



岩溶水文地质与地貌学

KARST HYDROGEOLOGY AND GEOMORPHOLOGY

德里克·福特 保罗·威廉姆斯 著

王团乐 薛果夫 陈又华 柳景华 等译



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

岩溶水文地质与地貌学

Karst Hydrogeology and Geomorphology

德里克·福特(加拿大麦克马斯特大学)

保罗·威廉姆斯(新西兰奥克兰大学)

著

王团乐 薛果夫 陈又华 柳景华 等译



中国地质大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF GEOSCIENCES PRESS

图书在版编目(CIP)数据

岩溶水文地质与地貌学/[加]福特,[新西兰]威廉姆斯著;王团乐等译. —武汉:中国地质大学出版社,2015.12

ISBN 978-7-5625-3784-7

- I. ①岩…
II. ①福…②威…③王…
III. ①岩溶水-水文地质学②岩溶地貌-地貌学
IV. ①P641.134②P931.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 293770 号

Translation from the English language edition:
Karst hydrogeology and geomorphology / Derek Ford and Paul Williams.
Copyright © 2007 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.
All Rights Reserved.

岩溶水文地质与地貌学

[加]德里克·福特 [新西兰]保罗·威廉姆斯 著
王团乐 薛果夫 陈又华 柳景华 等译

责任编辑:王 荣

责任校对:周 旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮编:430074

电 话:(027)67883511

传 真:(027)67883580

mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

Http://www.cugp.cug.edu.cn

开本:880mm×1 230mm 1/16

字数:142千字 印张:37

版次:2015年12月第1版

印次:2015年12月第1次印刷

印刷:武汉市籍缘印刷厂

印数:1—2 000册

ISBN 978-7-5625-3784-7

定价:65.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

著者序

Derek Ford (MA, DPhil., FRSC) was raised in the World Heritage limestone city of Bath in the southwest of England. As a schoolboy he became an enthusiastic explorer of caves in the nearby Mendip Hills, progressed to mapping them, and then studying their genesis for his doctoral thesis (Oxford University, 1963). He and his wife, Margaret, emigrated to Canada in 1959, where he taught in the Geography and Geology departments at McMaster University (Ontario) for more than forty years. He conducted his own research and directed students over a wide range of karst and allied subjects but maintained a focus in three principal areas: (i) speleogenesis (the development of solutional caves); (ii) the interactions of karst processes and landforms with glaciations and under periglacial conditions; (iii) with Henry Schwarcz (isotope geochemistry colleague at McMaster), U series dating, stable isotope and other pioneering paleo-environmental studies of calcite and aragonite speleothems. He has supervised or co-supervised fifty MSc and PhD students to completion and has been privileged to host more than thirty post-doctoral fellows and visiting scientists from other nations, including Xue Guofu, Zhang Zhigan, Zhu Xuewen and Han Baoping from China. He is an elected Academician (Fellow of the Royal Society of Canada), and recipient of other fellowships and awards from Canada and ten other nations. He served as Vice-President, then President, of the International Union of Speleology during the 1980s and is a member of the Board of Governors of the International Center for Research on Karst, Guilin. Since the 1960s Derek Ford has been much concerned with improving the conservation and interpretation of geomorphic landscapes in the national and provincial parks in Canada, and the creation of new parks where desirable; after 1980 this became enlarged advising proponent nations and IUCN/UNESCO on candidate natural sites for the World Heritage program.

Paul Williams (BA, MA, PhD, ScD) also grew up in southwest England, in the city of Bristol which has a deep limestone gorge and is near the Mendip Hills where, as a schoolboy, he too began caving. His interest in caves was well established by the time he was a teenager and developed into a broader scientific interest in karst in his university years, when he took the opportunity to research karst plateau in central France for his undergraduate dissertation. Then, as a doctoral student at Cambridge, he developed his karst research experience by measuring limestone dissolution processes and investigating karst hydrology in a glaciated karst area in western Ireland. His first professional appointment was to the academic staff of Trinity College, University of Dublin, where he taught geography and geology students. Around that time he became aware of the ground-breaking research of Prof. Joe Jennings on tropical karst in the Southern Hemisphere. This interest led subsequently to a move to a new position in the Australian National University, and to the opportunity to research karst in tropical Australia and Papua New Guinea. Then in 1972 he was appointed to a Chair at the University of Auckland, New Zealand, where he has remained, and has since investigated karst in the Pacific islands. Paul Williams' first opportunity to study the great karst of China occurred in October 1976 when he was a guest of the Chinese Academy of Sciences. He has returned to China, and particularly to Guizhou, many times since, particularly in connection with efforts to make a successful nomination of South China Karst for UNESCO World Heritage recognition. Although Paul Williams has investi-

gated karst throughout his professional life, he has also undertaken and published research on coastal processes, catchment management, urban hydrology and Quaternary paleoclimate. He was elected Fellow of the International Association of Geomorphologists in 2009. He is currently completing for publication a book on the geomorphology of New Zealand. Over the last few decades he has given more time to landscape conservation and to World Heritage, including as a field mission evaluator representing IUCN/UNESCO.

