

本书是由国家自然科学基金项目“干热河谷区不同土地利用类型下土壤水分时空异质性及其运移规律研究”(31560233)和“云南省高校优势特色重点学科(生态学)”建设项目共同资助

西南喀斯特 退化生态系统

植被恢复区土壤质量及抗侵蚀影响机制

赵洋毅 段 旭 / 著

XINAN KASITE TUIHUA SHENGTAI XITONG
ZHIBEI HUIFUQU TURANG ZHILIANG JI KANGQINSHI YINGXIANG JIZHI



科学出版社

本书是由国家自然科学基金

利用类型下土壤水分

时空异质性及其运移规律研究”(31560233)和“云南省高校优势特色重点学科(生态学)”建设项目共同资助

西南喀斯特退化生态系统植被恢复区土壤质量及抗侵蚀影响机制

赵洋毅 段 旭 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对西南喀斯特山地退化生态系统植被恢复过程中土壤质量和土壤侵蚀的影响机制进行了较为系统的研究,并分别以典型喀斯特区域的贵州中部和云南东部的中轻度石漠化地区土壤为研究对象,选择不同植被恢复阶段设置固定样地,采用野外定位监测和室内试验分析相结合的方法测定土壤理化性质、结构性、抗蚀抗冲性和生物学特性等指标数据为基础,分析了喀斯特退化生态系统植被恢复、土壤结构和母岩岩性对土壤抗侵蚀的影响以及植被恢复对土壤渗透性、土壤有机碳及生物学特性及土壤质量的影响,为喀斯特区石漠化治理提供依据。

本书可以为从事喀斯特水土流失治理和研究的科研人员提供研究方法和思路,也可供林业工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

西南喀斯特退化生态系统植被恢复区土壤质量及抗侵蚀影响机制 / 赵洋毅, 段旭著. —北京: 科学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-03-056500-6

I. ①西… II. ①赵… ②段… III. ①喀斯特地区-山区-土地退化-植被-生态恢复-土地质量-研究-中国 ②喀斯特地区-山区-土地退化-植被-生态恢复-土壤侵蚀-防治-研究-中国 IV. ①F321.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 021601 号

责任编辑: 张 展 刘 琳 / 责任校对: 江 茂

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年2月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018年2月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 200千字

定价: 88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

全球喀斯特面积约占陆地面积的 12%，中国喀斯特面积在 90 万 km^2 以上，接近全国国土面积的 1/10。中国西南喀斯特地区位于长江和珠江两大水系的上游，主要分布在以贵州为中心的西南地区，包括贵州、云南、广西、湖南、湖北、四川、重庆和广东 8 个省市自治区，总面积为 115 万 km^2 ，其中喀斯特面积约 55 万 km^2 ，其中石漠化面积达 14 万 km^2 ，横跨云贵高原和广西丘陵，地势总体上西高东低，是世界三大岩溶集中连片区中面积最大、喀斯特发育最强烈的典型地区。受地球内营力、强烈的地质运动、高温多雨且分布不均、碳酸盐溶蚀性强以及水文变化复杂的影响，在岩石裸露率高和钙镁含量高、土壤贫瘠、季节性岩溶干旱严重等自然胁迫环境下，该区域也是西南典型的生态脆弱区和退化生态系统的广泛存在区。喀斯特生态系统具有脆弱性和易退化的显著特点，主要体现在其稳定性和抗干扰性差、人地矛盾突出等方面。在亚热带地区喀斯特强烈发育的自然背景下，受人为活动的干扰破坏，造成了土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、生产力严重下降的土地退化现象，即石漠化现象。随着石漠化程度的加强，裸岩的分离程度逐渐增加，斑块面积逐渐增大，草坡、灌丛、林地的分离度逐渐增加，尤其是伴随着西南地区近年来干旱少雨或降雨分配不均程度日益增大的气候条件，对水文生态过程产生诸多不利影响，生态系统退化也日益严重。

喀斯特山地是极为脆弱的生态系统之一，喀斯特地区的森林植被一旦遭受破坏，其恢复十分困难，极易造成石漠化，必然造成大量的水土流失、土层变薄、土地退化。长期以来，在喀斯特发育典型的地区，不合理的土地开垦、资源利用已导致区域生态系统严重退化，对当地社会、经济的发展和资源的可持续利用以及生存环境构成了严重威胁。作者通过对典型退化喀斯特山地植被恢复过程中的土壤结构、物理、化学、生物学特性以及抗侵蚀性的研究，了解其在植被恢复过程中土壤质量变化特征，以期为喀斯特地区石漠化治理提供依据。

