喀斯特山地生态系统石漠化过程及其恢复研究综述

任 海
(中国科学院华南植物园,广州 510650)

摘 要:喀斯特石漠化一般经历顶极植被 - 灌草丛 - 石漠等 3个阶段。在这一退化过程中喀斯特石漠化对环境的选择性导致喜 Ca、耐旱和岩生性的植物生存,而生物量的移出和耐荫树种消退是退化的关键因素。退化过程中植被、土壤理化性质与环境形成正反馈关系,并具有退化方向上的一致性、退化过程的非同步性和退化速度的非线性等特点。喀斯特植被恢复时,其恢复对策经历了由早期更新对策向中期结构调整对策直至后期结构功能协调完善对策更替。喀斯特生态系统恢复的技术包括自然恢复、人工恢复与复合农林业综合治理技术。喀斯特区域恢复的核心是整体人地系统的生态优化。提出喀斯特生态系统石漠化过程及恢复研究的重点是适应性恢复与适应性管理的基础理论问题。

关键词:喀斯特生态系统;石漠化;适应性恢复;适应性管理
中图分类号: X171.4; P931.5 **文献标识码**: A **文章编号**: 1001 - 5221(2005)03 - 0195 - 06

我国分布有裸露、覆盖、埋藏等 3类喀斯特,面积约 344.3 ×10^6 km^2,其中裸露型喀斯特面积 90.7 × 10^4 km^2,主要分布于贵州、广西、云南等西南地区。三省区裸露喀斯特分布面积 328.4 ×10^4 km^2,占三省总面积的 40.7%[1-4]。根据《中国岩溶研究》,按地质年代、分布地域和主要地貌景观特征,可将我国石漠化土地划分为扬子准地台元古代至中生代碳酸岩系岩溶区、华南褶皱系晚古代及中生代碳酸岩系岩溶区、滇西褶皱系古生代碳酸岩系岩溶区等 3个岩溶区,13个亚区[4,5]。喀斯特地区脆弱的生态环境,加上长期以来人为因素的影响,导致森林植被严重破坏,水土流失加剧,土地严重退化,基岩大面积裸露,最终形成石漠化的面积达 46.3 ×10^4 km^2,短期内有潜在石漠化严重的趋势的土地达 87.6 ×10^4 km^2。全国石漠化区域共涉及 429个县,总人口约 1.3亿[1-3]。石漠化导致自然灾害频发,生存环境不断恶化,严重制约着该区域的社会、经济和生态协调发展。

喀斯特是一种易受干扰而遭破坏的脆弱生态环境,对环境因素改变反应灵敏,生态稳定性差,生物组成和生产力波动较大,被学术界定为世界上主要的生态环境脆弱地区之一,同时喀斯特也面临着贫困与环境恶化的双重难题[6-8]。20世纪 80年代末至 90年代初,水土保持科技工作者根据石山荒漠化是水土流失的一个重要特点提出了石化、石山荒漠化、石质荒漠化等概念,随后袁道先、屠玉麟、王世杰等分别探讨了石漠化的定义[9-11],概括如下:喀斯特石漠化是指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,受人类不合理经济活动的干扰破坏,造成土壤严重侵蚀,基岩大面积出露,土地生产力严重下降,地表出现类似荒漠景观的土地退化过程。在此基础上,开展了大量恢复研究与示范。本文在总结国内外喀斯特生态系统研究基础上,重点综述了喀斯特生态系统石漠化过程及其恢复研究进展,为下一阶段的喀斯特生态系统适应性恢复与管理研究和实践提供参考。

1 喀斯特研究概况

国际上早期的喀斯特研究以欧洲占主导地位,他们对喀斯特的地质成因、地貌特征、水文特征、发育过程作了地理、地质综合研究。随后,根据社会经济发展需要,对喀斯特水文地质、工程地质、地球物理勘探、喀斯特洞穴和喀斯特发育理论等做了大量研究[6,12-14]。自 1973年 Legrand在 Science上发表了文章[15]后,喀斯特区地面塌陷、森林退化、旱涝灾害、原生环境中的水质等生态环境问题受到重视。在此期间,国际上对马来半岛、美国卡罗来纳、新西兰和南非喀斯特地区以及德国的 Solnhofen石灰岩地区也已开展了一些石灰岩植物区系的形成及其生理生态研究工作[16,17]。20世纪 80年代后国际有关