Derek Ford and Paul Williams were the first PhD students of Dr Marjorie Sweeting, an internationally renowned karst scholar. Their very similar backgrounds in education and early experience, coupled with Ford's particular expertise in cave genesis and the cold regions balanced by Williams's particular expertise in surface morphometry and tropical karst, led them to accept a science publisher's invitation to prepare a comprehensive textbook for advanced students and professionals. It was designed to differ from earlier books on karst geomorphology by extending systematic descriptions of the nature of the karst rocks and the solution processes in early chapters to new chapters stressing the distinctive properties of karst aquifers when compared with ordinary granular or fracture aquifers, describing methods of measuring them where they remain inaccessible 'black boxes', the progressive development of solution caves within them that become big enough for humans to explore, and the earth history that can be recovered from analysis of the sediments and precipitates that can accumulate in these caves. Only in the ninth and tenth chapters would the reader be introduced to karren, dolines, poljes, tower karst, etc. —the suites of distinctive landforms on the surface of the Earth that the word "karst" itself is taken to summarize. A first edition of this book, "Karst Geomorphology and Hydrology", was published in 1989 and received very good reviews. Here, the volume translated into the Chinese language is a second, up-dated and enlarged, edition entitled "Karst Hydrogeology and Geomorphology", published by John Wiley and Sons, Ltd. in 2007.

The last 50 years has seen enormous development of our understanding of karst landforms, caves and karst hydrogeology. We two have been extremely lucky to have been able to participate actively in this and to have been buoyed along and stimulated by equally enthusiastic colleagues and students from many countries, who have shown us their caves and karst, explained their research and shared their concerns about management and conservation issues. The development of karst research in China since the mid 1970s has been particularly notable, as has been the increased pace and success of karst conservation. We very much admire the contributions made to both pure and applied karst science by colleagues at the Academy of Sciences in Beijing, the Karst Research Institute in Guilin, and Guizhou Normal University. At a personal level we also value their long-standing friendship very highly and hope to have many more years of fruitful cooperation. We are deeply honoured to have had our book considered worthy of translation into Chinese. We know the huge amount of effort it took to write it, and cannot imagine the immense determination and perseverance that was required to translate it, not to mention the high level specialist language skills required. Therefore to Wang Tuanle and Xue Guofu, the translators, we offer our sincerest thanks and congratulations for their success in completing this large undertaking.



Paul W. Williams

2016. 7. 14

译者序

《岩溶水文地质与地貌学(Karst Hydrogeology and Geomorphology)》是当代两位顶级岩溶学者 Derek Ford(德里克·福特)与 Paul Williams(保罗·威廉姆斯)毕生研究成果的结晶,1989年初版,2007年作了大幅度增补和修订。本书对世界岩溶研究影响深远,被誉为岩溶学界的“圣经”。

Derek Ford 为加拿大皇家学会会员(院士),20世纪80年代,先后担任国际喀斯特洞穴学会和加拿大地理学会主席,被加拿大和其他十个国家授予各种学术荣誉。他在岩溶学领域的造诣,得益于他的天赋、执着的科学精神和在业内特有的人格魅力。学童时期他就迷上了溶洞探险,正是对故乡溶洞起源的研究成就了他在牛津大学的博士学位。20世纪50年代末,他从教于加拿大麦克马斯特大学,开始了全球性岩溶研究的旅程,从赤道一带的印度尼西亚及加勒比海岛国,到四季冰封的加拿大北部永久冻土带,从欧美到亚洲,不断发现、研究各种岩溶地貌,探索过的溶洞数以千计。他的学术贡献特别在于三个领域:岩溶洞穴成因学;冰川边沿地带岩溶与冰川活动的相互作用;与 Henry Schwarcz(亨利·施瓦兹)教授合作,创立洞穴堆积物中方解石和文石的铀系测年法、稳定同位素测定及其他古环境的研究方法。

Derek Ford 与中国有着特殊的渊源,20世纪70年代,与我国自然地理学与海岸学家任美锷院士开始交往;他指导的世界各国30多位博士后研究员或访问学者中,包括中国的薛果夫、张之淦、朱学稳和韩宝平,还与中国岩溶学者袁道先院士、卢耀如院士及宋林华教授有长期交流合作。他多次来中国,实地考察过三峡及清江、乌江流域,讨论研究过金沙江乌东德水电站的岩溶问题。

