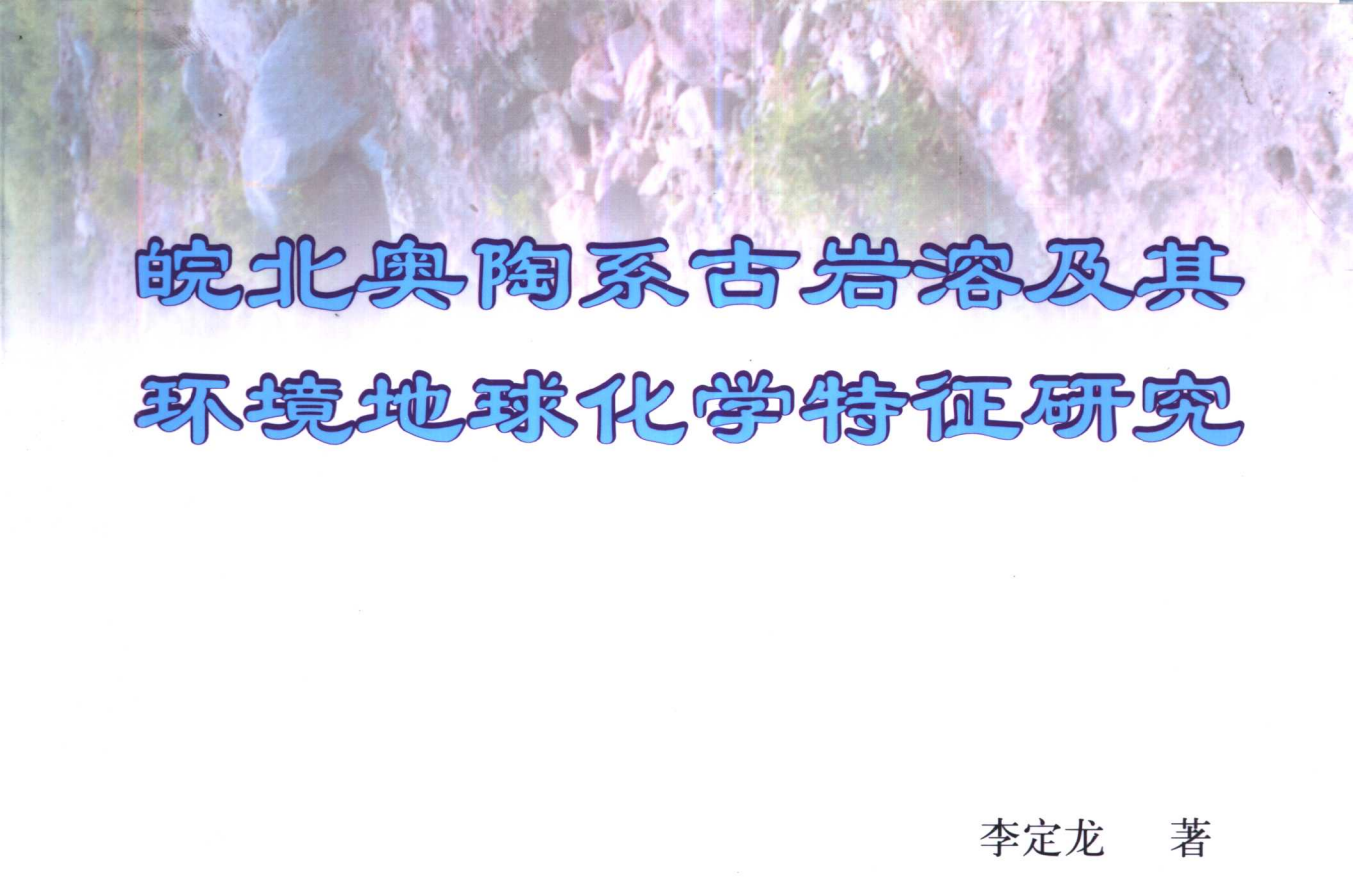




皖北奥陶系古岩溶及其 环境地球化学特征研究

李定龙 著



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

皖北奥陶系古岩溶及其 环境地球化学特征研究

李定龙 著

151111/15

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

皖北奥陶系古岩溶及其环境地球化学特征研究/李定龙著.
北京: 石油工业出版社, 2001.12

ISBN 7-5021-3651-7

I. 皖…

II. 李…

III. ①奥陶纪-岩溶-形成-研究-安徽省

②奥陶纪-岩溶-环境地球化学-研究-安徽省

IV. P642.252.254

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 094192 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

徐水印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 210 千字 印 1—800

2001 年 12 月北京第 1 版 2001 年 12 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3651-7/TE·2685

定价: 15.00 元

序 一

华北地区蕴藏着丰富的煤炭、油气等矿产资源，是我国重要的能源基地，但长期以来华北地区煤炭资源的开采一直受到奥陶系岩溶水的威胁。研究奥灰岩溶的发育规律，对“解放”华北地区受奥灰水患威胁的煤层，指导矿产资源的勘探，以及合理开发利用奥灰岩溶水资源，均具有十分重要的现实意义。

《皖北奥陶系古岩溶及其环境地球化学特征研究》一书在详细评述了前人相关科研成果以后，在大量研究露头、岩心、薄片及化学样品的观察、测试、化验和统计的基础上，认真分析淮北的肖县剖面和刘桥剖面，识别出3个可以对比的沉积古岩溶间断面；从岩溶发育历史过程的宏观、微观现象分析入手，全面、深入地阐述了奥灰古岩溶特征及形成机理；对奥灰的水文地质作用和岩溶形成演化划分了6个期次；从而阐明了岩溶岩的意义和岩溶岩类型划分；将古岩溶与地球化学相结合，率先提出了“古岩溶地球化学”概念，建立了华北地区奥灰古岩溶识别模式；分期恢复、解释了各类古岩溶发育环境，使古岩溶研究从定性分析拓展到（半）定量认识，丰富了古岩溶研究的内容，是对岩溶学领域的一个重要贡献。