收稿日期: 2005 - 02 - 22;**修订日期**: 2005 - 03 - 13
基金项目:国家自然科学基金项目(30200025);中科院项目(STZ - 01 - 36);广东省自然科学基金项目(003031, 021627)资助
作者简介:任海(1970 -),男,湖北黄石人,博士,研究员,主要从事生态系统生态学和恢复生态学研究,(E-mail) renhai@scib.ac.cn。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

喀斯特地区生物多样性的研究主要集中在植物区系、洞穴动物、植被调查分析等初步研究,缺乏生物多样性演变与生态系统功能的系统性研究。20世纪 90年代以后侧重于喀斯特生态环境脆弱性成因机理、喀斯特生态系统的碳循环及其对全球的响应等方面的研究。当前,比较重要的喀斯特研究是国际地质对比计划中的 IGCP299“地质、气候、水文与岩溶形成 ”(1990 - 1994)、IGCP379“岩溶作用与碳循环 ”(1995 - 1999)、 IGCP448“全球岩溶生态系统对比 ”(2000 - 2004)研究[9,18 - 22]。由此可见,国际上关于喀斯特的研究发展趋势是:越来越强调在全球变化背景下的喀斯特反应;重视从喀斯特生态系统的角度研究喀斯特现象;喀斯特生态系统与人类活动的相互作用;将加强喀斯特生态系统恢复与生态系统管理研究;喀斯特地区生态 - 经济 - 社会复合生态系统可持续发展研究;大尺度的跨越国界的喀斯特对比研究。

国内一直在开展喀斯特研究与示范,从“五五 ”国家科委和地矿部组织“四片五点 ”喀斯特科研会战治理旱涝研究以后,又先后开展了南方喀斯特地下河及喀斯特矿区水文地质调查和评价、西南石灰岩地区有效开发利用途径研究、滇黔桂石山地区农村经济开发研究、大西南连片贫困喀斯特地区脱贫与振兴经济建设、滇黔桂湘喀斯特贫困区喀斯特水有效开发利用规划建议与开发示范、中国西部重点脆弱生态区综合治理技术与示范 ——喀斯特课题等项目。此外,林业部门、高等院校和科研单位还分别从造林、农业开发和森林生态等角度开展了一些研究工作。可以认为,20世纪 90年代以前主要集中在喀斯特地貌形成、演变、水资源的赋存规律研究以及喀斯特水资源和水利水电工程的防渗处理技术等领域[9,22 - 25];90年代以后侧重于洞穴旅游、脆弱的喀斯特生态环境区的水土流失防治及植被的恢复、喀斯特石漠化的 RS- GIS等级划分及空间态势、典型石山脆弱生态环境综合治理与可持续发展试验示范等领域[26 - 28]。

总的看来,国内最近 20年来喀斯特主要研究内容包括:喀斯特地质地貌和洞穴、喀斯特地球化学循环、岩溶水资源开发利用研究、喀斯特石漠化的概念及其科学内涵、喀斯特森林资源综合调查、洞穴生物的生理生态学特征、基于 3S技术面上和实地点上的喀斯特石漠化的现状调查与评价、喀斯特生态系统定位研究、岩溶生态系统的结构、驱动机制和功能、人为干扰对喀斯特森林的影响、石漠化过程中土壤和植被变化初步观察、退化喀斯特生态系统自然恢复过程研究、石漠化退化土地及植被恢复与治理模式、喀斯特农业生态系统、石漠化防治对策、喀斯特区域资源开发利用与生态旅游规划等方面。这些研究虽然突破了水土流失的研究范畴,为后续研究积累了可贵的基本资料,但对不同喀斯特地貌 ——生态经济类型区的石漠化发生的原因、类型、石漠化过程、演替模式、驱动力因子及相应的生态重建技术途径和模式的研究较为缺乏,基本停留在定性分析阶段,定量化和空间性研究明显不足,理论体系相当零散;对生态修复、维持与适应性管理 (可持续利用)等关键科技问题及其作用机制不清,缺乏成熟的可操作性强的生态系统恢复、重建、管理的模式。这些对喀斯特生态系统保育与石漠化恢复过程中的关键基础理论问题没有进行深入系统研究,无法取得重要的理论和方法突破,其应用范围也深受局限。

