-30.
- [3] 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.
- [4] 我国岩溶地区石漠化状况公报[N].中国自然资源报,2019-01-09(5).
- [5] 云南省石漠化状况公报[EB/OL].云南省林业和草原局,2019-6-17. <http://www.ynly.gov.cn/8415/8443/91334.html>.
- [6] 李瑞玲,王世杰,周德全,张殿发,李凤全,周忠发,熊康宁.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J].地理学报,2003,58(2):314-320.
LI Ruiling, WANG Shijie, ZHOU Dequan, ZHANG Dianfa, LI

- Fengquan, ZHOU Zhongfa, XIONG Kangning. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 314-320.
- [7] 周锦忠, 吕英娟. 石漠化的成因机理与防治对策[J]. 湖南地质, 2003, 22(1): 43-46.
- ZHOU Jinzhong, LYU Yingjuan. Discussion on the origin, mechanism, prevention, management of becoming rock desert[J]. *Hunan Geology*, 2003, 22(1): 43-46.
- [8] 印贤波, 王杰亭, 刘争. 滇东南南部老君山地区成矿地质特征[J]. *西部资源*, 2018(3): 21-23.
- [9] 薛亮, 任华东, 李生, 姚小华. 西南喀斯特石漠化地区生态恢复研究进展[C]//中国科协年会: 中国西部生态林业和民生林业与科技创新学术研讨会, 2013: 5.
- [10] 但新球, 喻魁, 吴协保, 宁小斌. 我国石漠化区域划分及造林树种选择探讨[J]. *中南林业调查规划*, 2003(4): 20-23.
- [11] 陈强. 云南岩溶地区石漠化生态治理模式及技术[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2010.
- [12] 王宇, 张华, 张贵, 彭淑惠, 杨文礼, 蔡保新, 冯敏, 王梓澈. 云南省石漠化调查及治理综述[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 486-496.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, PENG Shuhui, YANG Wenli, CAI Baoxin, FENG Min, WANG Ziwei. Review of the investigation and integrated renovation on rocky desertification in Yunnan Province, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 486-496.
- [13] 李乡旺, 卢素娟, 王妍. 云南石漠化综合治理区域划分[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 44-50.
- [14] 罗文生, 宋维峰, 尹义发. 云南石漠化防治现状[J]. *亚热带水土保持*, 2010, 22(1): 27-30, 55.
- [15] 云南省林业厅. 云南省岩溶地区第三次石漠化监测报告[R]. 昆明: 云南省林业厅, 2017: 17-19.
- [16] 胡培兴, 白建华, 但新球, 等. 石漠化治理树种选择与模式[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015: 207-245.
- [17] 祝列克. 岩溶地区石漠化防治实用技术与治理模式[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 38-60.
- [18] 叶喜青. 龙门县矿区石漠化治理及造林技术[J]. 广东林业科技, 2013, 29(5): 72-75.
- YE Xiqing. Rocky desertification control and afforestation techniques in mining area of Longmen[J]. *Guangdong Forestry Science and Technology*, 2013, 29(5): 72-75.
- [19] Gosai K, Arunachalam A, Dutta B K. Tillage effects on soil microbial biomass in a rainfed agricultural system of northeast India[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 109(2): 68-74.
- [20] 王宇, 张贵, 张华, 等. 云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 15-21.
- [21] 王宇, 张华, 张贵, 王波, 彭淑惠, 何晓生, 周翠琼. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- WANG Yu, ZHANG Hua, ZHANG Gui, WANG Bo, PENG Shuhui, HE Raosheng, ZHOU Cuiqiong. Zoning of environmental geology and functions in karst fault-depression basins[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(3): 283-295.
- [22] 赵磊磊, 雷艳娇, 陈俊松, 朱仕荣, 周建洪, 唐芳林, 蓝芙宁, 曹建华. 云南红河州石漠化演变过程及其综合治理成效[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 704-712.
- ZHAO Leilei, LEI Yanjiao, CHEN Junsong, ZHU Shirong, ZHOU Jianhong, TANG Fanglin, LAN Funing, CAO Jianhua. Evolution process and comprehensive control of rocky desertification in Honghe state, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 704-712.
- [23] 苏春田, 潘晓东, 李兆林, 唐建生, 梁小平, 程洋, 赵伟, 谢代兴, 孟小军. 云南广南岩溶区水文地质环境地质调查进展[J]. *中国地质调查*, 2015, 2(8): 9-16.
- SU Chuntian, PAN Xiaodong, LI Zhaolin, TANG Jiansheng, LIANG Xiaoping, CHENG Yang, ZHAO Wei, XIE Daixing, MENG Xiaojun. Progress of hydrogeology and environmental geology survey in Guangnan karst area, Yunnan Province[J]. *Geological Survey of China*, 2015, 2(8): 9-16.
- [24] 赵勇. 滇东山区水库岩溶渗漏系统工程地质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [25] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7103-7108.
- CAO Jianhua, DENG Yan, YANG Hui, PU Junbing, ZHU Tongbin, LAN Funing, HUANG Fen, LI Jianghong. Rocky desertification evolution, treatment technology and demonstration in karst faulted basins, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [26] 曹光秀, 赵洋毅, 段旭, 薛杨. 滇中高原常绿阔叶林对天然降雨雨滴动能的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 146-151, 159.
- CAO Guangxiu, ZHAO Yangyi, DUAN Xu, XUE Yang. Effect of evergreen broad-leaved forest on kinetic energy of natural rainfall raindrop in central Yunnan plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 146-151, 159.
- [27] 李乡旺, 陆素娟. 云南石漠化区划研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2019, 39(2): 1-10, 2.
- LI Xiangwang, LU Sujuan. Regionalization of stony desertification in Yunnan Province[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2019, 39(2): 1-10, 2.
- [28] 黄钊, 徐正会, 刘霞, 李丽梅, 王亚丽, 史生慧, 石云, 陈志峰. 滇东北地区的蚂蚁物种多样性[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3697-3705.
- HUANG Zhao, XU Zhenghui, LIU Xia, LI Limei, WANG Yali, SHI Shenghui, SHI Yun, CHEN Zhifeng. Ant species diversity in northeastern Yunnan[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3697-3705.
- [29] 金梦迪. SPOT-6 影像在喀斯特石漠化遥感解译中的应用: 以云南昭通地区为例[C]//云南省首届青年地质科技论坛优秀学术论文论文集. 云南省科学技术协会, 2017: 9.
- [30] 代俊, 肖之强, 马晨晨, 侯淑娜, 侯昭强, 石明, 杜凡. 滇东北植物区系新资料[J]. *浙江林业科技*, 2016, 36(5): 69-76.
- DAI Jun, XIAO Zhiqiang, MA Chenchen, HOU Shuna, HOU Zhaoqiang, SHI Ming, DU Fan. New information of flora in the northeast of Yunnan[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science*