本书的出版，得到了国家自然科学基金项目干热河谷区不同土地利用类型下土壤水分时空异质性及其运移规律研究(31560233)和云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目的资助。感谢研究生舒树森、曹向文在野外调查采样、室内试验分析中付出的辛勤劳动。本书可以为从事喀斯特水土流失治理和研究的科研人员提供研究方法和思路，也可供林业工作者阅读参考。

由于本书编著过程中涉及内容较多，书中难免存在错误和不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2018 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 我国喀斯特分布及石漠化现状	2
1.1.1 我国喀斯特主要分布区域及环境特征	2
1.1.2 喀斯特石漠化现状	5
1.2 喀斯特退化生态系统的植被恢复研究	9
1.2.1 退化生态系统的特点	9
1.2.2 喀斯特退化生态系统的植被恢复	9
1.3 喀斯特地区土壤侵蚀研究	10
1.3.1 土壤抗侵蚀性	11
1.3.2 植被与土壤抗侵蚀性的关系	12
1.3.3 母岩特性与土壤抗侵蚀性的关系	15
1.3.4 土壤抗侵蚀性的评价指标方法	16
1.4 喀斯特地区土壤质量研究	17
1.4.1 喀斯特土壤特点	18
1.4.2 喀斯特退化生态系统石漠化过程土壤质量变化	19
1.4.3 喀斯特土壤质量评价	21
1.5 研究的目的及意义	22
第 2 章 研究区域概况	24
2.1 贵州中部研究区概况	24
2.1.1 自然概况	24
2.1.2 人文和社会经济状况	28
2.2 云南东部研究区概况	29
2.2.1 自然概况	29
2.2.2 人文和社会经济状况	32
第 3 章 喀斯特退化生态系统植被恢复及土壤结构对土壤抗侵蚀性的影响 ...	34
3.1 材料与方法	35
3.1.1 土壤抗冲性测定	36
3.1.2 土壤抗蚀性测定	37

3.1.3	评价指标	37
3.1.4	数据处理	38
3.2	结果与分析	38
3.2.1	喀斯特地区各植被下土壤的物理性质	38
3.2.2	喀斯特地区各植被下土壤的抗蚀性	40
3.2.3	喀斯特地区不同植被下土壤结构性与土壤抗蚀性关系	54
3.2.4	喀斯特地区不同植被下土壤的抗冲性	55
3.2.5	喀斯特地区不同植被下土壤结构性与土壤抗冲性关系	59
3.2.6	不同植被土壤抗侵蚀性综合评价	60
3.3	结论与讨论	63
第4章	喀斯特退化生态系统不同母岩对土壤抗侵蚀性的影响	66
4.1	材料与方法	67
4.1.1	样品采集	67
4.1.2	试验方法	67
4.1.3	评价指标	67
4.1.4	数据处理	68
4.2	结果与分析	68
4.2.1	不同母岩发育土壤的基本性质	68
4.2.2	不同母岩发育土壤的抗侵蚀性分析	70
4.2.3	岩性对土壤抗冲性的影响	77
4.2.4	不同岩性土壤的抗蚀性与抗冲性相关关系	80
4.3	结论与讨论	80
第5章	喀斯特退化生态系统植被恢复对土壤渗透特性的影响	83
5.1	材料与方法	84
5.1.1	研究区概况	84
5.1.2	研究方法	84
5.2	结果与分析	86
5.2.1	不同恢复阶段样地土壤渗透时间变化特征	86
5.2.2	不同恢复阶段样地土壤渗透性	88
5.2.3	不同恢复阶段样地土壤渗透性过程拟合	91
5.3	结论与讨论	91
第6章	喀斯特退化生态系统植被恢复对土壤有机碳及生物学特性的影响	94
6.1	材料与方法	95
6.1.1	研究区概况	95
6.1.2	研究方法	95

6.2 结果与分析	99
6.2.1 不同植被模式下土壤有机碳含量	99
6.2.2 不同植被模式下不同土层土壤酶活性及酶指数	100
6.2.3 基于结构方程模型的土壤酶活性与理化因子的关系	103
6.2.4 土壤酶活性与有机碳之间的相互耦合关系	107
6.2.5 土壤有机碳与土壤酶活性冗余分析	107
6.3 结论与讨论	109
第7章 喀斯特退化生态系统植被恢复对土壤质量的影响	112
7.1 材料与方法	113
7.1.1 研究区概况	113
7.1.2 研究方法及评价指标体系和原则	113
7.1.3 评价指标的确定	114
7.2 结果与分析	115
7.2.1 植被恢复对土壤物理质量的影响	115
7.2.2 植被恢复对土壤养分质量的影响	117
7.2.3 植被恢复对土壤酶活性质量的影响	120
7.2.4 植被恢复对土壤质量的综合影响	122
7.3 结论与讨论	124
参考文献	125