2 石漠化的原因与机理

2.1 石漠化原因及过程

石漠化是在自然岩溶过程基础上人为因素叠加所造成的,它作为岩溶地区的一种环境恶化和土地退化过程,根本原因是岩溶生态系统的脆弱性[29]。喀斯特生态系统石漠化过程涉及自然和人为因素,但人为因素是主因。

自然因素:石灰岩为表层土壤形成的母质;特殊的水文地质条件为土地石漠化创造了条件,在地表起伏较大而地下水以垂向作用为主的岩溶石山区只能出现不连续的薄层有机质土;由于崎岖破碎及山多坡陡等地形地貌的影响;年均温相对较低及降水相对少的高原气候导致植被生长慢;岩溶地区性质独特的土壤极易造成石漠化,碳酸盐岩系抗风蚀能力强,母岩造壤能力差,成土过程缓慢,每形成厚 1 cm的风化壳要 4 000～8 500 a,若考虑淋溶则要 1.3×10^4～3.2×10^4 a,成土模数为 45～75 $t/hm^2\cdot a$,只有非喀斯特地区的 1/80～1/10倍,且厚度不均,因而土壤资源缺乏;土壤独特的肥力性质决定了岩溶生态系统脆弱性,由于岩溶作用,土壤中阳离子交换量和有机质含量较高,但土壤中 Mn、Fe、P等元素有效性低,形成了低的肥力,加之土层薄、岩体裂隙、漏斗发育等导致干旱,因而较脆弱;岩溶地区土壤结构的上松下紧两种质态界面降低了稳定性,对环境脆弱起放大作用[30 - 33]。

人为因素:人为干扰的主要形式是火烧、开垦、放牧和樵采。在喀斯特区域,人口超载压力大导致

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了大规模的毁林开荒,特别是陡坡垦荒及超载放牧等导致水土流失而发生难以逆转的破坏;传统的旱坡顺坡耕种等耕作方式以及农林牧比例失调等不合理的土地利用方式破坏了植被和水土环境;工农业污染使岩溶地区水、土、气污染物指标超过其自净能力而出现土壤条件恶化,如贵州 1998年 SO_2 排放总量全国第二,加速了岩石的溶解,采矿过程中大量废渣、矸石等影响[30,33]。

石漠化土地的形成一般有 3个阶段:毁林开荒 -水土流失 -岩石裸露,经历了顶极植被 -灌草丛 -石漠过程。不同地方不同情景下土地石漠化的演化时间、速率不同[34]。一般从一种状态到另一种状态要几十年到几百年,但在重度干扰下,从森林变为裸地很短时间就可完成,详见图 1。

