

Evolutionary Mechanism and Control of

Karst Rocky Desertification

under Human Intervention

人为干预下喀斯特石漠化

演变机制与调控

周忠发 闫利会 陈 全 等 / 著



科学出版社

人为干预下喀斯特石漠化 演变机制与调控

周忠发 闫利会 陈 全 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以人为干预为主线,耦合自然过程,以喀斯特石漠化综合治理示范区为单元,从研究人为干扰下的石漠化过程机理和人为干预下的石漠化生态特征出发,以石漠化生态恢复的人为干预响应为核心,揭示不同地貌背景、不同社会经济发展、不同生态恢复治理工程干预下石漠化的演变机制;通过对多尺度、多类型喀斯特生态系统的观测集成研究,综合分析诊断退化及恢复生态系统的健康状况及演进趋势,揭示受人为干预的喀斯特生态系统结构和功能的基本特征和自维持机制及其对石漠化过程的影响,评价生态综合恢复措施时空优化调控过程与配置模式的优化度,提出调控措施。

本书可作为政府决策部门制定生态恢复与优化调控的理论指导,也可作为高等院校和科研院所地学与生态环境类师生及研究人员的教材与工具书。

图书在版编目(CIP)数据

人为干预下喀斯特石漠化演变机制与调控 / 周忠发等著. —北京: 科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-049255-5

I. ①人… II. ①周… III. ①喀斯特地区—沙漠化—研究 IV. ①P941.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 149398 号

责任编辑: 杨 岭 唐 梅 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 余少力 / 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

*

2016年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 300千字

定价: 128.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书编写人员

周忠发 闫利会 陈 全 陈圣子 田涟祯
陈亚娟 魏小岛 郭 宾 王 瑾 才 林
张勇荣 王 昆 孙树婷

作者简介



周忠发，男，汉族，中共党员，1969年6月生，贵州遵义人，教授、博士生导师，贵州省省管专家，贵州师范大学喀斯特研究院副院长、贵州省喀斯特山地生态环境省部共建国家重点实验室培育基地副主任、国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心副主任、国家遥感中心贵州分部(贵州省遥感中心)主任、贵州省省委“服务决策专家智库”专家、贵州省优秀青年科技人才。主持国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“人为干预下喀斯特山地石漠化的演变机制与调控”

(2012CB723202)、国家“十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B01)、国家自然科学基金“岩溶洞穴CO₂迁移变化机制及对洞穴岩溶环境的影响研究”(41361081)、贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠化生态修复及生态经济系统优化调控研究——喀斯特区岩土类型格局”(黔科合JZ字[2014]200201)等国家级、省部级和成果转化项目70余项，曾赴美国、意大利、德国、俄罗斯、芬兰、法国等国进行喀斯特生态环境修复科学考察与参加国际学术交流。发表论文110余篇，出版《喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例》《望漠特大山洪泥石流灾后重建——资源环境承载能力评估》《喀斯特山区草地资源遥感与GIS典型研究》等专著7部，授权专利与软件著作权等10项，获省部级奖励10余项。组建贵州师范大学“地理学”博士点与省级特色重点学科、国家与省部级平台、科技创新人才团队等。在喀斯特石漠化综合治理、GIS与遥感技术、喀斯特地貌与洞穴、主体功能区与空间规划、世界遗产申报与保护、山区灾后重建、生态保护红线、北斗导航与应用、农业产业园区信息化管理等领域取得标志性研究成果。

前 言

《人为干预下喀斯特石漠化演变机制与调控》一书是在国家重点基础研究发展计划(973计划)课题“人为干预下喀斯特山地石漠化的演变机制与调控”(2012CB7233202)研究成果的基础上编写完成的,同时结合国家“十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(2011BAC09B01)、贵州省国际科技合作计划“不同生态恢复措施干预下喀斯特石漠化演化及调控研究”(黔科合外G字[2012]7022号)、贵州省重大应用基础研究项目“喀斯特石漠态化生修复及生态经济系统优化调控研究——喀斯特区岩土类型格局”(黔科合JZ字[2014]200201)等项目,依托贵州省喀斯特山地生态环境省部共建国家重点实验室培育基地、国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心、国家遥感中心贵州分部(贵州省遥感中心)等平台建设研究成果使本书进一步充实完善。

