

广西岩溶山地生态系统特征与恢复重建*

Evolution and Ecological Processes of Karst Ecosystem of Guangxi

李先琨¹, 何成新¹, 唐建生², 蒋忠诚², 黄玉清¹

LI Xian-kun¹, HE Cheng-xin¹, TANG Jian-sheng², JIANG Zhong-cheng², HUANG Yu-qing¹

(1. 中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004)

(1. Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and CAS, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin, Guangxi, 541004, China)

摘要: 阐述广西岩溶生态系统主要特征和岩溶植被的演替过程, 介绍广西岩溶地区生态恢复与综合治理的技术, 为岩溶山地生态系统的恢复和重建提供借鉴和指导。

关键词: 岩溶生态系统 特征 生态过程 恢复 重建

中图分类号: S759.92 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2008)01-0080-07

Abstract The essential characteristics of eco-environment and the processes in karst region of Guangxi are reviewed. On the basis of the survey of various karst communities of Guangxi, the natural distribution and evolution of karst vegetation have a certain regulation. And then, some solutions about rehabilitation in Karst areas are discussed. Finally, some suggestions and opinions about ecological rehabilitation as well as the research trends in the future are put forward.

Key words karst ecosystem, characteristic, ecological process, restoration, rehabilitation

岩溶生态系统是地球表层系统的重要组成部分。在北回归线附近, 有一条由中国碳酸盐岩堆积区向西、经中东到地中海的碳酸盐岩分布带, 并与大西洋西岸隔海相望^[1]。

全球岩溶面积达 $2200 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占陆地面积的 15%^[2], 而生活在岩溶地区的 10 亿人口的社会水平都低于平原地区和沿海地区^[3]。因此, 碳酸盐岩分布的广泛性和岩溶地区存在的生态环境问题, 使岩溶形成、演化的研究与岩溶地区的生态重建在世界范围内具有借鉴性和示范性。

我国是一个岩溶大国, 岩溶面积 $334 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土面积的 $1/3$ ^[4]。以贵州为中心的中国西南岩溶区是全球 3 大块岩溶集中分布区 (欧洲地中海沿岸、

美国东部、中国西南部) 之一^[5], 其面积达 $54 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中滇、黔、桂、湘碳酸盐岩出露面积 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占该区总面积的 36%^[6,7]。广西岩溶面积为 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占广西全区总面积 41%。岩溶赖以发育的物质基础——碳酸盐岩以层厚、质纯为其特点, 累计厚度超过万米, 又长期处于热带和亚热带气候, 所以岩溶特别发育。世界著名岩溶学家、前国际洞穴协会主席 D. C. Ford 认为, 从广西桂林到南宁一带是世界上岩溶地貌发育最好的地区; 桂林则以其秀美奇特的峰林景观闻名于世。

岩溶生态系统以岩溶地质环境为基础, 强烈的人类活动为驱动力, 导致生态系统生产力退化, 呈现出独特的大面积石漠化景观。据国土资源部航遥中心遥感调查资料, 中国西南岩溶区岩石裸露率 > 30% 的石漠化面积达 $10.55 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占岩溶区面积的 17.5%^[8,9]。脆弱的岩溶生态环境导致该地区经济欠发达, 贫困人口集中。根据“八七扶贫攻坚计划”中确定的国定贫困县, 全国 592 个, 分布于土地面积占全国的 20% 的西南区的贫困县有 225 个, 占全国的 38%, 其

收稿日期: 2007-08-21

修回日期: 2007-10-17

作者简介: 李先琨 (1967-), 男, 研究员, 主要从事恢复生态学、植被生态学、环境生态学等领域的研究。

* 国家科技支撑计划 (2006BAC01A-10), 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-08-02), 广西应用基础研究专项 (桂科基 0575116), 中国科学院“西部之光”项目资助。

中碳酸盐岩分布面积 > 30% 的岩溶县 292 个, 其中贫困县 131 个, 占西南总贫困县数的 58%^[10]。岩溶生态系统生境异质性明显, 生物多样性丰富, 特有成分突出, 地域性植被保存的类型多样, 岩溶植被的自然分布与演替过程有一定的规律性。广西在治理岩溶山区水土流失和石漠化治理问题方面取得了一些宝贵的经验。本文阐述广西岩溶生态系统主要特征和岩溶植被的演替过程, 介绍广西岩溶地区生态恢复与综合治理的技术, 为岩溶山地生态系统的恢复和重建提供借鉴和指导。