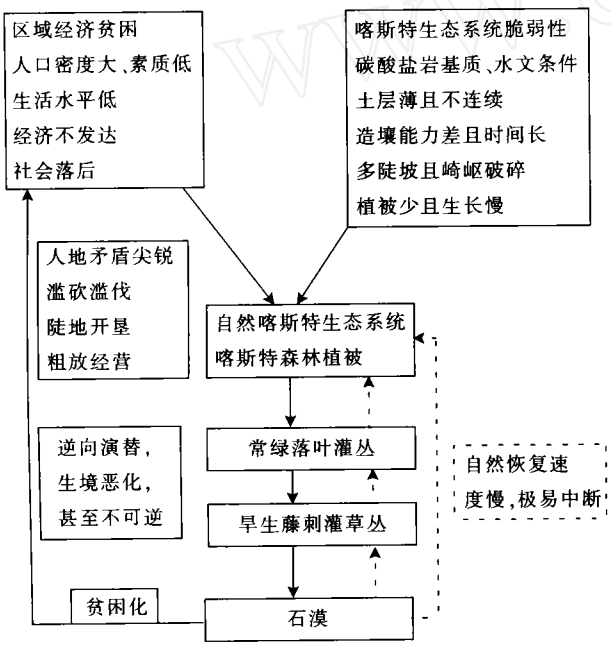

图 1　喀斯特生态系统石漠化过程

Fig. 1　The process of Karst rocky desertification ecosystem

2.2　石漠化机理

石漠化是在诸多自然因素和社会因素共同作用下发生、形成的。脆弱的生态环境为石漠化提供了条件,不合理的人为活动则加速了这一进程。从喀斯特区域研究看,典型喀斯特区域同时存在由石漠化向顶极森林的正向演替,也存在由森林向石漠化的逆向演替,两者均以藤刺灌丛为中间环节,形成了两个演变系列时间并存、空间互补。在人类干扰下,石漠化正向演替的空间驱动力明显小于逆向演替,动态平衡失衡[34-36]。

喀斯特石漠化对环境的选择性导致喜 Ca、耐旱和岩生性的植物适于生存,而对生境条件要求较高的喜湿、喜酸性植物甚至许多普适性植物难于生长。这种选择导致有些植物发生变异适应,且正向演替速度慢。在石漠化过程中,若无人为作用,不管正向或逆向演替都循序渐进,不发生从低态向高态的直接跃迁,即跨越阶段的演替[34]。

喻理飞等研究[34]发现,喀斯特森林退化可划分为 A - F 6个等级,干扰不大时,顶极群落发生正常波动,干扰增大时才发生明显退化,生物量的移出和耐荫树种消退是退化的关键因素。王德炉等[36]发现,石漠化过程中,植被种类组成从高大乔木向典型小灌木退化,并随着环境干旱程度的加剧向旱生化演替;植被退化的趋势依次为次生乔林 -乔灌林 -灌木林或藤刺灌丛 -稀灌草坡或草坡 -稀疏灌草丛,但优越的气候条件仍保持了区域内较高的物种多样性;退化过程中群落的密度先增加后降低,群落的高度和盖度随环境退化降低明显,形成稀疏植被覆盖的荒漠景观;小生境的恶劣程度随暴露程度的增加而增加,植被起源方式受干扰的影响较大;土地生产力的衰退是以乔木树种的衰退为主要标志,群落生物量急剧减少。退化过程中植被与环境形成正反馈关系,并具有退化方向上的一致性、退化过程的非同步性和退化速度的非线性等特点。

据王德炉等研究[37],随着石漠化的发展土壤黏性增强,容重增加,孔隙度降低,坚实度加大,保蓄水肥能力和通透性降低,结构恶化;同时,侵蚀和淋溶程度加强,生物富集作用不断减弱,土壤有机质含量大大减少,引起土壤中全 N、腐殖质、阳离子交换量等主要化学成分的降低,使土壤肥力下降,生产力逐渐丧失。土壤理化性质的变坏与石漠化过程形成相互促进的正反馈关系,并在退化方向和阶段上具有一致性和同步性。

从目前生态学和喀斯特基础研究的发展趋势看,石漠化过程中喀斯特生态系统功能衰退机理将是未来的研究重点,将涉及到典型喀斯特生态系统脆弱性的内在动力机制,喀斯特生态系统石漠化过程的阶段性特征,石漠化过程中基质持水能力与降水有效性变化与植物生长和生态系统功能的变化,石漠化过程中生境多样性简化与植物、动物、微生物物种多样性和生态系统功能的变化,喀斯特生态系统石漠化过程中能量流动与物质循环变化,喀斯特生态系统综合适应对策研究等。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 石漠化喀斯特生态系统恢复

