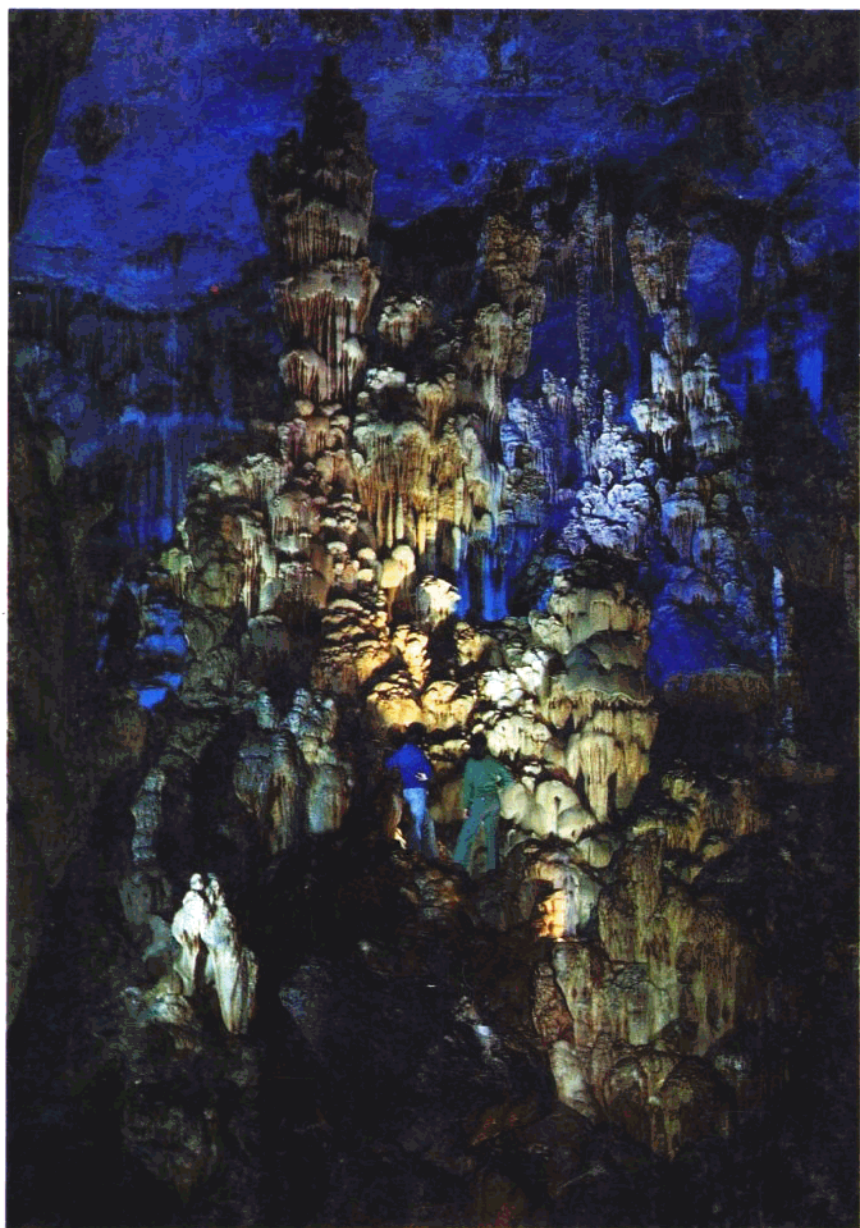


瑶琳洞形成与环境研究

林钧枢 张耀光 等著



中国科学技术出版社

57.156
335

瑶琳洞形成与环境研究

林钧枢	张耀光	周宣森	赵树森
黄赐璇	叶祥清	黄云麟	毕愚溪
陈樟福	方龙龙	冷达明	刘明林
余健生	张贞华	刘际松	著

中国科学技术出版社

• 北 京 •

(京)新登字 175 号

图书在版编目(CIP)数据

瑶琳洞形成与环境研究/林钧枢,张耀光等著. -北京:
中国科学技术出版社,1993
ISBN 7-5046-1019-4

I. 瑶…

Ⅱ. ①林…②张…

Ⅲ. 溶洞[瑶琳]-研究

Ⅳ. P642.252.55

中国科学技术出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市密云县印刷厂印刷

开本:787×1092毫米 1/16 印张:15.25 插页:2 字数:380千字

1993年6月第1版 1993年6月第1次印刷

印数:1—1,000册 定价:11.50元

序

洞穴的探险、调查、科学研究与资源开发,对人类文明、社会经济与工程建设都有相当广泛的影响。第11届国际洞穴学术会议1993年8月将在中国召开,林钧枢教授主编的浙江瑶琳洞穴学研究专著及时问世,为国争光,是令人深感敬佩和欣慰的,谨为作序以志祝贺。