喀斯特石漠化是在热带亚热带暖温带湿润半湿润气候条件的喀斯特环境背景下,由于人类活动和自然因素,导致地表植被遭受破坏,土壤严重侵蚀,基岩裸露或砾石堆积,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和现象。石漠化的产生是以脆弱的生态地质环境为基础,以强烈的人类活动为驱动力,以土地生产力退化为本质,以出现类似荒漠化景观为标志。依据国家《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006—2015年)》的要求以及喀斯特地区人地矛盾突出问题,深入量化研究石漠化对人为干预的响应及调控机制具有重要的意义。本书以人类活动为主线,耦合自然过程,定量地研究石漠化演变机制及人为干预在石漠化生态恢复中的贡献率,并通过多尺度、多类型喀斯特生态系统的观测集成研究,综合分析诊断退化及恢复生态系统的健康状况及演进趋势,为喀斯特环境石漠化治理工程配置优化与调控提供理论基础。

在项目立项、研究、总结和书稿的编写过程中得到了贵州师范大学、贵州省科技厅的指导与支持,并对项目的执行、本书的编写提出了许多指导性的意见。本书第一章主要由周忠发、陈亚娟、田涟祎完成;第二章主要由周忠发、闫利会、陈圣子、王瑾完成;第三章主要由周忠发、闫利会、田涟祎、陈亚娟完成;第四章主要由闫利会、张勇荣、王昆完成;第五章主要由闫利会、郭宾、魏小岛完成;第六章主要由周忠发、陈圣子、孙树婷完成;第七章主要由陈全、王瑾、才林完成。周忠发、闫利会、陈全、陈亚娟、陈圣子主要负责内容整理和插图处理,周忠发对全书进行了最终的修改和定稿。参加野外遥感调查、样方监测、社会经济调查、室内方案设计、试验分析、数据整理挖掘、数据库建设、模型构建与计算等研究工作的还有李波副研究员、张勇荣副教授、邹长慧助理研究员、黄凯程博士、王媛媛博士、贾龙浩中级经济师以及刘智慧、廖娟、黄静、

王平、谢雅婷、谭玮颐等硕士研究生，他们同时也承担了部分内容的分析整理、照片编辑等工作，在此一并深表感谢。

限于我们的水平、技术、经验和掌握的材料及时间方面的原因，书中的疏漏和不足在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月 1 日

目 录

第 1 章 喀斯特石漠化研究进展	1
1.1 喀斯特石漠化	1
1.1.1 喀斯特石漠化的定义	1
1.1.2 喀斯特石漠化等级和类型划分	1
1.1.3 喀斯特石漠化研究现状	3
1.1.4 喀斯特石漠化的影响因素	4
1.2 喀斯特石漠化遥感应用	6
1.2.1 喀斯特石漠化遥感信息提取	6
1.2.2 喀斯特石漠化预警与决策支持系统研发	8
1.3 喀斯特石漠化生态恢复与优化调控	9
1.3.1 人类活动定量研究	9
1.3.2 喀斯特石漠化综合治理模式与技术	10
1.3.3 喀斯特石漠化区生态系统健康诊断研究	14
1.3.4 喀斯特石漠化综合防治工程优化评价与调控	15
第 2 章 典型喀斯特生态表征与人类活动	16
2.1 研究区典型性与代表性分析	16
2.1.1 典型研究区选取原则	16
2.1.2 研究区典型性与代表性分析	17
2.2 喀斯特石漠化遥感提取与处理	22
2.2.1 遥感影像数据与处理	22
2.2.2 喀斯特石漠化生态特征遥感提取	27
2.3 喀斯特石漠化自然背景与生态环境	27
2.3.1 关岭—贞丰花江示范区自然背景	27
2.3.2 关岭—贞丰花江示范区生态环境	32
2.3.3 清镇红枫湖示范区自然背景	35
2.3.4 清镇红枫湖示范区生态环境	40
2.4 喀斯特石漠化社会经济与人类活动	44
2.4.1 关岭—贞丰花江示范区社会经济与人类活动	44
2.4.2 清镇红枫湖示范区社会经济与人类活动	49
第 3 章 喀斯特石漠化过程实验研究	54
3.1 实验设计	54