当 Derek Ford 在牛津大学学成之时, Paul Williams 也获得剑桥大学博士学位。不久,出于对热带岩溶的浓厚兴趣,他远渡重洋到澳大利亚国立大学任教,开展澳大利亚和巴布亚新几内亚热带地区岩溶的研究,1972年,他获新西兰奥克兰大学教授职位,研究地域扩展到众多的太平洋岛屿。1976年,Paul Williams 受中国科学院邀请,第一次参与研究中国岩溶,此后他多次访问中国,并为中国南部岩溶提名通过联合国教科文组织世界遗产认定作出了积极贡献。岩溶之外,他的研究领域还包括海岸再造作用、流域管理、城市水文学和第四纪古气候。2009年,他当选国际地貌学家协会理事,目前是世界自然保护联盟和联合国教科文组织的评审专家。

长江三峡勘测研究院有限公司(武汉)是我国水利水电勘测劲旅,担负着长江三峡工

程、葛洲坝工程和清江隔河岩、水布垭、高坝洲水电站,金沙江乌东德水电站及滇中调水等巨型和大型工程的地质勘察研究任务,在岩溶方面有着丰富的实践经验。在建中的乌东德巨型水电站地处大西南,地质环境复杂,岩溶问题奇特。面对这些问题,译者作为地质工程师倍感压力。当译者见到此书时,立即认真研读,在岩溶和水文地质方面大有感悟。本书指导译者不断克服乌东德水电站的岩溶问题中的难点,并取得最终突破。水电站数十千米地下硐室开挖已经充分验证,前期勘察中岩溶研究成果是正确的。这项工作的经历激发了译者将此书翻译出版,介绍给国内同行的念头。长江三峡勘测研究院领导当即给予支持,启动翻译工作。历经五年,译书终于在2015年11月定稿付梓。

该书应用系统理论的方法,从可溶岩岩石矿物组构、溶解的化学和反应动力学特性、岩溶剥蚀速率等基本原理解入手,系统论述了地下水在可溶岩中的运移规律,全面阐述了不同气候带地下洞穴系统的形成过程和洞穴沉积物的成因及特征,特别对前人研究鲜有涉及的干旱寒冷环境下的岩溶地貌,人类活动对岩溶岩石环境的影响等作了深入的研究,在此基础上,提出了岩溶地区水资源管理保护、岩溶地区生态可持续利用与恢复发展等先进理念。本书理论丰富、取材广泛、论述系统,研究方法具有开创性,研究范围涵盖了广阔的四大洲不同气候带,案例典型生动、实践与理论结合紧密。本书不仅是岩溶专业科研人员和学生的教科书,也是工程勘察与设计人员的理论工具书,也可作为旅行探险家、工程建设专家、人文艺术学者等人的实践参考书,特别是对当前中国企业参与世界范围内的基础设施建设项目竞争而言,会有所裨益。

参加本书翻译的还有:覃振华、曾立、董立、许琦、白伟、叶圣生、赵长军、向家波、刘冲平、吴和平、肖云华、王吉亮、郝文忠、曹伟轩、李志、翁金望、倪凯军、贾建红、谭朝爽、杨雪洲、苏亚军等。本书校核工作由王团乐、薛果夫和许琦完成。在本书译著过程中得到了长江三峡勘测研究院领导的帮助与指导,在此表示衷心感谢!

因英语水平和专业知识的不足,书中难免有一些不足之处,诚望读者批评指正。

译者

2015年11月20日于武汉光谷

前 言

本书对 1989 年出版的岩溶地貌学和水文学一书作了大量修改,保存了第 1 版书中系统研究方法的部分内容及水文学与地貌学部分内容。第 1 章中不再重复或不再引用第 1 版中已有的一些材料及部分文献。

第 2 章叙述了可溶岩石的特征及其地质结构;第 3 章和第 4 章全面描述了可溶岩溶解的物理化学过程及全球溶解速率比较。在过去二三十年间,有关水文学的研究和地下水方面的研究已成为学术界和实践应用方面的重要组成部分。第 5 章和第 6 章详细论述了岩溶水文系统,这两章及后面各章,着重考虑了大气降水通过溶解岩石从而使洞穴变大,进而论述了地下水在可溶岩石中运移的规律及特点。第 7 章讨论了过去 20 年有关地下洞穴系统成因认识的成果(通过广泛的国际会议及计算机硬件的升级为手段所取得)。第 8 章主要论述了洞穴沉积物相关的内容,地下洞穴系统中的沉积物保留了有关地表土壤、植物的变化信息及它们相互作用变化的证据,以及该流域中自然环境变化的证据。越来越多的人认识到洞穴是重要的自然遗迹,其中保存了有关大陆和海洋气候变化及变化速度的相关信息。近年来人们越来越关注全球气候变暖的问题,因此,对这些沉积物的研究越来越深入,第 8 章全面论述了这方面最新的研究成果。第 9 章和第 10 章主要论述了湿润温带、热带环境和干旱寒冷环境下的岩溶发育过程中产生的溶蚀和沉积地貌,并总结了岩溶研究实际应用的总体框架及前几章所论述的内容。岩溶水资源越来越受到全球的关注,这是第 11 章的重点,本章也论述了有关岩溶水资源供应的管理,以及公路、铁路和管道沿线上分布的大量危险物质的污染问题(其推进速度相当可怕)。第 12 章总结了由人类活动和岩溶作用共同引发的地质灾害,岩溶作用可能危害工程建设及其他人类经济活动,反过来,人类活动也会危害脆弱的岩溶生态系统、岩溶含水层和岩溶地貌特征;本章对环境恢复、可持续开发利用及保护也作了总结。

