

# 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<sup>[1,2]</sup>。目前,华北地区煤炭产量约占全国总量一半以上<sup>[1]</sup>,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<sup>[3~11]</sup>。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重大难题<sup>[12,13]</sup>。

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

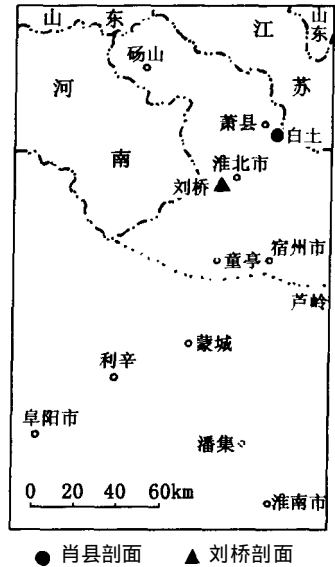


图 1-1 研究区及研究的奥灰剖面位置

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[1,12,13]</sup>。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期次的构造运动发生，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）<sup>[14,15]</sup>。“亮甲山组”为叶良辅和刘季辰命名（1919 年）<sup>[16]</sup>；“马家沟组”是 1922 年葛利普首创<sup>[2]</sup>。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<sup>[17,18]</sup>。70 年代人们基本还是遵从前人的二分划法<sup>[20,22]</sup>。

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<sup>[19,21]</sup>。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”）<sup>[22]</sup>。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<sup>[22,23]</sup>，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”<sup>[26]</sup>，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<sup>[27,28]</sup>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 <sub>2</sub>	八陡组												
	阁庄组	O <sub>2</sub>	老虎山组	O <sub>2</sub>	上马家沟组	O <sub>2</sub>	白土组		晃所组	O <sub>2</sub>	白土组		
O <sub>1</sub>	马家沟组	O <sub>1</sub>	马家沟组	上段下段	O <sub>1</sub>	下马家沟组	O <sub>1</sub>	马家沟组	O <sub>2</sub>	马家沟组	O <sub>1</sub>	马家沟组	
			肖县组	上段下段		青龙山组							小家浴组
	北庵庄组												
	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			

## 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）。随着地质学的发展，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<sup>[29~32]</sup>。任美镔指出：“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”<sup>[32]</sup>。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”<sup>[33]</sup>。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<sup>[33,34]</sup>。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、运动特点和物化化学特征如何，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<sup>[36]</sup>，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）<sup>[40,41]</sup>。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）<sup>[42]</sup>。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<sup>①</sup>。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、水文工程等内容的文章，共近 180 篇<sup>②</sup>。检索国内 1985 年以来关于古岩溶的文献<sup>③</sup>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：

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。

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。

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。

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<sup>[34]</sup>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<sup>[43~66]</sup>，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<sup>[67~79]</sup>：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。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<sup>[69~71]</sup>。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<sup>[78,79]</sup>。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: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<sup>[45]</sup>。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。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。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<sup>[80]</sup>。

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<sup>[34]</sup>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进展”,“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伐,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”<sup>[81]</sup>。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<sup>[82]</sup>,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( $^2\text{H}$ 和 $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}$ )特征的描述及其在解决某些实际应用的应用为主<sup>[81]</sup>,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：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。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。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<sup>[64,65]</sup>，但明显存在不足：多采用单因素或少因素研究难免会带来解释上的片面性；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；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；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<sup>[82]</sup>（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

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<sup>[45,55]</sup>，并提出了相应的淡水透镜体或海岛水文学的成因模式<sup>[35]</sup>。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。

前一种方法由于涉及到不同期次研究层的边界条件和有关参数，真实模拟再现难度较大（特别是构造运动强烈时期）。相对来说，后一种方法较为容易实现，并可为前者提供一定的建模参数。由于剖面保存的岩溶岩既有指示不同时期或不同环境的典型标志物，更有不同时期或不同环境的叠加产物，因此鉴别区分不同时期岩溶作用的岩溶岩特征标志即建立不同时期古岩溶识别模式，就成为此项工作的关键。

#### 识别模式。

古岩溶有何特征，如何鉴别？不同时期的古岩溶特征又如何区分？这既是古岩溶成因研究的基础（上已阐述），也是古岩溶研究必须首先要回答的问题。对于这些问题，目前主要是从以下四个方面来调查：a. 地层—地貌特征。这主要是针对明显的沉积间断或不整合面地形（起伏不平）及其之下的岩溶洞穴（非充填或非完全充填）及洞穴沉积物（如上覆层物质）特征。b. 剖面上的宏观特征，如岩性、生物的变化特征，充填物（海相的和淡水的等）及伴生的改造（压实、压溶等）特征，次生的金属、非金属矿物等。c. 岩溶岩的微观特征。主要通过薄片、电镜、阴极发光等手段来辨认或推断古岩溶的存在，如各种碳酸盐胶结物的溶解、矿物溶蚀改造及渗流充填物等。d. 地球化学特征。主要采用碳氧同位素方法，从定量上解释或证明古岩溶的存在，如强岩溶岩和弱岩溶岩、岩溶沉积岩与岩溶改造岩间的同位素差异明显等。