- and Technology, 2016, 36(5): 69-76.
- [31] 杨平, 汪正江, 余谦, 刘伟, 熊国庆, 刘家洪, 何江林. 滇东北木杆向斜奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 石油实验地质, 2019, 41(5): 638-647.
YANG Ping, WANG Zhengjiang, YU Qian, LIU Wei, XIONG Guoqing, LIU Jiahong, HE Jianglin. Evaluation of shale gas potential in Ordovician Wufeng–Silurian Longmaxi formations, Mugan syncline, northeastern Yunnan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5): 638-647.
- [32] 陈庆松, 杨润柏, 刘德民, 陶兰初. 滇东北会泽灯影组硅质岩成因及沉积环境: 来自岩石学和地球化学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1327-1337.
CHEN Qingsong, YANG Runbai, LIU Demin, TAO Lanchu. Petrogenesis and sedimentary environment of cherts of Dengying Formation in Huize county, Northeastern Yunnan: Evidence from petrology and geochemistry[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(5): 1327-1337.
- [33] 郑荣椿. 云南昭通第三纪褐煤盆地成因的探讨: 对“岩溶侵蚀盆地”成因的异议[J]. 中国岩溶, 1985, 4(Suppl.1): 161-170.
ZHENG Rongchun. Discussion on the origin of Tertiary Lignite basin of Zhaotong county, Yunnan: Some objections to the origin of "erosion karst basin"[J]. Carsologica Sinica, 1985, 4(Suppl.1): 161-170.
- [34] 蒋仁菲, 徐成东, 冯建孟. 滇西北地区蕨类植物物种多样性和区系组成[J]. 生态科学, 2015, 34(5): 71-76.
JIANG Renfei, XU Chengdong, FENG Jianmeng. Species diversity and floristic composition of pteridophyte in northwest Yunnan[J]. Ecological Science, 2015, 34(5): 71-76.
- [35] 刘芮彤, 王锦国, 周云, 黄华, 陈长生. 云南鹤庆西山岩溶地下水均衡模拟[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 532-538.
LIU Ruitong, WANG Jinguo, ZHOU Yun, HUANG Hua, CHEN Changsheng. Simulation of karst groundwater balance in the Westshan mountains, Heqing county, Yunnan Province[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(4): 532-538.
- [36] 黄娟. 滇西北植物多样性特征[J]. 云南林业科技, 2000(4): 41-45.
HUANG Juan. Characteristics of plant biodiversity in northwestern Yunnan[J]. Yunnan Forestry Science and Technology, 2000(4): 41-45.
- [37] 王磊, 王加昇, 王雷, 郭泽华, 韩润生, 刘飞, 崔峻豪. 滇西南澜沧江带红豆山铜矿花岗斑岩地质地球化学特征及成岩时代[J]. 地质通报, 2017, 36(7): 1231-1241.
WANG Lei, WANG Jiasheng, WANG Lei, GUO Zehua, HAN Runsheng, LIU Fei, CUI Junhao. Geological and geochemical characteristics and age of granite porphyry in the Hongdoushan copper deposit, south Langcangjiang belt, western Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(7): 1231-1241.
- [38] 赵筱青, 杨树华. 滇西南亚热带山地主要植被类型下土壤微量元素状况研究[J]. 水土保持研究, 2008(5): 140-144.
ZHAO Xiaqing, YANG Shuhua. Research on the microelements in the soil of the main vegetation types in the subtropical mountainous zone of southwest Yunnan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008(5): 140-144.
- [39] 赵平伟, 李宏波, 郭萍, 杨文. 滇西南地区NDVI变化及其对不同时间尺度干湿变化的响应[J]. 山地学报, 2018, 36(2): 229-238.
ZHAO Pingwei, LI Hongbo, GUO Ping, YANG Wen. Changes in NDVI and its response to changes in dry and wet weather at different time scales in the southwestern Yunnan, China[J]. Mountain Research, 2018, 36(2): 229-238.
- [40] Gao Lunlun, Wei Neng, Yang Guoping, Zhang Zhenxian, Liu Guizhou, Cai Chuantao. Ethnomedicine study on traditional medicinal plants in the Wuliang Mountains of Jingdong, Yunnan, China[J]. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 2019, 15(1): 1-20.
- [41] 李少娟, 黄樱, 屠拉. IPCC AR4 气候多模式对云南特征气温变化的模拟预估: 滇西南区案例分析(1960-2050年)[J]. 资源与生态学报(英文版), 2012, 3(1): 33-42.
LI Shaojuan, HUANG Ying, TU La. Projection of IPCC AR4 coupled climate models for multitime scale temperature variation in Yunnan: A case study on southwest Yunnan from 1960 to 2050[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 33-42.
- [42] 杨苏茂, 熊康宁, 喻阳华, 刘兴宜, 董晓超. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 91-96.
YANG Sumao, XIONG Kangning, YU Yanghua, LIU Xingyi, DONG Xiaochao. Identification and modification of vegetation recovery model at China's karst rockified areas[J]. World Forestry Research, 2017, 30(3): 91-96.
- [43] 刘拓, 周光辉. 石漠化综合治理模式[M]. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [44] 高吉喜. 西南山地退化生态系统评估与恢复重建技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [45] 孙雪婷, 龙光强, 张广辉, 孟珍贵, 陈中坚, 杨生超, 陈军文. 基于三七连作障碍的土壤理化性状及酶活性研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 409-417.
SUN Xueting, LONG Guangqiang, ZHANG Guanghui, MENG Zhengui, CHEN Zhongjian, YANG Shengchao, CHEN Junwen. Properties of soil physical-chemistry and activities of soil enzymes in context of continuous cropping obstacles for panax notoginseng[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 409-417.
- [46] 孙燕瓷, 马友鑫, 曹坤芳, 李红梅, 何建芬, 刘昌平, 刘洪平, 李斌. 西双版纳长期橡胶种植对土壤固碳和氮的影响研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 412-419.
SUN Yanci, MA Youxin, CAO Kunfang, LI Hongmei, HE Jianfen, LIU Changping, LIU Hongping, LI Bin. Impacts of long-term rubber plantation on soil carbon and nitrogen sequestration in Xishuangbanna[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 412-419.
- [47] 宋盛中. 镇雄县核桃产业发展现状及对策研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(11): 191-193, 224.
SONG Shengzhong. Current situation and countermeasures of

