

生物地球化学过程 与地表物质循环

——西南喀斯特土壤—植被系统生源要素循环

刘丛强 等 著



科学出版社

www.sciencep.com

生物地球化学过程与地表物质循环 ——西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环

**Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's
Surface: Cycling of Nutrients in Soil-Plant Systems of Karstic
Environments, Southwest China**

刘丛强 等 著

by Cong-Qiang Liu et al.

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是我国第一本系统研究西南喀斯特流域土壤-植被系统养分生物地球化学循环的成果专著,介绍了作者作为学术带头人领导的课题组近年来系统利用同位素与元素地球化学研究手段,并结合土壤学和生态学的研究理论及思路,对我国西南喀斯特地区主要类型土壤的成土过程,不同类型植被覆盖土壤中碳、氮、硫、磷及其他金属矿质养分的分布与循环特征的研究成果。全书共十二章,内容涉及土壤-植被系统中的生物地球化学过程和微生物地球化学的研究;喀斯特地区风化成土作用的地球化学特征;大气氮沉降的苔藓地球化学记录;土壤-植被系统的养分循环,重点介绍了碳、氮、磷、硫和其他金属矿质养分在土壤和优势植物中的分布变化特征;土壤氮循环与植物适应性;土壤-大气界面温室气体吸收与释放;小流域岩石-土壤-植被相互作用与地表水地球化学。

本书是一本成果专著,也是一本系统介绍地表圈层物质生物地球化学循环的元素和同位素示踪的研究理论、方法和思路以及有关研究动态的著作,可供地表地球化学、喀斯特地理、生态学、植物学和土壤学等学科的研究人员以及高等院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

生物地球化学过程与地表物质循环:西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环/刘丛强等著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023875-7

I. 生… II. 刘… III. 喀斯特地貌-生物地球化学-研究-西南地区
IV. P931.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 001447 号

责任编辑:谢洪源 宋云华/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第一版 开本:889×1194 1/16

2009年1月第一次印刷 印张:39 1/2

印数:1—1 500 字数:1 100 000

定价:260.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

序

地球近地表环境，也称为地球临界带或关键带（The Earth's Critical Zone）维持了几乎所有陆地生物的生存。人类生存和社会发展的快速需求促进了人们对这一地表和近地表环境中各种过程的研究和理解。地球临界带是一个固体地球和流体之间的动力界面，受复杂而广泛的物理、化学和生物过程的共同控制。由地球内部能量驱动的各种地质与构造运动改变地表环境，由大气和水圈驱动的风化作用控制土壤形成和侵蚀以及地表岩石的化学风化，由重力驱动的流体运动确定了地表地形地貌和地表物质的重新分配，由对养分的需求驱动的生物活动控制了土壤、岩石、大气和水之间的化学循环。因此，对地球临界带的综合研究被地质学家、生物学家、土壤学家和水文学家们认为是最为核心的研究领域之一。研究的核心内容有：在不同时间尺度上控制碳及其他物质循环和通量的各种过程；营养生态系统的过程在人类和地质时间尺度上的变化规律；生物地球化学过程控制土壤和水的长期持续性的机理；化学和物理风化的变化影响地球临界带的形式和特征。

土壤圈是地球临界带的主体，因此地球临界带研究的核心科学问题也就构成了现代土壤科学的主要研究内容，并成为目前世界土壤科学界的优先研究领域。历史上，土壤科学发展经历了从具有地质学根基的学科到应用农业和环境学科，并经过地球临界带的研究又发展到生物和地质科学的交叉学科的螺旋曲折道路。现代土壤科学的研究内容具有更丰富、广泛、集成、分析和定量特点。当前土壤科学面临的一个重要挑战是多学科的交叉研究。学科的交叉包括经典土壤科学的分支学科之间的交叉，如土壤化学、土壤物理学、土壤生物学、土壤矿物学、土壤学之间的相互合作。更重要的是通过引进其他学科，如微生物学、水文学、生态学、环境科学、地球化学、地质学、大气科学的知识和研究手段及理论，提高土壤科学解决问题的能力。

土壤圈是地球系统的重要组成部分，位于地球大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的界面上，是这些圈层共同作用的产物。土壤与水、大气、生物一起构成完整的地表自然环境，各自发挥重要作用但又相互联系。土壤圈通过与其他圈层间的物质交换影响生态系统的演化、影响全球气候变化、影响人类生存环境。因此，土壤圈与其他圈层的物质交换和循环以及控制圈层中和圈层之间的物质循环的生物地球化学过程的研究对我们认识人类生存环境变化并进而对其进行保护具有重要意义。近十年来，刘丛强研究员的课题组以典型喀斯特小流域为研究对象，根

