

# KARST

Mechanism and Regulation of Soil Quality Evolution  
in the Subtropical Zone of Karst Provinces

## 中国亚热带喀斯特山区 土壤质量演变机理及其调控途径

龙 健 李 娟 廖洪凯 刘 方 著



科学出版社

# 中国亚热带喀斯特山区土壤质量 演变机理及其调控途径

龙 健 李 娟 廖洪凯 刘 方 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

土壤质量演变及调控途径是中国亚热带喀斯特山区特有的重大科学问题。本书作者通过大量的实证研究,从生态环境要素的空间变化上研究土壤质量的演变规律,揭示不同喀斯特地貌类型、水文条件和不同人为耕作方式下环境因素与土壤质量的相互耦合关系,对土壤质量退化类型进行划分与评价,并从不同时段上研究了喀斯特环境中土壤质量退化的速率变化规律,揭示不同喀斯特环境耦合条件下土壤质量演变的时间变化情况。通过对典型样区中样点的定点观测,研究喀斯特环境中各要素对土壤系统内部各种物理、化学、生物过程的响应机制,揭示喀斯特环境条件下土壤肥力体系的演变过程,指出了合理开发利用岩溶山区土壤资源,解决或缓解资源承载力低下和人类需求的矛盾,是防止新的喀斯特山区土壤退化发生与发展、有效改善喀斯特石漠化的重要途径,并探讨了喀斯特石漠化治理对土壤生态系统稳定性的影响。通过定点观测样点和石漠化地区、过渡生态区、良性生态区的对比研究,结合喀斯特环境的复杂性和特殊性,提出喀斯特山区中主要耕地土壤质量的保持与定向培育原理与技术体系。通过实际的工程实践,证实了生态恢复途径的可行性,并在此基础上,建立了土壤质量恢复的土地利用模式和相关理论。本书的研究成果丰富了喀斯特山区土壤学研究的理论,而且为我国喀斯特石漠化治理提供了一条新的途径。

本书可作为大中专院校和科研单位从事土壤学、生态学、地理学及环境科学等广大科研工作者、管理人员以及相关专业研究生的参考用书,也可作为高年级本科生了解土壤地理学、生物地球化学以及全球气候变化等领域发展动态的课外资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国亚热带喀斯特山区土壤质量演变机理及其调控途径/龙健等著.  
—北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046493-4

I. ①中… II. ①龙… III. ①亚热带-岩溶区-土壤-质量-研究-中国  
IV. S159.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 283097 号

责任编辑:卢柏良 周 丹 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 伟 / 封面设计:许 瑞

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年12月第一次印刷 印张:20

字数:500 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

喀斯特环境是自然环境中一个独特的地理景观，以其二元结构为基本特征，形成了脆弱的生态环境。喀斯特环境在世界许多地方均有分布，尤其在我国西南地区滇、黔、桂三省较为集中，面积达 33.6 万  $\text{km}^2$ ，共约涉及 295 个县（市、区），覆盖人口约 4000 万人。其中仅在贵州省就有 13 万  $\text{km}^2$ ，占全省土地总面积的 73.6%，这使得贵州省成为我国喀斯特地貌较为发育的省份之一，该省属典型的亚热带生态脆弱区。20 世纪以来，该地区人口快速膨胀，人地矛盾不断激化，导致环境条件日趋恶化，森林覆盖率急剧下降、土壤严重退化、水土流失加剧、石漠化面积迅速扩大，严重影响了该地区社会、经济的可持续发展。目前该区贫困县就有 126 个，占全国贫困县的 19%。因此，深入认识喀斯特环境特点，探讨揭示土壤质量演变机理，研究其生态调控措施与途径已成为实现我国西部扶贫攻坚战略和促进喀斯特生态环境良性发展的重大科学问题。

土壤质量是现代土壤学的发展前沿和研究核心。研究土壤质量演变的机制、速率和效应及其与环境条件变化的相互关系是中国亚热带喀斯特山区土壤资源可持续利用的基础，探讨环境变化条件下土壤质量的演变是关系到土壤可持续利用和区域可持续发展的重要课题。土壤质量演变受生态环境演化和人为干扰及其强度的制约，因此其演变过程在时空上也有与之相应的演化类型。在喀斯特山区，由于地表破碎，成土过程缓慢，生态系统稳定性差，人为活动（不合理利用）是喀斯特环境土壤侵蚀和石漠化的主要原因（如生物多样性衰减、陡坡开垦等）。土壤质量演变特点明显，一般可以分为两种形式：一是渐变型退化，即从正常土壤→轻度石漠化→中度石漠化→严重石漠化→极严重石漠化的退化过程，当植被被破坏后，随着人类利用强度的加大，土壤侵蚀逐渐加剧，其作用是渐进的、平稳的，随着时间的推移，土壤逐渐退化，退化的程度从轻度发展到极严重程度；二是跃变型退化，即从正常土壤直接到极严重石漠化的退化过程，这种情形多半发生在陡坡开荒（ $>25^\circ$ ），在持续不断并逐渐加剧的自然和人为因素的干扰下，土壤质量产生退化阶段上不连续的退化过程，不合理的耕作方式和过度开垦，发生严重的水土流失，使正常土壤在短期内丧失土地生产能力，造成基岩大面积裸露。喀斯特地区的土壤质量演变，既有生态系统本身自然属性决定的内在原因。如喀斯特地区多为峰林、峰丛、峡谷地貌，地表崎岖破碎、坡度陡峭，溶蚀、水蚀作用显著，加上石灰岩成土速度慢，形成的土壤浅薄，并且土被不连续，土壤蓄水能力弱，植物生产缓慢、生态链易受干扰而中断，生态系统对外界干扰显得脆弱和敏感，系统的抗逆能力、稳定性和自我恢复能力较低；又有土地不合理利用等人为干扰的外在原因，植被覆盖率迅速下降，导致严重的水土流失，生物多样性减少，土壤质量退化，最终造成石漠化现象的产生。土壤是喀斯特（岩溶）地区一种广泛分布且具有重要意义的自然资源，长期以来大多数科技工作者多是从地貌学、水文学、地质学、地球化学、遥感及植物群落演变等方面入手展开研究。本书从土壤学的角度出发，对生态学、环境科学与地理学学科理论和手段进

