

原地质矿产部重要基础项目资助
国家自然科学基金项目 (49070155) 资助
IGCP 299 项目资助

中国岩溶动力系统

ZHONGGUO YANRONG DONGLI XITONG

袁道先 刘再华 林玉石 沈继芳
何师意 徐胜友 杨立铮 李 彬
覃嘉铭 蔡五田 曹建华 张美良
蒋忠诚 赵景波 等著



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书详细地介绍了岩溶动力系统的结构、功能和特点,并概括和总结了岩溶动力学的基本理论和研究方法。对在岩溶动力系统驱动下岩溶形成的动力学机制、生物机制、背景条件和碳循环的一些规律作了较深入的论述,同时较详细地展示了用岩溶洞穴石笋恢复和重建古环境的研究成果。在模拟实验基础上,建立了岩溶动力学的扩散边界层模型。用实际观测数据和不同的碳循环模型,估算我国碳酸岩盐地区表层和深部岩溶作用对大气 CO₂ 源汇的贡献。以碳循环特点为基础,对岩溶动力系统进行了分类。书的最后论述了岩溶动力系统的资源形成机制和生态环境效应,并对岩溶动力学的发展作了展望。

本书内容丰富,图文并茂,适合于地质、地理、岩溶、全球变化、碳循环、资源和环境等方面科研人员及院校师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国岩溶动力系统/袁道先等著.-北京:地质出版社,2002.11

ISBN 7-116-03712-8

I. 中… II. 袁… III. ①岩溶-动力地质学-研究②岩溶-成因-研究 IV. P642.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 085205 号

责任编辑:蔡卫东 何尧启

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京中科印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:24.25 彩图:2 页

字 数:450 千字

印 数:1—800 册

版 次:2002 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价:60.00 元

ISBN 7-116-03712-8/P·2319

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

国家“十五”重点图书
《中国地学院士文库》编委会

主 编：李廷栋

编 委：(按姓氏笔画排列)

马宗晋 王鸿楨 叶大年 卢耀如

孙殿卿 刘宝 刘广润 任纪舜

许志琴 李廷栋 汤中立 陈庆宣

陈毓川 宋叔和 沈其韩 肖序常

张本仁 张宗祜 张国伟 林学钰

杨遵仪 杨 起 於崇文 郑绵平

赵鹏大 赵文津 欧阳自远 郭令智

殷鸿福 袁道先 常印佛 谢学锦

裴荣富 翟裕生 戴金星

序

20 世纪 80 年代以前，我国岩溶研究曾以气候分带、岩溶地貌类型分区和岩溶形态描述为工作方法，以水 - 岩相互作用理论为指导，获得较大的发展。进入 20 世纪 90 年代，以袁道先院士及其研究群体为代表的岩溶学者，越来越注意到岩溶作用对环境的敏感性问题，认为要以地球系统科学为指导，抓住以碳、水、钙为主的物质能量循环体系，从相互耦合的大气圈 - 水圈 - 岩石圈 - 生物圈的相互关系上研究岩溶。由此形成了岩溶动力学理论的基本思路，并创造性地总结了一套捕捉碳、水、钙行踪的工作方法，全面地阐述了系统的定义、结构和功能，为建立完整的岩溶动力系统基本理论奠定了基础。这对促进岩溶学的发展及指导岩溶研究具有重要意义。

回顾岩溶学在 20 世纪末 10 年以来的发展历程，袁先生及其助手们运用岩溶动力系统的新理论，在岩溶研究领域取得了瞩目成就，开拓了岩溶研究的视野，极大地推动了岩溶科学向前发展。除建立岩溶动力系统的基本理论框架外，他们还在如下方面取得了重要进展或突破。

首先，在全面研究我国大陆岩溶形成背景条件及基本特征的基础上，首次提出“岩溶形态组合”的科学方法，并与全球岩溶作了对比，划分出 6 个类型的表层岩溶动力系统和深部岩溶动力系统亚类。这是我国区域岩溶成果的一次全面、系统的总结。

第二，在野外定位观测基础上，通过室内试验和计算机模拟，研究了驱动岩溶动力系统运行和岩溶形成的水动力学、气体动力学及生物机理，阐明了 CO_2 浓度梯度的作用，以及岩溶动力系统运动对元素迁移的影响。这不仅是岩溶形成机理方面的突破性进展，而且对岩溶区的生态恢复具有重要的实践应用价值。

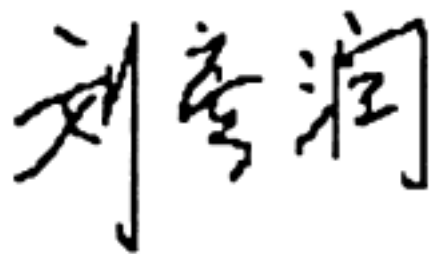
第三，估算了岩溶作用（包括深部断裂带 CO_2 释放）对大气 CO_2 的源汇量，为完善全球碳循环模型作出了贡献。其成果对全球温室效应的研究有重要意义，也是国际相关研究领域的突破。

第四，通过石笋内部微层理沉积学特征、微量元素、稳定同位素及加速器质谱¹⁴C 测年的综合研究，建立了我国南方 3.6 万年以来第一个古环境变化的连续剖面，揭示了末次冰期以来气候变化的全过程和几个气候跃变事件，为我国在缺乏冰心等其他古环境变化记录的岩溶区进行高分辨率古环境重建开辟了新途径。

第五，将研究成果应用于实践，先后选择济南、天津、乌江渡电站和清江隔河岩水库为研究对象，对其岩溶动力系统驱动下的资源形成和环境效应，进行了预测研究或提出了防治措施。这方面的成果将会产生重大而深远的经济、社会效益。

本书系统总结了上述研究成果。它资料翔实，内容丰富，论证有据。可以预见，它的出版将会带动岩溶科学更深入地向前发展。在此，预祝袁道先先生和他领导的研究集体取得更辉煌的科研成就。

中国工程院院士

A handwritten signature in black ink, reading '刘兴俊' (Liu Xingjun). The characters are written in a cursive, flowing style.