我国对洞穴的探测研究,历史悠久,前仆后继,文献丰富,翰墨绚丽。明代旅游家徐霞客(1586~1641),他的著名游记比西方加法尔(J. Gaffarel)的《地下世界》一文略早,对宜兴善卷三洞和桂林七星岩的有关记述,淋漓尽致,唯妙唯肖。我曾多次现场对照勘测,精辟详尽,叹为观止!他在云南腾冲探查高层洞穴时,冒着生命危险,攀缘悬崖绝壁,不顾生死,怵目惊心的事迹,感人肺腑!他的游记,不仅是洞穴记实文学的典范,而且是科学献身精神的楷模,百读不厌,给人以探寻洞穴奥秘的无穷毅力和忘我的意境。

随着社会生产需求和探测技术的进步,大约从19世纪开始,洞穴研究引起了国内外科技界的重视。我国80%的猿人遗址是在洞穴中发现的。北京周口店猿人化石的发现,揭开了对人类起源多元论战的序幕。我国考古和古人类学界裴文中、周明镇教授等,对洞穴文化层的研究作出了重大的贡献,有力地论证了亚洲东方是世界四大文化源地之一。1972年我去墨西哥参加《人类与科学》大会时,看到墨西哥国家博物馆公开展示,认为他们的祖先是在冰期经由白令海峡迁移到北美洲去的。

在前辈的鼓舞和感召下,1954年,周延儒、施雅风教授和我三人,曾经测绘过桂林七星岩的洞穴地貌图。中文及波兰文译本均已刊布。侯仁之教授对此曾有所评论。嗣后严钦尚教授对金华北山洞穴的考察,任美铎教授等对周口店洞穴环境的研究,大都从地貌学的角度,对洞穴系统的形成和发育,作了一些力所能及的开拓性工作。

由于社会主义建设和地球科学的蓬勃发展,特别是大规模的水文地质普查和深入的喀斯特研究,为洞穴调查研究积累了丰富的财富,起着巨大的推动作用。例如贵州高原东部和南部边缘地带,发现洞穴累计已超过2000个,其中包括面积达100000多 m^2 的紫云格必河洞系大洞厅和长达40余km的湖北利川腾龙洞系。西南地区铁路沿线隧道和车站建设工地,甚至人烟稠密的城市附近,都有新的洞穴发现,如著名的芦笛岩(桂林)、黄龙洞(张家界)、龙宫洞(黄果树附近)、瑶琳洞(杭州)等等,由于交通近便,得天独厚,很快就成为名闻遐迩的旅游资源。那些比较偏远、荫蔽的洞穴,也有用于地下厂房或仓库的。有时它们则可能成为水库工程、交通建设的隐患。所以在环境工程和自然灾害方面,洞穴研究也成为热门课题之一。

杭州西南90km的古仙灵洞,又称“瑶琳仙境”,它与西湖秀色、钱塘怒潮,相得益彰,堪称江南一绝。1979年开始探测工作,该项研究人员对其地质背景,地貌发育,洞穴沉积的矿物、化学、同位素分析,进行了大量的工作。并经沉积物测年标定洞穴形成于35万年以前(中更新世中期)。结合孢粉分析、阶地发育分析等,对古地理环境作出了科学推断;对洞穴空气中 CO_2 含量、地下河水成分、溶蚀速度、洞内气候动力与热力过程、动物特殊生态与环境开展监测,进行了综合研究。这样全面,系统的研究成果,在我国洞穴学研究方面是十分难能可贵的。

我完全赞同林钧枢同志的意见,当前洞穴学发展趋势,是开展包括地学、生物学和技术科学等多学科的综合研究,逐步形成一个跨界学科。他提出现今讨论的主题包括洞穴成因、洞穴发育过程、洞穴发育地带性与全球性对比;岩-水作用溶蚀机制、洞穴发育的控制基面与水、热动力学;洞穴沉积学与年代学、洞穴生物群(区系)与文物考古、生物侵蚀与沉积作用;探测技术、自动监测与信息系统;以及洞穴开发、管理与保护等许多方面。几乎涉及到地圈与生物圈的复杂系统与界面;涉及自然科学与人文科学研究领域的交叉。源远流长,任重道远。瑶琳洞的研究是一个良好的开端。祝愿我国洞穴学家们发扬光辉传统,吸收先进理论与技术,充分利用我国丰富的洞穴资源,形成有中国特色的学术流派,自立于世界民族之林,为洞穴学发展作出应有的贡献。

中国科学院学部委员
中国地理学会理事长

陈世亨

1992年11月12日

前 言

洞穴是特殊的喀斯特作用过程的地下部分产物。我国喀斯特分布广,仅出露地表的碳酸盐岩就约占土地总面积 1/10。随之,我国洞穴分布之广,数量之多,也名列世界前茅。有人估算,仅云南省就有洞穴 5000 多个,贵州、广西更远超此数,其中已作开发调查的不下 400 个。