据喀斯特生态系统退化和石漠化过程的不同阶段或生态演替阶段，结合基岩性质、土壤类型、水文条件等因素，在结合土壤学、水文学、生态学和地理学的理论和研究手段及方法的基础上，充分利用元素地球化学、多种同位素地球化学示踪和化学计量学理论及方法，对喀斯特生态系统中不同界面物质的生物地球化学循环进行了多学科交叉研究，并获得重要研究成果。他们在出版的前一本成果专著《生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环》中，系统介绍了他们前期对西南喀斯特地区大气沉降、河水、地下水、湖泊水体的地球化学组成特征、变化规律及其生物地球化学过程的控制机理和与流域生态环境变化之间关系的研究成果。该成果专著作为他们课题组对喀斯特地质与生态系统生物地球化学过程与物质循环研究的又一研究成果，主要介绍了他们近年对西南喀斯特地区土壤-植被系统中各种养分生物地球化学循环过程的研究工作，是多学科交叉研究土壤-植被系统物质生物地球化学循环和相关生态与环境问题的研究典范。

在地球临界带中，土壤-植被界面是控制物质循环和生态系统演化以及人类生存环境改变的重要界面。因此，对植物根区矿物化学风化、元素释放迁移、形态转化的生物地球化学作用的研究极为重要，是我们认识生态系统演化规律及其实质的理论基础。刘丛强研究员课题组近年对我国西南喀斯特环境土壤-植被系统养分生物地球化学的研究是一项目前我国对地球临界带物质循环及其生态环境效应研究的代表性工作，其涉及的研究内容主要有：岩石-土壤界面上生物-岩石相互作用与岩石风化成土过程；不同土壤-植被系统中碳、氮、硫、磷及其他金属矿质养分的分布和生物地球化学循环特征及其与生态系统演化之间的关系；不同植被覆盖土壤-大气界面温室气体的释放与吸收；土壤系统氮和磷等养分循环与植物适应性；小流域岩石-土壤-植被相互作用与地表水地球化学组成变化。即将出版的本成果专著介绍了刘丛强课题组在上述各方面的系统研究成果，这些研究成果对地球临界带核心科学和生态环境问题的研究具有重要的理论意义，对喀斯特生态环境的保护治理具有重要实践指导意义。

该书在国内是第一本全面论述喀斯特地区土壤-植被生态系统物质生物地球化学循环的成果专著，展示的研究内容和科学问题是前沿的，展示的研究工作成果是丰富而系统的，获得的研究结论具有重要理论意义和实践指导意义。该书的出版将促进我国对地表环境，其中特别是土壤圈形成、演化及其与之相关的生态与环境问题的多学科交叉研究，可供从事地表环境科学研究、环境土壤学研究和生态学研究的科学工作者及研究生参考。因此，该书出版之际，我很高兴为之作序，并表示祝贺。

赵其国
2008年12月20日

前 言

喀斯特环境中物质的生物地球化学循环受地质、地理、生物、水与大气的控制。喀斯特生态系统的普遍特征是富钙、偏碱的地球化学环境，缓慢的土壤生成速率与浅薄的土壤覆盖，活跃快速的水分运动和生态系统有限的水利用，土壤中养分库与有效性的不平衡及时间和空间的不匹配，形成具有喜钙性、耐瘠性、岩生性和旱生性的喀斯特植被。喀斯特生态系统运行的基础是系统中大气-水-土壤-生物（植物-微生物）等界面的物质（养分与水分）生物地球化学循环，其运动规模、迁移方向、流通速率是决定生态系统生产力与稳定性的关键控制因素，其耦合与脱耦合是喀斯特生态系统稳定与退化的根本原因，其调适与重构是喀斯特生态系统修复和优化的根本途径。喀斯特生态环境的特殊性在于这种循环的脱耦合决定的生态系统的脆弱性，使得植被变化、土地利用方式的改变导致生态系统生产力和稳定性的快速改变，同时影响到自然-社会-经济系统的可持续性。水分和养分循环方式的变化，如森林向农田的生态系统转换会显著降低土壤有机质活性组分的含量、组成和生物有效性。基岩大面积出露的石漠化过程的实质是喀斯特生态系统正常生物地球化学循环过程的改变或中断过程。因此，有必要加强对不同喀斯特生境类型的生物地球化学过程研究，建立生物地球化学循环对生态系统演替过程的响应和动态机制模型，分析生物地球化学循环的某一过程与环境因子间的关系，如与植物光合作用、土壤有机质分解转化等的关系，并将生物地球化学循环的全过程或多个过程综合考虑，进而预测未来环境变化或人类活动对喀斯特生态系统功能的影响，为制定喀斯特生态系统优化调控对策和措施提供科学依据。