第1章 绪 论

喀斯特(karst)是指由地下水和地表水对碳酸盐类岩石的溶蚀和改造作用而形成的一种特殊地貌,在世界上有广泛的分布。由中国向西,经中东到地中海,分布着一条广阔的碳酸盐岩带,并与大西洋西岸美国东部碳酸盐岩分布区相望,形成了世界上三大喀斯特集中分布区,即欧洲地中海沿岸、美国东部和中国西南喀斯特区。中国是喀斯特面积最大、分布最广的国家,喀斯特面积超过 90 万 km^2 , 约占全国总面积的 10%,主要分布于中国南方的贵州、广西、云南、四川、湖南、湖北、广东等省份,其中以贵州为中心连接桂北、滇东、湘西及川东南等地成一片的地区所占的面积最大,超过 55 万 km^2 ,是世界最大、最集中连片的喀斯特区(宋同清,2012)。在南方喀斯特山地典型脆弱区中,贵州喀斯特分布县(市)占 75 个,面积占南方喀斯特典型脆弱区总面积的 73.8%,也占全省土地面积的 73.8%(刘映良,2007),是喀斯特发育最强烈、景观类型最多、生态环境最复杂、人地矛盾最尖锐的地区;其次为云南省,县(市)分布占 60 个(李阳兵等,2002)。生态系统在自然或人为干扰下偏离自然状态,对退化生态系统的恢复受到各种人类活动、气候变化和不可预见因素的干扰,人类对喀斯特生态系统的保护、工人恢复、治理,以及一切生产活动、土地利用模式等,均构成对生态系统的人为干扰,兼具对生态退化和生态恢复的双重影响。喀斯特典型山地地表崎岖破碎,山高坡陡,基岩裸露率高,水、土要素出现结构性缺损,石多土少,成土速度极慢,地表干旱,可利用的水资源短缺,导致整个喀斯特生态环境系统的物质、能量流动不畅,功能低下,生态系统一经破坏,特别是反复破坏,则很难恢复,而这又主要表现在植被及土壤的恢复上(陈喜等,2014)。

由于喀斯特生态系统变异敏感度高,该地区属于典型的生态环境脆弱区,石漠化已成为该区域最为严重的生态环境问题。喀斯特脆弱生态系统易退化、难恢复,严重制约着区域生态—社会—经济的发展。随着人口的不断增加和工业化进程的加快,人类对可再生资源尤其是森林资源的过度利用,导致大面积植被遭到不同程度的破坏与干扰,许多类型的生态系统出现严重退化,继而引发了一系列的生态环境问题,如水土流失、森林消退、土地荒漠化、水体和大气污染加重、生物多样性锐减、淡水资源短缺等。在喀斯特地区,这些越来越严重的环境问题对人类的生存环境以及经济社会的可持续发展构成了更为严重的威胁。整治

日趋恶化的生态环境,防止自然生态系统的退化,恢复和重建已经受损的生态系统,是改善生态环境、提高区域生产力、实现可持续发展的关键。西南喀斯特地区地处长江和珠江水系的上游,对中国南方生态安全影响巨大,有了西南喀斯特地区的可持续发展,才会有长江、珠江流域的稳定发展(杨庆媛,2003)。

对喀斯特退化生态系统的研究,主要集中在喀斯特生态环境特点、喀斯特森林属性、群落学特征、种群生态及退化喀斯特森林自然恢复过程、土地退化及农业综合开发治理等方面,进行了大量的、相对独立的、专题性的研究,特别注重个体生态及退化群落的自然恢复研究,取得了丰硕的成果,积累了丰富的实践经验,并提出了一些喀斯特植被恢复的新理论,极大地充实了喀斯特恢复生态学等方面的内容(刘映良,2007)。为解决喀斯特石漠化和退化生态系统人地矛盾突出的问题,解决区域土壤问题是根本,土地是人类赖以生存的基础和根本,加强区域土壤侵蚀和土壤质量研究是关键,也是我国扶贫攻坚、生态恢复与重建的重点。基于此,本研究试图探讨以上喀斯特石漠化地区退化生态系统的土壤侵蚀和土壤质量问题,为喀斯特山区植被恢复提供科学的理论基础及实践经验。