行交叉,通过建立示范样区,在定位观测和室内分析的基础上,结合喀斯特石漠化区、过渡区、良性生态区的对比分析,系统研究了中国亚热带喀斯特山区土壤质量演变机理及其调控途径,获得了大量认识,极大丰富了中国在喀斯特地区土壤学的研究领域。

全书共分十章。第1章介绍了喀斯特环境与土壤退化及其恢复;第2章研究了喀斯特环境退化过程对土壤质量演变的影响机制;第3章探讨了喀斯特环境退化对小生境土壤性质及恢复能力的影响;第4章研究了喀斯特山区生境类型对土壤有机碳及其活性组分的影响;第5章研究了喀斯特山区土地利用方式对土壤有机碳矿化及其周转机制的影响;第6章探讨了喀斯特山区石漠化过程植被演替对水质变化的影响;第7章研究了喀斯特山区林草复合系统的土壤微生物学特性;第8章研究了喀斯特山区凋落物的生态功能、土壤石漠化及分形特征;第9章探讨了喀斯特石漠化治理对土壤生态系统稳定性的影响;第10章展望未来五年内中国亚热带喀斯特山区土壤质量及其调控途径研究方面的发展趋势,提出了今后努力的方向。

本书是在贵州师范大学龙健教授领导的研究组集体撰写完成的,是作者及其科研团队15余年来相关科研成果的系统梳理和总结。其中,龙健教授在对资料的收集整理、学术成果的凝练以及章节的组织汇总等方面起着决定性作用。各章撰写分工为:第1章,龙健、李娟、李阳兵;第2章,龙健、李娟;第3章,龙健、刘方、李娟;第4章,廖洪凯、龙健、李娟;第5章,龙健、廖洪凯、李娟;第6章,刘方、龙健;第7章,刘方、姚斌;第8章,龙健、龙翠玲;第9章,周文龙、李阳兵、龙健;第10章,龙健。此外,课题组的多位研究生参与了本书的资料收集和整理。

国家自然科学基金委对本书的科学研究及出版工作也给予了大力支持。其中涉及的国家自然科学基金项目包括:喀斯特环境中土壤退化机理与恢复重建途径研究(49761003)、贵州高原喀斯特生态环境退化与土壤质量演变及驱动机理(40361004)、喀斯特地区石漠化过程土壤微生物生态演变特征及其响应机制(40971160)、黔西南喀斯特山区石漠化景观时空格局对土壤水分的影响机制(31360121)、岩溶山地受损生态系统恢复过程中土壤微生物群落演变及其相互作用机制(41461072)等。正是有了这些项目的长期资助,才有了本书的问世。在此,笔者表示衷心感谢。

中国亚热带喀斯特山区土壤质量演变及其调控途径内容极其丰富、复杂,本书仅是冰山一角,只能起着抛砖引玉的作用。我们出版本书,也只希望本书能够引来众多科学家的关注和兴趣,希望今后有更多的学者和专家更加关注中国喀斯特地区土壤学研究,从宏观和微观、多角度多层次开展该领域研究,共同推动我国土壤学、生态学、环境科学与地理学的协同发展。

由于作者学术水平有限,时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请读者不吝赐教!

龙 健

2015年10月10日于贵阳

# 目 录

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第 1 章 喀斯特环境与土壤退化及其恢复                | 1   |
| 1.1 喀斯特山区土壤障碍因素分析及其调控               | 1   |
| 1.2 喀斯特山区土壤环境问题与对策                  | 6   |
| 1.3 喀斯特生态系统土壤成因及其恢复途径               | 10  |
| 1.4 喀斯特环境不同土地利用方式对土壤退化的影响           | 17  |
| 参考文献                                | 22  |
| 第 2 章 喀斯特环境退化过程对土壤质量演变的影响机制         | 24  |
| 2.1 喀斯特石漠化地区不同恢复和重建措施对土壤质量的影响       | 24  |
| 2.2 喀斯特山区退耕还林(草)模式对土壤肥力质量演变的影响      | 30  |
| 2.3 喀斯特石漠化演变过程对土壤质量性状的影响            | 36  |
| 2.4 喀斯特环境退化对土壤质量的生物学特性影响            | 42  |
| 2.5 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价         | 46  |
| 参考文献                                | 52  |
| 第 3 章 喀斯特环境退化对小生境土壤性质及恢复能力的影响       | 55  |
| 3.1 喀斯特山区不同土地利用和管理方式对土壤肥力的影响        | 55  |
| 3.2 喀斯特山区土地利用方式对石漠化土地恢复能力的影响        | 60  |
| 3.3 喀斯特小生境土壤类型及其土壤性质的变化             | 68  |
| 3.4 喀斯特生境退化过程土壤理化性质的变化特征            | 74  |
| 3.5 喀斯特生境退化过程中的土壤呼吸强度及酶活性           | 82  |
| 参考文献                                | 89  |
| 第 4 章 喀斯特山区生境类型对土壤有机碳及其活性组分的影响      | 93  |
| 4.1 不同土地利用方式下土壤有机碳和全氮分布特征           | 93  |
| 4.2 不同土地利用方式下土壤有机碳和基础呼吸特征           | 100 |
| 4.3 喀斯特山区土地利用方式土壤有机碳活性组分特征          | 106 |
| 4.4 不同土地利用方式对土壤物理有机碳组分的影响           | 112 |
| 4.5 不同土地利用方式下土壤团聚体有机碳分布及累积特征        | 118 |
| 4.6 花椒林种植对土壤有机碳和活性有机碳的影响            | 125 |
| 4.7 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响          | 131 |
| 参考文献                                | 140 |
| 第 5 章 喀斯特山区土地利用方式对土壤有机碳矿化及其周转机制的影响  | 145 |
| 5.1 喀斯特山区土地利用对土壤有机碳及其周转速率的影响        | 145 |
| 5.2 花椒种植对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响   | 152 |
| 5.3 花椒种植对喀斯特山区土壤有机碳拟合方程及化学组分稳定性碳的影响 | 161 |

