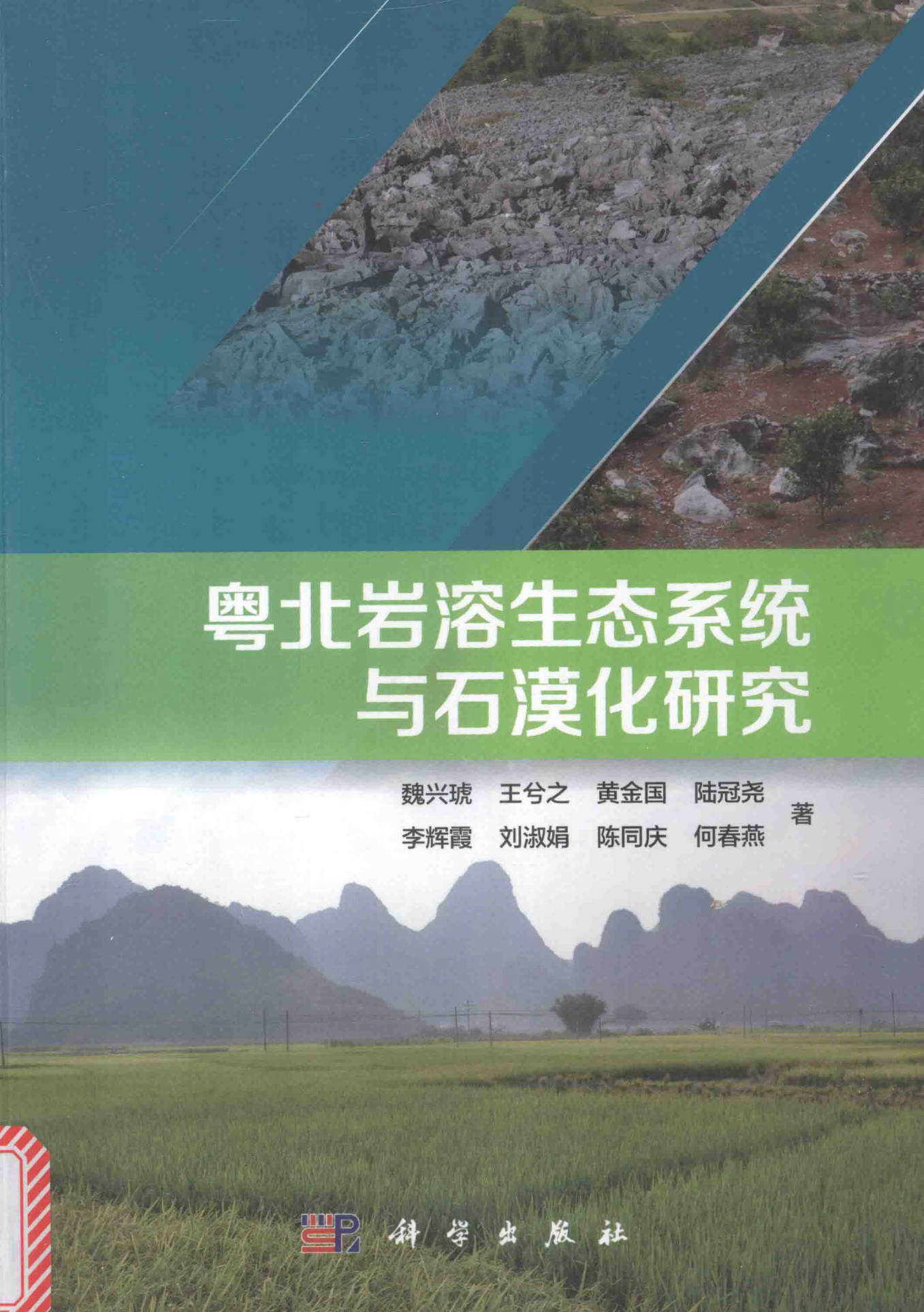




粤北岩溶生态系统 与石漠化研究

魏兴琥 王兮之 黄金国 陆冠尧 著
李辉霞 刘淑娟 陈同庆 何春燕



科学出版社

粤北岩溶生态系统与石漠化研究

魏兴琥 王兮之 黄金国 陆冠尧 著
李辉霞 刘淑娟 陈同庆 何春燕



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是对粤北岩溶生态环境系统研究成果的总结。本书基于粤北岩溶生态系统和石漠化的多年调查、模拟实验和实地观测资料,结合遥感分析、解译、室内试验测定等研究方法,对该区域不同岩溶地貌自然生态系统的植被、土壤、流域环境、石漠化时空分布、石漠化过程、水土流失及其人类活动对自然岩溶生态系统的影响、石漠化过程导致的生态系统退化及危害进行详细的分析与讨论,此外还对石漠化治理的策略、原则、技术体系等进行探讨。本书的研究成果对于中国岩溶环境研究,特别是对于深入探讨粤北岩溶生态系统、建设粤北生态文明、保护和治理岩溶退化环境有一定的科学意义和应用价值,同时对岩溶区百姓脱贫致富也有重要的指导意义。

本书对于地理学、生态学、资源与环境科学、喀斯特环境学、地理信息科学的研究人员和相关院校师生有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

粤北岩溶生态系统与石漠化研究/魏兴琥等著. —北京:科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047630-2

I. ①粤… II. ①魏… III. ①岩溶-生态系-研究-广东省 ②岩溶-沙漠化-研究-广东省 IV. ①P642.252.65

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第047236号

责任编辑:张欣 朱海燕/责任校对:何艳萍

责任印制:徐晓晨/封面设计:北京图阅盛世文化传播有限公司

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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年3月第二次印刷 印张:13 3/4 插页:3