应该指出：古岩溶的宏、微观现象观察是研究古岩溶的最基础性工作。由于岩溶化的宏观及微观特征以及它们之间具有空间和时序关系，因此室内外剖面的详细观察研究，不仅可为建立古岩溶分期识别模式奠定可靠基础，而且通过区分这些宏、微观特征的时序关系，建立岩溶相模式，从而为建立岩溶成因模式提供依据。岩溶岩地球化学信息资料不仅是定量判别古岩溶宏、微观标志是否可靠的最好证据，而且也是深入研究古岩溶识别标志和模式的可靠手段。总体看，前人在建立定性的古岩溶识别标志或模式方面做了大量工作，这是重要的，但在建立定性与定量相结合或定量识别模式方面所做工作甚少。这样一方面降低了某些古岩溶识别标志的可信度，同时也是造成不少人对其标志特征存有疑虑的重要原因。因此，目前对古岩溶的深化研究，定量手段和方法的辅助与结合势在必行。

#### 1.2.2.5 关于研究区奥灰岩溶及古岩溶的研究状况

研究区奥灰零星出露，大都隐伏，钻孔揭露资料很少。由于本区主要矿产（二叠系煤层）开采距奥灰顶面较远，一般情况下对上部煤层开采威胁不大。故以前奥灰研究程度低，涉及奥灰研究的主要内容集中在地层、岩性、古生物、沉积相（古地理）方面，仅有少量论文论及奥灰岩溶水资源勘探开发问题<sup>[3,4]</sup>，未见专门论述奥灰古岩溶的文献，但有少量奥灰沉积相的论述显示古岩溶发育的证据<sup>[83]</sup>。

本区奥灰是华北地区奥灰的一部分，以下对华北其他地区的奥灰古岩溶研究作一简述。

华北其他地区涉及的许多矿产资源均与奥灰有着直接或间接关系。因此，随着矿产资源的勘探与开发，华北其他地区对有关奥灰古岩溶问题认识早，相对来说研究较好。研究内容主要涉及以下四个方面：金属、非金属矿床（石膏、高岭土、铁矿等）的勘探开发。如马继民（1988年）在研究河南石炭纪铝土矿及其下部“山西式”铁矿的成因时，建立了第一风化—岩溶期，埋藏还原期及第二风化—岩溶期的矿床地质演化模式，实际上相当于古岩溶演化分期<sup>[84]</sup>。油气储层（冀中拗陷、鄂尔多斯盆地等）的勘探开发。如汪蕴璞等（1987年）在研究冀中拗陷古潜山油气储层时，运用古水文地质分析原理，分析了有关奥灰古岩溶现象（未作详细讨论）<sup>[112]</sup>。近年来随着陕甘宁盆地油气勘探的深入，有关奥灰储层古岩溶

的论文已有多篇出现<sup>[61,202,224]</sup>。石炭一二叠系煤层勘探开发。由于奥灰水直接威胁煤层开采,故有关奥灰岩溶问题在“六五”、“七五”期间曾列专项课题研究,主要成果反映在文献[3,4]中。有关古岩溶问题主要围绕两个方面:一是岩溶作用分期问题;二是与奥灰突水通道相关的岩溶陷落柱问题。其中“陷落柱”问题探讨较多<sup>[85~91]</sup>,但至今其形成时代、形成原因等方面仍有很大分歧。基础理论及奥灰水资源勘探开发。包括沉积学、岩石学、矿床学、地层学、地貌学及水文工程地质学等学科中零星涉及有关奥灰古岩溶问题<sup>[8,9]</sup>。

综观上述研究成果,在以下几个方面存在不足:奥灰岩溶演化分期不全或不明确,多注重于某一期次(主要是加里东期)的奥灰古岩溶发育特征研究,而疏于古岩溶发育的时间或演化过程作用。多偏重于构造、岩性、古地貌等因素对古岩溶发育的控制,而对古水文地质条件研究不足。现象描述及成因推测的多,定量解析、系统研究的少。正因此,至今人们对奥灰古岩溶的发育缺乏历史的系统的认识,对其所呈现的一些独特现象难以给予合理的时空解释和成因分析,也就难以形成一套奥灰古岩溶的研究思路、方法和程序。

上述研究成果及存在的问题,既是本次研究的基础,也是吸引笔者投入的原因。

## 1.3 研究的主要成果及进展

### 1.3.1 研究概况

#### 1.3.1.1 工作情况

笔者在1986~1990年间(本科毕业实习及研究生阶段)参与了“川南阳新灰岩(古)岩溶发育特征及其与天然气勘探的关系”课题研究,了解、掌握了古岩溶研究的一些基本方法和程序。其后,笔者自1991年至今在本区及其周缘地区参与进行了“井筒破裂调查”、“皖北刘桥二矿中小构造规律及开采对策”等多项课题研究,对本区及区域地质、水文地质等基础资料有了较好的了解。以上工作,为本课题的选定及顺利开展奠定了良好的基础。1996年,笔者申报煤炭科学基金课题:“皖北奥陶系古岩溶发育演化特征”,获得批准,为本课题的开展提供了一定的经费保证。