|                                           |            |
|-------------------------------------------|------------|
| 5.4 凋落物输入对不同植被类型土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 .....    | 168        |
| 参考文献 .....                                | 177        |
| <b>第6章 喀斯特山区石漠化过程植被演替对水质变化的影响 .....</b>   | <b>184</b> |
| 6.1 喀斯特石漠化过程中植被演替及其对径流水化学的影响 .....        | 184        |
| 6.2 喀斯特山区旱地土壤向水体释放磷的动态变化规律及影响因素 .....     | 192        |
| 参考文献 .....                                | 200        |
| <b>第7章 喀斯特山区林草复合系统的土壤微生物学特性 .....</b>     | <b>204</b> |
| 7.1 林草复合系统对土壤养分含量的影响 .....                | 204        |
| 7.2 林草复合系统对土壤微生物区系的影响 .....               | 213        |
| 7.3 林草复合系统对土壤微生物遗传多样性的影响 .....            | 218        |
| 参考文献 .....                                | 229        |
| <b>第8章 喀斯特山区凋落物的生态功能、土壤石漠化及分形特征 .....</b> | <b>235</b> |
| 8.1 喀斯特山区土壤石漠化的本质特征研究 .....               | 235        |
| 8.2 喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究 .....           | 244        |
| 8.3 喀斯特山区次生林凋落物的生态功能 .....                | 249        |
| 参考文献 .....                                | 271        |
| <b>第9章 喀斯特石漠化治理对土壤生态系统稳定性的影响 .....</b>    | <b>277</b> |
| 9.1 喀斯特生态系统土壤非保护性有机碳含量研究 .....            | 277        |
| 9.2 喀斯特石漠化治理区表层土壤有机碳密度特征及区域差异 .....       | 283        |
| 9.3 石漠化治理对喀斯特山区土壤生态系统稳定性的影响 .....         | 292        |
| 参考文献 .....                                | 300        |
| <b>第10章 结论与展望 .....</b>                   | <b>303</b> |
| 10.1 研究结论 .....                           | 303        |
| 10.2 研究不足 .....                           | 311        |
| 10.3 展望 .....                             | 312        |

# 第 1 章 喀斯特环境与土壤退化及其恢复

喀斯特环境是一种脆弱性很强的生态环境，在我国有较广泛的分布，且在滇、黔、桂三省区分布特别集中，是制约我国西南地区经济发展的主要因素之一（卢耀如，1986；袁道先，1993）。虽然以往已展开了一些喀斯特环境方面的研究工作，但在土壤退化方面的研究基本上还是空白。本章阐述喀斯特生态环境的脆弱性及其土壤退化的成因机理，根据我国西部大开发中生态建设的要求，提出了喀斯特环境中土壤退化的恢复途径及其研究的关键性问题。

## 1.1 喀斯特山区土壤障碍因素分析及其调控

贵州省地处我国西南喀斯特（岩溶）地区的中心地带，分布着世界上最为典型的喀斯特景观，且分布面积最广、最为集中（杨明德，1986；Brown，1994），是我国喀斯特地貌最发育的省份，属典型的生态脆弱区，也是我国西部唯一没有平原支撑的山区省份。碳酸盐类岩石出露面积为 13 万  $\text{km}^2$ ，占全省土地总面积的 73.6%，按喀斯特面积占县（市、区）土地总面积 30% 以上为“喀斯特县（市、区）”标准计，全省 88 个县（市、区）中就有 75 个为喀斯特县（市、区），占总县（市、区）个数的 85.2%。全省有 91.2% 的人口居住在喀斯特地区，生产活动主要是农业、牧业和林业。喀斯特地区地形奇特，岩性特殊，造壤能力低，水土流失严重。喀斯特地形与其相伴风化物所发育的土壤以及农业生产都有一定的特殊性，长期以来，土壤流失防治和土壤农业改良一直是岩溶综合开发治理的基本内容。过去由于种种原因，无论岩溶还是土壤科技人员对岩溶地区土壤研究都较薄弱。本节试图通过对喀斯特地区土壤障碍因素展开论述，提出调控对策，为喀斯特地区土壤资源的合理开发利用与保护提供理论依据。

### 1.1.1 喀斯特环境脆弱性特征分析

喀斯特环境是地理环境中一个独特的生态环境系统，它处于碳物质能量循环变异极其强烈和快速的状态下，具有环境容量低、生物量小、群落易被替代、生态环境系统变异敏感度高、空间转移能力强、稳定性差等一系列生态脆弱性特征，是一种承灾能力弱、灾害承受阈值弹性小的生态脆弱环境（杨明德，1990），其脆弱性主要表现在以下几个方面。

#### 1. 二元三维空间的地域结构

岩溶环境在结构上表现为二元三维空间的地域结构体，即它是地表岩溶地貌景观单元和地下岩溶地貌景观单元共同组成的一个密切联系、相互制约的双重结构体（蒋忠诚，1998）。喀斯特地区往往具有发达的地下流域系统，并和地表流域系统间有密切的物质、能量联系，这种联系是双向的。同时，喀斯特流域在空间地理位置上表现为从河

流上游到下游、从分水岭到河谷、从地表到当地侵蚀基面以下一定深度的一个“三维空间界面”，该界面又是随时间的流逝，在一组分布关系参变量控制下，以不同的空间、时间尺度和层次发生物质实体的循环、演化和变异，从无序到有序，从不平衡到动态平衡的一种“耗散结构”，这种演替在自然状况下，是以地质时间为尺度的，而人类活动的参与，会使之加速进行。