1 广西岩溶生态系统的主要特征

广西岩溶地貌特别发育, 形成了峰丛洼地、峰林谷地、岩溶丘陵和峰林平原 4 种典型的岩溶地貌类型。广西岩溶地貌景观举世闻名, 但生态环境也非常脆弱, 比较普遍的生态环境问题有: (1) 石漠化严重。根据中国地调局调查资料, 2000 年广西石漠化面积为 $2.73 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 11.6%, 分布于 79 个县(市、区)。(2) 岩溶干旱导致缺水。虽然广西岩溶地区降雨量丰富, 但十分发育的地下岩溶空间导致大气降水 → 地表水 → 地下水的快速转化, 同时人类对地表植被的掠夺性破坏和不合理的土地开发加剧了石漠化的发展, 进一步削弱了地表水源涵养和调蓄能力, 使旱涝灾害更为突出。(3) 水土流失。桂西石漠化区是广西水土流失的重点地区, 红水河流域水土流失面积占土地总面积的 25% 以上, 年均侵蚀模数为 1622 t/km^2 。泥沙淤积危害沿河水电工程效能和生态安全。(4) 洼地内涝灾害频繁。岩溶山区因水土流失严重, 造成洼地排水通道淤塞, 致使洪涝频繁。(5) 土壤贫瘠。广西 25 个国家扶持岩溶贫困县的耕地占土地总面积的 9%, 岩溶山区造壤能力差, 坡地土壤少, 土壤层较薄而不连续, 以碱性或中性石灰土及粗骨土为主, 土壤熟化程度和肥力低, 岩溶渗漏致使土层水肥保持能力差, 土壤贫瘠。(6) 生态效率和土地生产率低。由于岩溶作用强烈, 水土流失严重, 树木生长缓慢, 生态效率低, 加上人口密集, 居民对森林的砍伐和环境的破坏, 岩溶山地森林覆盖率极低。随着社会经济发展, 人口压力大, 经济增长与资源、环境和资金的矛盾相当尖锐, 面临的生态危机日益严重。

1.1 岩溶环境具有富钙偏碱的特性

岩溶生态系统的富钙性来源于碳酸盐岩的富钙性, 与玄武岩、花岗岩相比, 其钙、镁含量高^[11, 12]。这就构成了岩溶生态系统的富钙性。并在大气圈、水圈、生物圈都有明显的表现: 大气降水, 由于雨点总是围绕着尘粒, 而岩溶生态系统中的大气尘粒常是钙质

的, 以致雨水中含有较高的钙, 广西岩溶地区的雨水中的钙含量达 $2.9 \sim 6.0 \text{ mg/L}$, 非岩溶地区雨水中钙离子含量常低于 1 mg/L ; 岩溶水, 尤其是岩溶地下水是重碳酸根水, 其含量达 $50 \sim 120 \text{ mg/L}$ ^[13-15]。

岩溶生态系统的偏碱性主要表现在岩溶水。石灰土的 pH 值偏高。石灰岩与白云岩表层泉水 pH 值与 Ca^{2+} 浓度比砂页岩裂隙水明显偏高, 就全年平均而言, 石灰岩表层泉水 pH 值比砂页岩裂隙水高 0.47, Ca^{2+} 浓度高 45.77 mg/L ; 白云岩表层泉水 pH 值比砂页岩裂隙水高 0.89, Ca^{2+} 浓度高 43.35 mg/L 。这就从水化学方面揭示了岩溶生态系统的偏碱性和富钙性^[10]。

1.2 碳酸盐岩风化成土缓慢、侵蚀严重

碳酸盐岩为可溶岩, 其酸不溶物是其土壤发育的主要物质基础, 土壤是岩溶生态系统中的重要组分, 因此碳酸盐岩的类型不同、纯度的高低、酸不溶物含量的多少, 对岩溶生态环境将产生重要的影响。研究结果显示: 华南区碳酸盐岩的成分比较简单, 酸不溶物含量普遍较低。碳酸盐岩的风化成土过程首先是碳酸盐岩的化学溶蚀过程, 通过对典型碳酸盐岩酸不溶物及上覆土壤的矿物学和微量元素地球化学的研究表明: 形成 1m 厚的土层在广西岩溶区需要 $25 \sim 85$ 万年, 在贵州岩溶区需要 $63 \sim 788$ 万年^[2, 16]。同时, 岩溶区的水土流失危害性更严重, 按石灰土容重 1.7 t/m^3 计, 则黔桂地区碳酸盐岩风化成土速率为 $6.8 \sim 0.21 \text{ g/m}^2 \cdot \text{a}$ 。而据流经贵州、广西主要岩溶区河流的悬移质估算的土壤侵蚀模数为 $56 \sim 129 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ ^[17], 即土壤侵蚀量是岩石风化成土量的几十乃至几百倍^[3]。

2 岩溶环境与植被演变过程

2.1 岩溶生境异质性明显、生物多样性丰富

广西岩溶地区地形破碎, 广泛分布着山地、峰丛、洼地、峰林、盆地、峡谷、石林等多种地貌形态, 形成多种多样地域性小气候类型。小生境的多样性导致群落组成物种的复杂性。以木论岩溶森林植被为例, 该林区植物以亚热带成分为主, 热带成分次之, 温带成分也有一定的比例, 其区系主要为泛北极植物区中国-日本森林植物亚区滇黔桂地区的成分, 有野生维管束植物 908 种, 脊椎动物 260 种, 昆虫 410 种, 其中国家级保护的动植物数十种, 并发现多个新种^[18]。小生境的多样性也导致了生态类型的多样性, 从旱生植物到湿生植物、喜光植物到耐阴植物, 生态幅度较大的植物到狭生的喜钙植物都有分布, 它们分别占据与其特性相应的小生境^[19, 20]。