3.1.1	实验目的	54
3.1.2	实验方法	54
3.2	土壤养分与流失观测实验	54
3.2.1	实验设备与方法	54
3.2.2	土壤理化性质分析方法	56
3.2.3	实验样地选取与评价	56
3.2.4	土壤养分流失分析	62
3.3	植物群落多样性监测实验	71
3.3.1	实验设备	71
3.3.2	计算方法	72
3.3.3	实验样地分析与评价	72
3.3.4	石漠化不同演变阶段植物群落多样性评价	74
第4章	喀斯特石漠化演替	78
4.1	喀斯特石漠化时空格局	78
4.1.1	数据来源与研究方法	78
4.1.2	喀斯特高原峡谷区石漠化时空格局	78
4.1.3	喀斯特高原盆地区石漠化时空格局	81
4.2	喀斯特石漠化演变过程	85
4.2.1	石漠化演变方式	85
4.2.2	石漠化演变速度	92
4.3	喀斯特石漠化演变的驱动因素	95
第5章	喀斯特石漠化演替的人为干预响应	99
5.1	典型喀斯特区人为干预强度评价	99
5.1.1	喀斯特区人为干预强度评价指标体系	100
5.1.2	喀斯特区人为干预强度评价模型构建	102
5.1.3	喀斯特区的人为干预强度评价模型	105
5.1.4	典型喀斯特区人为干预强度评价	106
5.2	不同人为干预强度下石漠化景观研究	111
5.3	人为干预的介入与退出下石漠化演变特征	114
第6章	人为干预下喀斯特石漠化生态系统健康诊断	117
6.1	喀斯特石漠化生态系统健康诊断	117
6.1.1	数据源及预处理	117
6.1.2	生态系统健康诊断指标体系	118
6.1.3	石漠化生态系统健康综合诊断模型构建	120
6.1.4	石漠化生态系统健康诊断等级划分	120
6.2	喀斯特石漠化生态系统健康演替趋势	121

6.2.1	喀斯特高原峡谷生态系统健康时间演替趋势	121
6.2.2	喀斯特高原峡谷生态系统健康空间演替趋势	123
6.2.3	喀斯特高原盆地生态系统健康时间演替趋势	124
6.3	人为干预对喀斯特石漠化生态系统健康的影响	131
6.3.1	人为干预对喀斯特高原峡谷区生态系统健康的影响	131
6.3.2	人为干预对喀斯特高原盆地区生态系统健康的影响	134
6.4	喀斯特石漠化生态系统健康预测	137
6.4.1	建模方法	137
6.4.2	马尔科夫转移概率矩阵	138
6.4.3	喀斯特石漠化生态系统健康变化的预测分析	138
第7章	喀斯特石漠化生态恢复优化与调控	140
7.1	石漠化治理工程配置优化度评价	140
7.1.1	基于WSR法的石漠化区工程配置优化度评价指标体系	140
7.1.2	石漠化治理工程配置优化度评价模型	143
7.1.3	喀斯特高原峡谷区石漠化治理工程配置优化度评价	146
7.1.4	喀斯特高原盆地区石漠化治理工程配置优化度评价	150
7.2	喀斯特石漠化生态恢复生态经济效益评价	156
7.2.1	典型喀斯特石漠化地区生态环境质量综合评价	156
7.2.2	典型喀斯特石漠化地区生态系统服务功能评价	162
7.3	石漠化综合治理工程配置的优化与调控	175
7.3.1	不同石漠化区综合治理工程配置的共性优化措施	175
7.3.2	轻—中度石漠化综合治理工程配置的优化措施	175
7.3.3	中—强度石漠化综合治理工程配置的优化措施	176
参考文献		177

第1章 喀斯特石漠化研究进展

1.1 喀斯特石漠化

随着西部大开发战略的实施,特别是西部生态建设目标的提出,喀斯特石漠化(karst rocky desertification)问题备受瞩目。喀斯特石漠化是土地荒漠化的主要类型之一,与北方的荒漠、黄土和冻土构成中国的四大生态环境脆弱带。喀斯特石漠化是自然因素和人为活动共同作用造成生态系统退化的结果。

1.1.1 喀斯特石漠化的定义

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,特别是在砂页岩及红色岩系和石灰岩丘陵山地陡坡开垦所引起的水土流失研究中,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。屠玉麟(1996)认为,石漠化是指在喀斯特自然背景下,受人为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,所形成的土地称石漠化土地。袁道先(1997)采用石漠化(rocky 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层土的迅速贫瘠化。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,但人口压力、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。罗中康(2000)认为,喀斯特地区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,形成奇特的石漠化景观,简称石漠化。王世杰(2002)认为,喀斯特石漠化是指在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,受人类不合理社会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。李松等(2009)对石漠化科学内涵进行了探讨,指出石漠化是在热带亚热带暖温带湿润半湿润气候条件的喀斯特环境背景下,人类活动和自然因素,导致地表植被遭受破坏,土壤严重侵蚀,基岩裸露或砾石堆积,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和现象。