作者以严谨求实的科学作风，理论与生产实际相结合，应用计算机技术对矿区岩溶发育规律进行预测，是本书的又一特点。本书的许多成果具有重要的理论意义和实用价值，全书始终体现了科学性、系统性和实用性，内容丰富，资料翔实，既可作高校、科研单位科研人员的重要参考书，又是现场水文地质、岩溶地质工程技术人员工具书。为此，我特向广大读者推荐这本有意义的专著。

中国工程院院士

韩德馨

序 二

地质历史阶段所形成的古岩溶在许多情况下,已经被年青的沉积物或沉积岩所埋藏,因此对其特征、分布与形成演化规律的研究要比现代岩溶更为困难而复杂。但是,通过古岩溶研究可以恢复古水文地质环境的发展、演变和查明岩溶体系更迭的方式与过程,这不仅在理论上为岩溶学的发展做出必不可少的贡献,而且对指导碳酸盐岩油气储层的勘探与开发和“解放”受奥灰水威胁的煤层也具有重要的现实意义。

《皖北奥陶系古岩溶及其环境地球化学特征研究》一书在野外数条奥陶系剖面和对钻孔岩心详细观察和采样的基础上,通过大量的薄片微观研究,主要元素、微量元素和稀土元素的化学成分分析,碳氧同位素测定,以及与古岩溶有关的特殊产物的宏观、微观和地球化学特征的研究,从历史的、演化的及水岩作用的角度出发,将古水文地质学、环境地球化学与岩石学、沉积学、同位素地质学、数学地质等相结合,对古岩溶的形成、演化及其地球化学特征研究取得了一系列具有创新意义的成果,主要有以下几方面:

①以区域构造演化发展为基础,对奥灰水文地质作用和古岩溶作用分别进行了6期和5期合理的期次划分;

②提出了岩溶岩的新概念,并将研究区内的岩溶岩划分了2大类8个亚类,恢复了3期岩溶作用所产生的岩溶相模式;

③依据古岩溶的宏、微观特征和地球化学特征,在肖县剖面和刘桥剖面上识别出3个可以对比的沉积古岩溶间断面;

④通过岩溶岩的宏、微观特征及地球化学特征、环境标志等研究,分别恢复了古岩溶的发育环境,建立了奥灰古岩溶成因演化模式和储渗空间形成演化模式;

⑤通过构造热液期岩溶发育的构造应力场的研究,预测了淮北地区岩溶发育规律,获得了与实际较为一致的重要成果;

⑥另外,书中还在应用岩溶岩稀土元素地球化学特征识别沉积古溶蚀面和恢复古岩溶环境方面提出了有价值的见解。

该书系统完善地论述了奥陶系灰岩古岩溶发育规律,提出了古岩溶环境地球化学的概念及其研究方法和思路,是一本有较高学术价值和应用意义的专著,它的出版一定会推动我国古岩溶研究工作,也会对寻找油气和采煤防水有重要意义。

中国矿业大学教授、博士生导师

王桂樑

前 言

我国是一个碳酸盐岩分布极为广泛的国家。从纵向上看,几乎遍及各个时代地层;从出露分布面积看,约占国土面积的 $1/8$ 。因此,我国岩溶研究具有得天独厚的条件。但在 20 世纪 80 年代以前,我国同世界一样,岩溶研究主要针对裸露于地表的碳酸盐岩的现代溶蚀作用(以大气降水为背景)研究,并逐渐形成了一套现代岩溶研究理论体系和技术方法。

古岩溶研究与石油和天然气的勘探密切相关。众所周知,世界上许多大油田产自碳酸盐岩地层。人们在揭示碳酸盐岩地层的过程中,不断发现有大的放空、井喷、井漏、掉钻等一系列预示深部有岩溶洞穴存在。这样深的层位,显然与现代大气降水没有联系。它们不是近现代岩溶作用的产物,那么它们是何时形成的,形成机理如何,有何分布规律,受何因素控制?这些问题难以用现代岩溶作用理论和研究方法得到圆满解释。因而古岩溶、深岩溶研究引起了人们的注意并开始加强。80 年代末在世界范围内,古岩溶研究出现高潮,岩溶岩、岩溶相、岩溶控矿和成矿以及岩溶形成演化方面取得了重要进展,并在解决油气储层、金属、非金属矿床勘探和开发等问题方面做出了贡献,并推动了岩溶学、水文地质学研究与相关学科的结合,拓展了研究领域,产生了一些新的研究思路和方法。我国有关古岩溶、深岩溶研究逐步形成了自己的特色,并在某些方面走在世界前列。

与现代或一般的岩溶研究相比,古岩溶是一个年青的研究课题,在基础理论(定义、形成条件及机理等)、研究内容、研究方法等方面均有很大不同,开展研究有诸多困难之处,特别在定量认识方面尤为突出。

本书以古水文地质分析原理及地球化学原理为理论依据,以奥灰古岩溶为研究核心,以国内外前人有关古岩溶研究成果为基础,以室内外两个奥灰剖面为调查、观察研究重点,以奥灰岩溶岩两个剖面的地球化学信息为恢复岩溶发育环境的主要手段,在广泛搜集区内及区域相关资料的基础上,从历史的、演化的及水-岩作用的角度出发,将古水文地质学、地球化学以及沉积学、岩石学、地层学、同位素地质学、数学地质等结合,运用于(古)岩溶学研究。本书的一个重要特色是将(环境)地球化学的理论和方法与古岩溶研究相结合,使古岩溶研究从定性分析拓展到(半)定量认识,初步提出了古岩溶环境地球化学的概念、研究方法、研究内容及研究思路,拓展了古岩溶的研究内容与深度,为后续的广泛深入研究奠定了基础。该研究成果对进一步推动国内外古岩溶理论和应用研究工作及我国其他地区和层位古岩溶的深入研究具有积极意义。