字数:308 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国南方岩溶区是全世界最大的一片裸露、半裸露型岩溶区,也是石漠化广为发生发展的脆弱生态区域。在以云贵高原为中心的滇、黔、桂、湘、粤、川、渝、鄂 8 省(区、市) 451 个县(市)的 107.14 万 km^2 地域范围内,碳酸盐岩分布面积达 45.09 万 km^2 ,其中石漠化土地面积达到 12.96 万 km^2 ,二者分别占土地总面积的 42.08%和 12.09%。粤北岩溶山区是南方岩溶区的东延部分,也是广东省土地石漠化的重要区域之一。该区域涉及广东省韶关市、清远市的 15 个区(县、市),土地总面积为 20 576 km^2 ,区内广泛发育泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系等多套碳酸盐岩沉积构造,碳酸盐岩分布面积达 9475.63 km^2 。该区碳酸盐岩地层质纯层厚,比较稳定,在长期的内、外地质营力作用下,粤北岩溶区自西向东形成岩溶山地、岩溶丘陵和岩溶准平原等地貌。与南方岩溶区其他区域相比,粤北岩溶区同样分布于中亚热带-南亚热带季风湿润气候区,但更为充沛的降水与充足的热量,使其生态系统相比黔、桂、滇等石漠化重度发生区更稳定,石漠化面积、程度也相对较小。对这一区域的研究、治理工作也较其他区域薄弱。但与其他岩溶区一样,粤北岩溶区土层浅薄且不连续,土、石二元结构限制了植被发育生长,岩溶山地土壤瘠薄,水分渗漏严重,生境保水性差,水土资源不协调。充沛的降水也加剧了地表侵蚀和碳酸盐岩溶蚀。因此,粤北山区也是石漠化广为分布和发生的区域。对于广东省而言,粤北地区是重要的生态屏障,除了连江流域、北江流域外,还有众多河流发源或流经该区域,粤北地区生态环境的好坏直接影响到这些流域的生态健康,也直接影响到下游珠江三角洲区域的生态安全。

早在 20 世纪 80 年代,广东省科学院组织综合科学考察队对广东省山区地貌、土壤、植被、水资源、气候、农业、林业等开展了系统调查,基本掌握了广东省岩溶区的分布、面积、类型。1998~1999 年,广东省地质调查院与广东省水文工程地质一大队共同开展了粤北岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查工作,完成了粤北地区岩溶分布范围、面积、植被、地下水等方面的系统调查,特别对石漠化分布区域、面积、程度进行了初步调查研究,使我们对粤北地区约 20 000 km^2 范围的石漠化面积、比例,特别是不同石漠化程度土地的面积、比例及其在粤北各县、市的分布及比例有了初步的了解。

对粤北岩溶生态环境的系统研究始于 2004 年,截至 2015 年,佛山科学技术学院国土资源环境与旅游研究中心共主持了 6 项关于粤北岩溶环境研究的国家自然科学基金项目(“粤北岩溶山区土地石漠化过程与逆转机理研究”,基金号:30471412,李森,2004~2006 年;“粤北岩溶山地土地石漠化过程耦合试验模拟研究”,基金号:30870469,李森,2006~2008 年;“基于植被恢复演替的典型岩溶流域生态水文过程研究”,基金号:31070426,王兮之,2011~2013 年;“粤北岩溶山区岩石-土壤-植物系统钙迁移循环过程及其生态效应”,基金号:31170486,魏兴琥,2012~2015 年;“石漠化过程对人工任豆林林分蒸腾的影响及其机制”,基金号:41401108,李辉霞,2015~2017 年;“基

于水动力过程的粤北岩溶区土地利用方式对钙迁移、沉积影响机制研究”，基金号：41571091，魏兴琥，2016~2019年）、2项广东省自然科学基金项目（“粤北典型岩溶区土壤垂直渗漏特征与过程研究”，基金号：S2012010009272，魏兴琥，2013~2014年；“粤北岩溶地区土壤地表流失、地下漏失的观测与模拟”，基金号：2015A030310505，陆冠尧，2015~2018年）、1项教育部人文社会科学研究项目（“西南喀斯特地区生态系统服务对人类活动的响应与优化调控”，李辉霞，2013~2015年）、1项广东省哲学社会科学“十二五”规划项目（“粤北岩溶山区农地石漠化预警与优化调控研究”，黄金国，2013~2014年），得益于这些项目的资助，我们能够系统地开展粤北岩溶生态系统微观和宏观的时空演变、生态效应影响要素分析、石漠化过程与防治策略探讨，科学地评价岩溶生态自然、人工两大系统的变化及相互影响，为创建和谐稳定的岩溶环境提供科学依据。

本书正是对上述研究成果的总结，全书共7章，第1章由魏兴琥执笔，第2章由王兮之、黄金国执笔，第3章由魏兴琥、陆冠尧、李忠云执笔，第4章由王兮之执笔，第5章由魏兴琥、陆冠尧、李辉霞、刘淑娟执笔，第6章由魏兴琥、何春燕、陈同庆执笔，第7章由黄金国执笔。全书由魏兴琥、刘淑娟统稿、修改。梁钊雄老师、陈同庆老师对部分章节的图进行了修改。