研究过程中曾先后多次进行室内外剖面观察,具体时间如下:

①1996年8月24~25日,对皖北刘桥二矿水8孔奥灰剖面(当时尚未完钻,以下简称刘桥剖面)进行了初步观察(李定龙、朱善金)。

②1997年3月22日,对淮南市二条不完整奥灰剖面(李二矿西南、洞山)进行了观察(淮南矿业学院导师周治安教授亲临指导,参加者还有程学丰、钱守荣、杨为民)。

③1997年4月11~12日,对肖县白土奥灰剖面(以下简称肖县剖面)进行了初步观察(中国矿业大学导师王桂梁教授亲临指导,晁吉祥副教授一同指导观察)。

④1997年4月13~20日对刘桥剖面进行了详细观察(李定龙及淮南矿业学院93级王成斌、陈新林同学)。

⑤1997年5月19日,对淮南市洞山寒武一奥灰剖面进行观察(特邀成都理工学院贾疏源教授指导观察)。

⑥1997年5月22~24日,对刘桥剖面及肖县剖面再次进行观察(邀请成都理工学院贾疏源教授指导)。

⑦1997年8月12~18日,对刘桥剖面及萧县剖面进行详细观察并采集样品(李定龙、杨为民、汪才会)。

主要工作内容如下:

肖县剖面实测长度 185.2m,分 35 层,采样 35 块,平均约 5m 一个样,另采特殊样 5 组 10 个;野外照片 93 张,素描 11 幅;制作薄片 34 个,显微照相 36 幅。

刘桥剖面观察长度 120.7m,分 21 层,采样 27 块,平均约 4m 一个样,另采特殊样品 15 个;岩心照相 122 张,素描 19 幅;制作薄片 28 个,显微照相 35 幅。

定量分析有以下四方面内容: a. 岩石化学成分选做了刘桥剖面 15 个样。 b. 碳、氧同位素共做 33 个样品,其中肖县剖面 16 个(含特殊样 4 组 8 个);刘桥剖面 17 个(含特殊样 9 个)。 c. 微量元素共做 30 个样品,两剖面各为 15 个,测试项目 16 个。 d. 稀土元素共做了 31 个样品,其中萧县剖面 14 个(含 1 组特殊样);刘桥剖面 17 个(含 5 个特殊样)。以上均由南京大学地质系测试中心分析。

收集萧县白土奥灰剖面岩石化学成分分析资料 30 个和薄片 56 个(均由中国矿业大学晁继祥老师提供)。薄片观察照相 59 幅。

论文工作分四个阶段: a. 1996 年 8 月~1997 年 8 月,室内外收集资料及野外剖面观察取样工作; b. 1997 年 9 月~1997 年 10 月,样品观察(主要是薄片)及测试分析工作; c. 1997 年 11 月~1997 年 12 月,测试资料分析整理; 1998 年 1 月~1998 年 4 月,论文编写定稿。

#### 1.3.1.2 研究方法、研究内容及技术路线

本课题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研究重点,以两剖面奥灰岩溶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)岩溶学研究的综合科研思路,采用定性与定量、宏观与微观、地表与钻孔、传统方法与先进测试手段及局部与区域相结合等多尺度、多层次、多手段、多学科相互结合的系统研究方法。

研究内容主要有四个方面: a. 奥灰古水文地质演化及岩溶作用分期; b. 奥灰古岩溶的宏、微观特征及岩溶相研究; c. 奥灰古岩溶的地球化学特征研究; d. 奥灰古岩溶环境恢复、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,以及岩溶发育规律预测。

以上研究内容中,古岩溶宏、微观特征研究是基础,古岩溶地球化学特征研究是重点,以此来建立岩溶相和恢复岩溶发育形成环境,从而达到建立古岩溶各种模式的目的,并为岩溶发育规律预测提供基础资料。

技术路线。本课题研究的技术路线见图 1-2。

#### 1.3.2 主要成果及进展

依据本区地史演化过程,将奥灰古水文地质作用过程划分为五个期次;沉积水文地质期( $O_1-O_2$ )、淋滤水文地质期( $O_3-C_1$ )、埋藏封闭水文地质期( $C_2-P$ )、非完全埋藏构造水文地质期( $T-E$ )和二次埋藏封闭水文地质期( $N-Q_2$ ),与此对应古岩溶作用期分别为沉积岩作用期、风化壳岩溶或加里东岩溶作用期、埋藏岩溶或压释水岩溶作用期和非完全埋藏或构造岩溶作用期,并初步确定奥灰古岩溶发育的时间上限为第四纪中更新世末。