岩溶山地的地形地貌很复杂,生境的异质性程度高,不同地段、不同坡向、坡位的小生境均存在差异。小生境受多种因素影响,变化多样。土壤水分亏缺的时空异质性特点突出,小生境间资源分配、植物组成具有明显差异,生境的异质性可影响植物多样性的形成,甚至成为植物多样性维持的主导因子。

由于环境梯度的变化,沿环境梯度物种分布出现替代现象。例如,桂西南弄岗自然保护区的原生植被沿环境梯度样地间物种丢失数($g(H)$)和增加数($I(H)$),相邻样地间的变异值为8.5~12.5,物种沿环境梯度具有明显的替代趋势。地形对于植物群落中物种替代和分布的影响在两个方面:一方面是地形的直接影响,这里可能是坡度、坡形,它直接影响着植被的立地条件;另一方面,地形因素影响着其它非生物资源的分配,如光照、温度、水分及土壤资源的再分配。一般认为上坡位(近山顶处)光照较强、水分较差、湿度偏低、昼夜温差较大,土层薄、肥效低;中坡位次之;下坡位则相反。当然,这些条件也是相对的,并且受到研究尺度划分的影响。物种沿环境梯度的替代,乔木树种表现强烈,在不同地段重复出现的植物类型表现为灌木树种大于乔木树种,也就说灌木树种是沿海拔变化出现较多的连续分布物种。

桂西南岩溶区是我国14个具有国际意义的生物多样性地区之一。这个区域包括广西西南部左右江流域一带,21°98′~23°28′N,105°40′~108°6′E,区内地势表现为西北高(海拔1000~1300m)、东南低(海拔100~500m),岩溶地层为泥盆系至二叠系的石灰岩、白云岩,层厚而质纯,岩溶地貌发育完整:主要为峰丛洼地、峰林和槽形谷地,岩溶地形占据一半以上的面积,并常与由花岗岩变质岩和砂页岩所构成的丘陵山地呈镶嵌分布。本区的植物种类繁多,仅高等植物估计达到3000种左右,80%以上属于热带成分,主要属于印度马来西亚植物区系中越边植物区系州的成分,特有植物和濒危植物极为丰富。世界自然基金会(WWF)曾对我国生物多样性保护区域进行评估,广西具有全球保护意义或具有重要保护潜力的保护区域9处,全部分布在桂西南岩溶区^[21]。

2.2 岩溶植被的演替过程

广西是全国植被类型最齐全和最丰富的省(区)之一,广西岩溶区有高等植物4000多种,其中包含许多价值很高的资源植物和珍稀植物,仅药用植物就有2000多种^[22]。岩溶植被是一种地域性而非地带性植被^[22],它的出现主要不是受气候的制约,而是受地域性环境,如地质等的影响。岩溶植被是在岩溶地质环

境条件下产生的,一类与代表当地气候的、地带性植被不同的植被类型,但不同气候带的岩溶植被也有不同的区系成份、结构和外貌,因此岩溶植被还是带有地带性的烙印。广西岩溶植被类型可划分为5个植被型组、8个植被型,共96个群系,其中针叶林4个群系,阔叶林55个群系,竹林2个群系,灌丛28个群系,草丛7个群系,一些群系还可以划分为若干个群落^[20]。

广西岩溶植被的纬度分布从南至北为:季节性雨林→含热带成份的常绿落叶阔叶混交林→常绿落叶阔叶混交林。季节性雨林分布在北热带,含热带成份的常绿落叶阔叶混交林(是指有热带种类为共优种的类型)分布在南亚热带,常绿落叶阔叶混交林分布在中亚热带。次生类型同样有相应的分布规律,从南至北由次生季雨林变化为暖性落叶阔叶林;热性藤刺灌丛变化为暖性藤刺灌丛,次生季雨林分布在北热带;暖性藤刺灌丛分布在亚热带。广西南亚热带东部(湿润)亚区域的岩溶地区,海拔700m以上的植被为中亚热带常绿落叶阔叶混交林,但到了西部(半湿润)亚区域,常绿落叶阔叶混交林发生种类的变化。北热带岩溶地区季节性雨林垂直变化大体上可以概括为:海拔700m以下区域为季节性雨林,上升至海拔700m~1000m时,变化为含热带成份的常绿落叶阔叶混交林,海拔1000m~1300m,变化为常绿落叶阔叶混交林。南亚热带岩溶山地的含热带成份的常绿落叶阔叶混交林,也在海拔700m以上变化为常绿落叶阔叶混交林。限于严酷的岩溶山地条件,广西岩溶山地植被的树木胸径、树高生长具有速率慢、绝对生长量小,但生长量稳定、波动较小,以及种间、个体间生长过程差异较大的特点。木论岩溶森林的研究结果:圆果化香(*Platycarya longipes*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)林的乔木层地上部总生物量为164.076 t/hm²,山脊针阔叶混交林乔木层地上部分生物量为102.08 t/hm²,土层较厚的岩溶漏斗森林生物量为147.74 t/hm²^[18]。