本书的出版得到国家自然科学基金项目（31170486、41571091）资金上的帮助，中国科学院西部行动项目“西南喀斯特生态系统服务功能维持机理与调控技术研究”（KZCX2-XB3-10）——“喀斯特生态系统格局变化监测评估与调控对策”课题、中国科学院科技服务网络计划（STS计划）“广西喀斯特区生态服务提升与民生改善研究示范”项目（KFJ-EW-STS-092）——“喀斯特退化土壤修复与植被调控技术试验示范”课题、中国科学院成都山地灾害与环境研究所国家973项目“长江上游坡耕地整治与高效生态农业关键技术试验示范”子课题“云贵高原岩溶山地石漠化坡耕地整治与高效生态农业技术集成与示范”——施用矿质肥料促进喀斯特石漠化坡耕地植被恢复的试验等给予了粤北岩溶环境研究工作经费上的支持，在此表示衷心感谢。

非常感谢中国科学院成都山地灾害与环境研究所张信宝研究员对粤北岩溶环境研究给予的大力帮助，他数次来到广东省并实地考察粤北岩溶环境，指导项目组开展岩溶侵蚀、地下渗漏等研究，为开展粤北岩溶生态系统研究提出了很多创新性的建议。也非常感谢中国科学院亚热带农业生态研究所王克林研究员对我们研究工作给予的大力支持。

我们的研究成果也得益于佛山科学技术学院李森教授为粤北岩溶系统研究所做的开创性工作和奠定的良好的科研基础；佛山科学技术学院资源环境实验室关共凑老师、梁钊雄老师在野外样品测定和分析中给予了大力帮助，王雪老师参与了野外考察与试验调查工作；华南师范大学地理科学学院与佛山科学技术学院联合培养的研究生李红兵、罗红波、王金华、周红艳、徐喜珍、陈晓芳、雷俐、甘春英、王军、陈洲、李忠云和北京师范大学张素红博士先后在粤北岩溶环境研究中开展了野外调查、定位观测实验研究及论文撰写等工作；佛山科学技术学院资源环境与城乡规划管理专业2008级本科生林晓灿、马婷婷、王杰，2009级本科生黄演基、顾登全、方艾、陈凌星，2010级本科生刘颖茵、潘怡、蔡永龙，2011级本科生谭凌杰、刘耀文、叶翠韵、冼丽璇；地理信息科学专业2005

级本科生杜锦兴、刘慧珊，2010 级本科生张羿；自然地理与资源环境专业 2013 级本科生丘丹璇、孙小曼等参与了试验测定和野外调查的相关工作，在此深表谢意。

与其他岩溶区研究相比，粤北岩溶环境研究起步晚，对土地石漠化过程与作用机理的认识至今还处于初级研究阶段，众多科学问题还需进一步深入研究，尤其是石漠化治理的技术体系亟需完善和研究。本书总结的已有研究成果对认识我国南方岩溶区土地石漠化发展及逆转过程，揭示土地石漠化本质及形成机理具有一定的理论价值，对制定和实施石漠化防治措施也有重要的指导意义。希望借本书能够与广大岩溶研究的同行交流共勉，共同促进粤北岩溶生态系统的研究与石漠化治理工作。

由于作者水平所限，书中疏漏之处在所难免，敬请广大读者和专家批评指正。

魏兴琥

2015 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究现状与进展	2
1.2.1 研究阶段	2
1.2.2 研究进展	3
1.3 存在问题与未来研究方向	6
1.4 研究内容与方法	7
1.4.1 主要研究内容	7
1.4.2 主要研究方法	10
参考文献	12
第 2 章 粤北岩溶区概况	14
2.1 自然概况	14
2.1.1 气象	14
2.1.2 水文	15
2.1.3 地质地貌	15
2.1.4 石漠化土地	17
2.1.5 土壤	17
2.1.6 植被	17
2.2 社会经济概况	20
参考文献	22
第 3 章 粤北岩溶区地表生态特征	23
3.1 粤北岩溶自然生态系统特征	23
3.1.1 土壤生态系统特征	23
3.1.2 不同地貌部位土壤钙随深度的变化	36
3.1.3 土壤碳酸盐、钙、有机质及 pH 的相关性	40
3.2 植被生态系统特征	40
3.2.1 粤北岩溶区植被类型	40
3.2.2 粤北岩溶区植物区系特点	45
3.2.3 岩溶峰林不同地形植被特征	46
3.3 岩溶水特征	53
3.3.1 岩溶水类型	53
3.3.2 岩溶水水化学特征	54

3.4 粤北岩溶环境人工生态系统特征	55
3.4.1 粤北岩溶区土地主要利用方式	55
3.4.2 不同土地利用类型的生态系统特征	56
参考文献	66
第4章 粤北岩溶区流域生态系统与石漠化土地变化分析	69
4.1 流域概况	69
4.2 连江流域水环境分析	70
4.2.1 数据与分析方法	70
4.2.2 流域水化学特征	71
4.2.3 流域水化学类型分析	71
4.2.4 流域水化学特征控制因素	73
4.2.5 流域水化学时空变化特征	74
4.3 连江流域植被覆盖变化	78
4.3.1 数据处理与研究方法	78
4.3.2 结果与分析	79
4.4 连江流域石漠化土地时空演变	86
4.4.1 数据处理与分析方法	86
4.4.2 流域石漠化土地分类体系	87
4.4.3 流域石漠化土地时间变化	88
4.4.4 流域土地类型空间变化	89
4.4.5 流域主要土地类型空间变化方向分析	93
4.5 粤北岩溶流域生态水文过程模拟	98
4.5.1 数据处理与模型构建	98
4.5.2 参数率定与模型评价	99
4.5.3 模拟结果与分析	101
参考文献	104
第5章 粤北土地石漠化过程及作用机制	105
5.1 石漠化概念及分级	105
5.1.1 石漠化概念与分级问题评述	105
5.1.2 土地石漠化概念的修正及内涵释义	106
5.1.3 石漠化土地分级及其指征	107
5.2 粤北石漠化程度及驱动力分析	110
5.2.1 粤北典型岩溶山区土地石漠化程度遥感评价	110
5.2.2 人为活动对石漠化的驱动作用	117
5.2.3 石漠化驱动力的定量分析	119
5.2.4 土地石漠化发展演变的驱动机制	120
5.3 石漠化土地的植被演替、盖度、生物量及多样性变化	121
5.3.1 石漠化过程中植被群落特征及演替趋势	122