1.1 我国喀斯特分布及石漠化现状

1.1.1 我国喀斯特主要分布区域及环境特征

1. 主要分布区域

“喀斯特”一词源于经典喀斯特地区:斯洛文尼亚和意大利东北部边界一带 Istria 区到 Ljubljana 区,这个地区有不同的称呼:Kras(斯洛文尼亚人)、Carso(意大利人)、Karst(德语国家人),其中 Kras 较流行。意大利的蒂里亚斯特(Trieste)属于其中的一部分,约 200 年前,此地是地形崎岖、石灰岩露头面上交错出现凹槽与尖锐突起、沟谷、洼地等遍布的碳酸盐岩裸露区,住在附近的人就把这个地区称为喀斯特,这是用此地的地表表象特征称呼这个地区,Karst 由此而成为一个地理名称(地区名称)。1781 年,B. Hacquet 把 Kras 解释为地区名称或一种石质、类似于阿拉伯地区的沙漠景观的名称;1830 年,F. Hohenwarth 用脚注形式解释了 Kras 为石质、无水、无林地面特征,并广泛分布在整個 Dinaric 地区(亚得里亚海东沿岸)。因此,这种地面特征决定了喀斯特的最初含义:石质、无水、无林、地表崎岖(Gams, 1991)。

中国是喀斯特面积最大、分布最广的国家,境内碳酸盐岩类岩层纵横广,喀斯特现象普遍,类型繁多,形式多样,发育强烈,裸露面积为 90.7 万 km^2 ,接

近全国国土面积的 1/10。西南喀斯特集中连片,地理坐标为 $102^{\circ}\sim 111^{\circ}\text{E}$ 、 $23^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$,北起秦岭山脉以南,南至广西盆地,西始于云贵高原,东南抵达南岭山脉,主要分布在贵州、云南、广西、湖南、湖北、四川、重庆、广东地区,西南地区喀斯特总面积 42.62万 km^2 ,其中又以黔、滇、桂 3 省(区)最为集中,其裸露和覆盖的喀斯特面积达 32.06万 km^2 ,占 3 省(区)土地总面积的 39.71% (袁道先, 1993)。其中,石漠化面积达 14万 km^2 ,横跨云贵高原和广西丘陵,是世界上三大喀斯特集中连片区域面积最大、发育最强烈的典型地区。岩溶分布县(市):贵州 75 个,云南 60 个,广西 44 个,四川 35 个,湖南 11 个,湖北 8 个(李阳兵等, 2002)。我国西南喀斯特地区也是集“老、少、边、山、穷”于一体,总人口近 1 亿,有壮族、苗族、布依族、侗族、瑶族、彝族等 31 个少数民族,少数民族人口在 4000 万以上,贫困人口相对集中(戴洪礼, 2006)。

2. 环境总体特征

喀斯特环境系统的总体特征是:①地球表层的物质是可溶解的碳酸盐岩类,物质能量流动主要是碳和钙元素交换、贮存和转移的化学溶蚀动力过程;②形成的地域结构是地表、地下双层结构的二元三维空间地域;③环境系统是耗散结构开放系统(高贵龙等, 2003)。整个环境系统在运动中形成一个复杂的、多相多层次的、高熵喀斯特环境界面,由于环境向生态系统输入的负熵流小,导致整个生态环境系统显示出稳定性差、变异敏感度高、抗干扰能力弱、异质性强、系统功能低下、环境生态容量低等一系列脆弱性本质特征(刘映良, 2007)。如果人类不合理利用喀斯特环境,向环境系统输入负熵流,那么喀斯特环境潜在的脆弱性将因人类活动而被强化,进而导致生态系统的退化。

3. 喀斯特系统下的局部环境特征

生境泛指生物的个体或群落所在的具体地段环境。喀斯特系统内的局部环境一般为小生境,而小生境是小尺度的生境,其尺度的界限并没有公认的统一标准,小生境组合类型有土面-石面型、石面-土面型、石面-石缝型、石面-石沟型和石面型 5 种,以石面-石沟型和石面-土面型为主,小生境及其组合类型的分布与地形部位,主要小生境类型的分布格局随着取样面积增大,由均匀分布经随机分布变成集群分布(朱守谦等, 2003)。我国从 20 世纪 60 年代开始,就对发育在各类碳酸盐岩上的喀斯特地貌的生境特征研究较多,揭示了喀斯特生境具有土被不连续、岩石裸露率高、土层浅薄、土壤富钙、偏碱性等特征(周政贤, 1963)。朱守谦等(1993)研究发现,由纯质灰岩发育的喀斯特小生境类型,有石面、石缝、石沟、石洞、石坑、土面 6 种类型。喀斯特生境是由多种小生境类型镶嵌构成的复合体,其组合状况决定了该生境的生态有效性,小生境的多样性充分说明