从广西现存植被的分布状况和特征可略见岩溶石山区植被恢复的难度。广西在20世纪50~80年代森林遭受几次大规模的砍伐,在80年代中后期实施封山育林,恢复至今岩溶石山区与非岩溶区有较大的差异:岩溶区灌丛平均覆盖率为14.81%,森林覆盖率平均为12.13%;而非岩溶区的灌丛群落覆盖率仅为1.92%,森林覆盖率达到31.32%。

广西岩溶植被退化过程大致为:山地季节性雨林→常绿落叶阔叶混交林→砍伐破坏→次生季雨林。

落叶阔叶林→反复破坏→藤刺灌丛→火烧→草坡 退化植物群落也可自然恢复顺向演替,即草本群落阶段、灌草群落阶段、灌木灌丛阶段、灌乔过渡阶段、乔林阶段、顶级常绿落叶阔叶混交林阶段。文献 [23] 研究表明,退化群落恢复初期,群落种类组成中各适应等级种组的比例不同,对退化群落结构功能恢复速度、程度的影响不同。

石漠化岩溶区缺水、少土,立地条件极其恶劣,植被生存生长缺乏必要的物质基础。通过封山育林,经过数十年甚至上百年,植被可以依靠仅有的石缝土顽强地生长起来,之后根系直接利用各种裂隙在岩层形成巨大的生态空间,以支持高大的树体和获取水分和营养物质。目前,岩溶区利用人工植树造林,使植物在岩石表层上直接生长起来的难度非常大,现在还没有大面积造林成功的先例 [23]。

在岩溶植被的顺向演替过程中,群落小环境由高温低湿的旱性环境逐渐向低温高湿的荫蔽环境发展 [24]。区智等 [25] 对桂西南弄岗自然保护区及其周边地区的岩溶植被演替的主要阶段物种多样性特征进行研究,发现草本层为由草丛阶段向灌草丛阶段增加,达到灌丛阶段又相对下降,继续演替下去则增加;灌木层为从草丛阶段开始不断增加在灌丛阶段达到最大,往后演替又有所降低;乔木层为从先锋群落阶段向亚顶极群落阶段增加,在亚顶极群落就达到最大值,到顶极有所下降,但乔木层物种多样性的变化,不是群落的衰退,而是表明群落的成熟和稳定。

2.3 岩溶植被的生态适应性

不同的植被类型由于生境条件的不同和本身的选择吸收能力不同,残落物中灰份元素含量也会有差异。石灰岩上生长的常绿阔叶林中其残落物 CaO 的含量就要比生长在酸性土上的高 3 倍 [10]。岩溶植被对高钙环境的适应具有多种对策,比如叶表皮存在草酸钙结晶 [26]。

由于岩溶地区发育地下排水系统,加上土层薄,岩石裸露,地表蒸发强烈,降雨时地表水常沿溶蚀裂隙、落水洞等很快向地下漏失,只有少量的水保存在土壤表层岩隙森林生态系统中。因此,在岩溶区生长的植物常表现不同的旱生性。为了适应这种水分供应不足的生境,岩溶植被在长期的演化过程中形成各种各样的适应性。植被吸收的 90%~95% 的水分都因蒸腾作用而散失到大气中去,因此植物为了降低它的蒸腾速度形成各种结构的变化,如缩小的叶面积、加厚的角质层、凹陷的气孔和毛或气孔仅存在叶的下面且数目较少 [27,28]。

对平果岩溶生态治理示范区石灰土上生长的任

豆 (*Zenia insignis*)、黄皮 (*Claucaena lansium*) 进行根叶解剖的结果表明,任豆营养器官具有明显的抗旱结构,主要表现在根和叶的维管束发达,导管分布多;根表皮具有较多的根毛,增强了根的吸水力;根外皮层细胞壁加厚,使根具有很强的穿透力;叶有多层栅栏细胞;栅栏组织与海绵组织之比值高;叶表皮细胞外壁角质层厚,表明任豆具有抗旱的结构特征,属避旱性植物。在无籽黄皮根的初生结构中,根有四原型,五原型,六原型 3 种;叶为异面叶,叶肉细胞强烈分化,栅栏组织发达,大部分具有 2 层栅栏细胞,少为 1 层或 3 层;海绵组织排列紧密,胞间隙小;栅栏组织和海绵组织均富含叶绿体,叶肉有较多晶簇细胞;叶脉维管束较发达;气孔只见于叶下表皮有分布,为不规则型,气孔密度较大,表明无核黄皮根、叶具有明显的抗旱特征,也属一种避旱型植物。

岩溶植物具有发达的根系,以增大根与岩石的接触面,大多数植物能使根系穿插于岩石裂隙中,有的植物如斜叶榕 (*Ficus cyrtophylla*) 其根系则沿着岩石表面大量生长,增大与岩石的接触面来扩大水分和养分的吸收面积和固着能力。而假苹婆 (*Sterculia lanceolata*) 的根系能从岩石陡峭的段面上,下垂到几米以下的地面,这些根系暴露与空气中因经常有水分沿根流而使其不致枯死 [10]。有的植物还能沿裂隙穿过岩石到几十米深的地下去寻找水源,以便满足植物自身的需要。文献 [29] 初步研究表明,狗骨木 (*Cornus wilsoniana*)、茶条木 (*Delavaya toxocarpa*)、任豆和金银花 (*Lonicera japonica*) 可以通过气孔调节,从土壤或深层岩缝中吸收更多的水分用于蒸腾,以减少高温造成的伤害;任豆最大净光合速率为 $18.09 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光饱和点较高约为 $870 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,有耐受强光的能力,这表明狗骨木、茶条木、任豆和金银花的光合作用和水分代谢特性与其所生存的环境(光照、温度等)密切相关,表现出对环境的适应性,均具有较强的适应岩溶生境的能力。