5.3.2 石漠化过程中植被盖度变化	125
5.3.3 石漠化过程中现存生物量变化	126
5.3.4 石漠化过程中物种多样性变化	127
5.4 石漠化过程的土壤退化	128
5.4.1 不同石漠化程度的土壤粒度变化	128
5.4.2 不同石漠化程度的土壤养分含量变化	133
5.5 石漠化土地的土壤侵蚀过程	140
5.5.1 试验设计与方法	140
5.5.2 石漠化土地土壤地表与地下流失结果分析	141
5.6 石漠化土地的水文循环过程	150
5.6.1 试验设计与方法	150
5.6.2 石漠化土地“五水”转化特征	151
5.7 岩溶生态系统石漠化过程降水-侵蚀-土壤-植被耦合关系	160
5.7.1 试验设计与方法	161
5.7.2 不同石漠化阶段植被-降水截留量关系	161
5.7.3 不同石漠化阶段植被-土壤关系	161
参考文献	163
第 6 章 岩溶土壤垂直流失过程	166
6.1 土壤垂直流失概念	166
6.2 土壤垂直流失特征与数量	166
6.2.1 粤北典型岩溶山地地下裂隙、漏斗、孔穴、洞穴的分布特征	166
6.2.2 粤北典型岩溶山地土壤地下流失时间与流失量	173
6.2.3 土壤垂直流失影响要素分析	175
6.3 土壤垂直流失对地表环境的影响	177
6.3.1 地下土壤粒度垂直分布特征	177
6.3.2 地下土壤有机质与碳酸钙变化特征	181
6.3.3 地下土壤钙离子变化特征	183
6.4 土壤地下流失程度评价指标体系	185
参考文献	186
第 7 章 粤北石漠化环境的治理与恢复	188
7.1 石漠化危害	188
7.1.1 破坏土地资源,使可利用耕地资源减少	188
7.1.2 水资源供给减少,用水短缺	189
7.1.3 农业生态环境恶化,灾害频繁	189
7.1.4 经济发展滞后,贫困现象严重	189
7.2 石漠化治理策略与优化模式	190
7.2.1 石漠化治理思路	190
7.2.2 石漠化治理对策	190

7.2.3 石漠化治理的优化模式	193
7.3 石漠化治理技术	197
7.3.1 不同强度等级石漠化土地的造林植草技术	197
7.3.2 水土保持技术	200
7.3.3 土地整理技术	202
7.3.4 水资源开发及其高效利用技术	205
参考文献	207
附图	209

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

在广东省,岩溶山区总面积达到 $20\,576\text{km}^2$, 占全省土地总面积的 11.57%, 其中碳酸盐岩面积为 $9\,475.63\text{km}^2$, 主要分布在粤北地区的 15 个区(县、市), 包括清远市的阳山县、英德市、连州市、清新区北部、连南瑶族自治县东部, 韶关市的乳源瑶族自治县、曲江区、浈江区、武江区、翁源县、乐昌市、仁化县南部、始兴县西南部、新丰县西北隅, 以及河源市连平县西部(曾士荣, 2006)。粤北地区是我国南方中亚热带脆弱的岩溶生态环境区域, 是石漠化演变过程十分典型、石漠化问题依然严重的区域, 也是可以和世界其他岩溶地区, 以及可以和我国南方岩溶地区中、西部石漠化分布区相比较的一个重要区域, 其在我国石漠化研究中是一个占有重要位置的区域。1998~1999 年最早的调查结果显示, 在粤北 $20\,000\text{km}^2$ 的土地面积范围内, 石漠化土地面积达到 $2\,343.21\text{km}^2$, 占粤北碳酸盐岩分布面积的 21.36%, 集中分布在粤北的阳山县、乳源瑶族自治县、英德市和连州市。其中, 重度石漠化面积占岩溶石山地区面积的 4.34%, 中度石漠化面积占 7.09%, 轻度石漠化面积占 9.93%(黄树鹏等, 2002)。王金华等(2007)对不同时期卫星遥感影像进行解译, 辅以野外调查的方法, 结果证明, 在 1974 年、1988 年、2004 年 3 个阶段, 粤北的英德、阳山、乳源、连州 4 县(市)石漠化土地面积分别为 $1\,674.87\text{km}^2$ 、 $1\,217.12\text{km}^2$ 、 534.56km^2 , 总体上呈逆转趋势。但在阳山县岭背镇、江英镇西南和乳源瑶族自治县大桥镇、大坪乡等局部地区, 仍出现石漠化面积扩大或面积缩小、程度升级等反弹现象。也有研究表明, 20 世纪 60~90 年代, 广东省石灰岩地区的植被覆盖率由 35.8%减少到 16.8%, 水土流失的面积、强度分别由 18.2%和 $605\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 增加到 41.3%和 $2\,863\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 80 年代初期岩石裸露率大于 70%的石漠化土地占岩溶面积的 6.12%, 到 90 年代初期已占到 11.25%, 年均扩展 31.84km^2 , 扩展速率达 6.28%, 说明岩溶区生态退化形势依然严峻。特别是 20 世纪 70 年代以来, 粤北岩溶山区人口自然增长率高达 20.7‰~33.99‰。在人口过快增长和水土资源短缺的压力下, 陡坡开荒加剧, 地表侵蚀加剧, 导致基岩裸露增加, 土地石漠化广为发展。石漠化已成为导致粤北地区环境退化和人民贫困的主要因素。不仅如此, 粤北地区又是广东省中部重要的生态屏障, 源于该区域的连江、北江、西江、东江流域和众多支流是珠江流域的主要干流, 也是珠江三角洲河网的主要水源, 所以其生态区位非常重要。尤其是连江流域、北江流域, 是石漠化土地的主要分布区, 石漠化的发生、发展直接影响到连江流域、北江流域的生态环境质量, 进而影响到珠江流域的环境健康。对这一区域的岩溶环境进行研究和退化环境进行治理不仅关系到区域本身, 也涉及整个广东省的生态环境安全。