全书共分九章,插图 66 幅、表 21 张,附图版照片 36 幅。第一章绪论主要介绍研究背景,古岩溶涵义的理解、研究现状及存在问题,以及研究思路和成果;第二章着重介绍华北及研究区奥陶系岩溶发育的基本背景;第三章主要讨论奥陶系灰岩古水文地质演化及岩溶作用分期,以及古岩溶类型、岩溶岩分类与宏、微观特征;第四章着重讨论各类古岩溶的岩溶相,建立岩溶相模式;第五章主要讨论古岩溶的环境地球化学特征,提出了古岩溶环境地球化学的概念、研究方法、研究内容及研究思路;第六章主要是对奥灰古岩溶环境进行恢复及各种建模(包括奥灰古岩溶成因模式、综合识别模式、储渗空间形成演化模式)研究;第七章主要是对奥陶系古岩溶主要发育期次的古构造应力-应变场特征的模拟恢复,以及岩溶发

育规律预测;第八章主要阐述奥陶系古岩溶识别模式及发育规律;第九章对研究的主要成果及存在问题进行了总结。

研究过程中,公开发表论文8篇:

①李定龙,周治安,汪才会.马家沟灰岩(古)岩溶研究中的若干问题探讨.地质科技情报,1997,17(1);

②李定龙,杨为民,汪才会.皖北奥陶系古岩溶分期、分类及岩溶岩特征.淮南工业学院学报,1999,19(1);

③李定龙,杨为民,汪才会.皖北奥陶系古岩溶特征及岩溶相模式.淮南工业学院学报,1998,18(4);

④李定龙.古岩溶及古岩溶地球化学的概念及前景展望.高校地质学报,1999,6(2);

⑤李定龙,杨为民.皖北奥陶纪豹皮灰岩的古岩溶成因探讨.地质论评,1999,45(5);

⑥李定龙,杨为民.皖北奥陶系岩溶岩地球化学特征及古岩溶环境标志研究.煤田地质与勘探,1999,27(5);

⑦李定龙.皖北两奥陶系碳酸盐岩剖面地球化学特征对比.中国岩溶,1999,23(4);

⑧李定龙.皖北奥陶系岩溶岩稀土元素地球化学特征及其古岩溶意义.地学前缘,2000,5(1~2)。

研究过程中,本课题得到了各方面的大力支持和协助。皖北矿务局,特别是刘桥二矿的领导及有关同志(葛家德矿长、龚乃勤总工程师、高智联总工程师、贺兆礼科长、孙本魁高级工程师及吴军、魏大勇、宋晓洪等)毫无保留地介绍、借阅、提供资料,交换认识和看法,并在生活、工作上给予关心与支持,同时对本次研究提供了相关经费资助;中国矿业大学王桂梁教授、韩宝平教授(博士)、李义昌教授、郑世书教授给予了不少的引导或提供相关资料;晁吉祥副教授、李壮福讲师无私提供了肖县白土剖面有关基础地质资料;淮南工业学院周治安教授、钱守荣副教授、吴观茂副教授等在野外工作、岩心薄片鉴定、样品采集、计算机图件绘制等方面给予了不少的帮助;淮南工业学院磨片室陈明辉老师为本文制作了薄片。在此,作者谨向他们致以深深的谢意。

这里还要特别感谢成都理工学院贾疏源教授,他始终如一地热心指导和帮助作者,在许多问题上提出了宝贵的、富有建设性的意见,并为作者提供了许多宝贵资料;他不远千里,亲临野外给予指导,使作者对许多古岩溶问题有了更深刻的认识。

南京大学地质科学系测试中心的赵梅芳老师、黄耀生老师等为本文提供了地球化学方面的测试资料。研究过程中,还曾与中国矿业大学、南京大学、淮南矿业学院的有关老师与同仁进行过有益的讨论,给笔者以许多启迪。在此一并向他们致以衷心的谢意。

最后笔者深切感谢煤炭基金委为课题组提供了一次锻炼与实践的机会,以及在课题研究过程中给予的关心与支持。

应该指出,古岩溶是一个较为年青的研究课题,以古水文地质理论为指导,运用地球化学为主要手段来探讨古岩溶的形成演化规律可借鉴的资料很少,加之不同学者考虑问题的出发点及研究方法上的固有差异,文中的观点难免有不足或错误、或与其他学者间存在分歧,尚祈专家学者批评指正。

李定龙

2001年10月

目 录

1 引论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 前人研究综述	(2)
1.2.1 关于奥陶系划分	(2)
1.2.2 岩溶和古岩溶	(3)
1.3 研究的主要成果及进展	(9)
1.3.1 研究概况	(9)
1.3.2 主要成果及进展	(10)
2 奥灰古岩溶发育的基本背景	(12)
2.1 区域地质背景	(12)
2.1.1 区域地层	(12)
2.1.2 区域构造背景	(13)
2.1.3 地质构造发育简史	(15)
2.2 区域奥灰(可溶)岩的基本特征	(15)
3 奥灰古岩溶作用分期、分类及岩溶岩分类	(17)
3.1 古岩溶作用分期	(17)
3.1.1 沉积岩溶作用期(沉积水文地质期)	(17)
3.1.2 暴露岩溶作用期(淋滤水文地质期)	(17)
3.1.3 埋藏岩溶作用期(埋藏封闭水文地质期)	(17)
3.1.4 半埋藏—构造岩溶作用期(二次淋滤水文地质期)	(18)
3.1.5 二次埋藏岩溶作用期(二次埋藏封闭水文地质期)	(19)
3.1.6 现代岩溶作用期(现代水文地质期)	(19)
3.2 奥灰古岩溶分类	(19)
3.2.1 沉积岩溶或层间岩溶	(19)
3.2.2 风化壳岩溶或暴露岩溶	(19)
3.2.3 埋藏岩溶或压释水岩溶	(19)
3.2.4 构造岩溶或热水岩溶	(20)
3.3 奥灰岩溶岩分类	(20)
3.3.1 岩溶沉积岩	(20)
3.3.2 岩溶改造岩	(21)
4 奥灰古岩溶宏、微观特征与岩溶相模式	(22)
4.1 沉积岩溶或层间岩溶	(22)
4.1.1 岩溶相模式	(22)
4.1.2 豹皮云(灰)岩的岩溶成因假说	(23)
4.2 风化壳岩溶或暴露岩溶	(25)