生态系统的演化与系统内水分和养分的生物地球化学循环密切相关。研究生态系统演化过程中物质的生物地球化学循环规律，是研究植物适生性、物种优化配置和适应性生态系统调控机理的关键基础。近年来，我们以典型喀斯特小流域为研究对象，根据喀斯特石漠化过程的不同阶段或生态演替阶段，结合基岩性质、土壤类型、水文条件等因素，利用元素、同位素（如 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ）示踪和化学计量学理论和方法，对喀斯特生态系统中不同界面物质的生物地球化学循环进行了研究：对岩石-土壤界面，主要研究矿物在生物作用下化学风化、元素释放规律以及控制元素循环的界面过程，如水-粒界面吸附解吸过程、水-矿物界面化学反应过程等；对土壤-植被界面，重点研究植物根区矿物化学风化、元素释放迁移、形态转化的生物地球化学作用；对不同植被覆盖下的土壤-大气界面，主要运用同位素组成和通量研究来研究界面温室气体循环及其控制因素和过程；对典型小流域物质的水文地球化学循环研究方面，主要通过大气降水、地表水、土壤水和地下水的化学和同位素组成研究，揭示水体溶解物质组成和来源及其与流域地质和生态系统变化的关系。

在我们已出版的《生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环（Biogeochemical Processes and Cycling of Nutrients in the Earth's Surface: Chemical

Erosion and Nutrient Cycling in Karstic Catchments, Southwest China)》中,系统介绍了我们前期对西南喀斯特地区大气沉降、河水、地下水、湖泊水体的地球化学组成特征、变化规律及其生物地球化学过程的控制机理和与流域生态环境变化之间的关系的研究成果。本书作为喀斯特地质与生态系统生物地球化学过程与物质循环研究的又一研究成果,主要介绍了我们近年对西南喀斯特地区土壤-植被系统中各种养分生物地球化学循环过程的研究工作。

本书共十二章:第一章概述了中国西南流域地理、地质和生态环境特征,并重点综述了目前我国对西南喀斯特地区生态系统退化或石漠化的研究现状和成果;第二章扼要地介绍了土壤-植被系统中的一般无机和生物地球化学过程原理和特征,并同时介绍了我们有关岩石-微生物相互作用的地球化学研究实例;第三章介绍了有关喀斯特地区土壤剖面的地球化学组成分布和变化、碳酸盐岩风化成土过程的地球化学特征和成土方式;第四章介绍了喀斯特地区石生苔藓的地球化学组成,重点讨论了苔藓对大气氮沉降的地球化学记录特征;第五章至第九章分别论述了喀斯特土壤-植被系统中碳、氮、硫、磷及其他金属矿质养分的分布和迁移转化的生物地球化学行为;第十章介绍了有关西南地区广泛分布的砂岩黄壤和石灰土中氮循环和相应土壤适生植物(杉木和花椒)的适应性的对比研究成果;第十一章介绍了有关黔中地区不同植被覆盖土壤-大气界面温室气体释放和吸收的研究;第十二章介绍了黔南地区小流域地表水地球化学对流域岩石-土壤-植被相互作用的响应特征。

本书总结了我国近年重点对喀斯特土壤-植被系统生源要素生物地球化学循环的研究成果,但这一项系统研究工作的全面总结仍然是阶段性的。总结写成书时,我自己往往都感觉到研究工作开展前的设计不完善、实施工作中的系统性不足、数据分析总结过程中难以避免的疏忽和遗漏、出书后的成功喜悦和深感不足的遗憾。但是,正是这些遗憾和不足将使我们能站到更高的高度去发现新的科学问题和认识到过去工作的不足,成为我们将来研究的成功之母。

本书介绍的研究成果和本书的总结出版是在我的数届博士研究生李思亮、郎赞超、李军、宋照亮、朱书法、郑厚义、谌书、杨成、涂成龙、刘学炎、刘芳、蒋颖魁、张伟、刘涛泽、唐从国,以及合作伙伴朴河春研究员、吴沿友研究员、连宾研究员、王嘉学教授和王仕禄副研究员的大力支持和共同努力下完成的,他(她)们的部分博士论文工作和研究成果以及与我本人共同发表的科学论文是本书写作的基础。他(她)们分别是有关研究工作的合作完成者,并共同参与了本书有关章节的总结:第一章,王嘉学、吴沿友、何腾兵、刘丛强;第二章,刘丛强、连宾、何腾兵、吴沿友、谌书;第三章,宋照亮、刘丛强、何腾兵;第四章,刘学炎、肖化云、刘丛强;第五章,刘丛强、涂成龙、朱书法、朴河春、刘涛泽;第六章,刘丛强、杨成、涂成龙;第七章,刘丛强、张伟、蒋颖魁;第八章,刘丛强、朴河春、宋照亮;第九章,刘丛强、郑厚义、宋照亮、杨成、吴沿友;第十章,朴河春、刘丛强;第十一章,刘丛强、刘芳、王仕禄;第十二章,李思亮、郎赞超、李军、刘丛强、蒋颖魁、吴攀。还有我的多位在读研究生参与了本书的资料收集和整理,郎赞超博士、李军博士和李非里博士最后对全书引用文献和部分稿件内容文字进行了校对。全书在大家协作的基础上,由刘丛强执笔综合完稿。