2002.10.23

目 录

序	刘广润
1 概 述	袁道先 (1)
1.1 本专著依托的研究项目和研究方法	(1)
1.2 项目依托的国内外合作	(2)
1.3 新理论及主要发现和突破	(3)
1.4 岩溶动力系统研究的社会影响和应用前景	(4)
2 岩溶动力系统	(6)
2.1 岩溶动力系统的结构、功能和特点	袁道先 (6)
2.1.1 定义	(6)
2.1.2 结构和边界	(6)
2.1.3 功能	(7)
2.1.4 特点	(7)
2.2 研究方法	(7)
2.2.1 岩溶动力系统研究方法的特点	刘再华 (7)
2.2.2 指标选择	刘再华 (8)
2.2.3 捕捉碳循环的方法: 普测、定位观测	刘再华 (9)
2.2.4 同位素技术	覃嘉铭 (10)
2.2.5 岩溶动力系统变化过程的同位素记录研究	覃嘉铭 (17)
2.3 岩溶动力系统的类型	(27)
2.3.1 表层岩溶动力系统的分类	李 彬、徐胜友 (27)
2.3.2 深层岩溶动力系统的分类	何师意、蔡五田 (33)
2.4 岩溶动力系统的数据库及应用	李 彬 (34)
2.4.1 系统设计的基本思想	(34)
2.4.2 系统的基本结构	(35)
2.4.3 系统的基本功能	(36)
2.4.4 结束语	(38)
3 中国岩溶形成的背景条件和基本特征	(39)
3.1 中国岩溶的类型和基本特征	袁道先 (39)
3.2 中国南北岩溶分界线上的典型研究——以镇安、旬阳为例	赵景波 (42)
3.2.1 岩溶泉的概况与酸碱度变化	(42)
3.2.2 岩溶泉的 HCO_3^- 离子含量变化	(44)
3.2.3 土层中 CO_2 含量变化	(46)
3.2.4 该区岩溶地貌形成时代	(46)
3.2.5 初步认识与讨论	(47)

4	岩溶形成的动力学机制	(48)
4.1	水动力学机制	(48)
4.1.1	溶蚀作用的水动力学实验研究	刘再华 (48)
4.1.2	水的侵蚀作用与岩溶形成	林玉石 (50)
4.2	气体动力学机制	徐胜友 (55)
4.2.1	岩溶动力系统中气圈的组成及其特征	(55)
4.2.2	岩溶动力系统中 CO ₂ 的动态平衡理论	(59)
4.2.3	CO ₂ 对岩溶作用驱动的野外观测研究	(60)
4.3	岩溶动力学中的生物机制	曹建华 (71)
4.3.1	地质历史时期中生物演化与碳循环	(72)
4.3.2	现代生物碳循环与岩溶发育	(74)
4.3.3	几点新认识	(84)
4.4	岩溶动力学模型：野外观测和室内物理模拟实验	刘再华 (84)
4.4.1	扩散边界层理论模型	(85)
4.4.2	模拟结果及其野外和室内实验证实	(86)
4.5	碳酸盐岩岩溶化过程的数值模拟	沈继芳、于青春、万军伟 (100)
4.5.1	引言	(100)
4.5.2	单个裂隙溶蚀扩展	(101)
4.5.3	非连续裂隙网络溶蚀扩展	(105)
5	岩溶动力学的全球变化响应和记录	(109)
5.1	表层岩溶作用的大气温室气体源汇关系	(109)
5.1.1	表层岩溶作用与大气 CO ₂ 源汇的关系	徐胜友 (109)
5.1.2	我国南方 6 省岩溶系统碳循环及其环境效应	杨立铮 (121)
5.2	深层岩溶作用的大气温室气体源汇关系	(142)
5.2.1	深层碳循环在全球碳循环中的地位	何师意 (142)
5.2.2	云南中甸下给温泉形成条件与 CO ₂ 源汇关系研究	蔡五田 (143)
5.2.3	四川黄龙景区 CO ₂ 的源汇关系	何师意 (156)
5.2.4	腾冲地热区活动断裂带 CO ₂ 源汇关系	何师意 (159)
5.2.5	断裂带上有很厚覆盖层的气田中 CO ₂ 的来源	何师意 (161)
5.3	全球变化的岩溶记录	林玉石 (162)
5.3.1	岩溶形态的形成与环境的关系	(162)
5.3.2	岩溶建造的形成及古环境信息	(168)
5.3.3	桂林盘龙洞 1 号石笋的综合研究	(177)
5.4	岩溶生态系统的结构、功能及运行机制和全球变化反馈	(196)
5.4.1	岩溶生态系统的结构	蒋忠诚 (196)
5.4.2	岩溶生态系统的功能及运行机制	李 彬 (200)
5.4.3	岩溶生态系统对环境的敏感性及其全球变化信息	李 彬 (207)
5.4.4	岩溶生态的环境反馈	蒋忠诚 (208)
5.4.5	结束语	(212)
6	岩溶动力系统的资源形成机制和环境效应	(213)
6.1	岩溶矿床的成矿条件及形成机制	张美良 (213)

6.1.1 岩溶矿床的概念 (213)

6.1.2 成矿控制条件 (214)

6.1.3 岩溶成矿作用 (217)

6.1.4 岩溶矿床的类型 (225)

6.1.5 结束语 (226)

6.2 天然与人为条件下岩溶地下水水化学特征形成和变化 蔡五田 (226)

6.2.1 天津蓟县岩溶水水化学特征和演化规律 (226)