在过去的 25 年里,由于各种原因,地球科学家、环境科学家、土木工程师甚至一些法律界的人士对各方面岩溶研究也有着强烈的兴趣,从而导致与岩溶相关的出版物的数量剧增。仅用英文发表的相关出版物,我们在一年内也不可能读完,而要读完那些用其他语言文字发表的许多高质量的出版物更是不可想象的。在本书中我们尽量以国际视野的角度选择案例和相关文献。我们为了让该书价格合理,压缩了字行间距,因此有些引用的资料没有标注引用号,在此对这些同仁表示歉意。

致 谢

将本书献给从学生时代到职业生涯一直给予支持的我们的妻子玛格丽特·福特和格温妮丝·威廉姆斯。

——德里克·福特 保罗·威廉姆斯

目前国际上众多岩溶研究学者知识丰富,且充满活力与激情。非常感谢给予我们研究、写作支持的、在野外考查时陪伴的同事、同行们。我的已故导师 Joe Jennings(澳大利亚)和 Marjorie Sweeting(英国),他们的热情、科学诚信为我们树立了榜样,在职业生涯中时刻激励着我。我们是站在他们的肩膀上继续前进。

我深情怀念已故的 Jim Quinlan(美国)和宋林华(中国),感谢他们对我的教导。尤其感谢与我在洞穴研究共同合作有 40 年的 Henry Schwarcz,30 年来给现场考查提供技术支持的 Peter Crossly,感谢 Steve Worthington 对地下水水文学章节的严格校审,同时也感谢在岩溶研究方面给予我帮助同仁,他们的研究成果让我受益匪浅,并大大丰富了我在岩溶方面的经验。在此我要感谢:

Slava Andreichouk

Tim Atkinson

Michel Bakalowicz

Pavel Bosak

袁道先

Wolfgang Dreybrod

Victor and Yuri Dubljansky

Stein-Erik Lauritzen

Joyce Lundberg

Richard Maire

Alain Mangin

Andrej Mihevc

Petar Milanović

John Mylroie

Ralph Ewers	Jean Nicod
Paolo Forti	Bogdan Onac
Amos Frumkin	Art and Peggy Palmer
Franci Gabrovšek	Jean-Noel Salomon
Ivan Gams	Jacques Schroeder
John Gunn	Yavor Shopov
Zupan Hajna	Chris and Peter Smart
Russell Harmon	Tony Waltham
Carol Hill	Bette and Will White
Julia James	朱学稳和娜佳
Sasha Klimchouk	卢耀如
Andrej Krancj	Laszlo Zambo
Wieslawa Krawczyk	

目 录

1 岩溶概述	(1)
1.1 定义	(2)
1.2 地貌学和水文地质学与岩溶的关系	(4)
1.3 可溶岩的全球分布	(5)
1.4 岩溶研究的发展	(5)
1.5 本书的目的	(7)
1.6 岩溶术语	(8)
2 可溶岩	(9)
2.1 碳酸盐岩及矿物	(9)
2.2 灰岩组成及沉积相	(13)
2.3 石灰岩成因及白云岩的成因	(18)
2.4 蒸发岩	(24)
2.5 石英岩和硅质砂岩	(27)
2.6 地层岩性特征影响岩溶发育	(28)
2.7 夹层碎屑岩	(31)
2.8 层面、节理、断层和破裂面	(31)
2.9 褶皱地貌	(36)
2.10 古溶蚀面	(37)
3 可溶岩溶解:化学和反应动力学特性	(40)
3.1 概述	(40)
3.2 水溶液和化学平衡	(43)
3.3 硬石膏、石膏和盐的溶解	(47)
3.4 二氧化硅的溶解	(48)
3.5 重碳酸盐平衡和碳酸盐岩在普通大气水中的溶解	(48)
3.6 S—O—H 系统和碳酸盐岩石的溶解	(56)
3.7 碳酸盐溶解中的化学作用	(60)
3.8 生物岩溶过程	(64)
3.9 野外和室内测定:计算机程序	(66)
3.10 岩溶岩的溶解和析出的反应动力学特性	(69)
4 岩溶剥蚀的分布和速率	(81)
4.1 全球碳酸盐地区溶解性剥蚀的差异性	(81)
4.2 溶解剥蚀速率的测定和计算	(86)
4.3 石膏、岩盐以及其他非碳酸盐岩石的溶解速率	(94)