4.2.1	岩溶岩相模式·····	(25)
4.2.2	几个特殊识别标志岩溶·····	(27)
4.3	埋藏岩溶或压释水岩溶·····	(27)
5	古岩溶地球化学特征研究·····	(29)
5.1	两剖面岩溶岩地球化学特征对比·····	(29)
5.1.1	两剖面奥灰岩沉积特征对比·····	(29)
5.1.2	两剖面奥灰岩溶岩地球化学特征对比·····	(32)
5.2	岩溶岩地球化学特征的环境标志·····	(35)
5.2.1	稀土元素地球化学特征·····	(35)
5.2.2	微量元素地球化学特征·····	(48)
5.2.3	碳、氧同位素地球化学特征·····	(51)
5.2.4	主元素地球化学特征·····	(55)
5.3	奥灰岩溶岩剖面地球化学特征与古岩溶演化·····	(59)
5.3.1	沉积间断问题·····	(59)
5.3.2	沉积间断地层中元素地球化学的时空演变·····	(60)
5.3.3	岩溶岩剖面地球化学特征与古岩溶演化·····	(60)
6	奥灰古岩溶环境恢复·····	(72)
6.1	沉积岩溶·····	(72)
6.1.1	地质背景·····	(72)
6.1.2	古水文地质条件·····	(72)
6.1.3	沉积岩溶岩溶岩的形成·····	(73)
6.2	风化壳岩溶或暴露岩溶·····	(73)
6.2.1	地质背景·····	(73)
6.2.2	古水文地质条件·····	(76)
6.2.3	风化壳岩溶岩的形成·····	(76)
6.3	埋藏岩溶·····	(77)
6.3.1	地质背景·····	(77)
6.3.2	构造特征·····	(78)
6.3.3	古水文地质条件·····	(78)
6.3.4	溶蚀机理及岩溶岩的形成·····	(80)
7	构造(热液)期奥灰古岩溶发育特征的初步研究·····	(83)
7.1	岩溶发育背景及岩溶作用亚期划分·····	(83)
7.2	构造应力场的数值模拟恢复·····	(83)
7.2.1	模拟边界条件分析与确定·····	(83)
7.2.2	单元网格剖分及模型、介质参数确定·····	(84)
7.2.3	模拟实验与结果讨论·····	(84)
7.3	水动力场恢复及岩溶发育特征分析·····	(88)
7.3.1	构造应变场特征·····	(88)
7.3.2	水动力场恢复及岩溶发育特点·····	(89)
8	奥灰古岩溶识别模式及其发育规律的初步认识·····	(94)

8.1 奥灰古岩溶识别模式..... (94)

8.2 奥灰古岩溶储渗空间形成演化模式..... (95)

8.3 奥灰古岩溶发育规律的初步认识..... (95)

9 总结..... (97)

9.1 主要结论..... (97)

9.2 问题与建议..... (98)

参考文献 (99)

图版..... (109)

图版说明..... (112)

1 引 论

1.1 研究背景及意义

研究区位于安徽省北部的淮北—宿县地区(图1-1)。区内有淮北矿务局和皖北矿务局(地方)的生产矿井20余对,主采石炭二叠纪煤层,年产煤近2000万t,是华东地区的重要能源基地。

同华北的其他地区一样,本区下伏于石炭二叠系的下古生界奥陶系灰岩(以下简称奥灰)岩溶普遍发育,多呈深埋古岩溶类型。奥灰岩溶水水压高,水量大,突水来势迅猛,是造成本区及华北很多煤矿区岩溶水害的最根本原因。“六五”期间,仅1984年至1985年的一年多时间内全国(主要是华北地区)就发生岩溶突水淹井事故20余起,经济损失逾50亿元^[1,2]。目前,华北地区煤炭产量约占全国总量一半以上^[1],遭受水害(主要是奥灰水)威胁的煤炭储量高达100多亿t。“九五”期间,如不进一步采取相应的防治对策,将会使一大批受水害威胁的矿井提前报废。同时,由于奥灰水资源丰富,对目前城镇供水普遍紧张的华北地区来说,又是重要的供水水源。因此,奥灰岩溶研究,具有重要的、现实的经济意义。

大量生产实践表明,无论是开发利用还是岩溶水防治都必须掌握岩溶发育的规律性。建国以来,我国地质、煤炭等部门的专家学者为根治奥灰岩溶水害和开发利用岩溶水资源,在本区及华北其他地区做了大量的研究工作,取得了一些重要成果^[3~11]。但由于本区奥灰埋藏深、露头少、勘探资料缺乏,多数研究是通过钻孔勘探资料统计及抽、放水试验或遥感、模拟等技术方法来探讨奥灰岩溶发育及岩溶水分布规律,而对奥灰岩溶的基础研究不够深入。加之奥灰厚度大、岩溶发育极不均一,因而得出的一些结论和认识不能推而广之或与实际相悖。如何研究奥灰岩溶、查明奥灰岩溶发育规律,仍然是困扰着煤矿生产及从事该方面研究的专家学者的--大难题^[12,13]。

众所周知,岩溶发育特征是认识岩溶发育规律的基础。奥灰自沉积至今已经历了约500Ma的地质历程。其间不仅奥灰层内水经受了多次反复更迭,而且奥灰岩也在各种物理化学作用(岩溶作用是主要方面)下受到重大改造,某些岩层甚至面目全非。现今所揭示奥灰岩层内的各种岩溶特征已不是某一时期产物,而应具有世代性、叠加性、继承性等特点。这些特点,一方面显示了奥灰岩溶发育的复杂性和规律性;另一方面表明了早期岩溶(古岩溶)对现今奥灰岩溶发育的控制性和研究古岩溶的重要性;同时也隐示了古岩溶可能是造成现今奥灰岩溶发育不均一性的重要因素。