最后,我很感谢赵其国院士为这本书作序。值此本成果专著问世之际,我深深敬佩赵其国先生等老一辈科学家们对中国土壤科学事业发展和人才培养方面做出的重大贡献;深深感谢我的合作伙伴和我的学生们对这本专著问世所付出的辛勤劳动和重要贡献;深深感谢洪源和宋

云华二位老师对本书编审付出的辛苦努力。

本书的研究成果得到以下基金项目的资助，特此感谢：

(1) 中国科学院知识创新工程重要方向项目（编号 KZCX3-SW-140），乌江典型喀斯特小流域土壤-植被生态系统生源要素生物地球化学循环研究，2004~2006；

(2) 国家重大基础研究计划（973）项目（编号 2006CB403200），西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控，2006~2010；

(3) 中国科学院西部行动计划项目（编号 KZCX2-XB2-08），西南喀斯特生态系统退化机制与适应性修复试验示范研究，2007~2010；

(4) 国家自然科学基金（创新群体）项目（编号 40721002），西南喀斯特流域物质循环的生物地球化学过程与环境效应，2008~2010；

(5) 国家自然科学基金面上项目（编号 40772207），石灰岩和砂岩地区植物各自适应性控制机制研究，2007~2009。

刘丛培
2009年元月

目 录

序

前言

第一章 西南喀斯特地质地理与生态背景	1
引言	1
第一节 西南地区地质地理特征	1
第二节 西南喀斯特地区土壤类型分布	11
第三节 西南喀斯特地区植被覆盖与岩石和土壤	19
第四节 西南喀斯特生态系统石漠化现状和发生机制	24
参考文献	42
第二章 土壤-植被系统中的生物地球化学过程	45
引言	45
第一节 土壤无机组分	45
第二节 土壤有机组分	49
第三节 土壤无机地球化学过程	58
第四节 土壤生物地球化学过程与养分循环	63
参考文献	90
第三章 喀斯特地区风化成土作用的地球化学特征	98
引言	98
第一节 西南喀斯特地区土壤形成条件与特点	99
第二节 风化成土作用研究概述	111
第三节 土壤中矿质元素形态研究方法概述	117
第四节 土壤剖面矿质养分的分布特点	123
第五节 土壤物质来源的地球化学示踪	134
第六节 喀斯特山地成土方式探讨	147
参考文献	150
第四章 大气氮沉降的苔藓地球化学记录	157
引言	157
第一节 大气氮沉降及其植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 指示	158
第二节 苔藓的生物学性质及其稳定同位素研究意义	165
第三节 苔藓碳、氮同位素对环境条件和大气氮沉降变化的响应	171
第四节 石生苔藓碳、氮含量和碳、氮同位素与贵阳地区大气氮沉降	184

参考文献	204
第五章 土壤-植被系统碳循环	214
引言	214
第一节 土壤碳的生物地球化学循环	215
第二节 西南喀斯特地区土壤有机碳 (SOC) 含量变化	221
第三节 西南喀斯特地区土壤微生物生物量碳	258
第四节 西南喀斯特土壤-植被碳循环过程的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究	265
第五节 土地利用和植被覆盖变化对喀斯特地区 SOC 及其 $\delta^{13}\text{C}$ 分布的影响	283
参考文献	297
第六章 土壤-植被系统氮循环	308
引言	308
第一节 土壤中的氮循环与植物氮吸收	309
第二节 喀斯特地区土壤氮分布及其控制因素	320
第三节 喀斯特环境优势植物氮含量及其同位素组成变化	334
参考文献	345
第七章 土壤-植被系统硫循环	354
引言	354
第一节 土壤中硫循环与植物吸收	355
第二节 喀斯特流域土壤硫的生物地球化学	365
参考文献	394
第八章 土壤-植被系统磷循环	401
引言	401
第一节 土壤中的磷循环与植物吸收	401
第二节 岩石风化与成土过程中磷的地球化学	408
第三节 石灰岩和砂岩地区土壤磷与植被养分组成	417
参考文献	439
第九章 土壤-植被系统金属矿质养分循环	444
引言	444
第一节 金属矿质养分的植物营养作用与生物地球化学循环	444
第二节 喀斯特地区土壤金属矿质养分分布特点	454
第三节 喀斯特植物金属矿质养分的组成特征	465
第四节 喀斯特土壤-植物界面锗循环的同位素研究	470
参考文献	484
第十章 土壤氮循环与植物适应性：花椒与杉木的对比研究	489
引言	489
第一节 植物利用氮的策略和氮的生物地球化学循环	490
第二节 氮同位素组成与氮的生物地球化学循环	498