4.4	测定成果的解译	(97)
5	岩溶水文学	(106)
5.1	基本水文地质概念、术语、定义	(106)
5.2	岩溶水文系统发育的控制因素	(119)
5.3	能量补给及流网发育	(126)
5.4	水位和潜水带的发育	(132)
5.5	包气带的发育	(134)
5.6	岩溶含水层的分类及特征	(138)
5.7	达西定律在岩溶中的应用	(141)
5.8	淡水与咸水分界面	(143)
6	岩溶排水系统分析	(147)
6.1	岩溶的“灰箱”特征	(147)
6.2	地表勘查及调查技术	(147)
6.3	包气带中地下水的补给、径流、排泄	(154)
6.4	钻孔分析	(164)
6.5	泉水水文过程线分析	(173)
6.6	坡立谷水文分析	(180)
6.7	泉水水质分析	(182)
6.8	不同水文过程状态下地下水储存量及径流路线	(188)
6.9	岩溶含水层结构解译	(189)
6.10	示踪试验技术	(191)
6.11	岩溶含水层计算模型	(202)
7	洞穴系统的形成过程	(209)
7.1	洞穴系统分类	(209)
7.2	非承压型洞穴平面模式建构	(214)
7.3	非承压型洞穴的发育	(222)
7.4	单级洞穴的系统改变	(230)
7.5	多级洞穴系统	(233)
7.6	承压水循环或基底注入水的岩层中发育含大气水的洞穴	(236)
7.7	深成洞穴: 主要与 CO_2 有关的热水深成洞穴	(241)
7.8	深成洞穴: 含硫化氢水流形成的洞穴	(245)
7.9	海岸早期成岩洞穴	(248)
7.10	溶洞断面及侵蚀地貌的局部特征	(250)
7.11	洞穴中的冷凝作用、冷凝侵蚀和风化作用	(262)
7.12	洞穴垮塌	(266)
8	洞穴沉积	(271)
8.1	概述	(271)
8.2	碎屑沉积	(273)
8.3	方解石、文石及其他碳酸盐沉积	(282)
8.4	其他洞穴矿物	(293)
8.5	冰洞	(296)

8.6	方解石堆积物和其他洞穴沉积物测年	(299)
8.7	方解石洞穴沉积物的古环境分析	(307)
8.8	洞穴系统的质量流量:西弗吉利亚州 Friar 洞穴的例子	(319)
9	湿润地区岩溶地貌演化	(321)
9.1	水文与地球化学系统的耦合	(321)
9.2	小型溶蚀、刻蚀——微型溶痕和溶痕(微型溶蚀地貌和溶蚀地貌)	(321)
9.3	岩溶漏斗——代表性的岩溶地貌?	(338)
9.4	岩溶漏斗的起源和发展	(340)
9.5	崩塌洼地的起源与发育	(345)
9.6	网格状漏斗	(349)
9.7	溶蚀漏斗的地形测量分析	(351)
9.8	与异源补给相关的地貌:接触岩溶	(356)
9.9	岩溶坡立谷	(360)
9.10	侵蚀平原和基准面变化	(362)
9.11	岩溶平原上的峰林	(367)
9.12	岩溶的沉积和构造特征	(373)
9.13	蒸发岩地区的特点	(379)
9.14	石英及其他岩石的岩溶特征	(385)
9.15	潮湿地带碳酸盐岩岩溶地貌的演变顺序	(387)
9.16	岩溶地形进化的电脑模型	(392)
10	气候与气候变化及其他环境因素对岩溶发育的影响	(396)
10.1	气候地貌学理论	(396)
10.2	极端干热气候条件	(396)
10.3	极端寒冷气候:冰川地区的岩溶作用	(406)
10.4	极端寒冷气候:冻土地区的岩溶作用	(419)
10.5	海平面变化及大地构造运动对沿海岩溶作用的影响	(426)
10.6	多期旋回、多成因的剥露岩溶特征	(432)
11	岩溶水资源管理	(439)
11.1	水资源和可持续收益	(439)
11.2	确定可用的水资源	(440)
11.3	岩溶水文地质测绘	(442)
11.4	人类对岩溶水的影响	(445)
11.5	地下水的脆弱性、保护及风险评估	(458)
11.6	建坝、水库渗漏、失事及影响	(461)
12	人类影响及环境自我修复	(467)
12.1	岩溶系统固有的脆弱性	(467)
12.2	森林采伐和农业影响及石漠化	(468)
12.3	岩溶地区水位下降、负荷过重、溶解采矿及其他活动诱发的落水洞	(474)
12.4	可溶岩建设过程中的问题——预期会出现意外情况	(480)
12.5	可溶岩及矿物的工业开采	(484)
12.6	岩溶地的恢复和灰岩采石场的修复	(490)

12.7 岩溶的可持续管理.....	(494)
12.8 岩溶区的科研、文化价值	(498)
参考文献	(501)
索引	(564)