了喀斯特生境的异质性高,并与地形条件有密切关系,受到裸岩率和森林覆盖率的明显控制(屠玉麟,1997)。

4. 小气候特征

喀斯特系统生境的特殊性,造成了环境的光照、热量、水分等与其他系统存在较大差异,表现在这些生态因子的强度和变化进程不同,从而导致小生境间生态有效性各异。已有研究表明(朱守谦等,1993):①无论晴天或阴天,土面、石面生境中光照强度最大,其次是石坑与石沟,而深宽比较大的石缝与石洞光照条件较差。②阴天不同小生境中土壤温度无明显差异,而晴天则差异较大。与光照条件的变化一样,以石面、土面生境的土壤温度最高,石沟、石坑生境次之,石洞与石缝的土壤温度最低,这是不同生境中接受太阳辐射的多少不同而造成的。③阴天不同小生境中相对湿度恒近,晴天则有明显差异。土面、石面的相对湿度最低,石缝与石洞的相对湿度最高,石沟与石坑居中。这种差异随连续晴天日数增加而变大。④雨后土面生境中土壤含水量最高,其次分别为石洞、石坑、石缝和石沟生境,石面生境中土壤含水量最低,由于各小生境中光照、热量条件不同,其土壤水分的丧失过程有很大差异。土面、石面小生境中土壤水分丧失率最高,石缝、石洞生境中最低,石沟与石坑生境居中。从地面温度来看,白天裸露石面温度较乔林、灌木林、草坡高,夜间则乔灌木林、草坡高于石面。乔林最高地温比裸露石面低 10.1°C ,最低地温比石面高 2.7°C ,日较差比石面低 12.8°C 。随演替程度加深,湿度增大,光照强度的日均总量及日振幅均显著降低(李援越等,1998;张邦馄等,2000);反之湿度减小,光照升高。

5. 水分特征

水分是影响喀斯特植被生长的重要生态因子。李兴中和李双岱(1987)对喀斯特水文地质研究表明:喀斯特具有独特的地质水文现象——喀斯特水赋存的二元结构,即在同一含水岩组之中,枯枝落叶垫积层充填的上层喀斯特裂隙孔隙水和下层喀斯特水并存;上层水流量小且动态较稳定,下层水流量大且动态变化也相对较大。水质类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 、 Mg^{2+} 水及 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 水。喀斯特森林的持水性,及其对大气降水渗入补给在季节分配上趋于均衡的影响,致使地表水及地下水动态变化比较稳定。何纪星等(1997)对贵州中部的喀斯特森林 13 个树种水势变化研究发现,水势的日进程绝大多数是单峰型,也兼有极不典型的双峰型和相对典型的双峰型,年进程多为单峰型曲线;黔中喀斯特 10 个树种蒸腾强度的日进程以单峰型为多,少数有双峰型,日蒸腾量、年进程曲线都是单峰型,峰值出现在 5 月或 7 月,并按蒸腾耗水特性将它们划分为高峰强耗水型、中峰中耗水型、低峰中耗水型和低峰低耗水型 4 类;黔中喀斯特 21 个树种 PV 曲线,导

出8个水分状况,并对它们的耐旱性作出评定;喀斯特10个代表树种进行适应类型和耐旱程度评定,共划出低输入低输出型、高输入高输出型、高输入中输出型、中输入低输出型和高输入低输出型5种,它们的耐旱程度依次递增。碳酸盐类岩石发育的石灰土,土壤含水量随降水量而变化,特别是表层(0~30cm)土壤含水量的年变化曲线与降水量年变化曲线高度吻合;一年中,表层土壤含水量呈较明显的干湿交替(朱守谦等,2003)。