洞穴是一种资源,不仅往往赋存地下水资源和矿产资源,而且本身可作为旅游、医疗、仓库(如两次世界大战中作为军火和油库)、地下厂房、食用菌生产等场所,以及隐蔽和集结的兵要地点。洞穴作为旅游资源开发是世所公认,现已成立国际旅游洞穴协会。全球现有旅游洞穴 8000 余个,年游客量达 2600 多万人次。据初步统计,我国现已开发的旅游洞穴约 170 余个,仍有很大潜力,有必要在开发数量和质量上提高。洞穴又是保存环境记录、人类进化与文明史的信息库^[32,47]。我国洞穴中保存了巨猿、猿人、古人到智人(新人)和以后的文化遗址。前二者如广西柳城巨猿^[48]、巴马巨猿^[50]、周口店北京猿人^[31]、安徽和县猿人^[62],其余如广西韶关马坝人^[34]、湖北长阳人、广西通天岩洞柳江人^[33]、来宾麒麟山人、贵州猫猫洞兴义人、浙江乌龟洞建德人、辽宁营口金牛山人、桂林甑皮岩人类与新石器文化等等。而且,由于洞穴生态特殊,是生长和发现生物新种的宝库^[26,49]。

另一方面,由于洞穴的发育给喀斯特区经济建设带来一些难题和特殊性,需要分别对待。诸如它导致水利建设中的渗漏问题、铁道与城建的地基稳定性问题、地表强烈水土流失的石山荒漠化问题、频繁的喀斯特环境灾害与贫困问题等^[152,155]。因此,洞穴研究无论在理论,还是在生产上均有重要意义。

为此,中国科学院与前南斯拉夫科学艺术院达成洞穴合作研究协议。中方研究组由中国科学院地理研究所、地质研究所和杭州大学地理系组成(后来杭州师院生物系参加),在桐庐县旅游局及其所属瑶琳仙境管理处、县科委等大力支持与协助下,以浙江省瑶琳洞作为典型研究点,并赴世界著名的斯洛文尼喀斯特高原,尤其重点的迪姆尼兹(Dimnič)洞考察,进行中、南两地的国际对比研究。它以多学科综合研究和以高科技与新方法来研究活动洞穴为特色。从 1980 年至 1984 年进行实地考察、采样和定点观测。然后进行实验测试、分析和整理,累积了一批有价值的第一手科学资料。现将其中已较成熟部分,先撰写出版本册,献给我国喀斯特与洞穴学事业。

本项研究得到中国科学院和浙江省科委的支持。国际洞穴学协会本届副秘书长、中国地质学会岩溶地质专业委员会副主任、中国科学院地质所张寿越教授和中国地理学会地貌专业委员会前副主任、中国科学院地理所地貌室陈治平(原)主任发起,并参予野外考察,直至参加本书编写提纲的初拟,作了许多组织工作。

本项研究和本书的出版是在地理研究所等各所(院校)、室、系领导和同志们的关怀下完成。在定稿出版过程中,承蒙老一辈科学家陈述彭教授和罗来兴教授的悉心指点和帮助。这里尤其应当提到,本书出版得到浙江省桐庐县旅游局的赞助。对此,我们由衷地感谢。本书各章节执笔的分工是:林钧枢(中科院地理所)第一章,第三章第二节一部分,第五章第一、二节,第

六章第一、二、三(与李凤新合作)、五节,第七章第二节,第八章第一节,第十章第二节;张耀光(中科院地理所)第二章第一节,第八章第二节,第十章第一节;周宣森和余健生(杭州大学地理系)第二章第二节;赵树森和刘明林(中科院地质所)第四章第二节;黄赐璇(中科院地理所)第六章第四节(与梁玉莲合作),第十章第三节;叶祥清(中科院地理所)第四章第一节(与陈铁成等合作);黄云麟(中科院地理所)第五章第三节,第七章第一节;陈樟福(杭州师院生物系)和张贞华(杭州大学生物系)第三章第三节;方龙龙和刘际松(杭州大学地理系)第三章第一节;毕愚溪(桐庐县旅游局)第九章;冷达明(中科院地理所)第三章第二节。各部分初稿写成后分别由林钧枢、张耀光修改,最后全书由林钧枢汇总定稿。英文摘要由宋林华译,林钧枢校。本书出版还得到王天瑞同志支持并提供封面照片。

我们不能不提到下列协作单位和人员,他们是:中科院地质所叶素娟和裴静娴参加野外工作,并分别提供古地磁极性测定结果和进行热释光年龄测试;中科院地理所房金福协助水样化学分析,陈铁成、金力、冷达明参加 ^{14}C 年龄测试,李凤新提供沉积物重矿物鉴定结果,梁玉莲负责孢粉样化学处理,康立文负责土体盐分测试;中科院地质所电镜实验室赵慧敏、X光实验室李家驹等和差热实验室协助粘土矿物相应部分测试;北京石油勘探开发院协助部分X光、差热和扫描电镜测试;地科院矿床地质所协助扫描电镜和电子探针测试;中科院地质所九室、地矿部三所、有色金属公司北京地质所协助化学全量分析;北京科技开发中心协助氧同位素测试;中科院地理所沉积物实验室协助粒度测试,周熙成和陈俊华清绘全部插图,谨此表示诚挚的感谢。