3 广西岩溶地区生态恢复与综合治理技术

国家科技部和广西科技厅以“中国热带、亚热带岩溶地区生态重建技术开发与示范”项目为主线,贯穿整个“十五”计划各个年度,连续滚动实施多个年度项目,整合国家部属研究所和广西有关科研院所、技术开发机构、高等院校共 10 余个单位的科技人员,在广西 4 个不同的岩溶地貌类型(峰丛洼地、峰林谷地、峰林平原、岩溶丘陵)地区建立了 8 个示范区,针对岩溶生态脆弱区的主要环境问题和农村社会发展障碍,开展岩溶石漠化综合防治、桂中干旱区综合治

理、资源合理开发与可持续发展等方面的关键技术攻关,综合集成新技术,建立既能恢复生态平衡,又能满足岩溶山区群众生存和发展的技术体系;通过对岩溶区生态环境特点、地质背景、资源和人文条件的深入调查和研究,弄清岩溶山区生态系统退化和恢复重建的机理,探索不同岩溶环境有效恢复森林植被的途径,增强岩溶植被生态系统的服务功能;提出可持续发展的岩溶生态系统与社会经济系统相互作用的资源、生态、经济合理配置模式;对岩溶区的土地整理和土壤定向培育,提高土地生产力,调整农村产业结构;引进、发掘和推广生态恢复的高新技术和适用技术并进行系统集成,筛选出适宜不同类型岩溶区种植的农林植物品种,研究提高生物生产效率的实用技术,提高岩溶石山生态和农业生产的效果和效率;为我国西南岩溶山区的生态环境建设,为岩溶区广大农民稳定脱贫致富、提高生活质量,实现自然资源、生态、经济、社会的和谐统一,加速区域可持续发展提供科学理论、技术保障和范式。

3.1 岩溶生态退化区封山育林与人工诱导植被优化配置恢复技术

根据植被演替规律、生态经济效益并举的原则及植物生物学原理,结合退耕还林工程,进行林分结构与混交类型、混交方式的优化配置试验,人工模拟构建岩溶山地植被生态系统,进行针阔叶林的混交、常绿树种与落叶树种的有机组合,进行乔灌藤草混交、封育补植,加速植被恢复,构建乔灌藤草生态系统的优化配置技术。根据岩溶山地生境异质性特点,采取积极的干预与管理措施,诱导植被演替更新,加快生态退化区的植被恢复,充分挖掘广西岩溶区丰富的植物资源,收集筛选优良乡土植物,增加物种多样性,植被恢复和特色农林产品开发有机结合,建立种苗繁育示范基地。应用该技术,2005年平果果化示范区植被覆盖率平均增加了38.5%;选择推广优良乡土常绿阔叶树种13个,试验区物种多样性增加,秋冬季植被覆盖率达到30%;在果化龙何示范区纯灰岩基质山地造林试验表明,适生树种的造林成活率可以达到80%以上,部分常绿阔叶树种造林成活率可以达到90%以上^[30]。

3.2 岩溶区农业生态系统优化与复合农林模式构建技术

根据不同岩溶地貌类型,将岩溶山区农业生产、农村经济发展和生态环境治理与保护、资源培育和高效利用融为一体,构建新型综合农业生态体系。在促进农业生产和农村经济增长的同时,保护和改善农业

生态环境。坡地旱作、林果园内实施间作套种,多层配置,使高矮、生育期、营养需求不同的植物形成适生互补的共生群落,地被覆盖率增加10%~40%,既能减少蒸发、贮藏水分,又能提高养分含量和光能利用率,增加经济效益34%~204%。以构建岩溶区复合农林经营框架为目标,着重研究了与各种立地类型相适应的立体生态农业模式及有关物种组合、建立与管理等方面的关键技术,形成粮经草轮作模式、果经(草)模式、果药模式、林药模式和林草模式等多种组合。在改变原有耕作方式的基础上,根据实际情况及时调整和改进各种模式的经营管理措施,提高土地利用效率和单位面积产量,增加农民的经济收益,生态农业模式的经济效益平均增加20%~70%,土壤肥力状况和生态微环境得到初步改善。

3.3 岩溶干旱区综合治理与高效节水技术

运用3S技术,探明桂中岩溶旱区地下水资源分布、蓄水量和地表水漏失规律,实施地表、地下水联合开发和调度,调整水资源与土地资源配置;提高地表、地下水资源调控能力和岩溶水资源开发利用的有效性,配套组装节水灌溉技术和高效农业综合技术,构筑防旱治旱的技术保障和基础设施、条件,有效开发节水灌溉技术,推广应用生物蓄水保肥技术^[31]。