3.1 石漠化喀斯特生态系统恢复的理论研究

喻理飞等[35,38]、朱守谦等[39]通过对原生性喀斯特森林和次生性森林的自然恢复过程研究发现,喀斯特森林的自然恢复是各适应等级种组的有序更替;恢复对策经历了由早期更新对策向中期结构调整对策直至后期结构功能协调完善对策更替;更新对策以幼苗库为主,早幼苗库的贡献以无性繁殖苗为主,后有性繁殖苗为主。此外,他们还构建了自然恢复潜力度、程度、速度的评价方法。低一级演替阶段群落向相邻更高一级演替阶段群落恢复的潜力度最高,群落自然恢复是由低级阶段向高级阶段顺序替代过程;早期阶段恢复潜力度较高、恢复度低、速度慢,中期阶段恢复潜力度高、恢复度中等、速度快,后期阶段恢复潜力度较低、恢复度高、速度慢。群落整体恢复速度低于群落各特征指标恢复速度。群落结构恢复快于群落功能恢复,退化喀斯特森林自然恢复 40～50年可有较为正常的组成、外貌和结构,但要达到功能完全恢复则要更长时间。苏维词[40]从生态系统景观特征及其组成要素出发,分析了流域生态系统稳定性的影响因子,应用图论和脉冲论建立了流域生态系统稳定性结构模型,试图从流域尺度对生态系统进行优化调控。

到目前为止,国内外对森林恢复研究主要集中在恢复中的障碍(如缺乏种源、种子扩散不力、土壤和小气候条件恶劣不宜于植物定居等)和如何克服这些障碍两个方面,另有一些恢复过程中生态系统结构、功能和动态的研究。还存在研究时间太短、空间尺度太小、恢复过程不清、结构与功能恢复机理不清、恢复模型缺乏实验支持等问题。纵观生态系统恢复研究,过去主要关注过程,比较少关注规划、行动和评价阶段。最近恢复生态学在如下三个方面比较活跃:一是关于恢复的临界阈值问题,二是恢复过程中优势种群的扩散过程和空间格局的动态变化,三是利用景观生态学理论和方法探讨恢复机理问题。

总体而言,恢复生态学尚没有建立完整的理论体系,这其中,喀斯特生态系统恢复生态学的理论与技术也远远落后于实践的需求。下一步可能应从喀斯特生态系统生态异质性、脆弱性和健康评价,植物对喀斯特生境的综合适应对策,喀斯特生态系统生物多样性和生产力维持机制石漠化喀斯特生态系统的恢复/重建机制等关键科学问题切入。

3.2 恢复技术

多年来的理论研究与生产实践中,已探索出了一套退化喀斯特生态系统的恢复与治理技术。主要原则是喀斯特石漠化过程中不同阶段的类型应采取不同的策略,即生境较好的轻度退化生态系统以人工造林为主,缓坡及岩石裸露率 40%以下的中度退化生态系统以造林为主自然恢复为辅,严重退化的生态系统以自然恢复为主人工恢复为辅,极度退化的生态系统以自然恢复为主[36,39,41]。

在植被自然恢复方面,首要的是遏制生境退化的干扰,选择有种子或无性繁殖体的地段,根据生态系统自身演替规律分步骤分阶段进行,自然恢复要辅以人工促进措施,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[36,39]。

人工恢复的基本内容是造林,水分亏缺导致成活率低,因此应采用的主要技术是正确选择造林树种,按小生境类型配置树种的适地适树适小生境技术;不全面砍山、不炼山、见缝插针、局部整地的造林植被利用技术;切根苗造林,容器苗补植,生根粉浸根等提高造林成活率技术;汇集表土,加厚土层,造林地穴面覆盖,提高土壤墒情的生境改造技术;栽针留灌抚阔,利用自然力形成针阔复层混交林技术[29,36,39,42]。