通过奥灰古岩溶宏、微特征研究,分期建立岩相模式。

依据古岩溶宏微观特征及地球化学特征的剖面变化特点,在肖县剖面和刘桥剖面上分别识别出 3 个可对比的沉积古溶蚀面。

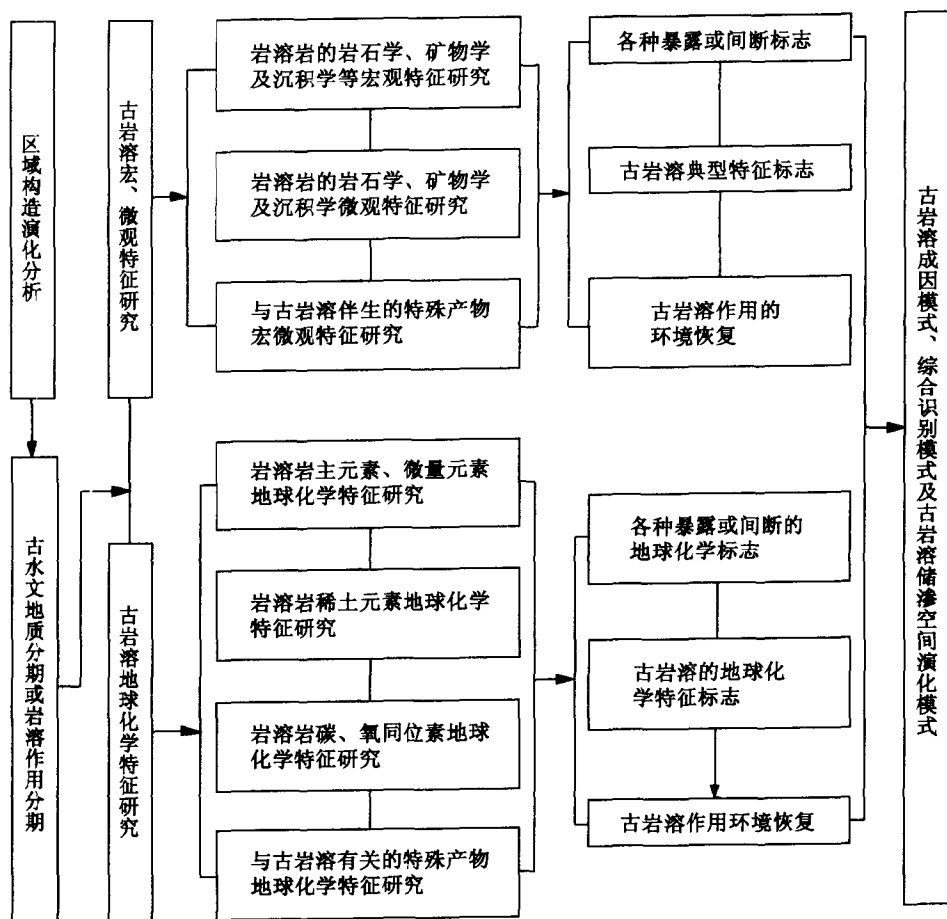


图 1-2 研究技术路线框图

通过岩溶岩的宏微观特征、地球化学特征的环境标志等研究，分期恢复了古岩溶发育环境，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。

对奥灰中“豹斑和花斑”的成因问题，提出了新的见解，即它很可能是岩溶海相充填物的次生选择交代的结果，为沉积岩溶的特征标志之一。

⑥岩溶岩的同位素、稀土元素等地球化学特征是识别沉积古溶蚀面或间断面和恢复岩溶发育环境的重要手段。古溶蚀面或间断面处地球化学特征异常（前人没有讨论）表明：地球化学手段不仅可用于地层时代界线的划分或判断，而且对于沉积过程中的小规模沉积间断的判识可能具有同样的适用性。这一认识对一些沉积矿床的形成演化规律的深入研究具有重要意义，同时碳酸盐地层（高分辨）层序地层学及地质演化的节律性研究也具有参考价值。

⑦通过构造期古应力场的数值模拟，结合各期岩溶发育特点，认为本区的刘桥—童亭—任楼一带为奥灰岩溶发育的强带。

## 2 奥灰古岩溶发育的基本背景

### 2.1 区域地质背景

#### 2.1.1 区域地层

区域基底为太古代和早元古代深、中深变质岩系及中元古代浅变质岩系组成，区内未见出露。盖层呈稳定地台型沉积，有上元古界青白口系至古生界二叠系，总厚约 3000 余 m；中生代侏罗系、白垩系及老第三系主要分布在断陷盆地内。区内缺失晚奥世至下石炭世地层和三叠系。平原地区均为新第三系和第四系松散层覆盖。为研究奥灰，现将古生代以来的地层分述如下（表 2-1）。