- walnut industry in Zhenxiong county[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(11): 191-193, 224.
- [48] 何山. 外来植物引进的风险评估体系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [49] 孔玮琳, 叶丽丽, 李顺安, 袁贤斌, 蒋金平. 水稻秸秆炭及组合改良剂对石漠化地区土壤—玉米系统中重金属迁移特征影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(8): 4815-4823.
- KONG Weilin, YE Lili, LI Shunan, YUAN Xianbin, JIANG Jin-ping. Effects of straw biochar and amendments on heavy metals translocation in corn-soil system in rocky desertification area[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(8): 4815-4823.
- [50] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 杨奇勇. 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.
- ZENG Faming, WU Zeyan, ZHANG Cheng, YANG Qiyong. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 67-73.
- [51] 王明明, 王世杰, 白晓永, 李世杰, 李汇文, 操玥, 习慧鹏. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(16): 6083-6097.
- WANG Mingming, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, LI Shijie, LI Huiwen, CAO Yue, XI Huipeng. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(16): 6083-6097.
- [52] 王克林, 岳跃民, 马祖陆, 雷廷武, 李德军, 宋同清. 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.
- WANG Kelin, YUE Yuemin, MA Zulu, LEI Tingwu, LI Dejun, SONG Tongqing. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in karst peak-cluster depression regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(22): 7098-7102.
- [53] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- HE Xiaojia, WANG Lei, KE Bing, YUE Yuemin, WANG Kelin, CAO Jianhua, XIONG Kangning. Progress on ecological conservation and restoration for China karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [54] Gray J E, Hetherington A M. Plant development: YODA the stomatal switch[J]. *Current Biology*, 2004, 14(12): 488-490.
- [55] 董雯怡. 毛白杨苗期水肥耦合效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 2-5.
- DONG Wenyi. Study on coupling effects of water and fertilizer on *Populus tomentosa* seedlings[J]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011: 2-5.
- [56] 中国科学院中国植物志委员会. 中国植物志. 第七卷—第八十卷[M]. 北京: 科学出版社, 1961-2002.