本区的奥灰古岩溶现象很早就为人们所认识,但对它的形成条件及不同地史期岩溶发育



图1-1 研究区及研究的奥灰剖面位置

特点、程度、规模等认识还较粗浅。也许正因为对本区奥灰古岩溶及其演化过程的研究的不足,才导致对现今奥灰岩溶及岩溶水分布规律的认识难以深入,以致奥灰突水预测极为困难。近年来,华北地区煤矿大型水害事故呈明显上升趋势,仅1995年就连续发生了20多起岩溶突水淹井事故,损失巨大^[1]。1996年3月,研究区皖北任楼煤矿发生奥灰突水淹井事故,直接经济损失达2亿元;1997年2月,与本区毗邻的徐州张集煤矿又发生奥灰突水淹井,直接经济损失超过3亿元。随着煤炭开采向深部延拓,本区及华北其他煤矿区的奥灰突水有愈演愈烈之势,成为煤矿生产的心腹之患,奥灰(古)岩溶问题再次成为人们关注的焦点^[1,12,13]。由此看来,全面、深入地认识奥灰岩溶发育特征是一项重要的基本任务,但它又非易事。从一定意义上讲,古岩溶的深入研究很可能是解开奥灰岩溶发育分布规律的关键所在。

本区地质历史演化表明:由早古生代至新生代曾有过多次的构造运动发生,其中包括历时不一的沉积间断期。此间,奥灰经历了多期岩溶改造。由于各期次构造运动性质不同,岩溶发育环境差异很大,且岩溶作用历时长短不一,因而各阶段岩溶发育程度、规模和特征不一,各种现象相互叠加导致层内岩溶特征现象纷繁复杂,但这些现象是与一定的岩溶发育环境相对应的,亦即现今的岩溶岩或岩溶产物中必然会保存有可指示岩溶发育环境的各种地质地球化学信息。因此,只要采取正确的研究方法和艰苦细致的工作,人们就完全有可能查明各种特征现象的形成时期、形成条件及其内在联系和制约关系,从而掌握其发育特征和规律。

本研究正是基于上述背景思路而提出的,以本区奥灰古岩溶研究为核心,以室内外奥灰古岩溶现象特征为基础,以奥灰岩溶岩地球化学信息为恢复岩溶发育环境的主要手段,分期阐述和建立古岩溶发育特征和成因模式。显然,该研究成果对本工区乃至华北地区的矿井奥灰突水预测、解放奥灰水患煤层及开发利用奥灰水资源等具有现实的指导意义和广泛的应用前景。本文提出古岩溶地球化学概念及其研究内容、方法和程序(后述)并应用于本次研究,使古岩溶研究从定性分析上升到定量认识,这将进一步丰富和推动国内外古岩溶理论和应用研究工作,对我国其他地区和层位古岩溶的深入研究具有积极意义。

1.2 前人研究综述

前人在有关奥陶系地层划分、岩溶及古岩溶等方面做了大量的研究工作,现将有关成果综合评述如下。

1.2.1 关于奥陶系划分

华北地台奥陶纪地层划分的基础在20世纪20年代就已基本确定。“冶里组”为孙云铸和葛利普命名(1922年,1923年)^[14,15];“亮甲山组”为叶良辅和刘季辰命名(1919年)^[16];“马家沟组”是1922年葛利普首创^[2]。建国以后,随着研究工作的深入,人们把“冶里组”和“亮甲山组”划归下奥陶统,把“马家沟组”划归中奥陶统,并将之分为上、下马家沟两组。本区也是如此^[17,18]。70年代人们基本还是遵从前人的二分划法^[20,22]。

近10多年来,随着区域工作的开展,在华北地台的各个地区(晋、冀、鲁、皖等)的奥陶系古生物地层学研究工作有了很大的进展^[19,21]。1975年在峰峰举行的华北奥陶系专题会议上,人们对中奥陶统的划分提出了疑义。主要是因为鲁、苏北等地区,在原“马家沟组”之上和石炭系之下,发现了一套碳酸盐岩地层,该会议定名为“峰峰组”。这一层位在本研究区的宿县、肖县奥灰露头也被发现(定名为“老虎山组”或“白土组”)^[22]。这样,

华北地台的中奥陶统就有 3 个组（即三分法）。但人们对这 3 个组的时代归属又产生了分歧^[22,23]，鲁、苏、皖等区测队将原先的“马家沟组”划归下奥陶统，把“老虎山组”或“白土组”等划为中奥陶统；而文献 [23] 认为过去的划分较合适。90 年代，冯增昭将“峰峰组”、“阁庄组”等与原“马家沟组”一道并称为“马家沟群”^[26]，分为上、中、下三组，“上马家沟组”即相当于“峰峰组”或“阁庄组”等。

由此看来，华北地区中奥陶统或奥陶系划分问题仍没有达到统一。由于本研究仅涉及奥陶系顶部的“白土组”和前人划分的“马家沟组”上段，本着从众、从旧和尊重本地区划分^[27,28]的原则，将“老虎山组”或“白土山组”划归中奥陶统，“马家沟组”划归下奥陶统。本区奥陶纪地层划分和对比见表 1-1。

表 1-1 奥陶纪地层划分与对比

陈均远 (1976 年)		安徽区测队 (1977 年)		安徽 323 地质队 (1974 年)		江苏区测队 (1976 年)		江苏地质五队 (1975 年)		本文 (1977 年)	
O ₂	八陡组										
	阁庄组	O ₂	老虎山组	O ₂	上马家沟组	O ₂	白土组	O ₂	晃所组	O ₂	白土组
O ₁	马家沟组	O ₁	马家沟组 上段 下段	O ₁	下马家沟组	O ₁	马家沟组	O ₁	马家沟组	O ₁	马家沟组
			肖县组 上段 下段		青龙山组		小家浴组		大泉组		肖县组
	北庵庄组				肖县组				寨山组		
	纸坊庄组 三段 二段 一段		贾汪组 韩家组		凤山组		贾汪组		贾汪组		贾汪组
€	凤山组	€	凤山组	€	凤山组	€	凤山组	€	凤山组	€	凤山组