根据黎塘实验区钻孔抽水试验结果分析,浅层岩溶带和 中层岩溶带平均给水度分别为 0.022~0.015^[32]。对浅层岩溶带而言,相当于每米厚度有 22mm 水柱的调蓄能力,20m 厚的浅层岩溶带整体调蓄能力相应为 440mm,相当于当地年平均降雨量 (1584mm) 的 27.8%。如果地下水位多下降 1m,形成的调蓄空间达 $2 \times 10^4 \text{ m}^3 / \text{km}^2$,本地下水系统内岩溶平原区面积约 115km²,地下水开采增加 1m 的降深,可以多取水 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$,相当于增加 2 个小型水库。而所需补充的水量仅为本区径流资源量的 8% 或地下水可开采资源量的 3.7%。因此,解决农业耕作区的农田干旱,采用分散、小规模的开发,形成稳定的取水井网,激发地下含水层的调蓄能力。

另外,进行水利设施的综合利用提高水资源利用效益,降低农业灌溉用水成本;以农艺节水为主要手段,开展岩溶植物的抗旱生理机制与抗旱品种调水研究,在耐旱品种选择、培肥地力调水、生物覆盖调水、复合农林业技术控水、化学抗旱剂控水等技术的综合运用。

复合农林经营模式可提高土壤水分利用效率,乔灌结合和乔草结合比单一种植粮食作物土壤含水量

分别增加 15.7%~17.1%,比单纯的草丛增加 19.1%~20.6% (图 1)^[33]。

3.4 优质高效畜牧业技术

开展以保护生态、发展经济为目标的生物载畜平衡研究,推动岩溶山区畜牧业的发展。建立以豆科牧

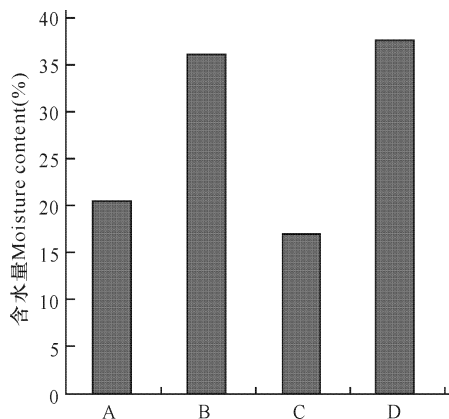


图 1 试验区坡地不同覆盖条件土壤表层含水量 (平果果化 2005 年 7 月)

Fig. 1 The soil moisture content in the land covered of field (2005. 7, Pingguo experimental site)

A. 玉米, B. 任豆 灌丛, C. 草丛, D. 苏木 草丛

A. Corn, B. *Zenia insgnis*-shrub community, C. herbage, D. *Caesalpinia sappan*-herbage community.

草为核心的混播草地生态系统,引进优良牧草 10 多个品种,采用豆科与其他草种混播技术,在果树、疏林下套种或无遮蔽种植等;采用豆科与禾本科牧草 2~4 个牧草品种进行混播,早期生长慢的品种如豆科植物和鸡脚草等禾本科植物与生长快的品种混播,生长快的植物具有为生长慢的植物保护越冬和防旱的能力;及时利用牧草,采用春秋生长旺盛与冬夏生长旺盛的品种混播。示范结果表明:优良的牧草生长快,而且能够固氮增肥保持水土等促进与其相伴而生的植物生长。平果示范区套种以菊苣-三叶草-鸡脚草(以菊苣为主的混播模式),刈割 12 次,亩产达 5000kg,最大亩产量达 10000kg。豆科牧草与其它牧草种类混播示范也取得良好的经济效益。同时由于多年生牧草根盘根错节,有效地保护土壤层,防止水土流失。通过观测分析,牧草地比黄豆地的土壤含水率增加 4.9%,建立草地生态系统,生态效益也十分显著。

3.5 技术集成与推广运用

3.5.1 土地资源定向培育与土壤改良技术的研究与示范

针对示范区生态环境脆弱,耕地质量差,土地破碎等特点,从土地生态系统整体层面考虑,进行生态景观设计,提高土地利用率和耕地质量,有效开发资

源,改善生态环境。坚持加强基本农田建设与生态退耕相结合,工程措施与生物措施和景观设计相结合,水利、能源及交通设施建设、土壤改良、坡改梯及平整土地工程、生物技术措施、农业措施等措施技术相结合,提出了岩溶区退化生态系统的土地整理方案和土壤改良方案。针对岩溶区特殊的地质背景和岩溶作用的特点,提出土壤改良主要采取单一方式土壤改良(增施有机肥、秸秆还田、平衡施肥等)和综合性土壤改良两种技术措施。

3.5.2 以沼气为中心的农村生物能源开发利用示范

建立以沼气为主,作物桔杆和其他能源为辅的山区能源结构体系,形成种植(林、果、粮、草)养殖(猪、鸡、羊、牛)沼气种植的生态良性循环链;开展高产稳产沼气池技术的研究,开发沼肥使用技术。通过开展能源技术开发,采用多种形式包括沼气、液化气、电、薪碳林等能源手段,大大缓解了樵采造成环境的恶化。通过技术应用,示范区农户沼气普及率达到 80%,农户燃料费用年均节支 200 多元/户。