本书出版时间仓促,加上对这样综合性洞穴研究尚是初次尝试,故疏漏之处在所难免,祈望同行和读者指正。

林钧枢

1992年12月于北京

中国科学院、国家计委地理研究所

目 录

序	陈述彭
前 言	
第一章 导论	(1)
第一节 洞穴的概念	(1)
第二节 洞穴研究简况	(7)
第三节 瑶琳洞的价值	(9)
第二章 瑶琳洞区域地貌特征与洞穴形态	(14)
第一节 瑶琳洞区域地貌发育特征	(14)
第二节 瑶琳洞形态特点	(33)
第三章 瑶琳洞洞穴生态与生物	(44)
第一节 瑶琳洞洞穴气候	(44)
第二节 喀斯特地下水流的环境同位素氮及其示踪	(51)
第三节 瑶琳仙境洞穴动物	(56)
第四章 瑶琳洞洞穴沉积物年代学	(62)
第一节 瑶琳洞 ¹⁴ C年代的测试研究	(63)
第二节 瑶琳洞洞穴沉积物 ²³⁰ Th/ ²³⁴ U年代研究	(73)
第五章 瑶琳洞地区第四纪沉积特征与分布	(78)
第一节 瑶琳洞地区第四系特征与层序划分	(78)
第二节 瑶琳洞地区第四纪沉积类型划分与分布	(88)
第三节 瑶琳洞碳酸钙化学沉积	(92)
第六章 瑶琳洞地区古气候环境及其与洞穴发育的关系	(100)
第一节 瑶琳洞地区沉积物粘土化学分析	(100)
第二节 瑶琳洞地区沉积物粘土矿物分析	(107)
第三节 瑶琳洞地区洞穴沉积物重矿物分析	(120)
第四节 瑶琳洞及其邻区第四纪孢粉分析	(126)
第五节 洞穴沉积物氧同位素古温度的研究	(136)
第七章 瑶琳洞发育的水动力条件	(141)
第一节 洞穴沉积石英砂表面结构电镜扫描分析营力特性	(141)
第二节 瑶琳洞碎屑沉积物粒度分析地下水流侵蚀能力	(144)
第八章 瑶琳洞区域喀斯特与洞穴发育演化	(160)
第一节 环境变迁分析喀斯特发育与洞穴演化	(160)
第二节 区域地貌分析喀斯特与洞穴发育演化	(169)
第九章 瑶琳洞开发规划和建设实践	(183)
第一节 瑶琳洞开发历史与规划	(183)
第二节 瑶琳洞开发与经营管理实践	(192)

第十章 斯洛文尼亚喀斯特与洞穴的典型研究.....	(194)
第一节 斯洛文尼亚喀斯特发育特征.....	(195)
第二节 迪姆尼兹洞地区喀斯特洞穴发育及其环境背景.....	(202)
第三节 迪姆尼兹洞地区第四纪古植被与古气候.....	(212)
结束语.....	(219)
参考文献.....	(220)
英文摘要.....	(225)
图版	

封面照片 瑶琳洞第一厅“广寒舞台” 王天瑞 摄

CONTENTS

Preface

Forward

Chapter 1 Introduction

- 1.1 Concept of cave
- 1.2 Review speleology
- 1.3 Values of Yaolin Cave

Chapter 2 Geomorphology and speleomorphology in Yaolin Cave region

- 2.1 Regional geomorphology
- 2.2 Speleomorphology of Yaolin Cave

Chapter 3 Speleoecology and speleobiology in Yaolin Cave

- 3.1 Speleoclimate
- 3.2 Environmental tritium in karst groundwater and their trace
- 3.3 Microfauna

Chapter 4 Chronology of speleothems in Yaolin Cave

- 4.1 ^{14}C dating
- 4.2 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dating

Chapter 5 Quaternary sediments in Yaolin Cave region

- 5.1 Characteristics and stratigraphical division of Quaternary system
- 5.2 Classification and distribution of Quaternary sediments
- 5.3 Carbonate deposits

Chapter 6 Paleoclimate and paleoenvironment related to cave development

- 6.1 Clay chemistry
- 6.2 Clay minerals
- 6.3 Heavy minerals in cave sediments
- 6.4 Quaternary sporo-pollen
- 6.5 Paleotemperature from oxygen isotope of speleothems

Chapter 7 Dynamic conditions of cave development

- 7.1 Property of flow by scanning electron microscope on quartz sand surface texture
- 7.2 Erosive capacity of underground flow by grain size of clastic sediments

Chapter 8 Karst development and cave evolution

- 8.1 Analyses from environmental change
- 8.2 Analyses from regional geomorphology

Chapter 9 Exploitation planning and practice in Yaolin Cave

- 9.1 Exploration history and planning
- 9.2 Exploration and managerial practices