1.2.2 岩溶和古岩溶

1.2.2.1 岩溶、古岩溶的涵义与理解

岩溶原称喀斯特 (karst)，该词产生于 100 多年前，当时仅是原南斯拉夫西部伊斯的利亚半岛石灰岩高原的地理专用名词（1966 年，我国第二次“喀斯特”会议后改称岩溶）。随着地学研究的发展，70 年代以来，该名词已演化为全世界所通用的地质学和地貌学专门术语^[29~32]。任美锬指出：“岩溶是一术语，它的涵义几乎是溶蚀作用的同义词，一直到表示岩溶发育的全部过程”^[32]。王大纯认为：“岩溶是水流与可溶岩石相互作用的过程以及由此而产生的地表及地下地质现象的总和。岩溶作用不仅包括化学的溶解及随之产生的机械破坏作用，而且还包括化学沉积和机械沉积作用”^[33]。N.J.James 等在《Palaeokarst》一书中指出：岩溶这一术语在此有更广泛的涵义，它包括所有的成岩作用特征宏观的与微观的、地表

的与地下的, 这些特征形成于化学溶解和伴随的碳酸盐岩的变化过程中^[33,34]。可见, 岩溶一词是一逐步演化并不断完善的专门术语, 现今赋予它的涵义是既包括岩溶作用又包括该作用的结果。岩溶作用是水流与岩石的相互作用, 其基本特点是以岩石的溶解为先导以及由此而引发的其他作用。因此, 凡是产生溶蚀作用的环境, 就有岩溶作用在进行。对于地质环境中的水流, 无论其成因如何、分布埋藏条件如何、运动特点和水化学特征如何, 只要存在与之作用的(可溶岩)岩石, 应没有任何限制均能参与岩溶作用。对于岩石, 只要它与水流相遇, 并可被其溶解, 无论其岩性如何、成岩阶段如何、埋藏产出特征如何, 均能参与这一作用。还应该看到, 岩溶作用的同时, 水流的化学成分、运动条件等也将发生重要变化。于是, 从一定意义上看, 岩溶作用也属一种地下水的形成作用。上述表明, 现今的岩溶作用的涵义应是广义的成岩作用。它有三个显著特点: 一是对原岩的改造、破坏; 二是导致新的岩石矿物产生; 三是改变水流的运动、化学特征。从岩溶术语的内涵看, 岩溶学研究具有广阔的前景, 目前的研究范畴还属狭小。

什么是古岩溶? 目前尚无公认确切的概念, 只有一个笼统的概念: 即古岩溶是指地质历史阶段的岩溶。但这个历史阶段如何划分, 是新生代前^[36], 还是第四纪以前尚无定论。Walkden (1974 年) 和 Wright (1982 年) 将古岩溶定义为“被年青沉积物或沉积岩所埋藏的古代岩溶有时并非被埋藏。”如我国南、北方不少地区地层(C、P、O 等)发育的现代岩溶, 追溯其岩溶岩层暴露地表的历史远在第四纪或新生代以前; 在西藏、云贵高原某些山顶, 发育有裸露的第三纪古岩溶(海拔 5200m)^[40,41]。近 10 多年, 随着研究的深入, 人们在第四系中也识别出了古岩溶, 如在巴哈马的阿巴科海湾海底发现埋藏有更新世形成的古岩溶洞穴, 称为蓝洞(blue hole)^[42]。总之, 现在人们尚未找到一个统一的时间尺度来划分现代岩溶与古岩溶。

众所周知, 某个地区某套可溶性地层确立后, 则控制岩溶发育的主要条件就是运移于岩层中的水流环境即水文地质环境。因此, 划分古、现代岩溶的依据可考虑以“其水文地质环境是在什么时候形成”为标准。现代水文地质环境形成以来发育的岩溶即为现代岩溶, 反之为古岩溶。对于不同的地质单元, 由于地表及地下水文网形成演化步调不一致, 故也不应存在划分古、现代岩溶的统一时间标准。现代岩溶应该是岩溶发展的一个延伸阶段, 古岩溶应该与古构造、古地理等名词一样, 含有随地质历史而不断演化的意义, 是在古水文地质环境中发育形成的。因此, 所谓古岩溶可理解为某套岩溶化地层岩溶形成与演化的过程, 它的基本任务是恢复古水文地质环境的形成与变迁, 从而查明岩溶体系的更迭方式。

1.2.2.2 国内外古岩溶的研究现状综述

目前, 关于岩溶的新名词不断出现, 诸如生物岩溶、热水岩溶、碎屑岩岩溶、红层岩溶、深埋岩溶等。同时, 古岩溶研究也正在兴起。

根据国际上近 20 年来发表的论文检索, 关于古岩溶的论文有 400 余篇^①。其中, 标题上出现古岩溶的共有 120 多篇, 若加上以古岩溶为主题词, 讨论地貌、古地理、矿产地质、地球化学、水文工程等内容文章, 共近 180 篇^②。检索国内 1985 年以来关于古岩溶的文献^③有 110 多篇。国内外发表论文涉及的内容见表 1-2。

① 据 Georef. 地质光盘数据库;

② 据中文地质文献数据库、中文石油文献数据库、中文科技期刊数据库(1985~1996 年)。

表 1-2 国内外古岩溶研究内容统计表

研究内容	煤田地质	油气地质	成岩作用	成矿作用	水文地质	工程地质	其他	总计
国外, 篇	3	10	38	39	14	4	72	180
国内, 篇	5	32	4	32	16	3	27	119

这些研究内容归纳起来有以下几个特点:

①国外古岩溶研究始于 70 年代末。80 年代, 发表的论文逐年增加, 至 80 年代末进入鼎盛时期, 90 年代又逐渐减少; 国内古岩溶研究总体上与国际同步, 但处于高峰期的有两个时期: 一是在 80 年代中后期; 二是 90 年代初至今又进入第二个高峰期。