一般认为,喀斯特石漠化以脆弱的生态地质环境为基础,以强烈的人类活动为驱动力,以土地生产力退化为本质,以出现类似荒漠化景观为标志。对于石漠化的定义,不同学者的描述各异,但在其形成背景、驱动因素或成因、表现景观等方面的认识是相同的。

1.1.2 喀斯特石漠化等级和类型划分

关于喀斯特石漠化的现状评价指标体系,不同学科背景的学者考虑的角度不同,对指标持续性作用的界定不同,指标的选择差异也较大,评价指标的量化标准(阈值)也不

尽相同(黄秋昊等, 2007)。目前对于喀斯特石漠化等级的划分, 国家尚无统一标准。周忠发(2001)应用多波段、多平台的遥感信息, 依据植被及土被比例、侵蚀面积比例、土壤平均侵蚀模数和平均流失厚度等数据, 将石漠化划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化、极强度石漠化 6 种等级(表 1-1)。熊康宁等(2002)从基岩裸露面积、土被面积、坡度、植被加土被面积、平均土厚, 分别对纯碳酸盐岩和不纯碳酸盐岩喀斯特区石漠化强度进行了分级, 将石漠化强度分为无明显石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、强度石漠化、极强度石漠化六个等级, 并提出不同强度石漠化区土地的农业利用价值(表 1-2、表 1-3)。李瑞玲等(2003)依据植被覆盖率、岩石裸露率、平均土厚和植被类型等指标, 建立了石漠化轻度、中度和强度三级制体系, 她指出, 轻度石漠化景观上岩石裸露较明显, 已不宜发展农业, 可适当发展林牧业; 中度石漠化岩石出露面积大, 水土流失严重, 土地利用类型上属于难利用地; 强度及以上石漠化地区基岩大面积出露, 许多地方甚至已无土可流, 基本失去利用价值, 景观与裸地石山几乎没有区别。兰安军(2003)采用基岩裸露率+土被覆盖率, 将石漠化强度等级划分为 5 个类型。王瑞江等(2001)、吕涛(2002)、王宇等(2003)均考虑岩石的裸露程度来划分石漠化等级, 但各人划分标准均不同。王瑞江等(2001)将岩石裸露面积达 70% 以上的地带划分为石漠化地区; 吕涛(2002)将裸露的碳酸盐岩面积小于 50% 的地区划分为无明显石漠化区; 王宇等(2003)将岩石裸露面积大于土地总面积 70% 的土地划分为严重石漠化土地, 岩石裸露面积占土地总面积 50%~70% 的土地划分为中度石漠化土地, 岩石裸露面积占土地总面积 30%~50% 的土地划分为轻度石漠化土地。王世杰等(2005)从生态建设层面思考已有的分类体系后提出, 尽管研究者已认识到石漠化以强烈的人类活动为驱动力, 但石漠化分类评价中并没有考虑到土地利用这一主要影响因子, 也没有区分自然因素的差异, 同时指出: 有关石漠化的监测数据因人因机构有别, 部分治理模式因为严重的地域局限性或经济不合理性, 无法大面积推广, 原因之一在于在实际工作中往往将石漠化等同于基岩裸露, 而忽视了不同成因的石漠化类型的生态功能差别, 据此提出了石漠化土地的景观+成因的两级分类模型(图 1-1)。白晓永等(2009)在分级体系中增加了土地利用现状与裸岩分布的特征。成永生(2009)提出“双重机制”(即“驱动机制+成因机制”)的喀斯特石漠化分类方式。因此, 在喀斯特石漠化类型划分的过程中应体现出层次性与先后性, 只有在对第一层次正确分类的基础上, 第二层次的分类才是有意义的。综上, 石漠化分类研究目前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, 没有形成一个公认的、被广泛接受的石漠化分类体系, 导致许多基础数据难于共享, 重复了部分基础研究工作, 不利于开展多学科、跨部门的石漠化综合防范与治理。因此, 石漠化评价指标选择和石漠化强度与等级的划分等方面尚缺乏深入研究。

表 1-1 基于植被覆盖的喀斯特石漠化类型划分

等级	植被+土被/%	侵蚀面积/%	土壤平均侵蚀模数 /(t/(km ² ·a))	平均流失厚度 /(mm/a)
无石漠化	>75	<30	<1000	<0.74
潜在石漠化	50~70	30~40	1000~2500	0.74~1.9
轻度石漠化	30~50	40~50	2500~5000	1.9~3.7