3.5.3 岩溶区异地移民开发示范

开展岩溶区社会经济人口承载力的研究,着重解决生态型农业的关键技术与产业结构调整,形成环境移民可持续发展模式,建立异地扶贫开发类型的生态经济重建示范样板。

3.5.4 山区环境建设与提高农民科技素质示范

对示范区内的移民迁入区及部分原有居住区内的民居建设进行总体规划和设计,鼓励农民自力更生,逐步改善居住环境。同时,在山区农村大力提倡和普及科学精神,有组织、有计划地开展农民科学技术的培训工作,提高劳动者的科技素质和专业人员的技术水平。

3.5.5 国际合作与技术引进

通过开展国际合作,采纳 16 名外国专家(6 个国家)提出的有益建议,引进实施了新西兰亚洲发展援助项目(ADAF)中国援助项目支援的牧草新品种、种草养畜先进技术,开展以消除贫困、提高当地群众的自我发展能力与促进环境保护为目标的技术合作和国际合作园区的建设。

3.6 实施效果

8 个示范区覆盖面积 140km²,辐射带动 2000km²。示范区植被覆盖率平均提高 39.5%,水土流失得到控制,水源涵养功能得到增强,示范区土壤侵蚀模数平均下降 30%,植被生态系统功能逐渐增强,大大改善了生态环境。示范区农民人均纯收入从实施前 2000 年的 1498.46 元增加到 2005 年的 2428.77 元,增长 62.09%,年均增长 12.4%,农民的

生活和生产条件大大改善,建立起以沼气为主,秸秆和其它能源为辅的山区能源结构体系。

4 结束语

岩溶生态系统运行以碳水钙循环为基本特征,并构成富钙、偏碱性的生物地球化学环境,制约和其它生命元素的迁移,也形成了一大批既适应岩溶生态环境、又有经济价值的植物

岩溶退化生态系统恢复最重要的任务是植被恢复。我国目前已在岩溶退化生态系统类型、退化原因、程度、机理、诊断,退化生态系统恢复重建的机理、模式和技术上做了大量研究。虽然各类生态系统恢复研究与实践取得了一定的成绩,但以岩溶石漠化生态系统生产力为目标的研究一直很薄弱,特别是在植物适应岩溶区异质性生境的综合对策,岩溶生态系统的结构脆弱性和生产力可恢复性等方面研究较少。当前,作为森林恢复的重要方式之一,造林忽视了生物多样性在生态恢复中的作用^[23]。

选择不同岩溶类型区域建立示范区,通过构建岩溶山区的复层植物群落,快速提高植被覆盖率,水土流失趋势得到控制,土地生产率提高;支柱产业基本形成,种植业、畜牧业得到较快发展;形成比较完整的岩溶山区生态治理技术体系,包括农田生态改良技术、牧业生态优化技术、特色经济植物群落构建技术、能源综合开发与管理技术、水资源开发利用技术等在内的具有指导推广价值的科学技术操作规程,可为岩溶山区的生态重建提供范例。

岩溶生态系统被定义为“受岩溶环境制约的生态系统”^[34],它包括无机环境和生命部分。目前,我们对岩溶生态系统中的无机环境已有较深入的认识,而对生命部分还缺乏总结和研究,尤其是生态系统中的消费者和分解者。因此,生态学应与地学、农学及其他相关学科密切联系,多学科交叉渗透,充分发挥我国岩溶研究的地域优势,坚持不同类型岩溶生态系统的动态监测和研究,掌握岩溶生态系统运行规律,逐步完善我国西南岩溶生态系统理论

参考文献:

[1] Yuan Daoxian. Karst of China[M]. Beijing Geological Publishing House, 1991.
[2] 王世杰,季宏军,欧阳自远,等.碳酸盐岩风化成土的初步研究[J].中国科学: D辑, 1999, 29(5): 441-449.
[3] 万国江.碳酸盐岩与环境[M].北京:地震出版社, 1995.
[4] 李大通.中国可溶岩类型图说明书[M].北京:地图出版社, 1985. 14-17.
[5] Ford D C, Paul Williams. Karst geomorphology and