表 2-1 区域地层简表

地层系统				构造运动	年龄 Ma	厚度 m	岩性特征
代	系	统	组				
新生代	第四系	全		Q <sub>4</sub>	喜山运动	0   200	主要由冲洪积相、湖积相的粘土、砂质粘土、砂、砾石等组成；以粘土和砂相间分布的混合堆积为特征，含有泥灰岩、薄层石膏及泥炭薄层等
		晚		Q <sub>3</sub>			
		中		Q <sub>2</sub>			
		早		Q <sub>1</sub>			
	第三系	晚		N	2.48	0   3000	不整合 灰色、灰白色、灰绿色、棕红色含砾中砂、细砂及粘土岩。本区分布不稳定（0~70m）
		早		E			
中生代				K	燕山运动	65	不整合 0   9500
				J			
				T			
上古生代	二叠系	上统	上 石盒子组	P <sub>2s</sub>	印支运动	248	假整合 1300   2000
		下统	下 石盒子组	P <sub>1x</sub>			
			山西组	P <sub>1s</sub>			
	石炭系	上统	太原组	C <sub>2t</sub>	海西运动	286	120   190
		下统	本溪组	C <sub>2b</sub>			
古生代	奥陶系	上	白土组	O <sub>2b</sub>	泰康加里东运动	433	假整合 330   560
		下统	马家沟组	O <sub>1m</sub>			
			肖县组	O <sub>1x</sub>			
			贾汪组	O <sub>1j</sub>			
	寒武系	上统	凤山组	ε <sub>3f</sub>	505	700   1400	上统为灰—灰黄色砂屑灰岩、豹皮白云质灰岩、条带泥质灰岩及页状泥灰岩。中统自下而上为灰岩和粉砂岩，向上为鲕状灰岩及棕黄、紫红色石英砂岩、粉砂岩，上部为灰白、肉红色鲕状白云质灰岩。下统为灰色、灰黄、黄绿色含砂砾质灰岩、白云岩、泥灰岩、豹皮灰岩以及灰岩与紫红色页岩不规则互层组成
		中统	长山组	ε <sub>3c</sub>			
			固山组	ε <sub>3g</sub>			
			张夏组	ε <sub>2z</sub>			
		下统	徐庄组	ε <sub>2x</sub>			
			毛庄组	ε <sub>2m</sub>			
馒头组	ε <sub>1m</sub>						
		猴家山组	ε <sub>1h</sub>	590	530   1000	不整合 上段主要为黄绿色钙质页岩夹薄层泥灰岩及厚层石英细砂岩；下段为灰白、灰色厚层状石英岩、含砾石英砂岩	
青白口系			Qn				

注：表中第四系年龄据文献 [116]，期他年龄数据均参考文献 [92]

古生界包括下古生界和上古生界二套地层。

下古生界寒武系和奥陶系主要由碳酸盐岩组成，区内广泛分布。寒武系层序完整，下寒武统厚度 255~455m，由沉灰岩、紫色页岩、豹皮灰岩（白云岩）、灰岩等岩性组成；中寒武统厚度 250~305m，由粉砂岩、石英砂岩、鲕状灰岩等组成；上寒武统厚度 170~225m，由竹叶状灰岩、鲕状灰岩、白云岩及豹皮灰岩等组成。奥陶系不完整，缺失晚奥陶世沉积，中奥陶统分布也不稳定。下奥陶统厚度 430~505m，主要为灰色中厚层灰岩、豹皮白云岩（灰岩）、角砾灰岩组成，局部见紫红色页状灰岩、燧石结核等；中奥陶统厚度 0~45m，由中厚层灰质白云岩、白云质灰岩、白云岩组成。该统在邻区徐州—山东含阁庄组和八陡组，至冀、晋等地称为峰峰组，本区有老虎山组、阁庄组和白土组三种命名，本文称之为白土组。奥陶系这套巨厚碳酸盐岩系组合为岩溶发育奠定了良好的物质基础。

上古生界石炭系和二叠系主要由海陆交互相和陆相碎屑岩组成。本区缺失下石炭统；中石炭统本溪组沉积不稳定，厚度 0~22m，由灰紫色、浅灰色铝土岩或鲕状铝质泥岩及紫红色铁质结核组成；上石炭统太原组厚度 120~160m，由 12 层左右灰岩与黑色砂、泥岩互层组成，含 1~11 层薄煤（部分可采）。二叠系总厚大于 2000m，分上、下 2 个统 4 个组：下二叠统山西组、下石盒子组；上二叠统上石盒子组、石千峰组。主要由海相、海陆过渡相、沼泽相的泥岩、砂岩和煤层组成，为本区的主要赋煤层位。

中生界侏罗系和白垩系主要为陆相碎屑岩沉积，局部有火山碎屑岩堆积。侏罗系厚度大于 800m，由粉砂岩、细砂岩及砂质泥岩等互层组成；白垩系厚度大于 1350m。由灰绿、紫红等火山碎屑岩、砂砾岩、砂岩等组成。

新生界包括第三系和第四系，为一套陆相碎屑岩。第三系研究程度较差，属于山间拗陷和断块盆地内陆相碎屑岩沉积。主要分布在宿县西北部广大地区，大都隐伏于第四系之下，厚度不稳定，西北部大于 1000m，至本区中部的低山、残丘地段厚度为 0~70m。第四系主要为冲洪积相、湖积相的粘土、砂质粘土、砂、砾石等组成，以粘土和砂相间分布的混合堆积为特征（含有泥灰岩、薄层石膏、泥炭薄层等），厚度变化大，变化范围为 0~200m，一般为 50~150m。