1 岩溶概述

岩溶是用来描述可溶岩(如灰岩、大理岩和石膏)及其中发育的洞穴和地下水系统组合的特殊地貌总称。大面积的无冰区存在碳酸盐岩发育的岩溶地貌,全球 20%~25% 的人生活在碳酸盐岩地区(图 1-1),大多以岩溶地下水作为生产、生活用水,开采岩溶地下水遇到的问题也越来越多。因此,岩溶水的保护和管理受到越来越多的重视。本书论述了地表水及岩溶地下水系统(水文地质学)与岩溶地貌(地貌学)之间的关系,并在水文地质学和地貌学范畴内进行了深入的讨论。

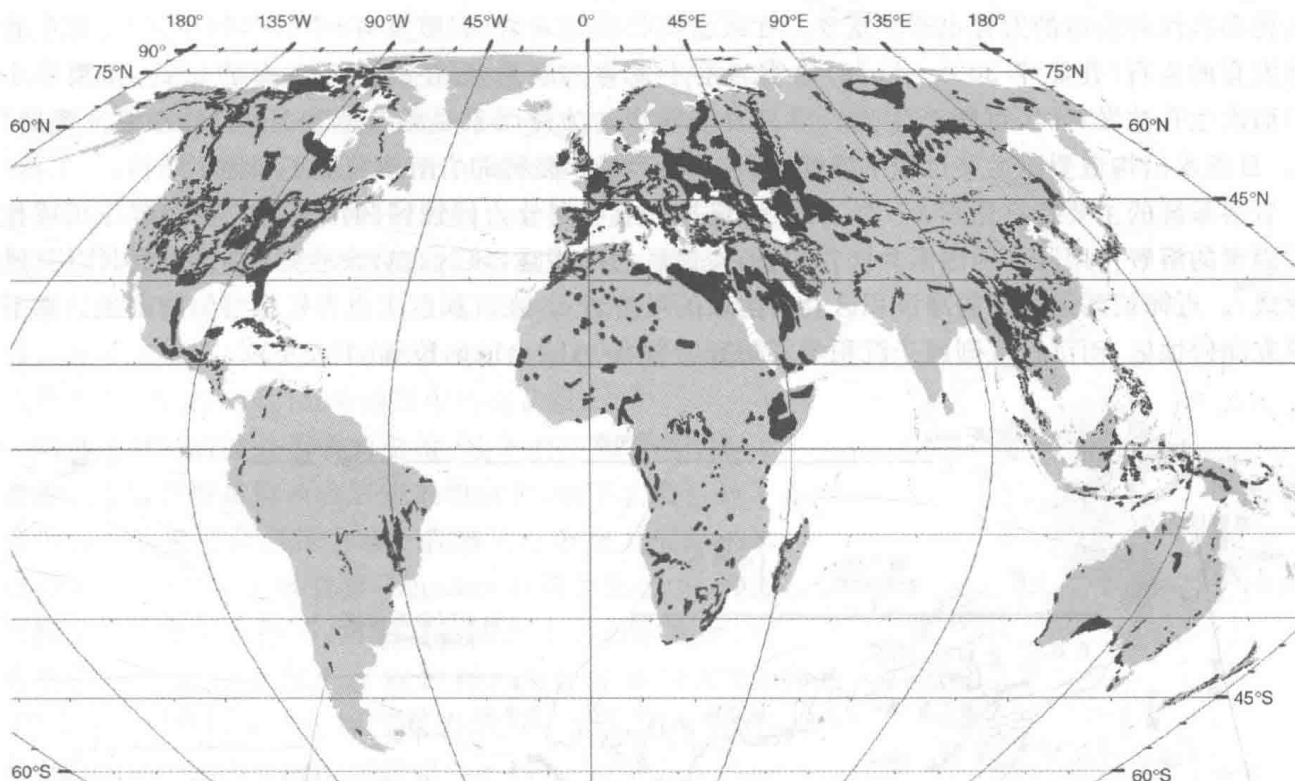


图 1-1 全球碳酸盐岩分布图。各图投影分辨率不同,各碳酸盐岩地区的岩性和出露情况有差别[使用区域地图在 GIS 采用 Eckert IV 投影法,许多区域地图引自 Gunn(2000a)]

很多水文地质学家错误地认为,地表岩溶不发育或不明显,则地下水系统中不存在岩溶水。这种认识上的错误会误导地下水管理及误判环境影响。在地表岩溶不发育的情况下也会产生岩溶水循环。在碳酸盐岩地区就可以默认存在岩溶问题。

《岩溶水文地质与地貌学》第 1 版(Ford, Williams, 1989)用系统的观点研究岩溶水文地质与化学反应过程的成果显著。因此,本版将继续采用系统分析方法对岩溶进行研究。岩溶可看作是由两个子系统,即作用于岩体上的密切相关的水文地质子系统与水化学子系统组成的开放系统,地表及地下的岩溶