Vegetation restoration model and suggestions on its optimization in rocky desertification areas of Yunnan Province

DUAN Huachao¹, ZHENG Xinhua¹, LI Shimin¹, LI Yanyan¹, YE Lan¹,
JING Huizhu¹, LUO Runwen², TANG Yong³, DONG Qiong¹

(1. Faculty of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Forestry Station of Bamei Town, Guangnan County, Guangnan Yunnan 663300, China; 3. Forestry Bureau of Luoping County, Luoping, Yunnan 655800, China)

Abstract Yunnan is located in the center of the east-Asian karst area, one of the three largest karst areas in the world. Rocky desertification is widespread in the area, which seriously restricts the sustainable development of local social economy. In this study, we summarize the research status and achievements of rocky desertification in Yunnan mainly from three aspects, rocky desertification zoning, governance model and vegetation restoration in rocky desertification areas. The results show that rocky desertification areas in Yunnan are divided into 2 large areas and 5 small ones. After years of exploration, 23 kinds in 4 categories of rocky desertification control models have been formed, and 435 kinds of plant species can be used for ecological restoration in rocky desertification areas, including 376 species of shrubs and 59 species of herbs. Finally, combined with geographical location, climate and altitude, this paper preliminarily summarizes the suitable restoration vegetation, and points out the shortcomings in the studies on the control of rocky desertification, so as to provide an important theoretical reference for the subsequent research on the restoration and control of rocky desertification vegetation.

Key words Yunnan, rocky desertification, control model, vegetation

(编辑 张玲)