## 2. 成土慢，土层薄，土被不连续

由于碳酸盐岩主要成分是  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{MgCO}_3$  等易溶物质在喀斯特作用过程中易淋溶流失，风化溶滤残留下来的酸不溶物质通常只占 1%~5%（万国江和白占国，1998）。十分缓慢的成土速度又导致土层薄的“先天性”缺陷，使贵州大部分喀斯特地区土层厚度多在 30 cm 以下。成土慢的这一特性还表现在石灰土的形成深受母质的影响，它在湿热的环境条件下极易进行溶蚀风化，新的风化物 and 崩解碎片以及含有碳酸盐的地表水源，源源不断地进入土体中，这就延缓了土壤中盐基成分的淋失和脱硅富铝化的进行，使石灰土一直处于幼年阶段。碳酸盐岩差异溶蚀的结果（构造裂隙及水对岩石选择性溶蚀的共同作用），使风化土层更不易保存，这就造成该区裸岩和土被不连续的自然特性。

## 3. 水土易流失

石灰岩地区土岩界面不存在过渡结构（土层常缺乏过渡层），即母岩与土壤通常存在着明显的软硬界面（苏维词和周济祚，1995），使土壤与母岩之间的亲和力与黏着力变差，一遇暴雨则极易产生水土流失和块体滑移。同时，在湿热的气候条件下，强烈的化学淋溶作用，使风化物中较高处的黏粒发生垂直下移，形成上松下黏，这又造成一个不同物理性质的界面，也容易产生水土流失。另外，土壤与母岩界面是一化学侵蚀面，当降雨渗透到岩石表面时，本身也产生化学侵蚀作用。在自然状态下（无人干扰），土壤水的渗透能力很强，使得地表径流常不足以在地表产生土壤侵蚀，化学侵蚀常常就在喀斯特地区占主导地位。

## 4. 生境干旱

随着喀斯特环境的发育，地表水不断向地下水转化，不完善的地表水系与地下水系并存而构成的二元结构喀斯特水系导致雨水及地表水强烈渗漏，形成“岩溶干旱”。特别是在一些构造抬升区，地表水系解体，地下水深埋，地表生境长期处于干旱状态，而石灰土结构表层疏松，这又加快了水分的下渗。同时，由于与大气交换通畅，因而蒸发也较非喀斯特地区的黄壤、红壤等酸性土壤强，土温极易升高，这也使生境常常处于干旱状态。另外，石灰土往往是土石相间的石旮旯土，在阳光照射下，石灰岩日间吸热，造成对土壤的“烘烤”，这更加剧了土壤中水分的蒸发。因此，同样水平的气象干旱，喀斯特环境远较非喀斯特地区严重，干旱频率随喀斯特发育面积增大而加强。

## 5. 生境对植物有严格的选择性

由于土壤的形成和熟化是在碳物质循环及富钙的环境下进行的，因此，这就造成了

土壤在组成成分上常表现出钾、碘、硼、氟等元素相对缺乏，土壤质量较差（杨胜天和朱启疆，1999），形成一种富钙、偏碱性的石灰性土类，因而只有那些在生理上表现出喜钙性、耐旱性和石生性的植物种群和根茎能适应攀附岩石，在裂缝中求得生存吸取营养的种属才能在土层薄、含钙质高、易旱的石灰土上生长发育。而且这些植被生长十分缓慢，野外测量结果显示，生长胸径在 10 cm 以上的柏木至少要 30 a 的时间。

### 1.1.2 喀斯特环境土壤障碍因素

#### 1. 碳酸盐岩抗风蚀能力强，成土过程缓慢

有资料表明，灰岩风化剥蚀速率为 23.7~110.7 mm/ka，若按平均 61.68 mm/ka 的剥蚀速率、平均酸不溶物 3.9% 计算，1000 a 只有风化残余物 2.47 mm，即每形成 1 cm 厚的风化土层至少需要 4000 a，慢者需要 8500 a，较非喀斯特山区慢 10~80 倍，且厚度不均（杨汉奎等，1994），这是喀斯特地区土层浅薄且分布不连续、喀斯特生境先天不足和脆弱性强的基本原因。

#### 2. 山多坡陡的地表结构不利于水土资源的保持

贵州山区喀斯特地表崎岖破碎，不仅山地面积大（其中山地占 87%，丘陵占 10%，而平川坝地仅占 3%），而且坡度陡。全省地表平均坡度达 17.78°，其中 >25° 的陡坡地占全省总面积的 34.5%，15°~25° 的占 34.9%，两者合计占 69.4%。山多坡陡的地表结构加剧了斜坡体水、土、肥的流失，在某些人类活动的干扰下，大面积喀斯特山地变成荒山秃岭，植被生境恶化，环境脆弱性增强。

#### 3. 特殊的土体剖面构造降低了斜坡土体的稳定性

喀斯特环境土壤剖面中通常缺乏过渡层，在基质碳酸盐母岩和上层土壤之间，存在着软硬明显不同的界面，这使岩土之间的黏着力与亲和力大为降低，一遇降雨便产生水土流失和块体滑坡。同时，贵州省地处亚热带湿润气候区，化学淋溶作用强烈，上层土体中的物理黏粒（<0.01mm）容易通过垂直下移积累，从而造成喀斯特地区土体的上松与下紧，形成一个物理性状不同的界面，这也容易导致水土流失的产生。喀斯特环境土壤与母岩间和土壤内部上、下层间存在的这两种质态不同的界面，不但加剧了水土流失，而且对生态环境的敏感性和脆弱性起了加剧作用。