第三节	杉木和花椒选择吸收 NH_4^+ 和 NO_3^- 的证据	507
第四节	植物氮利用策略的环境效应	510
第五节	共生菌对氮循环和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的影响	513
	参考文献	517
第十一章	土壤-大气界面温室气体吸收与释放	527
	引言	527
	第一节 土壤温室气体产生、释放与生物地球化学作用	527
	第二节 黔中地区不同生态系统土壤温室气体释放通量	532
	第三节 黔中地区不同生态系统土壤温室气体浓度剖面变化	551
	参考文献	562
第十二章	小流域岩石-土壤-植被相互作用与地表水地球化学	568
	引言	568
	第一节 黔南和黔东南地区地质地理与生态背景	568
	第二节 水化学组成对流域岩石-土壤-植被界面作用的响应	575
	第三节 养分同位素组成变化对流域岩石-土壤-植被相互作用的响应	580
	参考文献	611

第一章 西南喀斯特地质地理与生态背景

引 言

全球喀斯特面积约 2 200 万 km²，占世界陆地面积的 12% 左右，集中连片分布在全球的三个碳酸盐岩条带上：一是地中海沿岸的中南欧阿尔卑斯山直到法国中部高原，以及俄罗斯乌拉尔山地；二是中国西南喀斯特山区以及越南北部；三是美国中东部印第安纳州和肯塔基州喀斯特山区、古巴、牙买加以及澳大利亚南部一带。在喀斯特地区，居住着近 10 亿人口。中国境内碳酸盐岩类岩层纵深横广，喀斯特现象普遍，类型繁杂，形式多样，发育强烈。喀斯特面积若按含可溶岩的地层分布计，可达 344.4 万 km²，占国土面积的 35.93%；若按碳酸盐岩的出露面积计，则为 90.7 万 km²，也接近国土面积的 1/10。基本上分布于天山-阴山构造带以南，即大致在北纬 42°~43°以南（郭纯青等，2005）。包括广西、贵州、湖北、湖南、云南、四川及重庆的大部分和广东北部地区的西南喀斯特地区，北起秦岭山脉以南，南抵广西盆地，西起云贵高原，东至南岭山脉，地理坐标为北纬 22°00′~30°04′，东经 100°34′~114°10′，是我国碳酸盐岩层最集中分布的区域，也是全球三大喀斯特集中连片区中面积最大、喀斯特作用发育最强烈的典型地区（王宇等，2003）。区内喀斯特景观典型，洞穴暗河多、规模大，以开阔性溶蚀喀斯特类型为主。中国西南喀斯特景观复杂多样，人地矛盾突出，生态脆弱，在全球喀斯特生态系统中占有重要地位。

西南喀斯特地区独特的气候和地质地貌过程在很大程度上控制着其土壤发育和植被分布，并进一步影响土壤-植被体系生源要素循环，形成了较为脆弱的喀斯特生态地质环境。在人为活动的强烈影响下，石漠化日趋严重，并导致喀斯特区域生存条件恶化。“山连山都是石头山，坡连坡都是陡坡坡，沟连沟都是干河沟，地连地都是穷土地”，这是西南喀斯特地区“喀斯特贫困”的真实写照。

第一节 西南地区地质地理特征

一、社会经济概况

受历史、自然地理环境和经济社会等诸多因素影响，我国西南大部分地区处于岩溶生态恶劣区，是生态与经济并发的“双重贫困”地区（曹建华等，2004）。西南喀斯特地区人口增长快、密度大（平均密度达 164.23 人/km²），均超过全国丘陵地区和平原地区（曾艳华，2004）。工农业基础设施薄弱，城市化进程较慢，贫困面较广。

在各族人民的共同努力下，经过解放以来几十年的建设，已基本建立起门类较为齐全并具

一定规模的工业体系，一、二、三产业都得到较快发展，城镇化水平有了较大提高，基础设施制约瓶颈得以初步缓解，人民生活水平有了一定程度的提高。近年来，西南各省（市、区）以西部大开发、中国—东盟自由贸易区建设、“10+1”次区域合作、澜沧江—湄公河次区域合作、泛北部湾经济圈建设、社会主义新农村建设等为契机，加大对外开放力度、深化市场经济体制改革，大大加快了西南地区社会经济的发展，并因地制宜，大力发展特色农业和旅游业，近年来发展势头良好。