Chapter 10 Typical study on karst and cave in Slovenia

- 10.1 Karst in Slovenia

10.2 Karst and cave development and their environmental background in Dimnic Jama area

10.3 Quaternary paleovegetation and paleoclimate in Dimnic Cave area

Conclusions

References

Abstract (in English)

Plates

Cover Stalagmites in first chamber, Yaolin Cave

第一章 导 论

洞穴是喀斯特现象的重要标志,成为特殊自然景观的组成部分。如果没有洞穴,则喀斯特也就无从谈起。洞穴形态与洞穴沉积是记录和保存环境信息的极佳场所,可提供第四纪(甚至更早一些时期)以来区域环境和生态系统演化的基础材料。而且,它还适于作为建立喀斯特环境和水长期监测网络的地点^{〔1〕〔2〕}。洞穴往往是人类进化与文化发展的信息库,我国已发现的10处猿人遗址有8个是在洞穴中^{〔61〕}。洞穴又是自然资源,不仅赋存水、矿产、特种生物等资源,而且本身就是一种旅游资源。洞穴探测还是一项国际性竞赛(包括长度、深度、洞穴大小、潜水深度、洞穴摄影和录像等等)(表1-1)。它的发展对吸引游客、运动员、科学家,以及提高国家的声望有一定的作用。我国在1989年测得贵州紫云格必河洞系的苗厅面积11.6万m²,仅次于马来西亚穆鲁洞系的沙捞越厅(16.27万m²),跃居世界第二大洞厅^{〔3〕}。近年在湖北利川县腾龙洞探测,长度超过40km^{〔4〕},可望跻身于世界最长洞之列。我国目前已测最深洞是湖北鹤峰燕子坪寨洞,中科院地质所与法国洞穴联盟及科研中心联合考察,1992年12月实测深达552m^①。目前世界最深洞法国的捷恩本纳德深渊深达1535m,其次前苏联 Vjaceslav Pantjukhin 1465m,西班牙 Puerla de Illamina 1408m。

我国喀斯特分布广,碳酸盐岩在地球大陆壳岩石圈组成中占11.2%,而我国分布面积约占20~35%,其中仅出露的就约占国土面积9%^{〔1,20〕}。因而我国洞穴分布也广,数量亦多。为此,我们以瑶琳洞作为典型研究点,盼能有助于我国洞穴学的发展。

第一节 洞穴的概念

洞穴的定义不尽一致,认识不断深化。国际洞穴学联合会(ISU,即 International Union of Speleology)曾将洞穴定义为:大小足以人可以进入的天然地下空洞。这定义的优点是调查者能从这样的洞中直接获得信息。然而实际上,这并非绝对的,一些地学家认为必要时也可将小孔洞称为洞穴,只要它能部分或全部充填水、沉积物和冰;一些生物学家也将小动物造成的洞称为微型洞穴^{〔92〕}。值得指出,这种定义缺乏成因的含义。最近,D. C. Ford等(1989)定义喀斯特洞穴为:直径或宽度大于5~15mm的地下溶蚀空间。因为这是紊流的有效最小孔径^{〔101〕}。它根据如下层流动力传导性方程测算

$$K = \frac{gw^3}{12v}$$

式中 w 是裂隙宽度, v 是流体动力粘滞度, g 是重力。由此可见,所定义的洞穴大小限度由以人为标准发展到以水流状态为标准。

洞穴分类系统有多种,归纳起来主要有两种不同层次的分类体系:1,广义的洞穴分类系统(表1-2)^{〔92,44〕};2,狭义的限制以溶蚀为先导的喀斯特洞穴分类系统(表1-3)^{〔101〕}。其中常用的简便方法是按洞穴大小,尤其长度(深度)分类系统。A. Bögli(1980)按洞穴长度分为以下几类:

① 据张寿越通信提供。

小洞 50m 以下
 中等洞 50~500m
 大洞 500~5000m
 巨洞 5000m 以上

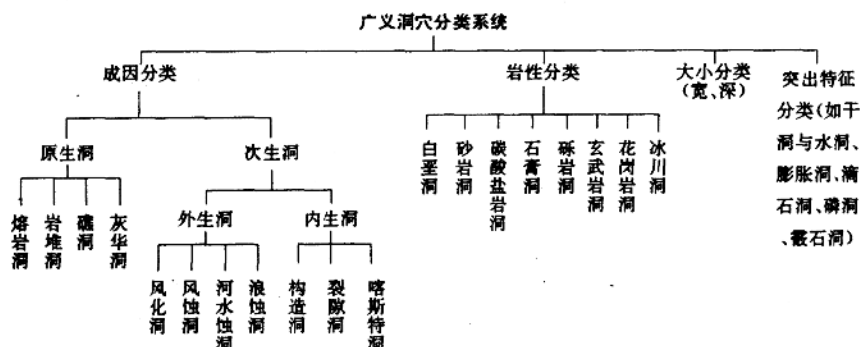
具有分支的洞穴统称洞穴系统。按照上述分类系统综合评定,瑶琳洞穴系统为发育在亚热带碳酸盐岩溶蚀为先导的,加上侵蚀与崩塌形成的洞厅与线状廊道相间的复合类活动大洞穴。