#### 4. 典型的钙生性环境限制了生物多样性

喀斯特环境是一种典型的钙生性环境，许多喜酸、喜湿、喜肥的植物在这里都难以生长，即使能生长，也多为长势不良的“小老头树”。在这里适生的主要是那些耐瘠嗜钙的岩生性植物群落，如旱生性的草灌丛、多种藤本有刺灌丛等，叶片革质化明显，群落结构相对简单，生态系统的正向演替速率慢且易中断，群落的自调控能力弱，这是贵州省喀斯特生态环境脆弱的重要原因。

### 5. 喀斯特环境的逆向演替

毫无疑问，喀斯特环境的逆向演替及其土壤退化是自然因素和人为因素共同作用的结果。就自然因素而言，喀斯特环境的二元结构是喀斯特环境脆弱的根本原因，也是喀斯特环境中土壤质量下降的主要影响因素（徐樵利，1993；张桃林和王兴祥，2000）。所谓二元结构是指地表喀斯特景观单元和地下喀斯特景观单元共同组成的一个密切联系、相互制约的双重结构体。在这种结构中，大气降水形成的地表水很快通过落水洞进入地下溶洞，漏水漏肥现象十分严重，即使在该区年降雨量高达 1000~1200 mm，也普遍出现“湿润条件下干旱”的情况，导致土层较薄，肥力低，植物生长十分缓慢。就人为因素而言，在人口不断增加的今天，我国西南地区的人口容量已大大超过了该区可承载的人口容量。例如，贵州省 1997 年人口为 3605 万，粮食产量达创纪录的 1025 万 t，但人均占有粮食仅 283 kg，与人均 350 kg 的温饱标准和 400 kg 的小康标准相距甚远，按现有生产力水平，以温饱标准计算，当前贵州合理的人口容量约为 2950 万，人口超载率达 22%。人地矛盾、人粮矛盾突出，使得毁林开荒非常普遍， $>25^{\circ}$  的陡坡耕地占全省耕地总面积的 20% 以上。因此，一旦植物被破坏后，土壤将很快退化，最终整个喀斯特环境会退化到一个低水平层次的物质、能量动态平衡状态。喀斯特环境逆向演替过程如图 1-1 所示。

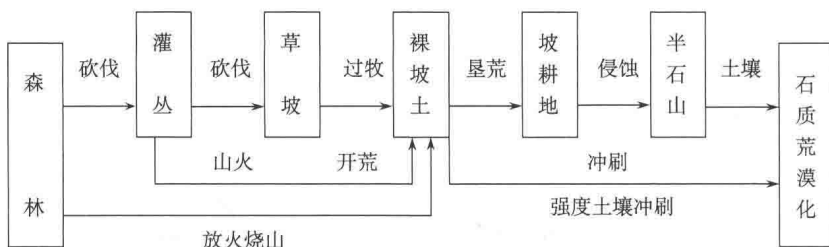


图 1-1 喀斯特生态环境逆向演替示意图

#### 1.1.3 调控对策

岩溶山区特殊的地质地貌造成该区生态环境脆弱，土壤资源极其珍贵。因此，加强保护有限的土壤资源，增加对耕地的投入，排除土壤障碍因素，加大中、低产田的改良力度，是实现该区农业可持续发展的根本途径。

#### 1. 水分状况的改善和调节是增产的关键措施

喀斯特地区地形条件特殊，水源分配不均匀，易造成旱涝灾害，因此必须兴修水利，进行储水灌溉。喀斯特地区群众修筑水库已有丰富的经验，如寻找不漏水的岩层且有泉水涌出之处进行修筑小型的山塘以解决灌溉用水。另外，混种、套种等耕作措施和经济用水等也是重要的措施。实行混种、套种，做到土不离根、根不离土，以保持地面

四季常青，特别是在作物生长的春、夏、秋三季保持地面覆盖，减少土壤水分的蒸发，以利于土壤保蓄水分，达到保证作物正常生长而高产的目的。

## 2. 水土保持是保护和提高土壤肥力的关键

土壤侵蚀不但会破坏土壤肥力，而且会把熟化肥沃的耕层冲走而毁灭土壤，这在石灰岩地区危害更大。因为石灰岩地区土层薄，土层下为坚硬的基岩，侵蚀作用会把全部土壤及风化壳冲走，而使基岩全部裸露，丧失生产能力。因此，必须修建梯田，建立稳固的农业基地，加强对旱坡耕地的有效整治，才能遏制土壤养分的流失，改善农业生产基础条件，增强农业后劲。在整治坡耕地时，应大力推广以生物梯化为主的“SALT” (sloping agricultural land technology) 技术，建立农林（果）、农牧复合生态系统。

## 3. 中、低产田土壤的改良

喀斯特石山土壤肥力偏低是造成作物单产偏低十分重要的原因。根据资料统计，低产土壤占土壤总面积的60%以上，土壤改良任务十分艰巨。消除中、低产障碍，是实现该地区农业可持续发展的关键所在。

农业土壤改良的任务是消除不利于土壤利用的障碍因素，改善土壤生产性能，提高土壤生产力。因此，喀斯特地区中、低产田的改良，必须根据其成因的不同，采取不同的措施。对过多施用石灰而引起的应进行深耕，通过减少石灰施用量、增施有机肥料、冬种绿肥或压青等办法来改良土性；由侧流矿化水引起的，除上述措施以外，在其侧流来源的上部开沟排除侧流物是根本措施；地下水引起的冷水田，应实行浅灌、勤灌，冬季沤田以防止地下水的上升；对黏板型中、低产田应采取添加砂土或粉煤灰加以改良。