相比贵州省、云南省、广西壮族自治区等石漠化重灾区, 自然环境与经济环境相对优越的广东省的石漠化发生程度与分布广度要轻一些, 所以粤北岩溶退化环境的治理并

未引起各级政府部门的足够重视,由此也导致当地群众与基层干部对石漠化的危害与发展认识不足、轻视,甚至忽略了对石漠化的治理,并且也未在政策上给予重视,砍伐森林、毁林开垦时有发生,尤其在岩溶“土山”区,大面积毁林、栽植桉树至今依然十分普遍。进入 21 世纪后,生态文明建设已成为国家的重要任务,广东省经过 30 多年的快速发展,也将产业结构调整和环境健康发展作为政府的主要目标,《中共广东省委、广东省人民政府关于进一步加强环境保护推进生态文明建设的决定》和《珠江三角洲地区改革发展规划纲要(2008—2020 年)》明确了广东省生态文明建设的目标,并先后出台了《关于深入贯彻〈广东省珠江三角洲水质保护条例〉的意见》《广东省西江流域水质保护规划》《广东省北江流域水质保护规划》和《广东省东江流域环境保护和经济发展规划纲要(1996—2010 年)》《南粤水更清行动计划(2013—2020 年)》等诸多文件与规划纲要。2010 年起,有关林业部门着手编订《广东省岩溶地区石漠化综合治理中期规划》,并选择连平县、连州市、乳源瑶族自治县作为省级石漠化综合治理试点县(市)。这些文件和规划为粤北岩溶环境的研究和石漠化土地治理奠定了良好的基础。

从科学研究角度,粤北岩溶区与贵州省、云南省、广西壮族自治区等岩溶区相比,降水强度更大、气候更潮湿、石漠化更易发生和发展,西南区石漠化分布区主要集中在中亚热带偏北区域,而粤北石漠化分布区多集中在中亚热带偏南区域,其气候、生物都存在差异,从而造成治理技术因地域而不同,该岩溶区域的研究数据和结果将使我国南方岩溶环境研究更加系统、全面和科学。

1.2 研究现状与进展

1.2.1 研究阶段

粤北岩溶环境的研究大致经历了 3 个阶段。

20 世纪 70~80 年代:广东省丘陵山区综合科学考察阶段。为配合完成国家发展计划委(今员会国家发展和改革委员会)、中国科学院下达的南方山区综合科学考察任务与广东省山区国土资源开发治理和保护的需要,广东省科学院组织成立广东省科学院丘陵山区综合科学考察队,对粤北、粤西、粤东步区 43 个行政县,包括韶关市、河源市、梅州市全区和清远市、汕头市、惠州市、广州市、肇庆市、茂名市、阳江市的部分县(区),土地总面积为 105 823.3km²的地貌、土壤、植物、水资源、气候、农业、林业等开展了系统调查,出版了《广东步区研究》丛书。这项工作对广东省内岩溶环境的地貌、土壤、水资源、植物及分布有了初步研究,为岩溶环境研究奠定了良好的基础。

20 世纪 90 年代~21 世纪初:岩溶生态环境调查与石漠化监测阶段。这一阶段的主要工作包括 1998~1999 年由广东省地质调查院与广东省水文工程地质一大队共同开展的粤北岩溶山区生态环境地质调查和 2005 年由广东省林业调查规划院组织完成的“广东省石漠化监测报告”。前一工作主要对粤北地区包括清远市的阳山县、英德市、连州市、清新区北部、连南瑶族自治县东部,韶关市的乳源瑶族自治县、曲江、浈江区、武江区、翁源县、乐昌市、仁化县南部、始兴县西南部、新丰县西北隅,以及河源市连平县西部,土地总面积为

20 576km²的岩溶区地下水资源及生态环境,尤其是对石漠化开展了系统调查。而后一工作是对整个广东省岩溶区6市(地区)、21个县(市)的石漠化土地面积、程度及空间分布、石漠化土地因人为因素或自然因素影响所产生的动态变化情况和有关石漠化监测区的自然地理、生态环境及社会经济因素的系统调查监测。这项监测工作使广东省岩溶环境及石漠化现状数据与空间分布情况更加准确翔实,是石漠化深入研究的基础。