6.2.2 济南泉域岩溶水水化学特征和演化规律 (235)

6.2.3 岩溶水化学成分总体演化趋势的理论解释 (239)

6.2.4 天然与人为干扰条件下岩溶水水化学特征的差异 (242)

6.3 水工建筑物中钙华的形成机制和防治 刘再华 (244)

6.4 隔河岩水库蓄水引发的岩溶塌陷和地震 沈继芳、石伯勋、张同发 (247)

6.4.1 罗家坳河间地块水动力场变化及其影响效应 (247)

6.4.2 隔河岩水库蓄水引发的岩溶塌陷地震 (257)

7 岩溶动力学的展望 袁道先 (266)

参考文献 (269)

1 概 述

我国广阔的岩溶地区 (334 万 km^2 , 含 90.7 万 km^2 裸露岩溶), 同青藏高原、黄土高原一样, 为中国的主要地域优势之一, 它在全球岩溶形成机制的探讨上具有重要地位。

各种地表、地下岩溶形态成为水和矿产资源的贮集场所, 但前者分布的不均匀性给后者的勘探、评价和开发带来困难。岩溶地区富钙的岩石圈, 以及大气圈、水圈、生物圈都具有地表、地下双层结构, 并以碳、水、钙循环为物质能量运移转换的主要形式, 给它带来一系列特殊的环境地质问题, 如旱涝、土壤贫瘠、生态平衡破坏及石漠化、地面塌陷、特殊的原生水质污染及污染方式等, 使得环境科学家把岩溶地区视为一种同沙漠边缘一样的脆弱环境。

岩溶地区特殊的资源、环境问题都与各种岩溶形态有关, 并以其为基础。人们已开始认识到不同的地质、气候、生物和水文条件下岩溶的形成及其相应的资源、环境问题的差别。但由于学术思想、地域和对各种岩溶形态及其相关沉积物成因研究深度的限制, 对岩溶发育规律的认识仍然是有限的。

本书就是要以地球系统科学为指导, 以研究岩溶形态及其相关沉积物组合的成因和时空分布为基础, 充分利用我国岩溶面积辽阔、环境跨度大的优势, 选择代表性的点作深入研究、对比观测, 获得岩溶形成及分布规律的深入认识, 从岩溶动力系统运行机制方面揭示岩溶地区资源环境差别的根源, 为岩溶地区的资源和环境的调查、评价、开发、管理提供科学依据, 运用各种现代技术, 充分发掘环境变化的岩溶信息, 为研究人类环境的变迁开辟新的途径。

1.1 本专著依托的研究项目和研究方法

依托的项目主要是原地质矿产部科技司 1992 年 6 月下达的重要基础性研究项目 8502218“中国岩溶的形成及环境变化预测研究”。该项目的目标是: ① 中国岩溶形成的地质、气候、水文及生物背景条件; ② 中国岩溶形成机理研究; ③ 岩溶环境预测研究。本专著同时还依托了国家自然科学基金项目“中国典型地区岩溶的形成及其与环境的相互影响”(49070155) 及中国地质科学院和中国科学院贵阳环境地球化学重点实验室资助项目配套进行, 从而获得必要的资金投入和有关部门的协作, 使一些研究内容得以顺利开展。

根据上述科学目标, 本项目以地球系统科学理论为指导, 把岩溶作用放到岩石圈、水圈、大气圈、生物圈界面上的碳、水、钙循环过程中去观察、研究, 探索各种岩溶形态形成、分布规律及有关资源、环境问题发生发展的机制。研究工作大致按照: 建立环境与岩溶形态组合系列, 研究中国岩溶形成的物理、化学及生物学机制, 重建重点岩溶地区的环境变迁过程及小环境变化预测的三段式技术路线进行, 实施时有所交叉。在不同阶段采取

了点面结合，以点带面；环境与岩溶形态组合对比；野外定位观测与室内物理化学、生物学、计算机模拟相结合；以及地质、地貌观察和各种新技术手段相结合的方法。除各种同位素计年、示踪技术外，在国家自然科学基金会和北京大学技术物理系支持下，使用了加速器质谱¹⁴C计年；得到德国不来梅大学物理系协作，把高速旋转盘和催化剂控制技术引入了多种因子岩溶形成物理化学机理的模拟实验。

为建立环境与岩溶形态组合系列，本项目抓住我国大陆几种优势的典型岩溶：亚热带石山岩溶；亚热带森林岩溶；北方半干旱区岩溶；西南部高山岩溶；东北温带湿润区岩溶，对其宏观的、微观的，地表的、地下的，溶蚀的和沉积的岩溶形态，联系其形成环境进行了深入的野外观察，配套分析，做出了科学总结。

为研究中国岩溶形成的物理化学机理，选择全国代表不同地质、气候、水文、植被环境的7个点：辽宁太子河、北京房山、陕西镇安、湖北长阳、四川松潘黄龙、贵州荔波茂兰、广西桂林，对其碳、水、钙循环过程与岩溶形成的关系进行了野外定位观测。在此基础上对不同温度、CO₂分压、钙离子浓度及水动力条件下岩溶形成（溶蚀及沉淀）的机理，以及扩散边界层理论模型，进行了物理实验（由我课题组派人在德国不来梅大学物理系完成）；对非连续裂隙介质中岩溶发育的水动力机理做了计算机模拟实验 [中国地质大学（武汉）水工系完成]。

本项目在岩溶环境的预测方面做了两方面的研究。一是以宏观和微观岩溶形态相结合，通过岩溶记录建立环境变化过程以作为预测今后变化的依据，尤其是动用工程从桂林盘龙洞采回1.22m高石笋，使用加速器质谱¹⁴C计年、进行沉积学、稳定同位素、地球化学综合研究，重建了分辨率为100~500年的3.6万年来的环境变化过程。二是选择贵州茂兰、广西甯岗等与贵州乌江渡水电站、湖北隔河岩水电站，山东济南等地区，对人类活动引起的石漠化、区域地下水化学成分变化、水库诱发地震、水工建筑物灌浆廊道钙华结壳等小环境问题，作了预测研究。