总体上看，西南喀斯特地区社会经济仍明显地体现为民族性、资源型经济、岩溶贫困及人地矛盾十分突出四大特征。

（一）多民族地区

西南喀斯特地区是我国少数民族分布最多的地区之一。有壮、苗、瑶、彝、水、侗、毛南、土家、仡佬等 48 个少数民族、近 3 000 万少数民族人口，占全国少数民族总人口的 28%。其分布特点是居住分散，分布广泛，多民族杂居，个别民族小聚居。少数民族人口绝大多数居住在人口稀少、偏僻闭塞、生产力水平相对落后、开发较慢的边区或偏远山区，人口受教育程度低，基础设施薄弱，城镇化水平低，并受长期形成的民族习俗和生活习惯影响，极大地制约着西南地区社会经济的发展。但同时复杂的喀斯特环境也孕育了丰富多彩的民族文化，并各具地域文化特色，为西南喀斯特地区发展民族文化产业和旅游产业，缓解人地矛盾等奠定了坚实的基础。

近年来，西南喀斯特地区大力发展旅游业，积极推进社会主义新农村建设，民族经济得到了较快的发展，初步形成了特色鲜明的喀斯特旅游区。

（二）资源型经济

西南地区是我国自然资源最富集的地区之一，特别是矿产资源、农业资源、林业资源、水和水能资源、生物资源以及旅游资源等，在我国社会经济建设中具有极其重要的战略地位。资源优势给西南喀斯特地区经济发展带来巨大潜力，也使西南喀斯特地区呈现出资源型经济所占比重大的特征。

区内矿产种类齐全、储量丰富，磷、煤、金、铅、锌等矿产储量在国内乃至世界上都占有重要地位，煤、铅、锌、银、汞、锑、铜、铝、磷等矿种全国闻名；西南地区河流水量充沛，流量稳定，水量相对集中且落差大，水能资源极其丰富，而且大部分水电资源开发具有淹没损失小、技术经济指标优越等特点，是西南地区极具开发潜力的优势资源。全区水能资源理论蕴藏量为 4.90 亿 kW，可开发量为 2.67 亿 kW，均占全国的 70%。中小水电资源可开发量为 6 552 万 kW，占水电可开发量的 24.5%。金沙江、雅砻江、大渡河、红水河、乌江、澜沧江等河流是我国重要的水电能源开发基地，目前仅乌江流域已经规划或建成的水电站就有十几座，如乌江渡、洪家渡、鸭池河、索风营、东风、普定、引子渡等大中型水库型水电站（杨小辉等，2003），进一步开发的潜力还很大；西南喀斯特地区人均耕地虽然相对于全国较高，但

除分布较少的喀斯特盆地外，山区、丘陵地带土壤较为贫瘠，农业生产极为落后，仍以传统的粗放农业为主，农业单产低；旅游资源较为丰富，特别是以奇特的喀斯特景观和多姿多彩的民族文化独具特色。近年来，西南各省区积极发展喀斯特旅游，充分发挥旅游业的关联带动效应，旅游产业已成为西南地区经济增长的一大亮点；森林资源方面，西南喀斯特地区森林覆盖率低，但生物种类多。

（三）喀斯特贫困

西南喀斯特地区是经济欠发达地区，有 152 个国家级贫困县，贫困人口超过 1 000 万人，2004 年农民人均收入只占全国平均水平的 74.6%。如果以碳酸盐岩分布面积超过 30% 的县厘定为喀斯特县，中国西南喀斯特地区有喀斯特县 292 个，集中分布于滇东、桂西、黔、湘西、鄂西、渝东呈现的北东向的隆起带上（曹建华等，2004），如图 1-1。