在农业综合开发利用方面,已有大量治理模式,如以花椒种植为核心的"花椒-养猪-沼气"模式,以砂仁种植为核心的"砂仁-养猪-沼气"模式,以花椒、砂仁与传统粮经作物混种的"传统粮经作物(如苞谷、花生、红薯等)-花椒、砂仁"间作套种模式,相对单一的"传统粮经作物(如苞谷、花生等)-野生乔灌木(如乌桕、栾树、构皮树等)"模式,以花椒种植为核心的"经果林(如柚木、柿树、枇杷、桃等)-花椒-金银花"套种模式,以花椒种植为核心的"防护林(如肥牛树等)-花椒-金银花-苞谷"混农林业模式,以皇竹草种植为核心的"皇竹草-养殖(牛羊、猪等)-沼气"草食型养殖业循环经济模式,以特色养殖为核心的"养殖(如火鸡、竹鼠等)-传统粮经作物"农牧复合模式等[43]。

3.3 恢复对策

大量研究表明,喀斯特山地的主要环境问题是土地退化,而贫困是环境退化的根源,环境退化的人类驱动是土地利用变化。因此,喀斯特山区应以协调人地关系,实现区域人类生态系统持续发展的生态重建为目标,其核心是整体人地系统的生态优化,主要是土地利用和产业结构的优化配置[44]。

降低人口出生率,劳动力输出和移民相结合,发

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

展生态小城镇,通过政策缓解人口对环境的压力,将喀斯特区域内的人口密度从 225人/km^2降至 150人/km^2。加强农田基本建设,建立高产稳产田,提高生产力,提高区域粮食自给率。建设以林业为核心的农林复合生态系统,调整目前农林牧土地结构比例 1∶1.03∶1.12为 1∶3∶1.5,强化封山育林育草,最大限度地提高绿色覆盖率。改变落后的耕种方式,利用资源优势,建设产品生产基地和支柱产业。加强立法,合理规划用地并严格管理[45-47]。

4　喀斯特石漠化生态系统恢复研究趋势

过去恢复生态学中占主导的思想是通过排除干扰、加速生物组分的变化和加速演替过程使退化的生态系统恢复到某种理想的状态。恢复生态学研究以生态系统尺度为基点,在景观尺度上表达[48]。目前,生态学还没有达到可以对特定地点特定方法下有特定产出的预测阶段。Ehrenfeld近来建议恢复生态学家应停止期待发现能预测恢复产出的简单规律或牛顿定律[49],相反,应该知道因为恢复地点本身及恢复目标导致的挑战的多样性,进行适应性恢复与适应性管理。这非常适于指导石漠化喀斯特生态系统恢复重建研究。

对石漠化形成的过程和机理的研究,特别是石漠化类型的划分,是科学制定石漠化防治对策的基础。由于缺乏全面系统研究,虽然宏观上定性认识较一致,但微观和定量研究浅,下一步要确定一套划分类型、评价石漠化潜在危险性的指标体系,要阐明指标与石漠化类型、石漠化程度和潜在危险性以及与石漠化防治的关系。生境异质性造成的植被恢复障碍与限制因子变化,不同干扰情景下石漠化过程及治理途径,不同时空尺度下的研究。

在研究对象上,以喀斯特石漠化景观为目标的研究一直很薄弱,特别是在植物适应喀斯特异质性生境的综合对策,喀斯特生态系统的脆弱性、可恢复性和恢复障碍,喀斯特生态系统恢复过程中基因流、能流与物流耦合,喀斯特生态系统生物多样性与生产力维持机制,喀斯特复合生态系统的适应性管理等方面研究较少。近期国际科学界在森林生态系统的退化与恢复过程中结构、功能和动态的复杂性,生态系统退化过程中生物与环境、能量流动与物质循环协同作用,生态系统退化与恢复阈值、生态恢复的方向和速度的不确定性等方面比较热门,已成为恢复生态学的学科前沿和当今国际生态环境科学领域基础研究的重点[50]。以我国西南发育最典型、面积最大、空间连续性最好、各类生态系统组合最多、村落与民族文化典型、经济较落后、石漠化最严重的喀斯特生态系统为对象,系统探讨西南喀斯特生态系统维持机理、生态综合适应性、生态系统退化与恢复机理,极有可能在理论上产生突破,从而在实践上可为我国西南及少数民族区域的"喀斯特贫困"提供解决途径。

致谢:本文在收集资料及完成过程中得到董鸣、杜小军、苏维词、李先锟等先生的帮助,特此致谢。

参考文献:

[1] Yuan Daoxian, Zhu Dehao, Liu Zhihong, et al. Karst of China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1991. 7-12.