②从研究内容看, 古岩溶研究主要是伴随成岩、成矿作用及油气地质的研究而兴起。特别是与石油、天然气及金属、非金属矿产地质研究的关系密切。

③从发表论文的数量看, 国内对古岩溶研究的重视程度不亚于国外, 但国内古岩溶研究以注重解决相关实际地质问题为特点。

④我国古岩溶研究区主要分布在西南、华北、东北及华南地区, 地层几乎遍及各个时代。

国内外古岩溶研究高潮的兴起均与相关的几次学术会议有关: 1985 年, 由 P.N.Choguette 和 N.J.James 召集和组织, 在美国科罗拉多学院召开了题为“古岩溶系统及不整合面特征和意义”的学术讨论会。会后于 1987 年汇编的《Palaeokarst》研究专辑^[34], 集中反映了国际上近年来不同领域的专家们从多侧面对不同时代碳酸盐地层中的古岩溶研究成果与现状; 同期, 在中国地质科学院岩溶地质研究所和中国地质学会岩溶地质专业委员会的主持下, 召开了第一届及第二届全国岩溶矿床学术讨论会; 1992 年 4 月, 中国天然气学会地质专业委员会在无锡召开了“碳酸盐岩岩溶储层研究及海相现代沉积学术研讨会”。这期间, 我国除大量介绍、吸收并应用国际有关研究的先进技术方法和理论外, 还根据我国 80 年代以来在四川、鄂尔多斯、塔里木等地实际揭露的古岩溶现象, 结合我国地质演化特点, 借鉴相关学科研究理论和方法进行了深入探索, 在古岩溶发育特征、形成机理、控制因素等方面开展了大量研究工作, 取得了可喜的成果^[43~66], 并在某些方面形成了自己的特色。现将国内外有关古岩溶的主要进展概述如下:

国外研究进展主要有三个方面^[67~79]: ①岩溶相及岩溶控矿。国外大多数古岩溶的论文是关于具体的古岩溶发育特征的介绍, 涉及的地层从元古界至第四系。由于参与这一研究的以沉积学、岩石学学者居多, 故把沉积岩石学和沉积相的方法引入古岩溶研究, 并提出岩溶相的概念。他们依据“岩溶是成岩作用相, 是陆地上暴露的碳酸盐岩体在各种气候和构造条件下的印痕, 由大气水中碳酸钙的溶解和迁移作用所产生并控制形成的可辨认的岩溶地貌”的定义 (Estban 和 Klappa, 1983 年), 把古岩溶和地层学、沉积学联系起来并偏重于对不整合面古岩溶的研究, 讨论古岩溶相问题及其对油气储层或矿产形成的控制作用。②岩溶岩、成岩作用、成矿作用。针对古岩溶特征 (如落水洞、塌陷岩、钙结层等) 的描述以及古岩溶与白云岩化、礁体发育及大气水成岩的地球化学特征等关系的分析, 将岩溶研究具体化、深入化。同时, 初步注意到不同成因地下水的岩溶作用。由于不同成因地下水可参与成矿, 故岩溶成矿的概念也逐渐形成, 逐步区分出了微岩溶、沉积岩溶、埋藏岩溶等概念, 并在成岩作用和成矿作用方面开展了一些开创性研究^[69~71]。③岩溶演化。少量的研究成果已注意到

古岩溶演化及其与矿产形成关系的研究^[78,79]。由上可见,国外在古岩溶方面的一个重要特点就是应用多学科(地层学、沉积学、岩石学、地球化学、矿床学等)的理论方法开展古岩溶研究。

国内古岩溶研究进展主要体现在三个方面:①古水文地质分析原理与古岩溶研究相结合。贾疏源等在这方面做出了尝试性和开创性研究^[45]。他通过对地史演化过程分析,划分了古岩溶类型,恢复这些类型岩溶发育阶段的古水文地质条件,来阐明这些岩溶发育及演化规律。由于古水文地质原理引入古岩溶研究,因而产生了新的研究思路,即由于岩溶是水流与可溶岩相互作用及其产物,因此地下水起源和活动特征不同,必然会形成不同体系的岩溶特征。但它们间又是相互联系的,即“旧体系”对“新体系”的控制,这正是岩溶的演化。这一认识为岩溶矿床形成演化的深入研究开拓了思路。②岩溶概念的进一步广义化。这主要是基于岩溶作用(即水—岩作用)双方是拓展的(前文已有论述)。一方面是指化学溶解作用,不仅发生于碳酸盐岩中,同时也在非碳酸盐岩及膏、盐岩和砂泥岩中也可发生;另一方面引起岩石溶解的水,不仅只有渗入大气成因水,同时还有沉积层的压释成因水、深部地下热水等。这都更新了传统的岩溶概念,也有利于将岩溶地质学的研究思路和方法引入非碳酸盐岩地层的有关地质问题的研究中。③深岩溶与古岩溶研究相结合。地下水水平循环带以下发育的岩溶即为深岩溶。可见现今深部岩溶分布区,碳酸盐岩中广泛发育了古岩溶,且古岩溶发育又控制了现代深岩溶发育,因此,在讨论深岩溶问题时,必须讨论有关古岩溶问题。同时,地史期的岩溶发育不可避免有深岩溶发育,故古岩溶研究中也应重视深岩溶研究。古岩溶中的热水岩溶、埋藏岩溶就是深岩溶。我国已有一些岩溶研究开始注意两者的结合^[80]。