地貌是这两个子系统相互作用的产物。

1.1 定义

“Karst”一词源于原始印欧语中(Gams,1973a,1991a,2003;Kranjc,2001a),它起源于“karra/gara”,意为岩石,在欧洲和中东地区发现与之对应的衍生词汇。最早研究岩溶的地方是迪纳拉(Dinaric)岩溶,2/3 位于斯洛文尼亚境内,1/3 位于意大利境内。斯洛文尼亚语中这个词经历了由 kars 到 kras,再到 kar(r)a 的演化过程。这个词还有石头和裸露岩石的意思,同时也将里雅斯特(Trieste)内陆地区称为岩溶。罗马时期这个地区则称为 Carsus 和 Carso,奥匈帝国时期,这个地区就叫 Karst。维也纳地理地质学院对这一国际性科学术语的应用具有决定性的作用,该词始应用于 18 世纪晚期,19 世纪中期被固定下来。Kras(或 Karst)地区的独特地貌成为岩溶地貌的代名词。

岩溶是次生孔隙(裂隙)发育的可溶岩所具有的独特水文特点与地表形态的总称。岩溶地区以发育地下暗河、洞穴、溶蚀洼地、溶沟及大流量泉水为特征,但岩石具强溶蚀性是不足以发育岩溶地貌的,岩石结构和岩性对岩溶的发育也非常重要。在致密块状质纯灰岩(裂隙发育)中岩溶作用强烈,原生孔隙非常发育的岩石(孔隙率 30%~50%)通常岩溶不发育。但是,原生孔隙不发育的岩石(孔隙率小于 1%)而次生孔隙发育时,可能产生强岩溶。岩溶发育的关键因素是地下水循环,这是岩溶发育的“引擎”。自然水沿构造裂隙运移过程中溶解岩石,从而产生了独特的岩溶地貌形态和地下结构。

岩溶系统的主要特点见图 1-2。岩溶地貌基本上可划分为侵蚀区和沉积区。在溶解作用或作为触发因素的溶解作用同其他因素共同作用下,侵蚀区为净搬运,该区也会发生短暂的再沉积作用(沉淀的形式)。近海或陆地边缘的净沉积区会产生新的可溶岩石,在沉积区中也有短暂溶解的现象。本书重点研究净侵蚀区,而沉积区则属于沉积学家研究的领域(Alsharhan,Kendall,2003)。

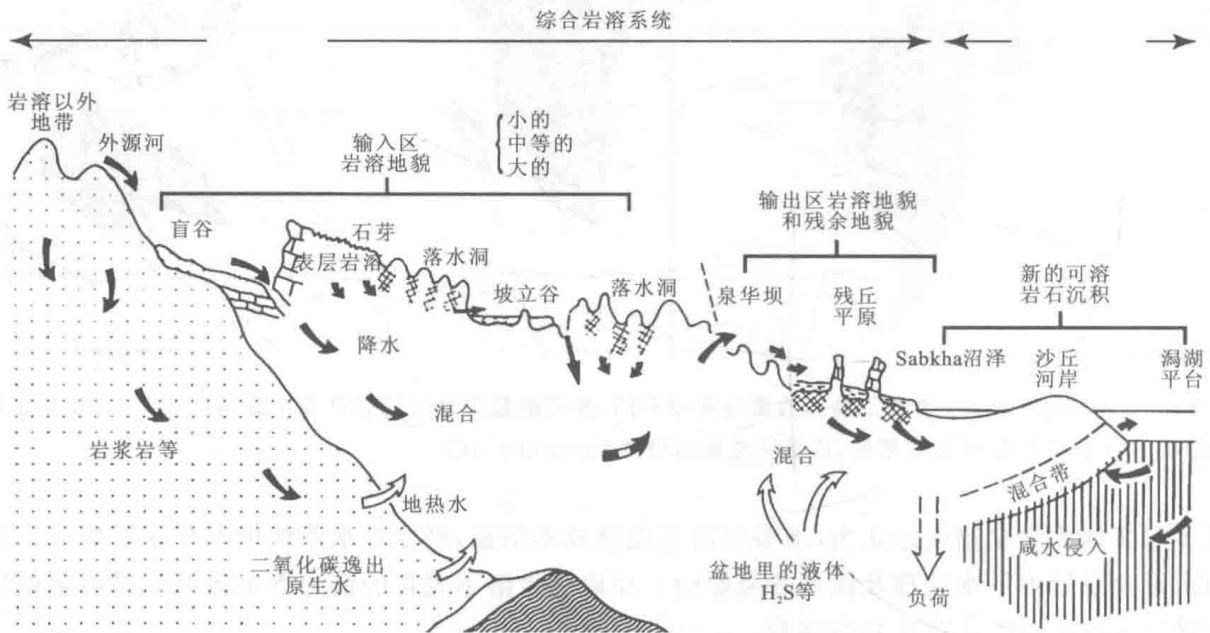


图 1-2 岩溶系统主要岩溶特征综合性说明(引自 Ford, Williams, 1989)