21 世纪初至今:岩溶环境系统调查与研究阶段。从2004年开始,在上述研究成果的基础上,为进一步了解广东省岩溶生态系统循环过程的水、土、生物、矿物元素的协同变化,分析石漠化发生、发展的过程及危害,佛山科学技术学院李森、王兮之、魏兴琥、李辉霞、黄金国、陆冠尧等先后开展了“粤北岩溶山区土地石漠化过程与逆转机理研究”(国家自然科学基金项目,30471412,李森,2004~2006年)、“粤北岩溶山地土地石漠化过程耦合试验模拟研究”(国家自然科学基金项目,30870469,李森,2006~2008年)、“基于植被恢复演替的典型岩溶流域生态水文过程研究”(国家自然科学基金项目,31070426,王兮之,2011~2013年)、“粤北岩溶山区岩石-土壤-植物系统钙迁移循环过程及其生态效应”(国家自然科学基金项目,31170486,魏兴琥,2012~2015年)、“石漠化过程对人工任豆林林分蒸腾的影响及其机制”(国家自然科学基金项目,41401108,李辉霞,2015~2017年)、“粤北典型岩溶区土壤垂直渗漏特征与过程研究”(广东省自然科学基金项目,S2012010009272,魏兴琥,2013~2014年)、“粤北岩溶地区土壤地表流失、地下漏失的观测与模拟”(广东省自然科学基金项目,2015A030310505,陆冠尧,2016~2017年)、“西南喀斯特地区生态系统服务对人类活动的响应与优化调控”(教育部人文社会科学研究项目,李辉霞,2013~2015年)、“粤北岩溶山区农地石漠化预警与优化调控研究”(广东省哲学社会科学十二五规划项目,黄金国,2013~2014年)、“广东岩溶山地土地石漠化过程耦合模拟研究”(广东省教育厅育苗工程项目,陆冠尧,2012~2013年)。这些项目使我们对粤北石漠化土地分布、类型、侵蚀状况、石漠化过程导致的生态系统变化、岩溶生态系统内的物质循环、岩溶环境人-地关系、岩溶流域环境等方面有了深入和系统的了解。

1.2.2 研究进展

1. 粤北石漠化发展程度与分布研究

1998~1999年,广东省地质调查院与广东省水文工程地质一大队共同开展了粤北岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查工作,首次对粤北地区岩溶分布范围、面积、植被、地下水等方面进行了系统调查,特别是对石漠化分布区域、面积、程度有了初步调查研究。调查结果显示,在约20 000km²的调查区内,石漠化面积达到2343.21km²,占碳酸盐类岩石分布面积的21.36%,集中分布在粤北的阳山县、乳源瑶族自治县、英德市和连州市。其中,重度石漠化(岩石裸露率大于70%)面积占岩溶石山地区面积的4.34%,中度石漠化(岩石裸露率为50%~70%)面积占7.09%,轻度石漠化(岩石裸露率为30%~50%)面积占9.93%(黄树鹏等,2002)。

王金华等(2007)根据李森等(2007a)和Li等(2009)建立的石漠化土地分级指

征,利用“3S^①”技术对20世纪70年代、80年代及21世纪初卫星遥感影像的解译辅以野外调查的方法等,研究了1974~2004年来粤北石漠化土地时空演变。结果表明,在粤北的英德、阳山、乳源、连州4县(市)共有石漠化土地534.51km²,其中极重度、重度、中度和轻度石漠化土地分别占总面积的0.63%、30.41%、43.21%和25.75%。1974年,本区石漠化土地为1674.87km²,至1988年石漠化土地减少至1217.12km²,年均逆转-32.70km²,动态度达-1.95%,极重度、重度、中度、轻度石漠化土地分别减少了36.16%、6.21%、28.95%和32.53%,表明该时段石漠化已初步逆转,极重度、轻度石漠化是逆转的主体。1988~2004年本区石漠化土地又由1217.12km²减少至534.56km²,年均逆转-42.66km²,动态度降至-3.51%,极重度、重度、中度和轻度石漠化土地分别减少了68.44%、30.35%、47.41%和74.21%,表明这一时段石漠化土地加速逆转,重度、中度、轻度石漠化土地均成为逆转主体,但局部地区仍出现石漠化程度加重的现象。但曾帮锐对广东省石灰岩山区石漠化变化的研究也表明,20世纪60~90年代,广东省岩溶区枯度覆盖率下降,水土流失面积强度增大,石漠化面积呈增加的趋势。王兮之等(2007)从景观类型水平上对粤北石漠化土地景观空间格局动态过程的时空变化进行了定量分析。

2. 粤北石漠化过程的研究

石漠化不仅是地表土壤流失的过程,还伴随着植物多样性的丧失、生物生产力的降低与生态系统稳定性的减弱等过程。李森等(2007b, 2010)通过系统研究认为,粤北土地石漠化过程是由植被退化丧失过程、土壤侵蚀过程、地表水流失过程、碳酸盐岩溶蚀侵蚀过程和土地生物生产力退化过程相互联系、组合而成的土地退化过程,也是岩溶山区土地生态系统演变为石质荒漠系统的地表生态过程。在轻度石漠化向极重度石漠化发展的过程中,仅2~3年,植被就从灌草混合群落退化为草本群落,物种减少76%,植被盖度降低87.2%;土壤侵蚀量逐渐加大,土壤物质不断流失和丢失,土层变薄,侵蚀模数以十多倍、数十倍的速度增加。罗红波等(2007)、魏兴琥等(2008, 2013a, 2013b)选择粤北岩溶山区石漠化土地分布最集中、最典型的英德市黄花镇岩背村为研究区域,系统地调查了不同石漠化程度的植被特征、物种多样性变化、土壤理化性质变化及其相关性,证明了在石漠化由轻到重的变化过程中,石灰岩植被的生境越来越向旱生和岩生方向转化,植被种类组成越来越简单。从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,植被盖度分别为94.65%→84.98%→79.21%→<12.14%;现存生物量从轻度的513.57g/m²到中度的406.95g/m²、重度的261.57g/m²和极重度的57.54g/m²,呈显著下降趋势;丰富度指数、Shannon-Wiener指数也显著下降;土壤粒度逐渐变粗。此外,土壤碳储存量也与石漠化程度有关,中度、轻度和潜在石漠化单位面积土壤有机碳分别是极重度的49.23倍、47.9倍和29.4倍(魏兴琥等, 2013a, 2013b)。