### 2.1.2 区域构造背景

淮北宿县地处华北板块南部。区内构造特征与煤炭、油气等矿产资源具有密切成因及控制关系，因此前人在此做了不少研究工作<sup>[90~100]</sup>。值得指出的是：在古生代期间，华北地区有一个重要的地壳运动面，即中石炭统直接覆盖在中奥陶统灰岩之上。对这一间断面，通常解释为地壳抬升发生在晚奥陶世，经志留、泥盆纪直到早石炭世，抬升持续了近 140Ma；也可解释为地壳抬升发生在间断时限中任一时段内，如到泥盆纪才抬升，晚奥陶世和志留纪曾有过沉积，只是后来又被抬升剥蚀了。这次地壳发生的时间一直是华北区域地质中一个难解之谜，现在仍无确切证据来解决它。本次研究奥灰古岩溶问题，仍按上述的通常解释来处理。

印支运动期间，华北板块与华南板块发生碰撞对接，结束了本区自晚元古代以来长期稳定的内克拉通拗陷历史，使盖层发生褶皱。燕山运动使盖层褶皱进一步复杂化，形成了以所谓徐宿弧形构造，并导致强烈的断块活动，局部岩浆侵入和火山喷发，产生了规模不等、形成时间各异的断陷盆地。

#### 2.1.2.1 主要构造形迹

总体看，区内以弧形（推覆）构造特征为主，兼有 NNE（新华夏系）及 EW 向构造

(图 2-1)。弧形构造的主导构造线由北向南沿着 NNE、NE、SN、NW 向弧形展布，构成

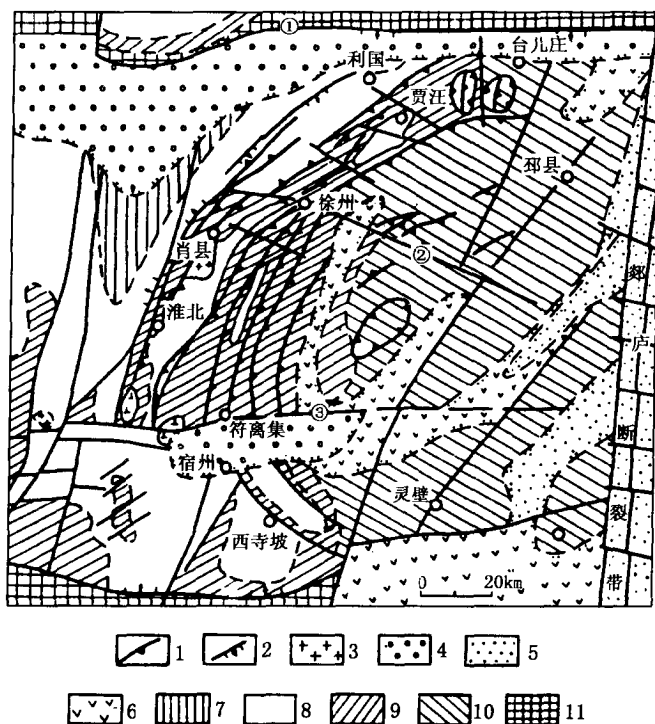


图 2-1 区域地质构造图<sup>[94]</sup>

1—逆断层；2—一般断层；3—侵入岩体；4—下第三系；5—白垩系；6—上侏罗统；

7—下三叠统；8—石炭二叠系；9—下古生界；10—上元古界；11—太古界；

丰沛断裂；②—废黄河断裂；宿北断裂

一个向西突出，向北收敛，向南撒开的弧形构造。卷入此构造的主要褶皱有：皇藏峪背斜、闸河向斜、萧县背斜等。复式背、向斜和次级背向斜及其间的众多断层一起在平面上显示为由北东向西突出的弧形构造，俗称“徐宿弧”。该“弧”在印支运动期（三叠世）已具雏形，至燕山运动初期（早、中侏罗世）达变形高峰<sup>[95]</sup>，变形后期的近 EW 向拉张（伸展）作用，最后在“弧体”的山前地带形成一系列近 NE 向展布的侏罗世—早第三纪的沉积盆地。NNE 向排列的背向斜在本区非常明显，轴向 N20°至 30°E。其中向斜较背斜大而开阔，且往往是东翼陡、西翼缓，陡翼常与走向逆断层共生。主要断裂有丰沛断裂、宿北断裂、郝集断裂等。新生代的喜山至新构造时期基本承袭了早期构造发展，这从本区上第三纪和第四纪的凹陷长轴方向再次显示 NNE 向展布得到佐证<sup>[116]</sup>。