综上所述,国内外通过对古岩溶研究使很多旧的概念得到更新,并不断产生新的概念及新的研究内容和思路。N.J.James 在文献 [34] 中回顾古岩溶研究进程时指出:“过去 30 年中,有些地质学家曾研究碳酸盐岩地层学和沉积学并对古岩溶的认识有所了解和发展”,“开始于碳酸盐沉积物的大气水成岩作用的研究”,“最后,不断意识到,以前曾归之于大气成因的许多令人困惑不解的组构和构造,也可以在其他成岩环境中形成,如海底和深埋环境”。这表明,由于其他学科的渗入,古岩溶研究正在向一门新的独立的学科方向发展,“岩溶和古岩溶”是“近地表成岩作用形成”的传统观念正在受到挑战。此外,我国在古岩溶研究方面已经跟上世界的研究步调,并在某些方面走在世界前列。

1.2.2.3 关于(古)岩溶地球化学

岩溶地球化学是“研究岩溶系统中化学作用的规律及其应用的学科”^[81]。它既研究岩溶系统的地球化学背景条件,也要研究岩溶发育和岩溶水水质形成和变化的化学机理。但它以研究现代正在进行的低温低压条件下的地球化学作用及研究开放系统中碳酸盐在天然水中的三相平衡为主。

70 年代末,国外就出现了岩溶地球化学一词,虽发表了大量有关论文^[82],但尚无系统的总结或专著,目前尚处积累阶段。所做工作主要有三个方面:①理论探讨(主要是天然溶液中碳酸盐三相平衡);②研究区域岩溶地球化学规律;③探索用岩溶地球化学方法去解决实际问题。

我国自 80 年代以来,在岩溶地球化学方面也做了不少的研究工作,但大都以某地区、某岩层现今岩溶水的化学特征、稳定同位素(^2H 和 ^1H , ^{13}C 和 ^{12}C , ^{18}O 和 ^{16}O) 特征的描述及其在解决某些实际应用为主^[81],与国外尚有较大差距。

本研究借用前人的“岩溶地球化学”一词,提出“古岩溶地球化学”一词。主要是基于

以下几点考虑：①现代大气背景下的岩溶发育环境与古岩溶有明显差异。如气候条件，大气水海洋水的氢、碳、氧同位素等。②古岩溶既可在常温常压的开放系统中发育，也可在高温高压的封闭系统中发育，即地球化学背景上存在一定差异。③古岩溶是在古水文地质环境下发育形成的。古水文环境现今已不复存在，亦即早期岩溶水早已消失，企图通过岩溶水的化学、地球化学特征来阐明岩溶发育形成条件已不可能。故岩溶作用产生的岩溶水和岩溶岩中唯岩溶岩可保存下来，也只有岩溶岩才可直接地保留有岩溶的环境特征信息，所以通过岩溶岩“记录的地球化学信息”有可能恢复古岩溶的发育环境。由此可见，古岩溶的地球化学研究与上述“岩溶地球化学”在研究背景、研究对象及目的等方面具有明显不同。

由于古岩溶研究的基本目的是通过对古岩溶发育环境的恢复，查明古岩溶的发育分布规律，而岩溶岩中又可能记录有古环境标志的地球化学信息。因此，“古岩溶地球化学”可作如下定义：应用地球化学的原理和方法，通过提取岩溶岩中“记忆的地球化学信息”（同位素、微量元素、稀土元素、包裹体等），解释和恢复古岩溶发育环境（古气候、古地理、古水文地质等），并为阐明岩溶发育形成机理提供可靠依据。

笔者提出“古岩溶地球化学”一词并抖胆下此定义，并非“标新立异”和“哗众取宠”。实际上国内已有人开始应用地球化学方法研究古岩溶了^[64,65]，但明显存在不足：①多采用单因素或少因素研究难免会带来解释上的片面性；②偏重于不同岩溶岩类型间的地球化学特征的对比，缺乏纵向对比；③在应用地球化学信息解释、判别岩溶发育环境时没有或欠考虑岩溶发育环境的变化性和继承性；④没有明确地球化学与古岩溶研究间的关系，故也就难以明确或阐明古岩溶地球化学特征的时代意义。国外有人应用“岩溶地球化学”的方法去研究古岩溶^[82]（以古岩溶和地球化学两个主题词，对1990年至1996年国外工程文献索引进行并集检索，未发现一篇文献），但即使不考虑大气水、古海水等气候地理背景的差异，该方法也难以解释恢复其他环境中的古岩溶发育，显然不具有普适性。这些不足使笔者感到：一方面地球化学在古岩溶研究中的优势和重要（可以从定量角度阐明某些问题），亟待开展加强；另一方面由于古岩溶发育形成的自身特点决定了应用地球化学研究古岩溶，无论在研究方法还是应用解释上都应有自己的特色，积极地尝试、探索并不断总结，很可能为古岩溶研究（特别在定量方面）开拓新的局面。因此“古岩溶地球化学”的提出，既是深入研究的需要，又是研究深入的必然。它很可能成为岩溶学研究的一个新的分支。

1.2.2.4 关于古岩溶成因及识别模式

①成因模式。

自古岩溶一提出，人们就在探讨它的成因。起初，人们只是把古岩溶与地史时期的沉积间断相联系^[36]，因此推论古岩溶（实际上是风化壳岩溶）发育与现代裸露的碳酸盐岩岩溶发育模式相同。之后，随研究的深入，发现碳酸盐岩在沉积过程中也有短暂沉积间断，于是出现了沉积（古）岩溶或层间（古）岩溶、微岩溶之说^[45,55]，并提出了相应的淡水透镜体或海岛水文学的成因模式^[35]。有关埋藏期及构造期的古岩溶成因模式，目前尚缺乏深入研究。应该指出，成因模式实质上是古水文地质条件的恢复再现。因此建立成因模式可有两种途径：一是在分析大量局部、区域地质资料基础上，建立各期次的地质、水文地质模型，通过有关边界条件和参数，由物理模拟或数值模拟来确定各期古水动力场。古水动力场是古水文地质条件的核心，也是影响、控制岩溶发育的关键因素。因此恢复了古水动力场即可指示岩溶发育成因条件。二是通过岩溶作用所保留的岩溶岩在纵横剖面上的组合展布特征即所谓岩溶相，并结合一些特征产物的典型环境标志来分析推断古岩溶发育的古水文地质条件。