3. 粤北石漠化土壤侵蚀的研究

岩溶区地貌类型复杂,基岩多样,裂隙发育,地表径流过程研究难度大。为系统地

^① “3S”,即遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、全球定位系统(GPS)。

探讨粤北石漠化土壤侵蚀和水循环过程,在粤北阳山县江英镇设置了石漠化径流试验场,通过自然降水过程和人工模拟降水结合的方法观测径流侵蚀程度。根据36场模拟降水的结果,降水初期土壤侵蚀量较大,变幅也较大,随着降水时间的延长,土壤侵蚀量明显降低且波动减少,并逐渐趋于稳定,处于稳定阶段的土壤侵蚀量与雨强之间存在显著的线性关系(李森等,2010; Li et al., 2009)。还在同一径流试验场对不同地类的石漠化土地侵蚀速度做了初步研究,未扰动灌丛草坡侵蚀量达到 $67.92\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,耕地侵蚀量达到 $1756.96\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是草坡侵蚀量的25.87倍;裸地侵蚀量达到 $2455.37\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,是草坡侵蚀量的36.15倍。原始灌丛草坡地和耕地的土壤侵蚀量均与次降水量存在相关性,裸地的侵蚀量与连续30min最大雨强的相关性高,说明地表植被抵御短期强降水侵蚀土壤的效果明显(张素红等,2006)。张素红(2007)采用 ^{137}Cs 示踪法分析测得粤北石漠化地区多年平均土壤侵蚀模数为 $2433.2\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,远高于喀斯特地区土壤允许侵蚀量。耕作土壤侵蚀模数高于非耕作土壤,坡耕地侵蚀模数高达 $4968.3\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

魏兴琥等(2013a, 2013b)从2012年开始对粤北岩溶山地土壤垂直渗漏进行调查,先后调查了清连高速剖面、连南瑶族自治县威建水泥厂剖面等8个典型剖面,对岩溶山地剖面裂隙、漏斗、孔穴的分布特征与比例有了初步分析(雷俐等,2013),根据平面图与剖面调查计算了土壤垂直渗漏的体积与比例。

4. 碳酸盐岩溶蚀研究

李红兵(2006)通过埋设标准石灰岩溶蚀试片和设置侵蚀针的方法观测了阳山县江英镇石漠化径流试验场的溶蚀率与土壤侵蚀率,标准石灰岩溶蚀试片的土下平均溶蚀率为2.41%,地面平均溶蚀率为1.20%;侵蚀针的变化结果表明,裸地土壤年侵蚀最大厚度达12.9cm,土壤侵蚀最小厚度为2cm,年平均侵蚀厚度为2.85cm。魏兴琥将粤北的碳酸盐岩溶蚀样片置于酸雨程度较大的佛山市禅城区进行了近3年的观测,35个月的逐月测定数据表明,含云灰岩在土壤表层,10cm、20cm和30cm处的年溶蚀量平均为 $3.19\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.81\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.78\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.69\text{g}/\text{cm}^2$,云灰岩分别为 $2.74\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.92\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $0.69\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $0.57\text{g}/\text{cm}^2$ 。地表溶蚀量远大于土壤中岩石溶蚀量,年际间溶蚀量也有差异,溶蚀量大小与降水量有很好的联动性。云灰岩在地表的溶蚀量远小于含云灰岩,但土壤中二者差异不大。不同pH水溶液对含云灰岩和云灰岩两种碳酸盐岩溶蚀的影响模拟实验表明,在3~30h的短时间尺度,pH为6.0和pH为3.0会增加含云灰岩的溶蚀量,而云灰岩在pH为6.0的微酸环境中的溶蚀量增加,在自然石灰岩环境的积水(pH为7.7)中,溶蚀量会随着浸泡时间的延长而稳定增加;在1~30d的长时间尺度,含云灰岩和云灰岩在pH为3.0溶液中,1d和5d的溶蚀量分别是pH为7.7的自然溶液中溶蚀量的106倍、11.4倍和30.5倍、47.4倍。显然,过酸的水溶液会显著增加石灰岩的溶蚀量;相同pH与相同的溶蚀时间下,云灰岩的溶蚀速率大于含云灰岩(魏兴琥等,2013a, 2013b)。

5. 粤北石漠化治理研究

粤北岩溶山区是广东省石漠化土地分布的主要区域,经过多年的治理,土地石漠化出现了逐步逆转的态势,但石漠化仍是当地生态环境改善和社会经济发展的主要制约因

素,治理石漠化环境是加快岩溶山区经济发展、解决贫困的基础(陈朝辉,1992)。黄金国等(2008)分析了粤北岩溶山区农业水土环境问题的现状及主要成因,提出了改善农业生态环境,促进农业水土资源可持续利用的针对性措施和石漠化治理的模式。刘鉴明等(1999a, 1999b, 1999c)根据粤北阳山县江英镇石灰岩山区的生态环境特点、土壤类型和各类土壤的肥力特性,确立粤北石漠化开发与治理的主攻方向,提出农业综合开发与治理、调整作物结构、改革耕作制度、推广良种良法和反季节蔬菜栽培等一系列措施。黎景良和后斌(2008)以粤北山区的韶关市作为研究区域,利用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术,构建一套适合研究区域的土地可持续利用评价指标体系,提出一个土地可持续利用定量评价模型及土地可持续利用的可行性建议。孔淑琼等(2005)、张苏峻和刘福权(2006)、叶照桂(2006)通过分析粤北石漠化的现状、形成与环境效应,提出了相应的治理对策。