[2] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical karst of south China[J]. Z Geomorph. N. F., 1997, 108: 81-90.

[3] 李林立,况明生,蒋勇军,等. 我国西南岩溶地区土地石漠化研究[J]. 地域研究与发开, 2003, 22(3): 71-74.

[4] 喻甦. 中国石漠化分布现状与特点[J]. 中南林业调查规划, 2003, 22(2): 53-55.

[5] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究[M]. 北京:科学出版社, 1987. 1-231.

[6] John G, Smith D. Human Impact on the Cuilcagh karst Areas[M]. Italy: Universita di Padova, 1991. 23-28.

[7] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18: 447-453.

[8] 马文翰. 贵州喀斯特脆弱生态环境的可持续发展[J]. 贵州师范大学学报, 2003, 21: 75-77.

[9] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社, 1993, 1-5.

[10] 屠玉麟. 贵州土地石漠化现状及成因分析[A]. 李箐:石灰岩地区开发治理[C]. 贵阳:贵州人民出版社, 1996. 65-72.

[11] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.

[12] Bogli A. Karst Hydrology and Physical Speleology[M]. Springer-Verlag. 1980. 1-132.

[13] Ford DC, Williams PW. Karst Geomorphology and Hydrology[M]. London: Unwin Hyman Ltd. 1989. 1-230.

[14] Sweeting MM. Karst in China, Its Geomorphology and Environment[M]. Berlin: Springer-Verlag. 1995. 55-69.

[15] LeGrand HE. Hydrological and ecologial problems of Karst regions[J]. Science, 1973, 179: 859-864.

[16] Micro M, Aldino B. World inventory of karst researchers: Preliminary report[A]. Sauro U, Bondesan A, Meneghel M. Proceedings of the International Conference on Environmental Changes in Karst Areas[C]. Italy: Universita di Padava, 1991, 241-247.

[17] Kobza RM, Jim K. Community structure of fishes inhabiting aquatic refuges in a threatened Karst wetland and its implications for ecosystem management[J]. Biological Conservation, 2004, 116(2): 153-165.

[18] Yuan Daoxian, Liu Zaihua. Global Karst Correlation[M]. Beijing: Science Press & VSP BV. 1998. 1-13.

[19] 袁道先. "岩溶作用与碳循环"研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14: 425-432.

[20] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比:科学目标和执行计划[J].