1.2 项目依托的国内外合作

本项目的实施与袁道先院士组织领导的国际地质对比计划 IGCP 299“地质、气候、水文与岩溶形成”（1990~1994）同步进行。它不但提供了有利的国际合作条件，而且可以从全球的视野来研究中国岩溶，在许多方面深化了对岩溶及有关资源环境问题形成机理的认识。

国内外许多单位以不同方式与岩溶地质研究所的课题组一起完成了本项目的各项研究。其中完成某一方面研究内容的有：中国地质大学（武汉）水文地质系（隔河岩水库岩溶小环境预测及非连续裂隙介质岩溶发育水动力学计算机模拟），成都理工学院水文地质系（南方六省岩溶系统碳循环），长春地质学院水工系（北方半干旱地区岩溶发育背景和分布规律），西安地质学院（镇安、旬阳岩溶发育机理及时代研究）；中国地质大学（武汉）古地磁实验室（桂林太平岩石笋超导古地磁研究），北京大学考古系（协助盘龙洞石笋同位素资料解释），德国不来梅大学物理系（协作四川黄龙、贵州乌江渡水电站廊道钙华成因研究，岩溶形成的水动力学和物理化学模拟实验研究）。

协助7个观测站观测的有：中国地质科学院沈阳地矿所（辽宁太子河），北京地矿局

(北京房山), 长江流域办公室三峡勘察大队 (长阳), 四川地矿局 (黄龙), 贵州荔波茂兰喀斯特森林保护处 (茂兰), 西安地质学院水文地质系 (镇安)。

完成专项测试工作的有: 北京大学技术物理系 (加速器质谱 ^{14}C 测年), 岩溶地质研究所实验室 (水、气样品的碳、氢、氧同位素测试, 不平衡铀系法测年, 低本底液闪 ^{14}C 测年, 水样、岩样化学分析), 中国科学院贵阳环境地球化学重点实验室 (贵州样品的测试)。在研究过程中, 中国地质矿产信息院基础室不断提供信息支援。

1.3 新理论及主要发现和突破

本书第二章至第六章, 分5个方面详细总结了野外调查研究和室内测试模拟实验方法, 及其所获得的新资料、新发现, 以及提出的新理论。其要点如下:

(1) 岩溶动力系统。把本项研究所取得的所有进展加以理论概括, 可归结为对岩溶动力系统结构、功能、运行机制及资源环境效应的认识。全书内容, 不论是对中国岩溶形成的背景、动力机制还是对有关资源的形成和环境效应的探讨, 都围绕这一主线展开。为此在本书的开始, 在第二章对岩溶动力系统的基本概念, 以及由于该系统对环境变化反馈的敏感性而必须采用的一套研究方法特别是如何捕捉碳、水、钙循环的行踪均作了说明。它强调了现场测试、定位观测的必要性, 以及同位素技术在研究岩溶动力系统时必须注意的问题和经验。最后还根据不同的地质、气候、水文、生态条件对岩溶动力系统进行了分类, 以作为在全球区别对待研究的依据。因此, 这一部分虽然以较大篇幅讨论了工作方法问题, 但为其立论基础, 成为本书的重要内容之一。

(2) 中国岩溶形成的背景条件和基本特征。这是第一项研究内容所作的总结 (第三章)。它包含三方面内容和进展, 首先是以本项目首次提出的“岩溶形态组合”(在相同环境下形成的宏观的微观的、地表的地下的、溶蚀的和沉积的岩溶形态的配套组合)的科学方法对中国大陆的三种优势岩溶类型的基本特征作出了总结, 提出了它们的分界线。第二是在全球对比的基础上, 指出了中国大陆岩溶的特点, 以及造成这些特点的四大优势背景条件 (坚硬古老碳酸盐岩; 新生代大幅度抬升; 季风区水热配套; 未受末次冰期大陆冰盖刨蚀)。第三是对中国南方亚热带岩溶与北方半干旱区岩溶分界线上典型地段 (秦岭南坡)的典型调查及观测研究结果, 深入揭示岩溶形态组合、成因与岩溶动力系统结构与运行特征的关系。

(3) 中国岩溶形成机理。这是对第二项研究内容所作的总结 (第四章)。以全国7个岩溶动力系统观测站的资料, 及室内物理化学模拟和计算机模拟为基础, 深入揭示了中国岩溶形成的水动力学、气体动力学及生物学机理, 获得了一系列突破性进展。如气体动力学方面, 发现岩溶发育强度与 CO_2 的关系, 后者的梯度比浓度起更重要的作用, 这一重要发现不但使镇安等地观测资料中 HCO_3^- 高峰比 CO_2 高峰的“假滞后”现象得以解释, 而且为溶蚀作用由大气回收 CO_2 提供了直接证据。在水动力机制方面, 建立了表面反应和溶质传输相结合的模型, 通过野外观测和室内模拟, 证明了不论是溶蚀作用强度或沉淀作用强度, 都是随着水运动速度加快 (扩散边界层减薄) 而加快, 反之则减缓。重新解释了一些岩溶现象的形成机理, 例如根据上述认识, 结合碳同位素示踪, 得出了四川黄龙钙华是深部 CO_2 脱气作用的无机成因的新结论。同时还通过溶质传输 (Ca^{2+} 浓度变化) 与

水力梯度相结合的计算机模拟，建立了在非连续裂隙介质中岩溶管道发育的时空预测模型。在生物学机理方面，揭示了生物作用与碳酸盐岩表面水分及化学元素迁移相互关系的规律，并获得洞穴叠层石的重要发现。