表 1-1 世界最长的洞穴

洞名(国家)	1980 年公布 据(A. Bogli)		1988 年公布 据(D. C. Ford et al)	
	探测长度 (km)	名次	探测长度 (km)	名次
弗林特—猛犸洞系(美国)	341.2	1	530.00	1
奥普铁米斯铁斯卡雅洞(前苏联)	142.5	2	157.00	2
黑罗赫洞(瑞士)	139.8	3	133.50	3
奥者纳雅洞(前苏联)	104	4	105.30	6
宝石洞(美国)	100	5	120.73	4
俄约·古尔仁那(西班牙)	61	6	89.07	7
菲利·特罗姆伯洞系(法国)	60	7		
格林贝尔/俄冈洞系(美国)	58.2	8	60.51	14
弗莱尔坑洞(美国)	50.4	9	68.82	13
风洞(美国)	49.2	10	80.46	10
埃斯捷尔洞系(英国)	45.4	11	52.50	18
坎伯兰洞系(美国)	43.8	12		
克里维斯洞(美国)	43.4	13	45.38	24
叶斯雷森沃尔特洞(奥地利)	42	14		
朱鲁齐卡洞(前苏联)	40	15	82.00	9
俄冈费南郡洞(英国)	38.5	16		
圣马丁洞系(法国)	38.4	17	51.20	22
斯劳恩斯谷洞系(美国)	36.7	18		
克罗威尔斯洞系(法国)	36.3	19	53.20	16
坑洞(美国)	35.8	20		
达斯坦—猛犸洞(奥地利)	35	21		
锡本汉斯提洞系(瑞士)	35	21	110.00	5
喜约美德洞(法国)			87.00	8
拍列菲萨森(墨西哥)			71.60	11
造翁岭洞系(美国)			71.50	12
勒·阿尔卑洞(法国)			53.67	15
锡兰切俄洞(沙捞越)			53.00	17
忽特拉洞(墨西哥)			52.10	19
马猛·肯兰大(巴布亚新几内亚)			51.82	20
古特兰盖洞(沙捞越)			51.66	21
卡普—库坦洞(前苏联)			46.10	23
康普利索·费格希那(意大利)			45.00	25

喀斯特洞穴形成的基本动因是溶蚀作用和侵蚀作用。溶蚀作用是先导的、最基本的。随着洞穴和区域地貌发育阶段的发展,侵蚀作用的效果一度增加,二者比例不断调整。碳酸盐岩溶蚀参数常由温度、电导性、pH 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 浓度等组成,并通常用所导出的硬度、饱和指数 SI_c 与二氧化碳分压 P_{CO_2} 来解释(图 1-1)。后二者分别定义为^[144]:

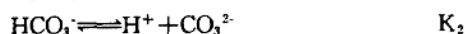
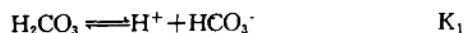
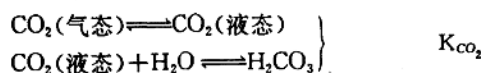
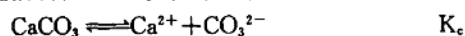
表 1-2 广义洞穴分类系统



$$SI_c = \log \frac{K_{ac}}{K_c} = \log \frac{a_{Ca^{2+}} \cdot a_{CO_3^{2-}}}{K_c} = \log \frac{\gamma_{Ca^{2+}} m_{Ca^{2+}} \gamma_{HCO_3^-} m_{HCO_3^-} K_2}{a_{H^+} K_c}$$

$$P_{CO_2} = \frac{a_{HCO_3^-} \cdot a_{H^+}}{K_1 K_{CO_2}} = \frac{\gamma_{HCO_3^-} m_{HCO_3^-} a_{H^+}}{K_1 K_{CO_2}}$$