## 4. 有机肥料和石灰的施用

增施有机肥料是改良土壤性质、提高土壤肥力、充分发挥土壤矿物质养分作用的重要措施。耕作土壤一般缺乏有机质，土壤团聚结构破坏，土质黏重，土壤耕性不良。喀斯特地区野生绿肥资源丰富，种类繁多，可以充分利用以改良土壤耕性，提高土壤肥力，创造良好的作物生长的土壤环境。喀斯特地区石灰来源方便，取之不尽，用之不竭，因而施用很普遍，且量多施用与其他肥料配合恰当对增加生产起一定作用。但如果配合不当，不但得不到增产效果，反而会使土壤变坏而减产。石灰施用的关键在于其同有机肥料（绿肥、稻草还田及一般有机肥）的密切配合，配合得当，则既可提高产量，又可改良土壤的理化性质；否则，仅大量施用石灰，田土变硬，有机质遭到迅速分解，土壤理化性质变坏，肥力降低，退化为低产土壤。因此，石灰与有机质的良好配合是喀斯特山区增产改土的重要措施。

## 5. 因地制宜，合理安排种植茬口

喀斯特地区旱地面积广阔而零碎，地不连片，坡陡，土层浅薄，母岩裸露，但土壤肥力较高，农业生产潜力大，只要安排合理，就会获得良好的产量。在坡陡土少而不宜农作的地区应大力进行造林绿化，这样不仅可以改善气候，还可以减少水旱灾害和土壤

侵蚀对农业生产的影响。此外,集约经营土地也是重要途径之一,如混种和套种、穴垦穴种,充分利用零星的土地。集约利用土地是石灰岩地区充分利用光能和热能、扩大耕地面积、增加粮食产量的主要措施之一。

## 6. 积极推进退耕还林(草)

退耕还林(草)是实施西部开发战略中生态建设的重要措施,这在喀斯特山区尤其重要。贵州喀斯特地区山多坡陡,大部分耕地属于坡耕地,每年土壤侵蚀量的90%来自坡耕地,搞好退耕还林(草)工作,是遏制喀斯特山区水土流失、重建生态的核心和关键。为顺利推进退耕工作的实施,要做到如下三点。一是加强基本农田建设,扩大良种推广面积,以提高基本农田单位面积的粮食产出,使农民在退耕后粮食不至于下降太多;二是适当加大对退耕还林(草)区的补贴力度(包括粮食和资金),保持退耕区农民的生活水平不下降;三是做好退耕地的开发和管理,根据喀斯特山区的具体情况,在退耕地上发展适生于喀斯特环境的既有生态效益又有经济效益的经济果林、药材林(如花椒、香椿、石斛、金银花等),使退耕区农民的纯收入稳步提高,确保退耕地不被复垦。

喀斯特地区是我国典型的生态脆弱区,人口容量小,生物生产力与生物量低,生态环境敏感度高,易遭破坏且难以恢复。该区造壤能力低,水土流失严重,旱涝灾害突出,是西部生态建设的重点区域之一。喀斯特地区土壤障碍的根本原因是喀斯特环境的脆弱性。其次,人为活动的干扰是该环境土壤质量下降的重要外营力,而喀斯特环境独特的地理结构即二元结构是该环境中土壤质量下降的主要影响因素。贵州喀斯特地区水热条件丰富,土壤资源匮乏,基本上没有可开发的耕地后备资源,尤其是高质量的基本农田。目前,退耕还林(草)已成为政府的主要政策取向。发展农业生产的唯一出路就是集约化经营,从而提高单位面积产量。为此,对喀斯特山区土壤资源来说,必须实行保护与利用并重的方针,保护好现有的土壤资源,才能做到土壤的持续利用。

## 1.2 喀斯特山区土壤环境问题与对策

### 1.2.1 问题的提出

贵州省岩溶山区是我国西部生态环境脆弱带的重要组成部分。近百年来,岩溶山区人口迅速增加,自然植被破坏,开荒、扩荒以及过度开发资源,使土壤质量发生了重大的变化。土壤环境的变化主要表现为土壤退化,生产力下降,土壤生态环境日益恶化,特别是在贫困山区人口增加和农业极低投入的双重作用下,土壤环境问题尤其突出,严重制约着岩溶山区经济、社会的可持续发展。在第18届国际土壤学大会上,土壤与环境问题成了会议的中心议题之一,成为全世界土壤学家共同关注的重大问题(Sposito and Reginato, 1992; 赵其国, 1995),大会除了研究土壤自身基本性质及其发生规律外,主要研究土壤及环境质量问题。岩溶山区土壤与环境问题是关系到岩溶地区经济社会可持续发展和我国西部大开发战略实施与推进的重大科学问题,为适应国民经济社会发展,全面建设小康社会,亟待开展岩溶山区土壤与环境问题的研究。

## 1.2.2 喀斯特山区土壤环境的主要科学问题

### 1. 岩溶动力系统对土壤环境元素迁移的影响

目前,  $\text{CO}_2$  温室效应对全球的影响及其可能带来的环境问题, 已成为许多国家政府普遍关注的一个重大问题。生物碳循环是全球碳循环中最活跃的子系统, 其中土壤有机碳含量  $1.6 \times 10^{12}$  t, 是大气  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  碳库总和的 2 倍。在岩溶地区, 独特的岩溶作用对喀斯特环境土壤的形成和演变具有深远的影响, 岩溶动力系统 ( $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ) 的运行及环境因素的相互作用驱动了土壤环境元素的迁移, 最终影响土壤环境质量 (Pan et al., 1997)。加强岩溶山区土壤中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  的源和汇及其在不同耕制与作物种植条件下  $\text{CH}_4$ 、 $\text{NO}_2$  的变化规律研究对阐明全球土壤温室气体形成机理、变化规律具有重要意义。