(4) 岩溶动力学的全球变化响应和记录。由于在本项目执行过程中发现岩溶作用对大气温室气体的源汇有重要影响，因此，把原计划的第三项研究内容（岩溶环境预测）所获得的成果分两章来写，第五章专门写与全球变化有关的问题，第六章写其他资源环境问题。与全球变化有关的重要进展和突破主要有 3 个方面。一是岩溶作用与大气 CO₂ 源汇关系，首次提出了估算因岩溶作用而导致大气 CO₂ 源汇通量的三种方法（水化学法、沉积量法、溶蚀试板观测法），并根据野外观测资料结合有关区域性资料，估算我国南方六省每年因岩溶作用而由大气回收的碳为 $9.14 \times 10^6 \text{ t a}$ ，全球为 $4.282 \times 10^8 \text{ t a}$ ，占目前常用的全球碳循环模型中未知汇（missing sink）的 15%。同时也发现在黄龙、中甸等地有浓度达 23%~90% 的深部 CO₂ 向大气释放，也初步作出了定量评价。二是全球变化的岩溶记录，在全面分析了环境变化的各种溶蚀和沉积形态记录后，详细讨论了桂林盘龙洞石笋的特征，该石笋高 1.22m，在研究其内部微层理的沉积学特征的基础上，通过加速器质谱¹⁴C 计年，稳定同位素和地球化学综合研究，建立我国南方 3.6 万年以来第一个古环境变化的连续岩溶剖面。不但揭示了末次冰期以来气候变化的全过程，而且揭示了几个气候跃变事件，其分辨率在暖湿期可达 100 年，在干冷期也可达 500 年。从所达分辨率与所跨的时间段相结合的角度来说，此项研究处于当时国际同类研究的先进水平，并为全球缺乏冰心等其他古环境变化记录的岩溶地区重建高分辨率的环境变化过程提供了新途径，总结了一整套新的研究方法。三是在岩溶生态系统的全球变化反馈方面，对此种系统的结构和运行机制做了全面分析，用许多新的论据，揭示其在全球变化中的脆弱性的原因，在于其双层结构，富钙的地球化学环境，水土贫瘠，生物多样性受到限制。这些规律性的认识将为今后若干年我国南方岩溶石山治理改造提供重要的科学依据和新的思路。

(5) 岩溶动力系统的资源形成机制和环境效应。第六章有两个主要内容，首先在岩溶矿产方面，以构造应力场、地热、雨水对岩溶动力系统中地球化学场的影响为基础，联系若干实例，对岩溶地区矿产资源的形成机制作了新的探讨。第二是对岩溶地区几个环境变化问题作了预测研究：① 对济南和天津蓟县岩溶水系统，以其水化学形成演化规律为基础，探讨了地下水开发、水泥工业发展等人类活动对地下水质的影响和发展趋势，分析了济南岩溶地球化学场的特征，揭示了中寒武统岩溶水通过断裂带向奥陶系岩溶水补给的途径，并为一次大型示踪试验所证实；② 以乌江渡水电站为例，通过岩溶水化学演化规律和同位素示踪，发现灌浆帷幕廊道中的钙华有常规的岩溶水放碳和氢氧化钙碱性水吸碳两种机理，由此提出了防治措施；③ 以本项目实施期间建成的湖北隔河岩水电站为例，通过水库水位抬高期间对有关岩溶动力系统的同步观测和现场调查，对水库渗漏、水质变化，以及水库诱发地震等小环境问题作了预测。

1.4 岩溶动力系统研究的社会影响和应用前景

本书写作群体已发表相关论文 34 篇。其中，已在国内外核心刊物 Episodes, Geochimica et Cosmochimica, Quaternary International, 科学通报, 第四纪研究, 古生物学

报上发表论文 10 篇，其他国内刊物上发表论文 11 篇，为第 30 届国际地质大会撰写论文 13 篇。培养博士 2 名和硕士 1 名。本书总结的一些重要发现和学术观点获得 IGCP 执行局的高度评价。在联合国教科文组织的刊物《Nature and Resources》1994 年 3~4 期中，IGCP 执行局前主席 Malcolm Brown 从 100 多个项目中选出 18 个优秀项目为范例作了重点介绍，IGCP299 为其中之一，并以文字、插图和彩色照片详细地介绍了上述重要发现。

以本书提出的几个重要的全球性问题为科学目标，由袁道先院士提出的新的国际地质对比计划 IGCP 379 “岩溶作用与碳循环”经过各国专家的严格评审，IGCP 执行局科学委员会讨论，已于 1995 年 2 月初被批准，从 1995 年开始的 5 年间执行。1995 年 IGCP 共受理 18 项申请，仅批准 8 项，IGCP379 为其中之一。按 IGCP 惯例，一个项目结束后，获得延续项目的批准也是很少的。它说明我们提出的这些科学问题已取得各国同行的共识。

岩溶地区所有的资源环境问题，都是在岩溶动力系统中特定的物质能量运移规律中形成和发展的。如前所述，本项目提出的岩溶动力系统的结构和运行的规律，将为岩溶石山治理，岩溶矿产资源调查勘探评价，以及岩溶地区许多小环境问题缓解治理提供科学基础和新的思路。例如本项目开创的学术思路和研究方法，在解决山东济南奥陶系灰岩岩溶水的补给来源和贵州乌江渡水电站大坝廊道钙华成因及其防治措施的实践中已发挥了重要作用。