#### 2.1.2.2 岩浆活动

本区为岩浆活动较强区。自早古生代以来，区内发生的岩浆活动主要有：早古生代加里东期侵入岩主要分布在宿县以东栏杆、姜庄及灵璧等地。中生代为本区地史上岩浆活动最强烈、分布最广的时期；先后可分 4 个活动期，即第一次为中性岩浆岩，与 NE 向构造有关，分布于宿北断裂附近；第二次为酸偏中性岩浆岩，SN 向和 NNE 向构造相关，主要分布于永城、肖县背斜一带；第三次为酸性岩浆岩，分布于肖县丁里、宿县夹沟等地；第四次为基性、超基性岩浆侵入，分布于闸河向斜、宿北向斜等地。新生代喜山期主要产于本区

东部的灵壁、泗县一带中生代内陆盆地的上侏罗统和下白垩统中，岩性主要为安山岩等。

### 2.1.3 地质构造发育简史

本区地质构造发育史受区域地质构造控制，大体经历了如下过程（图 2-2）：

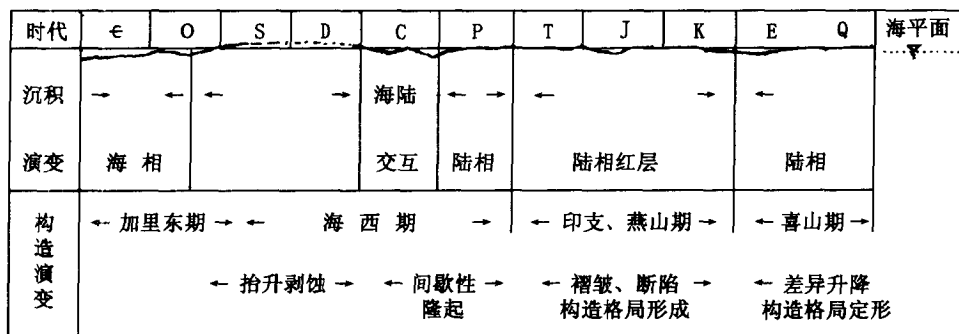


图 2-2 研究区地质构造演化示意图

太古代—早元古代至少经历了五台期、吕梁期二次构造运动，形成了古老的浅—深变质基底岩系，构成了区域的東西向基底褶皱和平行轴向的压性断裂。

早元古代末期吕梁运动，使本区隆起，形成剥蚀区，直至晚元古代中期，地壳下沉接受了一套以海相碳酸盐岩为主的沉积建造，形成震旦期的沉积盖层。晚元古界蓟县运动（本区又称栏杆运动）之后，使本区下古生界与上元古生不同层位之间呈假整合和微角度超覆关系，如本区寒武系与震旦系上统呈假整合接触。

早古生代开始，海侵广泛，古地理环境为广阔的浅海。至中奥陶世晚期，发生了波及整个华北的长达 50Ma 的泰康运动，使地壳再度上升遭受剥蚀，普遍缺失晚奥陶世、志留纪、泥盆纪和早石炭世沉积；至中石炭世开始广泛海侵，沉积了一套海陆交互碎屑岩，二叠纪开始，海水退却，沉积了二叠系含煤岩系，为明显的海退序列。

中生代以前，本区主要构造线方向为东西向。从中生代开始，印支及燕山早期构造运动强烈，受郯庐断裂发生大规模左旋平移影响，盖层剧烈褶皱，形成了一系列的 NNE 向褶皱和断裂，并伴有规模较大的岩浆活动。印支运动使本区绝大部分地区隆起遭受剥蚀，可能缺失三叠纪沉积；燕山运动中早期，于褶皱向斜和断陷盆地内堆积了侏罗纪和白垩纪的陆相红色碎屑岩和火成岩；至燕山晚期，本区发生断块差异升降运动，形成隆起和断陷，在一些北东向和东西向断陷中形成晚侏罗世和早白垩世陆相沉积；并沿断裂带有岩浆侵入活动。

新生代的喜马拉雅山运动继承了燕山晚期的构造运动特点。表现为强烈的断块差异运动，进一步改造了前期构造形迹，以拉张作用为主形成了以张性正断层为主要特点的断裂系统，由此可造成块体大幅度陷落接受沉积。如本区西部和北部的周口、黄口坳陷区，沉积了厚达 7000m 左右的第三系地层。晚第三纪至今的新构造运动表现为以区域性沉降为主要特点，但本区有北升南降的特征。大部分地区接受了冲、洪积，湖沼相沉积，厚度 0~250m，发展为现今淮北平原的自然景观。

## 2.2 区域奥灰（可溶）岩的基本特征

本区奥灰岩总厚度为 560m 左右，几乎全以碳酸盐岩为主的可溶岩组成。根据本次观察并参考区域资料，奥灰主要有灰岩类、白云岩类、次生膏溶岩类四种（表 2-2），以前三种