续表

等级	植被+土被/%	侵蚀面积/%	土壤平均侵蚀模数 /(t/(km ² ·a))	平均流失厚度 /(mm/a)
中度石漠化	15~30	50~60	5000~8000	3.7~5.9
强度石漠化	5~15	>60	>8000	>5.9
极强度石漠化	<5	<30	<1000	<0.74

表 1-2 纯碳酸盐岩区的喀斯特石漠化类型划分

强度等级	基岩裸露/%	土被/%	坡度/%	植被+土被/cm	平均土厚/cm	农业利用价值
无明显石漠化	<40	>60	<15	>70	>20	宜保水措施的农用
潜在石漠化	>40	<60	>15	50~70	<20	宜林牧
轻度石漠化	>60	<30	>18	35~50	<15	临界宜林牧
中度石漠化	>70	<20	>22	20~35	<10	难利用地
强度石漠化	>80	<10	>25	10~20	<5	难利用地
极强度石漠化	>90	<5	>30	<10	<3	无利用价值

表 1-3 不纯碳酸盐岩区的喀斯特石漠化类型划分

强度等级	基岩裸露/%	土被/%	坡度/%	植被+土被/cm	平均土厚/cm	农业利用价值
明显石漠化	<40	>60	<22	>70	>20	宜保水措施的农用
无明显石漠化	>40	<60	>22	50~70	<20	宜林牧
潜在石漠化	>60	<30	>25	35~50	<15	临界宜林牧
轻度石漠化	>70	<20	>30	20~35	<10	难利用地
中度石漠化						
强度石漠化						
极强度石漠化						

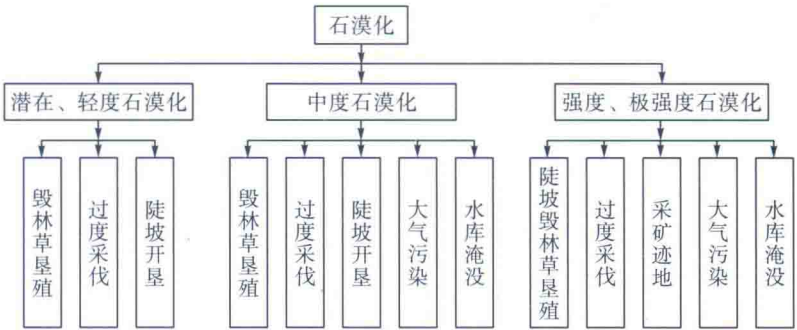


图 1-1 基于生态景观特征的喀斯特石漠化类型划分

1.1.3 喀斯特石漠化研究现状

继 2004 年国家林业局组织开展了喀斯特地区首次石漠化土地监测工作，2011 年国家林业局组织开展了第二次石漠化监测工作，监测范围涉及湖北、湖南、广东、广西、贵州、云南、重庆、四川等八省(自治区、直辖市)的 460 个县(市、区)。结果显示，截

至 2011 年,我国石漠化土地面积为 1200.2 万 hm^2 ,占监测区国土面积的 11.2%,占喀斯特面积的 26.5%;与 2005 年相比石漠化土地净减少 96 万 hm^2 ,减少了 7.4%,年均减少 1600 km^2 ,缩减率为 1.27%。

贵州处于世界喀斯特最复杂、类型最齐全、分布面积最大的东亚岩溶区域中心,是我国石漠化最严重的省份之一(袁道先,2000)。碳酸盐岩极为发育,喀斯特出露面积占贵州省国土面积的 61.92%(熊康宁等,2002),脆弱的生态环境和复杂的人地关系,导致严重的水土流失,基岩大面积裸露,迫使喀斯特石漠化成为贵州乃至我国西部地区首要的生态问题,石漠化迫切需要治理。根据 2010 年贵州省喀斯特石漠化遥感调查结果,贵州省喀斯特石漠化等级类型齐全,石漠化分布复杂,全省喀斯特面积达 109084.5 万 km^2 ,占全省总面积的 61.9%。其中无石漠化面积为 39463.5 km^2 ,潜在石漠化面积为 33148.5 km^2 ,轻度石漠化面积为 22426.4 km^2 ,中度石漠化面积为 10018.3 km^2 ,强度石漠化面积为 4027.4 km^2 (陈起伟等,2014)。