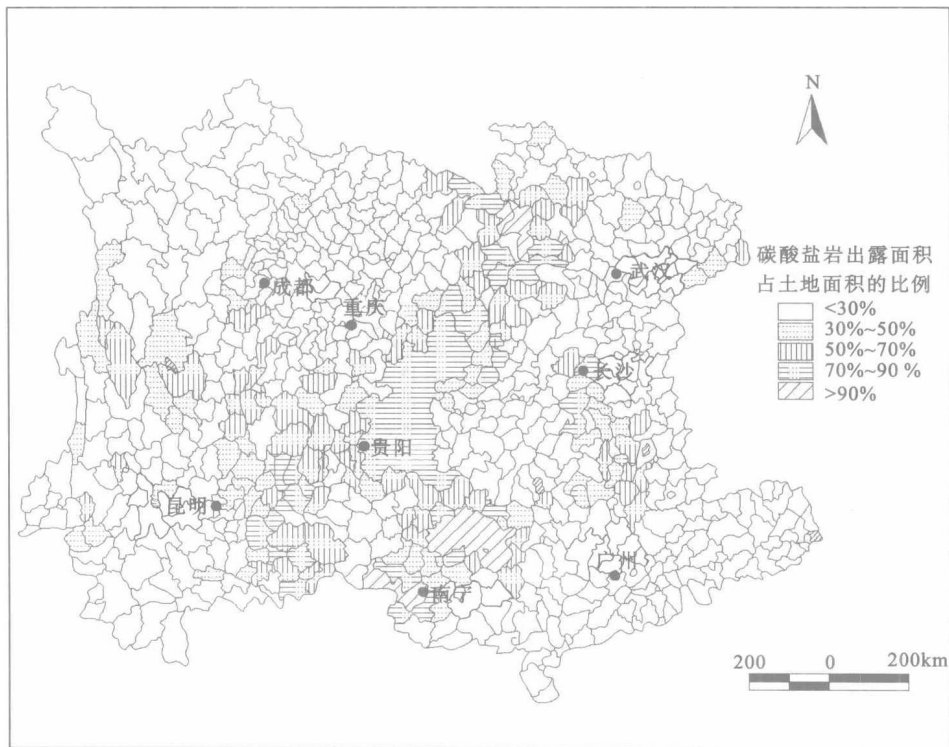


图 1-1 西南地区碳酸盐岩出露面积比例图（曹建华等，2004）

喀斯特县的人口密度、人均国内生产总值、农民人均纯收入一般不及非喀斯特县，喀斯特贫困特征非常突出。曹建华等（2004）以 2000 年分省统计年鉴为源，用人口密度、农民人均纯收入、人均国内生产总值作为社会经济发展的指标进行分析（表 1-1），结果显示：广西、湖南、湖北、重庆喀斯特县的人口密度仅分别为非喀斯特县的 85.05%、83.03%、46.78%、54.43%，喀斯特县的人均国内生产总值、农民人均纯收入也不及非喀斯特县。

表 1-1 西南地区部分喀斯特县与非喀斯特县社会经济发展对比 (曹建华等, 2004)

指标	贵 州		广 西		湖 南		湖 北		重 庆	
	喀斯 特县	非喀斯 特县	喀斯 特县	非喀斯 特县	喀斯 特县	非喀斯 特县	喀斯 特县	非喀斯 特县	喀斯 特县	非喀斯 特县
人口密度/(人·km ⁻²)	209.3	157.2	182.8	214.6	378.7	456.1	194.2	415.3	274.2	503.8
农民纯收入/(元/人)	1 412	1 445	2 365	2 257	1 959	2 124	1 723	2 373	1 494	2 092
国内生产总值/(元/人)	2 440	1 788	3 823	3 815	4 091	4 565	4 002	6 237	2 990	3 995

(四) 人地矛盾突出

中国西南喀斯特山区属于典型的生态环境脆弱区,生态承载力极低,加之人类对土地资源不合理的开发利用,区域生态安全面临诸多威胁(王世杰,2003)。如贵州农村平均每年消耗薪柴达0.2亿t,其中合理樵取的仅占20.6%,其余皆为过量樵取(屠玉麟,1994)。这些地区森林火灾频发,据统计,仅黔南州^①1977~1981年由于烧灰积肥、烧荒开垦等生产性火源引起的火灾占80.5%,部分火灾严重的县,森林火灾烧毁面积远远超过造林面积。这些都使喀斯特山区的生态系统遭到严重破坏,导致生态破坏与贫困恶性循环,最终使居住条件越来越恶化,耕地更加分散、贫瘠。近几年进行的“村村通公路”工程,由于资金不足和技术监督管理不到位等原因,基本上没有采取防止水土流失的措施,致使这成百上千条乡间公路成为造成水土流失和加剧石漠化灾害的根源。在修建大型的基本建设项目时,一些建设单位为了取材方便,没有对石山环境保护多加考虑,随意开采,也使石山地区的环境破坏严重(王世杰等,2003)。如贵州每年新增石漠化面积就达93.3km²,水土流失和石漠化直接威胁人类赖以生存的土地资源安全(杨庆媛,2003)。

二、地貌与气候

(一) 地势与地貌

西南喀斯特地区的主体部分位于云贵高原东部,其东侧属于地势较低的长江中游山地丘陵和东南沿海山地平原,总体地势表现为西高东低。从南北方向看,由于贵州中部是长江和珠江两大水系的分水地带,故其地势又具有由本区中部向南北两个方向倾斜的特点(周性和,1990)。川西的平均海拔,石渠、色达一带丘状高原为4 500~4 700m;甘孜、道孚、康定以南为4 000~4 500m;沙鲁里山原为4 500~4 700m,延伸至滇西北亦有很多超过4 000m的高峰;更南在滇境内丽江、剑川、巧家一带为3 000~3 400m,大理、滇中一带为2 100~2 500m,元江、思茅等地为1 300~1 500m,滇南各大河河谷平原在500m以下。地势自西而东逐级下降,自川西和滇西北山地的4 000~4 500m,至川西南滇北山地降为3 000~4 000m,