本书的出版是与原地质矿产部、国家自然科学基金委员会、中国地质科学院领导的大力支持，以及各参加研究单位的大力协助分不开的，特在此表示衷心感谢。除各章节作者的辛勤撰稿外，袁道先院士、邓自强研究员对本书提出了宝贵的修改意见。全书由何师意进行统编，郭芳、姜光辉参加了本书编排和修改工作。书中插图由陈阵和梁茂珍清绘。本书是按照统一的学术思路和提纲编写的，虽做到了将研究过程中获得的新资料、新发现尽量详细地总结，但分头执笔，时间仓促，难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

2 岩溶动力系统

现代岩溶学有两个特点：一是从全球角度研究岩溶；二是引入了地球系统科学思想。由我国提出并组织领导的国际地质对比计划 IGCP 299 “地质、气候、水文与岩溶形成” (1990~1994)，和 IGCP 379 “岩溶作用与碳循环” (1995~1999) 的科学目标，代表了当代岩溶学的这两个趋向。实施原地矿部“八五”重要基础项目 8502218 项，和国家自然科学基金 49070155 项，研究中国岩溶的形成与环境预测问题，既考虑到了我国自然条件的特点和经济发展的需要，又考虑了岩溶学科发展的这种趋向。

近百年来的岩溶学经历了形态描述及其成因和演化的假说，背景条件的分析，到岩溶形成的水岩作用机理几个阶段，后者是指导迄今大部分岩溶研究的学术思想。它把岩溶作为一种发生在岩石圈和水圈界面上的地质作用来研究。在此种学术思想指导下完成的许多有关岩溶发育规律的研究，常以岩性、地质构造、水文地质条件如何控制岩溶发育的论述而告终。实际上，由于 CO_2 的积极参与，如不把岩石圈、水圈同大气圈、生物圈联系起来，即以地球系统科学为指导，就很难说清楚与全球碳、水、钙循环共存的岩溶作用。

本书试图以地球系统科学理论为指导，以对“岩溶动力系统”的结构、功能、运行机制和留下的轨迹的认识为主线，贯穿于全书。这就面临一个从理论到具体的工作方法，以及对各种岩溶现象的认识，全面创新的艰巨任务。为此，有必要首先说明一下我们称之为“岩溶动力系统”的构成、功能和特点，以及其研究方法和类型。

2.1 岩溶动力系统的结构、功能和特点

2.1.1 定义

岩溶动力系统是控制岩溶形成演化，并常受制于已有岩溶形态的，在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈界面上的，以碳、水、钙循环为主的物质、能量传输、转换系统。

2.1.2 结构和边界

岩溶作用发生在一种三相不平衡的开放系统中，在自然界，这种作用必然与碳循环，即 CO_2 - 有机碳 - 碳酸盐系统相耦联。因此，岩溶作用是全球碳、水、钙循环的一部分，而岩溶动力系统的结构，可以用图 2—1 或图 4—9 所表示的概念模型来描述。它由固相、液相、气相三部分构成，固相部分为各种以碳酸盐岩为主的岩石及其中的裂隙网络构成；液相部分为含有以 Ca^{2+} (Mg^{2+})， HCO_3^- ， CO_3^{2-} ， H^+ 和溶解 CO_2 为主要成分的水流；气相部分则为以 CO_2 为主的各种参与岩溶作用的气体。由于岩溶动力系统是一个开放系统，其边界既受制于已有的地表地下岩溶形态系统，又与地球四层圈有密切联系。在其下部的固相部分，不但通过碳酸盐岩及其中的裂隙网络而与整个岩石圈联系，而且还通过现代活动深断裂与地幔联系，使深源 CO_2 得以积极参与岩溶动力系统的运行并向大气释放。其中间的液相部分，实际上是全球水圈的一部分，它不但是岩溶动力系统的枢纽，而且通

过它与生物圈、人类活动、大气圈联系（如光合作用吸收水分和碳、水工建筑改变水的运动），使它们积极参与岩溶作用（溶蚀或沉淀）。上部的气相部分属于大气圈的组成部分，也通过气体的 CO_2 交换而和生物圈、岩石圈及人类活动密切联系（如光合作用、石灰的烧制、水泥的固化等），使它们积极参与岩溶动力系统的运行。

2.1.3 功能

岩溶动力系统的基本功能是驱动岩溶作用（溶蚀或沉淀）。其基本运行机制也显示在图 2—1 和图 4—9 的概念模型上：用两对箭头来表示。简单地说，每当有较多的 CO_2 由大气进入该动力系统时，就发生溶蚀作用，产生各种溶蚀岩溶形态，进入的 CO_2 越多溶蚀作用越强。反之，每当有较多的 CO_2 由该系统中逸出时，就发生沉淀作用，产生各种沉淀岩溶形态， CO_2 逸出越快，沉淀作用也越快。具体地说，岩溶动力系统的功能可概括为 4 个方面：① 驱动各种岩溶形态的产生，并通过其所造成的地表地下双层岩溶空间结构和碱性地球化学背景导致一系列环境问题，如旱、涝、石漠化、水土贫瘠、气爆、诱发地震、地面塌陷、生物多样性受限等；② 通过岩溶作用由大气回收或向大气释放 CO_2 ，调节大气温室气体浓度，缓解环境酸化；③ 驱动元素的运移、富集、沉淀，形成有用矿产资源，影响生命；④ 记录全球环境变化过程，由于岩溶动力系统与全球四圈层的密切关系，它可以敏感地反应并忠实地记录各种环境因子，包括降雨量、气温、植被、地下水位与海平面升降、酸碱度等变化，为研究全球变化提供依据。可见，对岩溶动力系统结构、功能、运行机制的正确认识，是科学地合理地解决岩溶地区乃至某些全球性资源环境问题的关键，这个思路贯穿在本书的始终。