国内外对喀斯特环境问题的认识基本上是同步的。自 LeGrand 1973 年在美国《科学》杂志上发文指出了喀斯特地区地面塌陷、森林退化、旱涝灾害、原生环境中的水质等生态环境问题以来(LeGrand,1973),受到世界各国的普遍关注(Ford et al.,1989;John,1991)。1983 年 5 月,美国科学促进会第 149 届年会安排了“喀斯特环境问题”专题讨论,并将喀斯特环境列为一种脆弱的环境;1983 年 9 月,贵州环境科学学会召开“贵州喀斯特环境问题”学术讨论会(袁道先,1997)。随着喀斯特地区以石漠化为主要特征的生态环境退化日益严峻,国内外对喀斯特地区的研究重点有了明显变化,从原来的侧重地貌过程和水文过程的研究转变到喀斯特生态系统脆弱性和人类影响、喀斯特地区的环境退化、生态重建研究(贾亚男等,2003;蒋勇军等,2004)。UNESCO 和 IGCP 共同资助的喀斯特地区生态环境研究计划,从“地质、气候、水文和喀斯特形成”“喀斯特作用和碳循环”“全球喀斯特生态系统对比”到“喀斯特含水层和水资源对比研究”也反映了这一趋势(袁道先,2001)。

1.1.4 喀斯特石漠化的影响因素

石漠化主要发生于浅覆盖及裸露型的喀斯特地区,由于植被的减少、自然背景以及人类活动的干扰,极易发生地表裸露,在强降雨或者径流的作用下,进一步造成土壤流失、岩石裸露,最终导致石漠化恶性循环。影响石漠化形成的因素主要是自然因素和人为因素两大类,王世杰等(2003)、李阳兵等(2004)、赵其国等(2013)等根据大量的研究,发现随着社会经济和人类社会活动的发展,人为因素越来越成为石漠化发生的主导因子。

1. 自然因素

1) 地质岩性

中国西南喀斯特地区,特定的地质演化过程奠定了脆弱的环境背景。以挤压为主的中生代燕山构造运动使西南地区普遍发生褶皱,形成高低起伏的古老碳酸盐岩基岩面;以升降为主、叠加在此之上的新生代喜马拉雅山构造运动塑造了现代陡峭而破碎的喀斯特高原地貌景观,由此产生较大的地表切割度和地形坡度,为水土流失提供了动力潜能;

从震旦纪到三叠纪,在该区沉积了巨厚的碳酸盐岩地层,为喀斯特石漠化的发生提供了物质基础,特别是碳酸盐岩的大面积出露,为石漠化的形成奠定了物质基础。

2) 水文气候

喀斯特地区多属于中亚热带湿润季风气候,常年温暖湿润,冬无严寒,夏无酷暑,无霜期长,雨量充沛,湿度大。地处太平洋季风和印度洋季风交汇影响的边缘地带,加之纬度较低,海拔较高,冷暖空气常在此交汇,形成静止锋,因而雨量充沛(张冬青等,2006)。喀斯特地区分布大量的可溶性岩,水对可溶性岩石(碳酸盐岩、石膏等)主要以化学溶蚀作用为主,以流水的冲蚀、潜蚀和崩塌等机械作用为辅,形成地表落水洞、地下洞穴等。碳酸盐岩的变形、裂隙的发育以及碳酸盐岩本身的溶解性质,造成“地下水滚滚流,地表水贵如油”。白云岩含水介质多以小型溶蚀孔洞、节理裂隙为主,地表岩石多破碎,岩体表层提供了地下水储集的空间条件,其表层常保存着一定量的岩溶地下水,相对而言有利于植被的生长(王明章,2003)。

3) 土壤侵蚀

喀斯特地区土层浅薄,当植被退化或者丧失后,土壤表层暴露在空气中,受到地形、地势、雨水冲刷的影响,加剧石漠化形成。土壤侵蚀包括土壤流失和土壤丢失两种现象。当土壤发生侵蚀时,一部分土壤物质沿坡面流失,并在坡脚或沟谷下游发生堆积,这一现象被称为“土壤流失”。除一部分土壤沿坡面流失外,还有一部分土壤颗粒、溶蚀物质及风化壳物质沿着坡面垂直或倾斜运动就近流入岩溶裂隙,或者通过落水洞将土壤流失于地下系统中,就是所谓的“土壤丢失”(孙承兴等,2002)。石漠化程度与土壤养分状况有密切的联系,有机质、全氮、全磷、水解氮、速效钾,全钾和速效磷与石漠化程度的相关性稍差一些(李阳兵等,2004;龙健等,2005)。随着侵蚀的加剧,土壤中的养分含量逐步减少,可利用的土地退化为基岩完全裸露,呈现大面积的喀斯特石漠化景观。