^① 黔南州为黔南布依族苗族自治州的简称,下同

更东在滇东北宣威及黔西北威宁、赫章、水城一带为 2 000~2 400m, 黔中贵阳、安顺、瓮安一带为 1 100~1 400m, 黔东镇远以东为 500~800m (赵汝植, 1997)。一些大型山脉的分布格局更使得本区地形复杂化, 如北部的大娄山将四川盆地和贵州高原相隔, 西部的乌蒙山又纵贯在滇东高原之中, 南部的十万大山、六万大山和大瑶山等则使广西具有四周高而中部低的盆地地貌, 其盆底可在海拔 200m 以下 (周性和, 1990)。

复杂多样的岩石组分及其种类, 使得西南喀斯特地区地貌形态复杂、种类繁多。喀斯特山地、峰丛、峰林、溶蚀丘陵、洼地、槽谷等地貌形态广泛发育, 在这里几乎可以见到全球所有的喀斯特地貌形态和类型。

云贵高原主要以溶丘洼地和溶丘谷地为主, 在大流域的分水岭及次一级河流的谷坡地带, 有较多规模宏大的洞穴系统发育。其中, 滇东高原西部以石芽、溶沟、溶蚀洼地、孤立石峰和小面积峰林为主, 东部则有地下河、盲谷、漏斗、落水洞、石林和峰林等; 贵州高原喀斯特分布随碳酸盐岩露头而呈若干条带状, 地貌类型齐全。高原面和分水岭部位多为发育峰林的巨大喀斯特盆地, 坡地除峰林、峰丛外, 还多悬谷与瀑布, 谷地内则形成峰丛中低山, 溶洞数量极多。

云贵高原至广西盆地的过渡斜坡地带, 主要发育了峰丛洼地、峰丛谷地, 局部残存的高原面上仍保存着早期发育的峰林谷地, 在大面积的斜坡地带, 有很多大的暗河仍在强烈发育; 云贵高原至四川盆地南缘, 峰林、喀斯特盆地分布也很广, 其间峰丛、溶洞分布较为密集 (卢耀如, 1996)。

广西盆地以峰林-谷地、孤峰-平原等为主。石峰多有脚洞, 平面形态为椭圆形, 短长轴比平均值为 0.66, 平均直径 200m, 长轴方向为北西西或北东, 石峰高度有的超过 100m, 有的不足 20m, 平均超过 70m。广西西北部到中部, 地形形态呈有规律的变化: 峰顶高度依次降低, 山峰密度逐渐变稀, 不规则的长条形谷地则逐步过渡为较开阔的峰林谷地和孤峰平原地形。同时, 山间的封闭洼地高程也渐次下降, 洼地规模也明显增大, 由数个洼地连接成串珠状洼地 (卢耀如, 1996)。

(二) 气候特征

西南喀斯特地区主体部分的气候特征为温暖湿润的亚热带季风气候 (饶懿等, 2004)。同时, 西南喀斯特地区幅员广阔, 地貌复杂, 特殊的地理位置又使该区同时受东亚季风、印度洋季风和青藏高原季风的影响, 形成三大季风过渡区的气候特点, 加之部分地区垂直高差大, 垂直气候特征显著, 具有多种多样的气候类型 (赵汝植, 1997), 总体上呈现降雨相对集中、空间分布、季节不均匀的特点。

云南气候比较复杂, 囊括低纬气候、季风气候、山原气候。贵州大部分地区年平均气温在 15℃ 以上, 向南逐渐增高到 20~24℃ (广西和云南南部), 大于 10℃ 积温在 5 000~8 000℃ 左右。年平均日照时数一般为 1 200~1 600h, 往南高达 1 800~2 000h, 且年际变化不大。年日照百分率为 25%~42%。绝大部分地区年降水量为 1 000~1 600mm, 最高达 1 800~2 000mm, 年均相对湿度为 75%~80%。降水的 70%~80% 集中在每年的 5~8 月, 具有水热

同期的分布特点(王世杰等, 2003)。四川盆地、贵州大部、云南省东北部冬季多阴沉天气, 相对湿度较高, 夏季高温多雨。云南省大部、四川凉山、攀枝花及甘孜州南部冬季盛行干暖的西南支气流, 天气晴朗干燥, 夏季为西南季风控制, 水汽丰沛(赵汝植, 1997)。

(三) 气候地貌区划

根据西南喀斯特地形地貌及水热条件的相似性, 可将西南喀斯特地区划分为 11 个气候地貌区, 如图 1-2。各地貌气候区具有各自不同的特征, 差异较大。对此, 温琰茂等(1990)已就各气候地貌区基本特征进行了较全面的归纳, 具体叙述如下。



图 1-2 西南喀斯特地区气候-地貌区划示意图(温琰茂等, 1990)

- I. 桂西南区; II. 滇东南—桂西区; III. 桂中—桂东北区; IV. 桂西北—黔南区; V. 黔中区; VI. 滇东—黔西区;
VII. 黔东北—川东南区; VIII. 川滇黔接壤区; IX. 四川盆地西部、北部区; X. 川西北区; XI. 滇西—川西南区