hydrology[M]. Unwin Hyman LTD, 1989.
[6] 洪业汤.岩溶(喀斯特)环境与西部开发[J].第四纪研究, 2000, 20(6): 532-538.
[7] 欧阳自远.中国西南喀斯特生态脆弱区的综合治理与开发脱贫[C].世界科技研究与发展, 1998, 20(2): 53-56.
[8] 童立强,丁富海.西南岩溶石山地区遥感调查研究[M]/中国地质调查局.中国岩溶地下水与石漠化研究.南宁:广西科学技术出版社, 2003. 36-45.
[9] 蒋忠诚,袁道先.西南岩溶地区的石漠化及其综合治理[M]/中国地质调查局.中国岩溶地下水与石漠化研究.南宁:广西科学技术出版社, 2003. 13-19.
[10] 曹建华,袁道先,裴建国,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M].北京:地质出版社, 2005.
[11] 翁金桃.桂林岩溶与碳酸盐岩[M].重庆:重庆科学技术出版社, 1987.
[12] 成都地质学院岩石教研室.岩石学简明教程[M].北京:地质出版社, 1978. 45.
[13] 蒋忠诚,翁金桃,谢运球,等.北京西山岩溶[M].桂林:广西师范大学出版社, 1996.
[14] 蒋有绪,卢俊培.中国海南岛尖峰岭热带林生态系统[M].北京:科学出版社, 1991.
[15] 袁道先.中国岩溶地球化学研究的进展[J].水文地质与工程地质, 1990(5): 41-42.
[16] 袁道先,蔡桂鸿.岩溶环境学[M].重庆:重庆科学技术出版社, 1988.
[17] 何腾兵.贵州喀斯特山区水土流失状况及农业建设途径[J].水土保持学报, 2001, 14(8): 28-34.
[18] 郑颖吾.木论喀斯特林区概论[M].北京:科学出版社, 1999.
[19] 吴征镒.云南植被[M].北京:科学出版社, 1987.
[20] 苏宗明,李先琨.广西岩溶植被类型及其分类系统[J].广西植物, 2003, 23(4): 289-293.
[21] Mackinnon J, Meng Sha. A biodiversity review of China[M]. Hongkong. Published by WWF China program, 1996.
[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] 任海,彭少麟.恢复生态学导论[M].北京:科学出版社, 2002.
[24] 向悟生,李先琨,吕仕洪,等.广西岩溶植被演替过程中主要小气候日变化特征的研究[J].生态科学, 2004, 11(1): 25-31.
[25] 区智,李先琨,吕仕洪,等.桂西南岩溶植被演替过程中的植物多样性[J].广西科学, 2003, 10(1): 63-67.
[26] 李强,邓艳,余龙江,等.两种忍冬属植物叶表皮扫描电镜观察及其生态适应性的研究[J].广西植物, 2007, 27, (2): 146-151.
[27] 邓艳,蒋忠诚,曹建华,等.弄拉典型峰丛岩溶区青冈栎叶片形态特征及对环境的适应[J].广西植物, 2004, 24(4): 317-322.
[28] 欧祖兰,苏宗明,李先琨.广西岩溶植被植物区系[J].广西植物, 2004, 24(4): 302-310.

(下转第9页 Continue on page 91)

3 结论

种相思的树高和胸径早期生长迅速,速生期为1~3年,但3个树种的生长差异不大;其后生长放慢,分化加剧,6年生时树高生长差异达到显著水平,胸径生长达到极显著水平,后期的生长杂交相思不及厚荚相思和马占相思。

在1~6年生阶段,3种相思树的单位面积蓄积随平均单株材积的增长而增大,6年生时,厚荚相思、马占相思和杂交相思的蓄积分别达 $122.3\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、 $100.7\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 和 $70.7\text{ m}^3/\text{hm}^2$,前者分别为后两者的121.5%和173.0%。

立地条件和经营水平相同的6年生试验林,厚荚相思、马占相思和杂交相思的纯经济收入(含税费)分别为10620.0元/公顷、7695.0元/公顷和3645.0元/公顷,前者为后两者的1.38倍和2.91倍。

林分生长量 and 经济效益静态分析的结果表明,短周期工业用材林的相思类造林树种,选择厚荚相思为优,次为马占相思。

参考文献:

- [1] 秋菊.台湾相思树的开发利用[J].中国热带农业,2004(1):35-36.
- [2] 周鸿彬,高本旺,高登梅,等.相思类树种引种初报[J].湖北林业科技,2001(4):19-22.
- [3] 韦增建.相思类树种在广西的发展前景[J].广西林业科学,1996,25(3):158-161.
- [4] 韦增健,丘小军,莫钊志.相思类树种种质资源收集保存研究[J].广西林业科学,1996,25(4):181-188.
- [5] 刘君良,章道春,江泽慧,等.相思类树种木材的资源、材性与加工利用[J].木材工业,2002,16(6):6-9.

(责任编辑:邓大玉)

(上接第86页 Continue from page 86)

- [29] 何成新,黄玉清,李先琨,等.岩溶石漠化地区几种生态恢复植物的生理生态学特征[J].广西植物,2007,27(1):53-61.
- [30] 吕仕洪,李先琨,陆树华,等.广西岩溶乡土树种育苗及造林初报[J].广西科学,2006,13(3):236-240.
- [31] 唐健生,夏日元.南方岩溶石山区资源环境特征与生态环境治理对策探讨[J].中国岩溶,2001,20(2):140-143.

- [32] 唐建生,何成新,庞冬辉,等.桂中岩溶干旱区综合治理技术开发与示范[M].北京:地质出版社,2007.
- [33] 蒋忠诚,李先琨,曾馥平,等.岩溶峰丛洼地生态重建[M].北京:地质出版社,2007.
- [34] Yuan Daoxian. On the karst ecosystem[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3): 336-338.

(责任编辑:邓大玉)