在净侵蚀区,地下水运移过程中主要产生溶解作用。岩溶系统中的地下水大部分来源于大气降水,其表现为地下水浅部循环且地下滞留时间短;向岩溶系统补给的深部循环热水或岩浆岩(或沉降盆地)中的热水在岩溶水系统中所占比例很少,但这种现象很常见;近海一带,海水与淡水混合,溶解速度加快。

侵蚀区大部分溶解作用发生在地表或近地表,地表岩溶地貌形态显著。根据岩溶发育的规模将岩溶地貌分为3种类型,发育形态尺寸小于10m的岩溶为小型岩溶,10~1000m的为中型岩溶,大于1000m的为大型岩溶。根据地下水的补给、径流、排泄,将岩溶系统分为输入区、径流区和排泄区三部分,其中输入区的岩溶地貌占主导地位。输入区地表水入渗地下,岩溶形态与冲积作用及冰积作用形成的地貌形态差异显著。径流区内,独特的峡谷以及底部平坦洼地构成坡立谷(poljes,即岩溶平原),是地表可溶岩带(有时亦为非可溶岩)输送地表水、地下水的通道。排泄区地下岩溶水向地表排泄形成岩溶泉,在岩溶泉附近形成侵蚀峡谷地貌、沉积或堆积地貌(如边石坝等)。地下水水位下降或河流下切过程中,冲积平原上常见高陡溶蚀残丘发育。

有些古老的岩溶被后期固结的岩石覆盖之后,岩溶停止发育,与当代岩溶系统的水文地质环境不同,称为古岩溶。这些古岩溶经历了构造运动(沉降)及碎屑物沉积固结成岩的过程,碎屑岩与下伏古岩溶呈不整合接触关系。有时上覆盖层被侵蚀,古岩溶重新成为现代岩溶系统的一部分,中断了千万年的岩溶得以重新发展。在现代岩溶的作用下,古岩溶的遗迹发生变化。就像过去是冲积平原,而现在变成了河流阶地一样,古岩溶遗迹表明排泄基准面发生了重大变化,如残余山丘的侵蚀面远高于现今水位;又例如海岸带海水下的岩溶洞穴,多层洞穴系统中的上层洞穴成为地下水的排泄通道,也是这类岩溶地貌的主要类型。

尽管在地球上像石膏、硬石膏和盐之类的易溶岩广泛发育,但因上覆不溶岩或难溶岩石覆盖,在侵蚀区地表很少出露(图1-3)。这些易溶岩上部尽管有隔水层保护,即使埋深达1000m,仍会受到地下水循环侵蚀,也会被大面积搬运,这种现象称为层间岩溶。层间岩溶会导致地表或上覆岩石塌陷或沉降。在碳酸盐岩中也会发生层间岩溶,但这种作用不明显。在可溶岩地层中的特定层位或特定层组中优先溶解,也可产生层间岩溶(如白云岩地层中的石膏层)。

欧洲文献将岩溶分为表层岩溶、地下岩溶和覆盖岩溶3种类型。表层岩溶是指地表岩溶地貌组合,地下岩溶是地下发育的岩溶地貌组合。其中地下岩溶又可分为大气降水岩溶(hyperkarst)和原生水岩溶(hypokarst)两种类型,前者指大气降水入渗地下水循环,溶蚀岩石而产生的岩溶现象,而岩石中的初生水和原生水溶解岩石称为原生水岩溶(图1-2)。一些俄罗斯学者把原生水岩溶进一步细化为两种,一种是深部地下水上升溶蚀可溶岩,另一种是可溶岩中的原生水在压力作用下溶蚀岩石。覆盖岩溶是指在透水的覆盖层(如土壤、冰碛物、冰川堆积物和残积物等)下伏的可溶岩石中发育的岩溶。孤立岩溶(karst barré)是指碳酸盐岩被周围隔水层围限的孤立岩溶现象,而条带状岩溶是孤立岩溶的亚类,如灰岩中发育碎屑岩夹层,其地层出露特征表现为地层产状陡倾或近垂直。近来重点研究接触岩溶,这类岩溶指来自相邻非可溶岩地区的水流沿可溶岩与非可溶岩接触带产生的大规模岩溶现象(Kranjc,2001b)。

有些类岩溶地貌并不是溶蚀或侵蚀塌陷作用形成的,这种地貌称为假岩溶。如冰川中的洞穴(冰中的洞穴是相变产生,而非溶蚀产生),热“岩溶”是冻融作用产生的洼地形态,火山“岩溶”是在熔岩中发育的管状洞穴及洞顶产生的机械坍塌的组合地貌,管涌是碎石、土壤和黄土中因冲刷产生的管道及与之相关的坍塌地貌的组合。另一方面,像溶沟这种地貌形态(见9.2节)在石英岩、花岗岩和玄武岩的露头上



图 1-3 蒸发岩全球分布图
(据 Klimchouk, Andrejchuk, 1996)