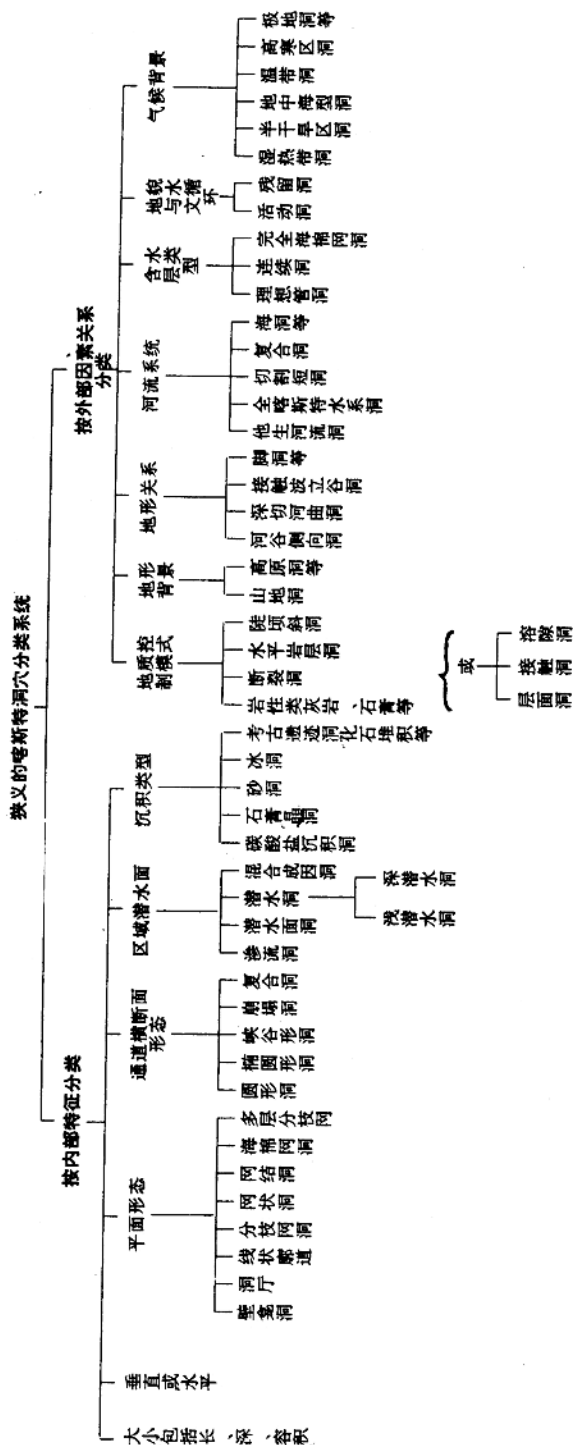
式中 a 是活动性, m 是克分子浓度, γ 是活动性系数, k 是反应平衡参数



表示水偏离平衡的状态和水的侵蚀性。从 CO_2 平衡的化学反应角度,碳酸盐溶解度随温度的增高而降低(图 1-2)。然而温度作用的另一情况是,当温度升高,在溶蚀的四个反应过程的后一阶段,加大空气 CO_2 向水中扩散的速度,加速水中 CO_2 恢复平衡,大约每增高 $10^\circ C$ 反应速度加快 1 倍。这只有在开放系统下才能充分满足,而自然界溶蚀作用绝大部分是在开放系统下进行。而且尚应注意到在大自然中,生物气候对溶蚀作用的影响^(22,142)。正如 Juckus(1977)所指出,全部喀斯特溶蚀因素中生物成因的 CO_2 和有机酸占 86.3%,随着热量与水分的增长,生物活力迅速增加,喀斯特剥蚀速率增大。如果将荒原地带溶蚀强度设为 1,则高纬与冰缘地带为 5,温带为 8,地中海地区为 11,湿热带为 71⁽¹²²⁾。因而,水、热关系决定喀斯特作用的强度。有人认为,当温度较低时,降水量的变化对溶蚀作用的影响甚小,而当温度提高到一定高度后,降水量对溶蚀作用的效应迅猛增长,这个临界值大体在 $16 \sim 20^\circ C$ (图 1-3)⁽⁷⁷⁾。另一值得注意的问题,当水流通过原始裂隙时,水的大部分溶蚀潜力在流入点的短距离(数厘米—数米)内消失。溶蚀速率在上游可达 0.1 cm/a ,而后随着沿程饱和度增加而迅速下降。于是尚未饱和的地下水有可能深深地渗入,以缓慢而均匀的速度溶蚀碳酸岩,进入另一种溶蚀环境。在相同温度下,碳酸盐岩溶解度在缺乏空气的封闭系统中比开放系统中为小(图 1-4)。

应当指出,溶蚀作用中近年提出混合溶蚀作用,即不同饱和度、温度和盐分的水混合后,恢复或加强侵蚀性,分别如图 1-5 中的 C 和 E 点。这种作用对封闭的深部喀斯特尤为重要。