4) 植被退化、丧失

石漠化过程中植被退化、丧失是最为直观和敏感的现象。岩石出露后,随着生物量的增长和土壤的形成,逐渐形成以生物活动和土壤过程为主导的喀斯特生态系统(潘根兴等,1999)。喀斯特生态系统普遍具有基岩裸露,土层浅薄,水分下渗严重,保水性差,基质、土壤和水等富钙的生态特征(屠玉麟,1995),植物多喜钙和具有耐旱性,且普遍具有发达而强壮的根系。石漠化植被退化、丧失首先表现为物种数量减少,其次是群落组成成分、结构趋向于单一化,生物量和植被盖度降低。植被退化、群落受损为流水侵蚀、化学溶蚀等提供了有利条件,这样一来生态稳定性变差,植被会进一步退化甚至丧失,造成恶性循环,碳酸盐岩环境中石山的形成是生态系统退化和岩溶地球化学系统退化的结果(李阳兵等,2004)。

2. 人为因素

喀斯特山区的生态系统遭到严重破坏,导致生态破坏和贫困恶性循环,最终使居住条件恶化,耕地更加贫瘠(李阳兵等,2004)。喀斯特地区俗有“地无三里平”之说,人

口的快速增长使得人类不得不砍伐林地、灌木林地使其变为坡耕地,经水土流失、土地退化,加剧了石漠化的形成。这是一种与脆弱生态地质背景和人类活动相关联的过程,可以认为强烈的岩溶化过程为其产生的主要自然原因,人类对生态的破坏和土地的不合理利用成为激发石漠化过程的主要人为因素(袁道先,1997),主要表现有过度开垦、过度放牧、过度砍伐等。综上,人口的快速增长使本来就处于偏低自然潜力的地区遭到高度的开发,过度的活动引发并且加剧了喀斯特地区植被的破坏,加快土壤侵蚀和流失的速率,进一步加剧了石漠化的形成和发展。

1.2 喀斯特石漠化遥感应用

1.2.1 喀斯特石漠化遥感信息提取

喀斯特地区地面覆盖情况复杂,通过影像数据的解译所提取的石漠化分布图件误差较大、精度较低。影像数据主要是植被、土壤、岩石的混合像元,直接对其解译难以区分,并且不同坡度、坡向、海拔等地形地貌因素所形成的石漠化现状也不相同。通过光谱特征的分析可以很大程度上减小单凭影像分类所带来的误差,可以更加明确石漠化的分布规律,对石漠化的治理提出适宜的治理模式。通过对遥感影像提取不同等级石漠化的光谱特征,建立喀斯特地区不同等级石漠化的光谱信息指标数据体系,为喀斯特地区生态和经济建设提供更为科学的平台和理论支持,为喀斯特石漠化综合防治提供更为可靠的科学依据。

石漠化信息提取不是孤立的技术手段,而是多种信息综合分析、反馈的过程。喀斯特并不是石漠化,但石漠化区是喀斯特区域的子集(熊康宁等,2009)。计算机提取的任务是应用数学方法确定影像与石漠化特征的对应关系,并与人眼观察特性进行匹配。而遥感影像提供的地面信息是水平与垂直方向上交叉重叠的波谱特征,这使影像与地物之间存在着复杂的对应关系。为了简化这种对应关系,从遥感影像处理的角度分析,应尽可能地使参与运算的像元更加趋于纯净。对于喀斯特石漠化信息提取来说,逐步圈定石漠化范围是解决这一问题的合理方法。研究过程中将研究区的非喀斯特信息剔除作为进行石漠化信息提取的第一步。喀斯特是一种自然现象,包括水对碳酸盐岩溶蚀的地球化学过程和形成的地貌形态(高贵龙等,2003)。喀斯特研究区的水文地质图上有明确的碳酸盐岩的分布范围,因此可以较为方便地实现喀斯特区域的提取。目前大部分喀斯特石漠化研究采用此方法作喀斯特区域的初步圈定(况顺达等,2009;熊康宁等,2002;喻琴,2009)。喀斯特石漠化的提取主要运用监督分类方法,这是最早应用的方法,同一强度等级的石漠化图斑在图像上表现出相似的光谱特征。熊康宁等(2002)利用“3S”技术,建立了石漠化遥感解译指标体系。李文辉等(2002)认为喀斯特地区的主要地物是基岩、黏土和植被,分析了三者的光谱特征后,以TM图像为数据源,实地选取17个样地,运用监督分类法进行计算机自动识别。将石漠化分为轻度石漠化和严重石漠化两种,对湘中南5.7万km²范围的喀斯特石山区进行监测,获得的石漠化分布图精度达到85%。