2.1.4 特点

岩溶动力系统最突出的特点是其对环境反应的敏感性。作为全球碳循环、水循环的组成部分，这似乎是不言而喻的。但直到一套便携式仪器——温度自动补偿 pH 计、 CO_2 探测器和暂时硬度测试装置的引入，并在野外联合测试，我们才真正了解到这个系统对于环境变化是多么敏感。由本书中所引用全国 7 个岩溶动力系统的定位观测资料，可以反复证明这个特点。许多环境因素，如降雨、气温、植被、大气中的 p_{CO_2} （与生物作用过程有密切的关系），水流状态、深度、温度、扰动程度和系统的开放度等，都可改变 CO_2 的运移方向，继而改变岩溶作用的强度、方式甚至方向（指溶蚀或沉淀）。这种敏感反应的时间尺度，不但有季节变化，还有昼夜、小时甚至分的变化。岩溶动力系统的这个特点，对其研究方法带来特殊要求，首先是现场测试和定位观测的重要性。同时，由于系统中的物质、能量在地球四圈层间穿梭运动的复杂状况，这就使同位素示踪和实验室模拟技术，对于真正掌握岩溶动力系统的运动机制具有重要意义。岩溶动力系统对环境变化的敏感性，还要求根据不同的地质、气候、水文、植被环境，区别不同类型，抓住不同的侧重面，采取不同的工作方法，以作深入研究，这些内容将在本章的后面几节中作详细说明。

2.2 研究方法

2.2.1 岩溶动力系统研究方法的特点

岩溶作用是在碳循环及与其相耦联的水循环、钙循环系统中碳酸盐（岩）的被溶蚀或沉积，而各种岩溶形态则是这一复杂的循环系统的运动在碳酸盐（岩）上留下的轨迹。由

于该系统涉及固（碳酸盐岩）、液（水）、气（CO₂）三相的相互作用，而此种作用随时空变化，因此，岩溶系统是一个动态的系统，用传统的碳酸盐平衡的知识将不足以解释自然界遇到的种种岩溶现象，而必须在此基础上进一步用动力学的方法对该系统进行研究。

根据野外工作的经验、室内模拟实验结果及理论分析，岩溶动力系统研究方法有如下特点：

(1) 把握系统 CO₂ 随时空变化的规律：CO₂ 作为岩溶作用的源动力，其来源主要包括大气 CO₂、土壤 CO₂ 和地球深部 CO₂。其中：大气 CO₂ 含量较低，但相对稳定，它是裸露岩溶区岩溶作用得以发生和加强的源泉；土壤 CO₂ 含量时空变化很大，主要取决于土壤生物化学作用，它是自然界岩溶作用，特别是覆盖型和埋藏型岩溶区岩溶作用的主要侵蚀动力；地球深部变质 CO₂ 变化也很大，取决于深部变质作用程度及碳氧的提供，如深部是否存在碳酸盐岩等，这部分 CO₂ 主要是一些构造活动地区岩溶作用发生的根源。

(2) 掌握系统的水动力特征：水在岩溶动力系统的重要性不只体现在它是一种溶剂和载体。由于它的动态差异，岩溶作用，不论溶解或沉积，都可能明显不同，如地下河中可形成边槽；岩溶洞穴中可产生各种形态和大小的石笋、石柱等。究其原因，在于水岩间扩散边界层的存在。研究表明，水流愈快，边界层厚度愈小，碳酸盐溶解或沉积的速度愈大，反之，水流愈慢，边界层厚度愈大，碳酸盐溶解或沉积的速度愈小。

(3) 了解系统的温度动态：温度一方面通过影响化学反应的平衡常数改变反应的速率；另一方面它影响系统的生物活动性，从而改变系统的 CO₂ 产生率，这从后文野外定位观测的阐述中可以看出。

(4) 捕捉系统水化学的变化规律：上述系统的 CO₂ 含量、水动力及温度特征只是系统的输入部分，而要把握住一个系统，则必须了解它的输出特性。对于岩溶动力系统，输出主要包括 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、H⁺ 值等。

(5) 利用试片直接观测系统碳酸盐（岩）溶解、沉积的速率：为了更直观地了解系统的输出特性，利用试片直接观测系统碳酸盐（岩）溶解、沉积的速率（包括野外和室内实验）是研究岩溶动力学系统的一个较好方法，它可以和利用水化学得出的结果相互验证、相互补充。

(6) 充分利用环境同位素所提供的信息：与岩溶系统密切关联且利用价值较高的环境同位素主要为碳、氧同位素，其中碳稳定同位素在揭示岩溶作用过程的机理方面可发挥重要作用；铀、碳放射性同位素主要用于测年，配合碳、氧稳定同位素所提供的环境信息，可用于古环境的恢复和重建。

2.2.2 指标选择

岩溶作用过程（以 CaCO₃ 的溶解和沉积为例）可用下图（图 2—1）来概括：它包括如下可逆反应：

(1) CO₂（气）⇌ CO₂（液），即气相 CO₂ 溶解于水或液相 CO₂ 转换成气相逸出，两者间通过亨利定律 $CO_2（液）= K_h p_{CO_2}$ 建立联系；

(2) CO₂（液）+ H₂O ⇌ H₂CO₃，即液相 CO₂ 与水结合为碳酸或碳酸发生水解，之间关系为：CO₂（液）= K₀（H₂CO₃）；

(3) H₂CO₃ ⇌ H⁺ + HCO₃⁻，即碳酸分解产生氢离子和碳酸氢根离子，或沉积时发生可逆过程，之间关系为：(H⁺) (HCO₃⁻) = K_{H₂CO₃} (H₂CO₃)；