6. 土壤特征

喀斯特山区的地表基质是石灰岩、白云岩等碳酸盐类岩,这些岩类主要由可溶性矿物组成,但也含有少量的酸性不溶物,这些不溶物经风化、溶蚀而残留下来,构成了喀斯特地区土壤的主要成分。由于土壤的物质来源少,再加上母岩风化、溶蚀的速率慢,使得喀斯特区土壤形成速度极慢。对成土速度的估算不尽相同。据袁道先(1988)研究发现,喀斯特地区形成1cm厚土层需2500~8500年。韦启番(1996)在排除成土过程中不断发生的化学的、物理的淋溶以及地表径流的常态侵蚀后,计算得出形成1cm厚土层需1.3万~3.2万年。由此可知,喀斯特区生态环境一旦遭受破坏,其恢复将相当困难。因此,迅速遏制喀斯特区生态系统的退化,预防保护重于治理、改造,充分利用植物对环境的适应、改造能力,加快植被恢复速度非常关键。喀斯特森林生态系统内,石灰土、有机质含量十分丰富,全P较高,速效P中等,速效K丰富(张明和张凤海,1987);随着喀斯特生态环境的逐步恶化,土壤的容重不断增加,总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均有不同程度的下降,砂粒含量逐渐下降,粗粉粒和胶粒逐渐上升,全N、有机质、腐殖质、阳离子交换量均有较大程度下降(杨胜天和朱启疆,1999)。可见,喀斯特地区严重的土壤侵蚀引起了土地极度退化,其最终结果就是石漠化。

1.1.2 喀斯特石漠化现状

1. 石漠化的本质

我国西南喀斯特地区生境严酷且脆弱。该地区的碳酸盐岩是中生代前形成的,结构致密,孔隙度很低($<3\%$),纯质碳酸盐岩的酸不溶物含量很低,一般低于4%,极不利于成土作用和植物的生长。在强烈的社会经济压力作用下,生态环境遭受严重破坏,植被锐减、水土流失、基岩裸露、土壤贫瘠,形成具有明显地域性的生态地质环境灾害——喀斯特石漠化。石漠化或称“石化”“石山化”“岩漠化”,是目前较认同的名词。对其概念也有较一致的理解,但在内涵上有所

不同,即广义的石漠化和狭义的石漠化(罗海波,2006)。

广义的石漠化是指以流水侵蚀作用为主的、包括多种地表物质组成的以类似荒漠化景观为标志的土地退化过程。包括:①主要发生在贵州高原和桂北地区丘陵的碳酸盐岩地区,因植被破坏、流水冲刷形成的“石山荒漠化”。②主要发生在四川紫色砂页岩地区,因岩性构造疏松、地表侵蚀严重形成基岩裸露的“石质坡地”。③发生在泥石流、滑坡等活动频繁的陡坡峡谷地区,形成以沙石堆积为主的“砾质荒漠化”。④发生在矿区,由于采矿、采石、采砂活动对地表的剥蚀及以废弃矿为主形成的碎石覆盖地。可以认为,广义石漠化实际上包括了大部分水蚀荒漠化的类型。由于地质条件、气候因素以及社会环境的差异,这些类型的石漠化有着不同的成因和形成过程,本质上有一定的差异(王德炉等,2004)。狭义的石漠化,是指在南方(特别是滇、黔、桂)湿润气候条件下,由碳酸盐岩(石灰岩、白云岩等)形成的喀斯特地区,由于植被破坏而引起水土流失导致的石质荒漠化。本书所研究的内容及后文所提到的“石漠化”均指此类(罗海波,2006)。

对于喀斯特石漠化准确的定义,不同学者给予了不同的描述。20世纪80年代末到90年代初,部分科技工作者在水土保持工作中,提出了“石化”“石山荒漠化”“石质荒漠化”的概念,并特别强调石山荒漠化是水土流失的一个突出特点。袁道先(1997)采用石漠化(rock desertification)概念来表征植被、土壤覆盖的喀斯特地区转变为岩石裸露的喀斯特景观的过程,并指出石漠化是中国南方亚热带喀斯特地区严峻的生态问题,导致了喀斯特风化残积土的迅速贫瘠化,热带和亚热带地区喀斯特生态系统的脆弱性是石漠化的形成基础,人口压力、土地利用规划和实践的不合理、大气污染等人类活动触发了这一事件的所有过程。此外也有学者指出,石漠化是指在喀斯特的自然背景下,受人类活动干扰破坏造成土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、生产力下降的土地退化过程,所形成的土地称为石漠土地(屠玉麟,1997;王世杰,2000)。张殿发认为,石漠化是指在亚热带地区岩溶极其发育的自然环境背景下,受人为活动的干扰破坏,造成土壤严重侵蚀、基岩大面积出露、生产力严重下降的土地退化现象(张殿发等,2002)。喀斯特地区的森林植被一旦遭受破坏,不仅难以恢复,而且必然造成大量的水土流失、土层变薄、土地退化、基岩出露,形成奇特的石质荒漠化景观(王世杰,2000)。罗海波(2002)研究发现,喀斯特石漠化是指在喀斯特湿润气候条件下,由于人类的不合理活动超过了喀斯特生态的调节能力,使喀斯特植被遭受严重破坏,甚至植被消失,水土流失加剧,土地生产力降低,岩石大面积裸露的荒漠化景观。对于喀斯特的内涵较为普遍的表述是:由于喀斯特地区生态环境脆弱、森林植被的破坏、水土流失的加剧,导致了土地严重退化,形成基岩大面积裸露的现象称为石质荒漠化(简称石漠化),或指石质山地水土剧烈流失的结果,主要指