### 2. 岩溶山区土壤退化时空变化、形成机理与调控对策

贵州高原地处长江、珠江上游分水岭地带, 岩溶发育强烈并分布广泛, 岩溶山区地貌类型复杂, 区内山高坡陡, 土被薄而不连续, 加之森林植被的破坏和人为活动的干扰影响, 土壤侵蚀极为严重。严重的土壤侵蚀是岩溶地区生态恶化的主要表现形式 (土地石漠化), 这已给这些地区土壤生态环境造成严重的影响, 土壤侵蚀对生态环境和社会经济发展现状存在的危害较之其他地区更为严重 (万国江和白占国, 1998)。20 世纪 60 年代贵州省水土流失面积为 3.5 万  $\text{km}^2$ , 占全省土地面积的 14.2%; 20 世纪 70 年代流失面积 19.9%; 20 世纪 80 年代上升到 5 万  $\text{km}^2$ , 占 28.4%; 20 世纪 90 年代已超过 8 万  $\text{km}^2$ , 占 43.5%; 1998 年全省土壤年侵蚀总量已达 2.8 亿 t, 相当于每年有 4.33 万  $\text{hm}^2$  平均厚度 33 cm 的土层被冲走, 导致石漠化面积日益扩大, 现已达 1.33 万  $\text{km}^2$ , 而且每年以 0.933 万  $\text{hm}^2$  的速度递增。仅贵州省毕节市水土流失面积占土地总面积 44.3%, 每年泥沙流失量达 813.3 万  $\text{t}/\text{km}^2$ , 相当于每年侵蚀 0.4 cm 的表土层, 约损失有机质 142 t、全氮 7.7 t、速效磷 0.04 t、速效钾 0.5 t, 相当于该市每年施肥所提供的养分。全省严重的水土流失灾害造成了土地的严重损毁和污染退化, 每年损毁的耕地约 0.67 万  $\text{hm}^2$ , 退化的耕地面积就更大, “生态移民” 数量增加, 引起了党中央和国务院的高度关注。

### 3. 岩溶山区土壤污染发生类型、形成规律与防治途径

贵州省是汞、镉、铅、钼、铜、锌、砷、铊等微量元素分布地球化学异常的省份, 也是容易造成这些元素污染的省份。贵州新一轮 1:20 万区域化探扫面工作的分析结果, 与全国相比, 贵州全省具有亲铜成矿元素呈强聚集的高地球化学背景占主导地位的特点。以汞、镉、砷、铊为代表 (包括铜、钼、铅、锌) 的地球化学背景值明显高于全国的背景值, 其中汞、镉、砷、铊的富集系数为 1.80~39.6; 钼、铜、锌、铅等重金属元素的富集系数为 1.20~2.00。与地壳克拉克值比较, 汞、镉、铅、砷、铊的富集

系数分别为 1.28、1.57、2.35、8.27 和 6.75。在卡林型金矿区、汞矿区、锑矿区普遍发育着汞、锑、砷、铊、金等元素组合异常；在铅锌矿区普遍发育铅、锌、镉、银、锰等元素组合异常。在这些矿种的矿区及其外围，这些元素的背景异常突出。汞、锑、金、磷矿是贵州的优势资源矿产，铅锌矿也具有重要地位，这些矿点多面广，导致有毒有害元素的原生地球化学富集，表生环境的地球化学异常以及人为开发的后天污染，将影响区域人类生态系统的土壤环境质量，这是贵州省一种不利的环境特征。这些元素如果在矿业活动中不断污染与累积，其毒性在生态系统的食物链传递过程中就会逐渐加强，最终影响人体健康。日积月累，还可能造成“爆炸性”的严重后果。例如，贵州省兴仁县的铊中毒、高砷燃煤砷中毒等事件，就是明显的例证。

#### 4. 岩溶山区土壤质量的演变机制、评价体系及恢复重建

岩溶山区土壤类型复杂，幼年土壤所占比重大，并且土体浅薄，质地黏重，结构性差，通气透水能力弱，耕性不良。土壤中有有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、缓效钾、速效钾处于中低水平（全国土壤普查肥力分级标准），土壤养分处于贫瘠状态。典型的岩溶山区石灰土中由于大量的游离钙的存在，土壤呈微碱性反应，这对土壤中微生物活动、养分有效性及各种养分的协调供应状况等产生不利影响，从而影响土壤生产力发挥。西南岩溶山区土壤普遍存在限制因素既是造成水土流失与生态环境恶化的原因之一，又是水土流失与生态环境恶化的结果之一。因此，只有加强保护有限的土壤资源，增加对耕地的投入，排除土壤障碍因素，培育可持续利用的土壤，提高土壤质量，才能实现农业的可持续发展。

#### 5. 岩溶山区土壤生态环境建设及其治理途径

水土流失是岩溶山区土壤生态环境建设的主要祸源，水土保持已成为生态环境建设的主体和江河治理的根本措施。全国与生态环境有关的土地利用两大问题——即北方沙漠化和南方的石漠化中，沙漠化问题已受到重视，而石漠化问题至今未受到应有的重视。而事实证明，岩溶地区保护珍贵的土地资源比其他地区显得尤为急迫。岩溶山区土壤形成速度极为缓慢，土壤相对较少而珍贵，每千年的风化残留物仅为 1.27~4.60 mm，每形成 1 cm 土层需 2000~8000 a（张美良和邓自强，1994）。流失这宝贵的 1 cm 土层在岩溶山区一般只需 1 a 左右的时间，更有甚者，一场暴雨可使数厘米乃至数十厘米的土层流失殆尽，岩溶山区土壤的流失与生成比值较之任何山区都大，这就是岩溶山区土壤生态环境建设与治理的严酷现实。此外，由于岩溶山区地质地貌发育齐全，岩石组成结构、地貌特征、水热气候条件、土壤类型分布、水文地质条件及植被生态群落等诸多方面均存在明显的差异。山高坡陡，切割剧烈，裸岩出露面积大，硬地面易形成径流，溶洞、漏斗、裂隙、裂缝又使地表径流变成地下径流，从而造成这些地区地下水污染，“跑水跑肥”现象严重，加剧了岩溶山区土壤生态环境建设与治理的难度。