地表覆盖变化是生态环境变化的直接结果,很大程度上代表了生态环境总体状况。

喀斯特石漠化地区地表的主要覆盖类型除了和非喀斯特地区一样的植被和裸土外,还存在广泛分布的裸露基岩,因此,植被覆盖率、岩石裸露率、土层厚度等喀斯特地表覆盖信息通常被作为石漠化评价和分级的关键指标(李瑞玲等,2004),近年来被广泛地应用于石漠化信息遥感定量反演研究中。王金华等(2007)选择 TM4、3、2 波段组合和 TM5、4、3 波段组合确立了粤北喀斯特山区基岩裸露率、植被和土被盖度、植被种类、土地利用类型等石漠化表征信息的解译标志;吴虹等(2002)则发现 TM6、5、1 波段组合对广西都安石漠化裸露灰岩的提取有很好的解释性;李阳兵等(2006)利用 STER 影像数据对贵州省盘县喀斯特石漠化分级指标基岩裸露率和植被+土被覆盖率进行遥感解译;胡娟等(2008)利用 CBERS-02 的 4、3、1 波段假彩色合成图像对贵州省黔南布依族苗族自治州石漠化退化土地覆被进行遥感解译。

这些研究仍停留在人工目视解译的遥感图像处理初级阶段,这种方法避免不了人为主观的影响,解译工作量大、速度慢,解译者需要对石漠化的遥感影像表现有深刻的认识,特别是对不同程度的石漠化,用人眼目视判别量化上的差异存在较大困难。如果是由不同解译者来对同一区域进行解译,结果可能会出现很大的差异,增加了提取石漠化信息的不确定性,影响石漠化信息提取的效率和可靠性。

除了上述方法外,植被指数和混合光谱分析技术是目前应用比较广泛的地表覆盖信息遥感提取方法。童立强(2003)利用增强的比值植被指数增强了石漠化信息,消除了太阳照度、坡向等的影响;万军等(2003)应用线性光谱分离技术研究了贵州省关岭县喀斯特地区的土地覆被变化。然而,这两种方法在喀斯特地物信息提取研究中的应用均存在一定的局限性:一方面,植被指数主要是基于绿色植被的反射光谱特征发展而来的,能够反映植被的“绿度信息”,而不能用来直接有效探测基岩裸露率、土壤裸露程度等喀斯特非绿色植被地表覆盖信息;另一方面,混合光谱分析技术受制于确定纯像元或端元,而对于地表复杂度高、地物分布不连续的高度景观异质性的我国西南喀斯特石漠化地区,即使是常用的空间分辨率相对较高的 Landsat TM(空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$),一个像元内部也往往包含了植被、基岩、裸土等多种地物的混合光谱信息,端元选取非常困难,应用混合光谱分析技术来获取高景观异质性的喀斯特地区的地表覆盖信息存在一定难度。闫利会(2008)选取贵州省毕节鸭池示范区石桥流域为研究区,采用典型的后向人工神经网络分类方法进行分类,并开展野外遥感调查,以提高和验证分类精度。喻琴(2009)在分析地物光谱特征的基础上,运用基于 CART 算法的决策树分类方法,集成遥感影像多种光谱特征和地学辅助数据建立研究区石漠化信息自动提取的决策树模型。龙晓闽(2010)在遥感和地理信息系统技术的支持下,分析和探讨了利用像元二分模型进行石漠化信息提取的可行性,并应用多时相遥感数据开展了喀斯特石漠化问题的研究。杨晓英(2012)主要通过对多光谱影像 Landsat-7 与高光谱影像 Hyperion 进行石漠化光谱采样,分析并提取了不同等级石漠化的光谱特征,建立了快速识别喀斯特石漠化等级的遥感影像光谱信息的指标体系和数据体系。岳跃民等(2011)、刘波等(2010)针对喀斯特高度异质性导致的混合像元效应严重,和利用现有植被指数及混合光谱分析方法提取石漠化信息的不足之处,开始尝试利用高光谱数据发展新的光谱指数来提取喀斯特地区绿色植被、非绿色植被(已落叶植被及其凋落物)、土壤和裸岩等复合覆盖度信息,取得一些初步成果,但仍处于探索阶段,停留在实测地物光谱和探究石漠化光谱响应机制阶段。