在喀斯特环境的自然背景下,受人为活动的干扰破坏,造成土壤严重侵蚀、基岩大面积裸露、土地退化、生产力下降的裸岩石砾地和石脊晃地(王世杰,2003)。

对于喀斯特石漠化的内涵,罗海波于2006年总结得出了以下5方面的内容(罗海波,2006):①石漠化在南方湿润喀斯特区的形成,是以人为干扰破坏为主要原因和直接外动力,因此,其发展趋势取决于干扰的类型、强度和频度。恢复的难度和速度与石漠化的程度密切相关,石漠化程度越深,恢复难度越大。②石漠化是在人类发展的历史时期,特别是近半个世纪以来,人口的急剧增加和对资源的不合理开发利用的结果。喀斯特环境脆弱性为石漠化提供了自然基础。在脆弱的喀斯特环境基础上,以人为过度干扰(开垦、放牧、樵采、火烧等)为主要原因和外动力,在较大降水量和降水强度的诱发下,导致土壤不断侵蚀,是自然与人为因素共同作用的综合过程。③石漠化是指在我国南方湿润喀斯特地区。从理论上说,凡是具有碳酸盐岩大面积出露的地表,均有可能形成石漠化。④碳酸盐岩主要以纯质石灰岩和白云岩为典型代表。纯质石灰岩发育的喀斯特地貌以较陡峭的峰丛峰林为主,地表破碎程度和基岩裸露程度高,生境十分复杂多样。白云岩发育的喀斯特地貌多为馒头状或坟丘状较为平缓的丘陵山地,基岩裸露率低甚至不裸露,地表生境较单一,土被连续,土层较薄,受到强烈侵蚀后呈现出一种砾石堆积的地表景观。⑤石漠化本质是土地生产力的下降和丧失,其以植被的退化、土壤的流失、基岩的裸露及相应的生境变化为外部可识别特征。

2. 石漠化的分布

目前,喀斯特石漠化已成为影响我国南方社会经济和发展的主要环境灾害之一(周运超,2001;张红玉等,2015)。近年来,许多学者对南方部分地区喀斯特石漠化的分布、特点、成因、影响因素和治理方面进行了初步研究,得到了较为丰富的成果(Yuan,1997;苏维词,2002;Wang et al.,2004)。到目前为止还没有严格科学意义上的划分标准,也没有统一的石漠化评价指标体系。但无可否认的是,西南岩溶山地的石漠化程度已经相当严重。贵州喀斯特石漠化面积中度以上占到全省的7.66%;广西石漠化加重的趋势仍未得到改变,仍以每年3%~6%的速度在发展;云南喀斯特主要分布在滇东区、滇西北区、澜沧江和怒江中段。石漠化土地主要分布在长江上游的金沙江、乌江流域和珠江上游的红水河、南北盘江、左江、右江流域以及国际河流红河、澜沧江、怒江流域。贵州是西南地区喀斯特最集中的地区,其强度石漠化集中分布于水城—安顺—惠水—平塘一线及其以南地区,中度石漠化和轻度石漠化也连片分布于这一线附近及其西南地区,在毕节地区和黔中分布也较广,在黔东北和黔北则为零星分布。初步的研究结果表明:贵州是西南岩溶石山地区石漠化分布面积最大的省份,面积达3.6万km²,占全省行政区面积的20.40%,云南石漠化面积为8470km²,广西石漠化面积达