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地球科学进, 2001, 16: 461 - 466.
[21] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究 [J]. 地学前沿 (中国地质大学,北京), 1997, 4: 17 - 25.
[22] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学 [M]. 重庆:重庆出版社. 1988, 1 - 6
[23] 何宇彬. 关于"喀斯特水系统"研究 [J]. 中国岩溶, 1997, 16: 67 - 73.
[24] 谭明. 喀斯特水文地貌学 [J]. 科学通报, 1993, 38: 1921 - 1924.
[25] 宋林华. 喀斯特地貌研究进展与趋势 [J]. 地理科学进展, 2000, 19: 193 - 202.
[26] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题 [J]. 世界科技研究与发展, 1997, (5): 93 - 97.
[27] 周德全,王世杰. 关于喀斯特石漠化研究问题的探讨 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22: 127 - 132.
[28] 周游游,黎树式,黄天放. 我国喀斯特森林生态系统的特征及其保护利用 [J]. 广西师范学院学报, 2003, 20: 1 - 7.
[29] 苏维词. 贵州喀斯特山地石漠化及防治对策 [J]. 长江流域资源与环境, 1995, 4(2): 177 - 182.
[30] 王德炉,朱守谦,黄宝龙,等. 石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究 [J]. 山地农业生物学报, 2003, 22(3): 204 - 207.
[31] 韦启璠. 我国南方喀斯特区土壤侵蚀特点及防治途径 [J]. 水土保持研究, 1996, 3(4): 72 - 76.
[32] 张殿发,王世杰,李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究 [J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 77 - 79.
[33] 路洪海,冯绍国. 贵州喀斯特地区石漠化成因分析 [J]. 四川师范学学报, 2002, 23(2): 189 - 192.
[34] 蓝安军. 喀斯特石漠化过程、演化特征与人地矛盾分析 [J]. 贵州师范大学学报, 2002, 20(1): 40 - 45.
[35] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究 (I) [M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1993.
[36] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究 (II) [M]. 贵阳:贵州科技出版社, 1997.
[37] 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, 2003, 27(3): 26 - 30.
[38] 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.
[39] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究 (III) [M]. 贵阳:贵州科技出版社, 2003.
[40] 苏维词. 喀斯特流域生态系统稳定性结构模型初探 [J]. 贵州科学, 2002, 20(1): 14 - 18.
[41] 周政贤,毛志忠,喻理飞. 贵州石漠化退化土地及植被恢复模式 [J]. 贵州科学, 2002, 20(1): 1 - 6.
[42] 蔡秋. 贵州喀斯特山区环境特征与生态系统的恢复与重建 [J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(1): 49 - 53.
[43] 苏维词. 喀斯特峡谷石漠化地区生态重建模式及其效应 [J]. 生态环境, 2004, 13(1): 57 - 60.
[44] 张惠远,蔡运龙. 喀斯特贫困山地的生态重建:区域范型 [J]. 资源科学, 2000, 22(5): 21 - 26.
[45] 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 - 31.
[46] 苏维词. 贵州喀斯特山区的土壤侵蚀退化及防治 [J]. 中国岩溶, 2001, 20(3): 217 - 223.
[47] 王克林,章春华. 喀斯特斜坡地带资源开发中的环境效应与生态建设对策 [J]. 农业环境与发展, 16(3): 11 - 14.
[48] Dobson A D, Bradshaw, A D Baker AJM. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology[J]. Science, 1997, 277: 515 - 522.
[49] Ehrenfeld J. Defining the limits of restoration: the need for realistic goals[J]. Resotration Ecology, 2000, 8: 2 - 9.
[50] 任海,彭少麟,陆宏芳. 恢复生态学的一些研究进展 [J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1756 - 1764.

A REVIEW ON THE STUDIES OF DESERTIFICATION PROCESS AND RESTORATION MECHANISM OF KARST ROCKY ECOSYSTEM

REN Hai
(South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China).

Abstract: Karst rocky desertification is a process of land degradation in which soil is eroded seriously, bedrock is widely exposed, land productivity declines seriously, and landscape becomes desertificated as a result of intense human disturbance on the fragile environment. Karst rocky desertification generally goes through a process from climax vegetation stage, shrub and grass stage to rocky desert stage. In such degraded process, the key factors are the decrease of vegetation biomass and disappearance of shade-tolerant species. The vegetation degradation is the most important cause and a sign of desertification. During the degradation process, plant-soil and site environment form a positive feedback with the same degradation direction, and the degradation process is characterized by asynchronism and nonlinearity of speed. The strategy for restoration of Karst ecosystem should be changed from sole regeneration in early stage, structure regulation in following period, to structure and function coordination in late stage. Restoration techniques include those of natural restoration, artificial restoration and agroforestry management. The core of restoration should focus on ecological optimization of the whole human-land system in Karst region. It is suggested that adaptive restoration and adaptive management should be emphasized in Karst studies in future.

Key words: Karst ecosystem; Rocky desertification; Adaptive restoration; Adaptive management

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net