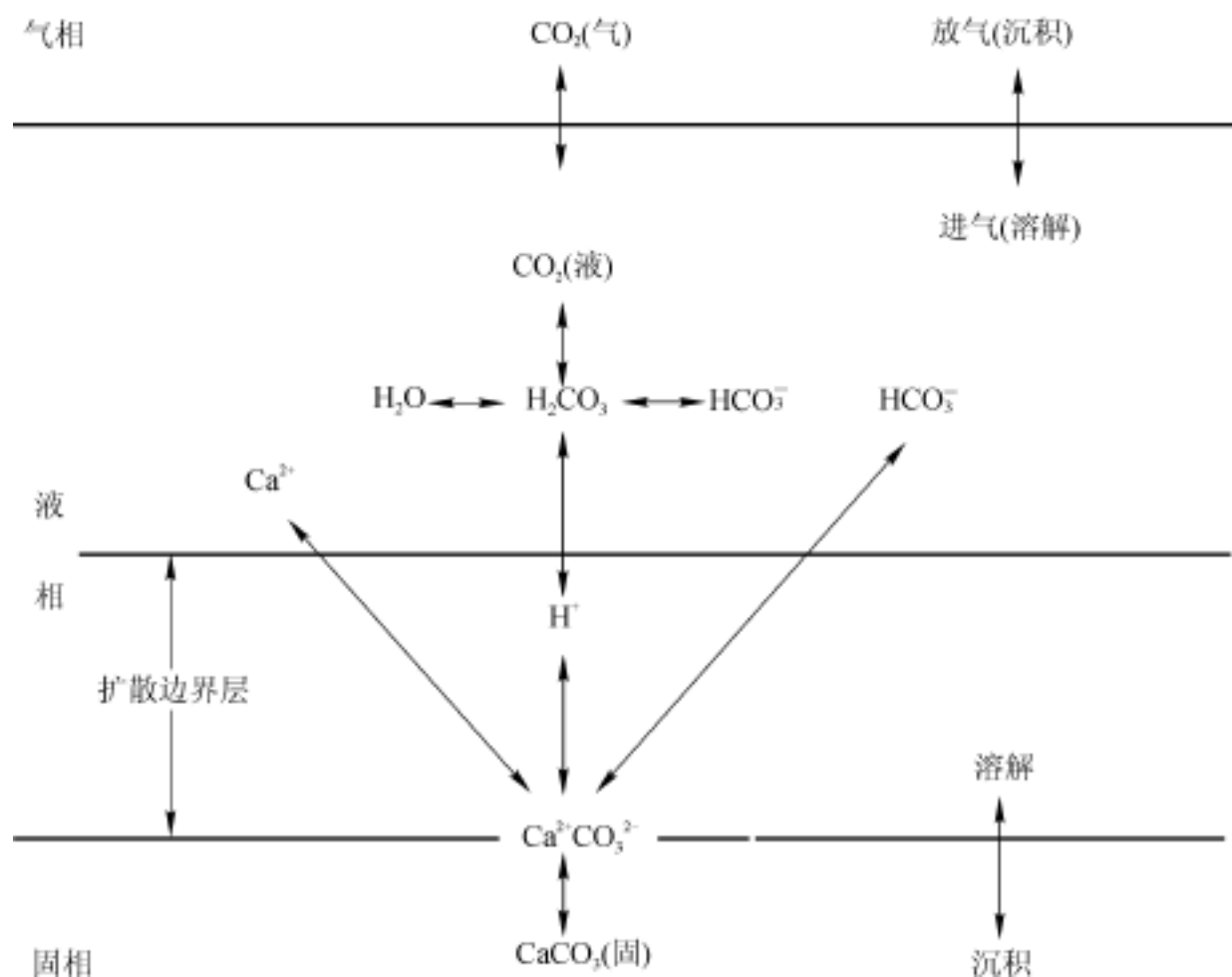


图 2—1 岩溶动力系统概念模型

(4) $\text{CaCO}_3 (\text{固}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ ，即碳酸钙发生溶解，可逆过程即碳酸钙沉积，质量作用方程为： $(\text{Ca}^{2+}) (\text{CO}_3^{2-}) = K_c$ (碳酸钙溶度积)；

(5) $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HCO}_3^-$ ，即溶解时反应 (3) 产生的氢离子与反应 (4) 产生的碳酸根离子结合成碳酸氢根离子，使得溶解反应 (4) 能继续进行，或沉积时为可逆过程。质量作用方程为： $(\text{H}^+) (\text{CO}_3^{2-}) = K_2 (\text{HCO}_3^-)$ 。

由此可见，系统涉及 CO_2 (气) (常表示为二氧化碳分压 p_{CO_2})、 CO_2 (液)、 H_2O 、 H^+ (或 pH 值)、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 Ca^{2+} 、 CaCO_3 (固) 及扩散边界层厚度 (与流速和温度相关) 共 10 个变量，由于前 9 个变量之间通过质量作用定律存在相互关系，因此，了解该系统不必对每个变量都进行观测，而且，某些变量数值甚低也难以观测到。理论分析及经验证明，只要对系统的 p_{CO_2} 、流速、温度、pH 值、 HCO_3^- (或 Ca^{2+}) 5 个指标进行观测，并结合碳、氧同位素所提供的信息，即能较有效地掌握系统岩溶作用的特征和规律。当然，上述考虑的是纯碳酸钙系统，对于其他离子 (如 Mg^{2+})，特别是外源离子 (如 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等) 含量较高的系统，尚需增加这些指标。

2.2.3 捕捉碳循环的方法：普测、定位观测

岩溶作用与碳循环是紧密相连的，因此，把握岩溶动力系统规律的重要一环在于把握系统的碳循环特征。而由于系统具有时空变化的特性，因此必须掌握系统碳循环的时空变化规律，后者实际上反映了岩溶形成的机理。

岩溶系统的普测、定位观测即是基于前述岩溶动力系统的特点，选择合适的指标 (已如前述)，在野外进行大量的现场测试，以达到捕捉碳循环，进而把握岩溶动力系统特征的目的。两者的差别在于普测侧重对系统空间变化的了解，而定位观测侧重对系统时间动