总体而言,对粤北石漠化的研究已进入新的、更系统的阶段,也取得了一些初步成果,但在石漠化过程中,岩石-土壤-植被生态系统耦合机制、钙迁移循环及其生态意义、侵蚀因子及其降水模拟等方面还需深入研究,在岩溶区生态环境恢复综合技术、生态补偿、产业结构调整等方面也需进一步探讨完善。

1.3 存在问题与未来研究方向

2004年至今,尽管开展了一系列粤北岩溶生态系统的研究,取得了大量第一手资料,积累了一些成果,但多为粤北岩溶环境的基础研究,虽掌握了最基本的石漠化、溶蚀量、侵蚀量、多样性、植被土壤等基础数据,但对于整个岩溶生态系统,如基于不同地貌类型、基于不同流域、基于不同基岩,乃至石灰岩与砂页岩结合的生态系统的研究,特别是宏观尺度下岩溶系统变化及其对其他系统的影响研究还很薄弱。此外,岩溶系统既是复杂的生态系统,也是极其脆弱的生态系统,其对自然和人类的影响十分敏感,在全球环境变化及人类活动强度增加的背景下研究其变化规律,寻求人类干扰的适宜度对于保持人-地关系和谐也至关重要。基于这些原因,下一阶段关于粤北岩溶环境的研究应强化以下几个方面。

1) 环境变化预测及其对岩溶环境的影响。包括岩溶区产业结构改变导致的空气、水、土壤污染对岩溶环境的影响,如酸雨程度增加对石灰岩溶蚀的影响、对土壤的影响、对水化学的影响等。

2) 人类活动对岩溶生态系统景观格局的影响。包括岩溶区土地利用方式变化(耕地、林地扩展)对土壤侵蚀、自然植被、石漠化、碳储存等的影响,化肥使用对岩溶土壤、岩溶流域的影响等。

3) 基于流域尺度的岩溶生态系统变化对流域生态的影响。包括岩溶流域尺度和整个流域尺度下水化学变化过程及岩溶生态系统对其他生态系统的影响,岩溶水化学对全球生态系统的作用等。

4) 岩溶区资源可持续利用与保护。包括岩溶植被保护、生物资源开发,岩溶土壤资源保护与利用,石漠化治理策略与技术,岩溶水资源保护与利用等。

1.4 研究内容与方法

1.4.1 主要研究内容

1. 粤北岩溶山区土地石漠化过程、耦合及逆转机理研究

(1) 土地石漠化时空演变过程的分析与模拟研究

利用 20 世纪 50~60 年代的航空相片和 70 年代与 21 世纪初的多光谱扫描仪/专题制图仪卫星遥感影像数据,编制粤北岩溶山区土地石漠化动态变化系列图件(1:25 万);解读、分析 20 世纪 70 年代中期至 21 世纪初粤北岩溶山区土地石漠化宏观尺度的时空格局、演变过程及分异规律。

(2) 土地石漠化生态过程的观测、模拟与研究

在石漠化典型地段布设定位观测点,以轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化三级退化土地和石漠化人工恢复、石漠化人工+自然恢复两种逆转土地为对象,对人为活动的强度与方式、雨水坡面径流水和裂隙水对地表的侵蚀、地表形态变化、小气候变化、土壤营养元素的变化与迁移、土壤水分变化、植物群落退化与恢复演替、主要建群种的生理生态、生物生产量的减增等多个因子、因子团及其效应等进行定位观测和对比,阐明植被变化与土壤侵蚀、基岩之间的关系。

选择典型石漠化土壤剖面,通过对石漠化土壤剖面的测量和采样,运用 ^{137}Cs 同位素等示踪技术,分析土壤流失与土壤丢失等侵蚀特征及侵蚀量。

选择典型岩溶丘陵布设定位试验观测点,开展天然降水条件下和人工模拟降水条件下,土地石漠化发展过程中,土壤侵蚀量、营养物质损失量、坡面上降水产流入渗的试验观测;并在不同程度石漠化土地上埋设碳酸盐岩试片,对基岩(石芽、角石、溶沟)的形态变化、土壤 CO_2 及土壤酸含量、岩石溶蚀量等进行观测。以非石漠化土地为对照,结合气象观测,探讨石漠化过程中降水变化与水分流失、土壤侵蚀(土壤流失与土壤丢失)对植物群落及植物生长特性、土壤营养元素迁移、碳酸盐岩侵蚀的影响,探讨土壤 CO_2 及酸含量、土壤侵蚀量对岩石“生长”的影响,研究土地石漠化的多个生态过程及其生态效应。

(3) 土地石漠化多过程、多维度生态过程耦合与生态过程建模研究

在对粤北岩溶山地气候-基岩-土壤-植被-水文的复杂性、脆弱性和区域气候变化、人为活动强度与方式分析的基础上,依据上述调查、观测、模拟试验的研究结果,阐明岩溶山地复杂界面上土地石漠化的植物退化过程、土壤侵蚀过程、水文循环过程、碳酸盐岩溶蚀过程、生物生产力退化过程等多过程、多维度生态过程耦合关系。运用地-气耦合生态过程计算机模拟系统,构建土地石漠化生态过程模型,揭示土地石漠化生态过程耦合的作用机理和本质,并通过对土地石漠化过程及其恢复机理的综合分析,提出不同