2.7 万 km² (柴宗新, 1989; 包维楷和陈庆恒, 1999; 罗海波, 2006; 宋同清, 2012; 陈喜等, 2014)。

3. 石漠化产生的原因

石漠化的发生过程实质上是土地的退化过程, 是土地生产力的丧失过程, 包括植被系统、土壤系统和环境系统三个子系统的退化。受干扰的植被系统发生退化过程中, 土壤系统随之发生退化, 并与植被系统的退化基本“同步”, 植被系统和土壤系统退化超过一定的阈值后导致环境系统的退化。这种退化一旦发生, 三者之间的因果关系便会发生变化, 作为植被和土壤系统退化结果的环境系统退化, 反作用于植被和土壤系统, 引起二者进一步退化, 形成一种相互循环、互相转化的正反馈机制。

石漠化是以脆弱的生态环境为背景, 而不合理的人为活动又加速了这一进程, 从喀斯特区域研究看, 典型喀斯特区域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。有研究表明, 在石漠化过程中, 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—稀树灌草丛, 但优越的气候条件仍保持了区域内较高的物种多样性; 在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, 随着石漠化的发展, 土壤勃性增强, 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, 引起土壤中主要化学成分的降低, 使土壤肥力下降, 生产力逐渐丧失(王德炉, 2003)。

在人为干扰没有超过植被系统的调节阈值时, 喀斯特植被系统在顶极乔林群落阶段, 系统具有较强的自我调节功能, 保持了良好的森林生态系统环境, 群落为喀斯特常绿落叶阔叶混交林, 盖度极高, 结构清晰, 乔、灌、草及层间植物层次分化明显, 有较高的物种丰富度与多样性。次生乔林是石漠化过程中植被退化的初期阶段。石漠化过程在植被景观上的形式表现为, 喀斯特顶极植被在人为干扰下, 部分顶极物种遭到破坏或消失, 或当干扰减弱和停止时复生, 部分新物种侵入, 形成喀斯特次生乔林群落, 成为石漠化发展初期阶段的典型植被。在人类持续干扰下, 次生乔林群落向着乔灌过渡群落和灌木群落或藤刺灌丛群落退化, 乔木树种逐渐退出; 进一步退化使木本植物数量减少, 草本植物增加, 形成稀灌草坡或草坡群落, 当强烈的干扰继续存在时, 退化也继续进行, 形成覆盖度极低的稀疏灌草丛(罗海波, 2006)。土壤系统随着植被系统的退化而退化, 在初期表

现为枯枝落叶和腐殖质的流失,中期为腐殖质层土壤物质及大量养分流失,末期为土体整体流失,形成基岩裸露或砾石堆积的类似荒漠化景观。

可见,石漠化的发生、发展过程实际上就是在脆弱的生态环境地质背景下,人为活动破坏生态平衡所导致的地表覆盖度降低的土壤侵蚀过程。表现为:人为扰动—林退、草毁—陡坡开荒—土壤侵蚀—石山、半石山裸露—土壤侵蚀—完全石漠的逆向发展模式。最终导致土壤质量下降,土地生物产量急剧降低,基岩大面积裸露具类似荒漠景观;石漠化过程以水土流失和旱涝频繁为其直接表现形式,土壤侵蚀是石漠化最直接的因素,土壤侵蚀的极端表现形式就是石漠化;因此,从本质上看,石漠化是一种土壤质量降低,土地退化过程。石漠化进程意味着土壤生存环境的丧失。

1.2 喀斯特退化生态系统的植被恢复研究

1.2.1 退化生态系统的特点

生态退化是目前全球所面临的主要环境问题之一,它不仅使自然资源日趋枯竭,生物多样性不断减少,而且还严重阻碍社会经济的持续发展,进而威胁人类的生存和发展,因此,生态退化已引起各国政府和学者的高度重视(刘映良,2007)。在一定的时空背景下,在自然因素、人为因素或二者共同作用下,导致生态要素和生态系统发生不利于人类和生物生存的量变和质变的过程或结果,具体表现为生态因子或生态系统的基本结构和功能的破坏或丧失,稳定性和抗逆能力减弱,系统生产力下降,导致生态退化(章家恩和徐琪,1997)。而退化生态系统主要体现为生态系统在自然或人为干扰下形成的偏离自然状态的系统,与自然系统相比,其种类组成、群落或系统结构改变,生物多样性减少,生物生产力降低,土壤和微环境恶化,生物间相互关系改变(Daily,1995;陈灵芝和陈伟烈,1995)。

1.2.2 喀斯特退化生态系统的植被恢复

1. 自然恢复演替过程

从群落数量特征的角度阐述喀斯特自然恢复过程,并指出自然恢复过程树种的分布格局可分为3种类型:一是相对重要值呈单调增加趋势,并在近顶极群落中达到最大;二是相对重要值呈单调减少趋势,有的在顶极群落中很少出现或不