## 6. 粗放的矿产资源开发对土壤环境的影响机制

开发矿产资源的矿业活动是人类作用于地球表层强度大、扰动环境程度最重的活动,而当其作用于生态环境、地质环境贫瘠脆弱的喀斯特(岩溶)山区时,其影响则更加严重。在采掘过程中,常出现许多问题,如植被的破坏、地下水位下降、干涸、区域性干旱、地表塌陷、矿坑废水的污染、废弃尾矿堆积占用土地、开采造成的边坡失稳、滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害问题。在矿产资源的粗放利用中,贵州普遍存在小土焦、小铅锌、小冶金、小硫磺等多种原始生产方式,虽屡屡明令禁止,但因种种原因常禁而不止,其对水、气、土壤、植被的污染和影响极其严重,加之地区的经济相对落后,对矿产资源开发和环境保护的资金、科技投入严重不足,普遍存在资源的回采率、回收率、综合利用率、土地复垦率、生态恢复率都十分低。这些都加剧了资源的浪费、环境的污染、生态的破坏,严重影响着资源的可持续利用和资源与生态环境的保护。

## 7. 岩溶山区土壤与环境有关的基础问题

岩溶山区土壤与环境有关的基础问题主要涉及土壤与古环境、古地貌;土壤碳循环与全球变化;土壤污染物质的转化规律与形成因素;水土资源的变化规律与调控;城市与近郊土壤的基本特性、发生分类及其对环境的影响;土壤资源的开发利用与环境的影响;土壤信息与遥感技术的应用;土壤新仪器设备与手段的研制与开发;土壤环境技术与成果的开发、转化与推广应用。开展岩溶山区土壤环境问题的研究应着重于土壤因素与其他环境因素的相互作用,其核心内容是研究岩溶山区土壤与生态环境问题,开展岩溶山区土壤与生态环境的多样性、稳定性与土壤储存、转化和运输功能等三个方面研究工作。

### 1.2.3 治理对策

#### 1. 制定喀斯特环境生态建设与保护规划

针对喀斯特生态环境脆弱性现状、类型及其成因,应尽快制定喀斯特生态环境建设与保护规划。其中应把喀斯特森林植被的恢复和营造、水土流失和石质荒漠化防治、天然林工程、主要工矿区的生态建设示范作为重点,明确目标,分类分期分批实施。

#### 2. 设立喀斯特生态环境建设专项基金,实施合理的补偿机制

我国西南喀斯特地区地处长江和珠江上游,其生态状况的好坏对本地区和长江、珠江两大流域中下游地区可持续发展均有深远的影响,生态地位重要;同时,该地区是我国少数民族最集中、贫困面最大(贫困县约占全国的1/2)、贫困人口最多的地区,生态建设所需经费投入严重不足(蔡运龙,1990)。因此,除应考虑设立喀斯特生态环境建设专项基金外,还应实施合理的流域开发生态补偿机制,使流域上游喀斯特生态治理区能与中下游经济发达区形成一种良性的经济生态互动关系,促进整个流域的持续协调发展。

### 3. 加大喀斯特环境生态整治技术的研究开发与试验示范力度

选取适合喀斯特环境生长的优势经济果林,采用多种技术,特别是当地中药材品种的选育和规模化栽培技术、石漠化地区治理的先锋植被的选育技术、喀斯特环境造林营林与管理技术、喀斯特山区优势农副产品的保鲜与加工技术等,同时针对不同喀斯特地域的经济社会发展状况及生态脆弱性的类型、成因机理,选择有代表性的几种主要喀斯特生态脆弱类型区进行生态环境治理与可持续发展试验示范,不断总结经验,推广生态环境治理的成功模式。

### 4. 建立喀斯特山区中土壤环境质量的监测预警与管理系统

土壤环境演变实质是一个物质动态平衡过程,其数量和质量的时空变化特点。因此,建立喀斯特山区土壤环境质量时空动态的监测预警与管理系统是十分必要的。以典型喀斯特山区的定位观测资料和各种开发活动的动态监测资料为基础,通过系统分析与模拟,建立具有喀斯特环境地域特色的土壤生态环境监测预警与管理系统;根据喀斯特环境生态结构、功能及其演替规律,分析不同喀斯特生态类型对外界干扰的响应状态,确定合理的生态阈值,建立喀斯特景观动态变化的预测、预警系统;在上述系统的支持下,建立符合喀斯特区域环境土壤质量的监测信息系统,将土壤环境问题研究从静态发展到动态,及时为生态建设规划与决策服务。

## 1.3 喀斯特生态系统土壤成因及其恢复途径

土壤学界对石灰土的类型与特征已有详尽的研究,但仅限于土壤本身;而过去岩溶研究重基岩、轻土层。岩溶生态系统土壤和表层岩溶带是岩溶地区岩石、大气、水、生物等四大圈层的敏感交汇地带,又是生态系统赖以存在的基础。它作为土壤圈层的一部分,有其特殊性,因此很有必要从土壤在地球表层生态系统中的地位与作用的高度,从土壤形成演化的驱动力去探索并体现土壤与地质过程、生态过程及社会经济过程的关系,从地球表层系统演化、岩溶生态系统的角度来认识岩溶生态系统土壤的特征及其与岩溶生态退化恢复的关系。

### 1.3.1 喀斯特生态系统土壤成因与分布特征

#### 1. 土壤成因

目前,对覆盖在碳酸盐岩之上的红色松散堆积物质的成因以及红色松散堆积物质与碳酸盐岩之间的关系仍存在很大的争议,随着对世界不同地区碳酸盐岩上覆土层物源及成因研究的深入,关于它们的物源及成因的认识,目前至少有如下几种观点:①碳酸盐岩酸不溶物的残余堆积;②碳酸盐岩上覆或附近高处碎屑岩的风化残余;③风成沉积物或火山灰的风化残余;④携带外来成土物质的表生流体对碳酸盐岩溶蚀、交代、沉淀和充填的成土方式;⑤多成因说,即上述观点中前三者或其中两者对碳酸盐岩上覆土层物