表 1-3 狭义的喀斯特洞穴分类系统



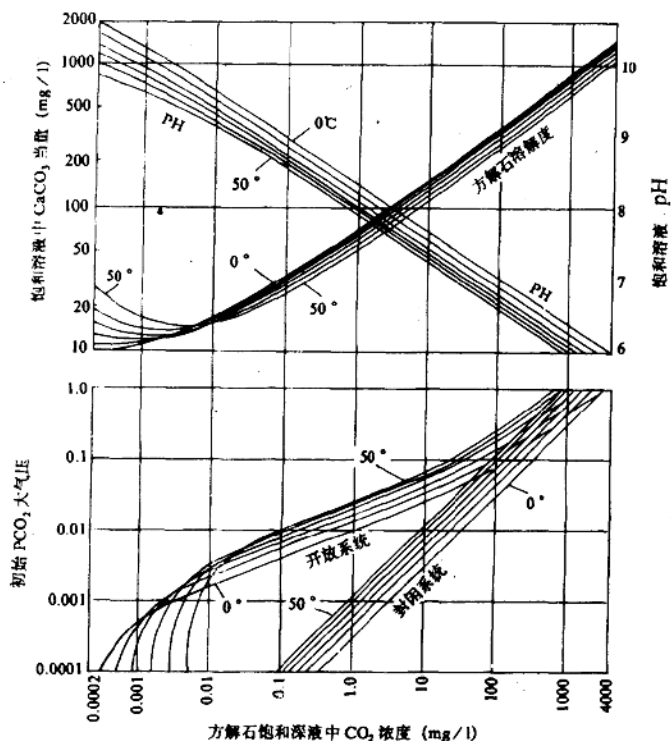


图 1-1 不同 CO_2 分压和在开放与封闭系统条件下,水中溶解方解石的饱和值
(据 Palmer, 1984, 略改)

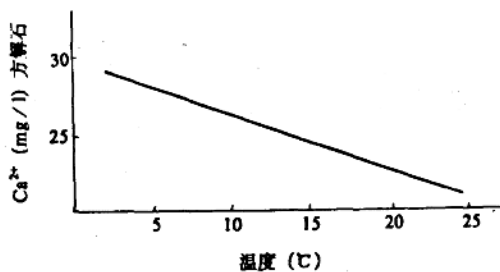


图 1-2 标准大气压下 2~25°C 水中方解石溶解度
(据 Ford and Williams, 1989, 略改)

洞穴成因的水文环境自一开始就产生两种学说:1.统一喀斯特水面学说,1871 年比利时人提出(J. Cvijić, 1893),1903~1910 年德国哥隆德(A. Grund)系统总结为理论;2.孤立喀斯特水学说,19 世纪末法国水文学家提出后,德国恰茨耳(F. Katzer, 1902)上升为理论^[22]。实际上二者是相互转化,由于自身喀斯特水系发展、碳酸岩间隔分布和地形分割,洞穴成因总是从孤立水开始,然后随地貌向老年化发育和水系的扩大,向统一水面发展。这种转化是可逆循环。

洞穴发育阶段问题,1930 年戴维斯(W. M. Davis)提出“双循环”概念,奠定了理论基础。即构造运动上升,早期溶蚀与磨蚀扩展阶段的洞穴随之被提升,成为高层老洞,朝另一方向横向

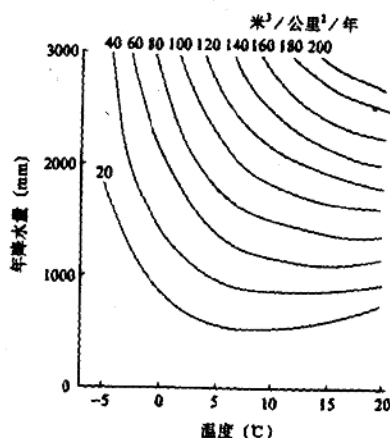


图 1—3 溶蚀量与温度、降水的关系(据 Pulina, 1974)

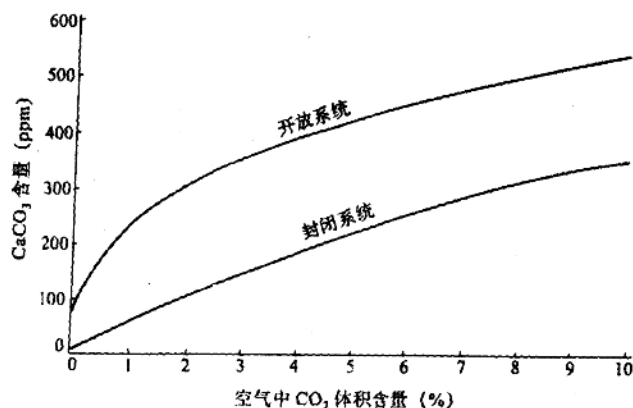


图 1—4 10℃时石灰岩在封闭和开放系统中的溶解度曲线

(据 Smith 和 Mead, 1962)

循环发展,脱水,进入第二阶段充填、衰亡;而其下按先前的过程,发育新的低层洞,连接上层洞组成纵向循环。并且,这种洞穴演化和区域地形发育密切相关,构成地貌循环的组成部分⁽⁹⁶⁾。近年来,在这方面有新的发展。溶蚀洞穴系统发育是由原始裂隙溶蚀扩大形成,其扩大速率可由三个方程表达⁽¹⁰⁰⁾:

$$\text{物质平衡方程} \quad \frac{dw}{dt} = \frac{Qdc}{b\rho dl}$$

$$\text{层流动力方程} \quad Q = \frac{bw^3\gamma \cdot dh}{12\mu dl}$$

$$\text{溶蚀动力方程} \quad \frac{dc}{dt} = \frac{2k}{w}(1 - C/C_s)^n$$

式中 dw/dt 是裂隙溶蚀扩宽速率, Q 是流量, dc/dt 是水流路径单位长度溶解基岩而增加的浓