为主。

表 2-2 奥灰主要岩石类型

岩石类型	岩性	岩性特征	主要矿物成分
石灰岩类	泥晶灰岩	几乎全由小于 0.01mm 的泥晶方解石组成，含少量白云石和生物碎屑	方解石大于 90%
	豹斑云质灰岩	基质多为泥晶方解石，含大量粉、细晶白云石组成的斑块，呈斑或豹皮状	方解石大于 50%
	生物碎屑灰岩	含角石、三叶虫、海绵等多种生物碎屑，泥晶方解石充填胶结	与前二者基本相同
白云岩类	泥晶白云岩	以泥晶白云石为主，含粉晶白云岩，有去云化现象形成云斑	白云石大于 80%
	粉细晶白云岩	他形—半自形亮晶结构。明亮洁净	白云石大于 95%
	中粗晶白云岩	半自形—自形亮晶镶嵌结构，明亮洁净	白云石大于 95%
	灰质白云岩	一是粉细晶白云岩组成骨架，泥晶方解石充填；二是泥晶白云岩中有次生灰岩。前者可能是白云化产物，后者是去云化产物	变化范围大
次生膏岩	膏溶角砾岩	角砾大小悬殊，无分选和磨圆，砾石成分主要为泥晶白云岩和泥质碳酸盐岩	变化范围大

总体看奥灰岩性及其层组结构有以下三个特点：岩性稳定，厚度大，分布广，各段组岩性、厚度一般变化不大，区域上可以对比；奥灰厚度虽大，但各段组间灰岩与白云岩多相间分布，岩石成分及其可溶性都有较大差异，是影响岩溶发育不均一性的重要因素；奥灰中上部为一套碳酸盐岩与硫酸盐岩（石膏）混合建造（由于近现代岩溶作用，本区已难以见到石膏层，代之则是大量层次不清的膏溶角砾岩及含膏假晶灰岩）。这种特殊的易溶硫酸盐的存在为其后岩溶的强烈发育奠定了基础。

应该指出，由于奥灰可溶岩经历了长期的后生改造作用，其岩石结构构造、岩相组合甚至化学成分，一定程度上已难以反映其原始面貌，相反它们一定程度上是岩溶作用结果的反映，亦即奥灰岩的这些特征一般情况下不能用以作为古岩溶发育的影响因素，但作为奥灰近现代岩溶发育影响因素无疑是正确的。这也是古岩溶与现代岩溶研究方法上的重要不同之处。

上述表明，本区巨厚奥灰可溶岩、长时间间断暴露、多期次构造及岩浆作用等为奥灰古岩溶发育奠定了良好的背景。

## 3 奥灰古岩溶作用分期、分类及岩溶岩分类

### 3.1 古岩溶作用分期

“引论”中已指出，古水文地质条件的恢复研究是古岩溶研究的基础和关键。古水文地质研究的内容一般包括以下四个方面：再现水文地质发展史，即划分水文地质期问题；再现各期次的古水动力场；再现各期次地温场或古地理环境；再现各期次地下水水化学场。其中水文地质发育史的再造是研究的基础和核心，若其不能客观、合理地重建，则必然会导致错误的结论。显然，水文地质期或岩溶作用的划分是至关重要的，是开展古水文地质研究或古岩溶演化研究的基础。

前苏联学者在古水文地质方面做了许多工作<sup>[110]</sup>，并以构造运动作为划分水文地质阶段或期的主要依据，提出了关于水文地质期的两种划分方法，即水文地质旋回和构造—水文地质期。关于这两种方法的不足之处汪蕴璞在文献<sup>[111, 112]</sup>中作了详细分析，并提出了分期的三种标志原则（地壳构造运动、古水文地质动力条件及地球物理场和地球化学场，其中前者是划分期的主要标志）和四种基本型式（沉积作用水文地质期、淋滤作用水文地质期、埋藏封闭作用水文地质期和构造作用水文地质期）。应该指出，上述分期都是针对某一地区的整个地史期而言的，并非针对某一时代地层。对同一时代地层的水文地质期划分尚需要深入研究该地层的地史演化过程；对于古岩溶研究，尚须特别注意它的开启和封闭程度。依据上述划分原则和方法并结合本区地质构造演化史可将奥灰含水岩系的演变过程或岩溶作用过程划分为6个水文地质期或岩溶作用期（表3-1）。对于奥灰古岩溶演化来讲为5个作用期。应该指出，在进行分期时，为研究方便，忽略或归并了一些小的作用期；在对“期”命名时，主要考虑岩溶作用的环境和构造因素。

#### 3.1.1 沉积岩溶作用期（沉积水文地质期）

本区从寒武纪开始地壳总体呈下降趋势。海水动荡剧烈，海侵范围广，持续时间长达132Ma（其中奥灰约47Ma），一直至中奥陶世才结束。沉积的巨厚海相碳酸盐沉积层为其后岩溶发育奠定了物质基础。沉积过程中由于海进、海退频繁，即有小的沉积间断发生或淡水混入改造，故有发育沉积岩溶或层间岩溶的可能。因此，无论研究奥灰地下水生成过程，还是研究奥灰古岩溶均应以奥灰沉积作用开始为起点。

#### 3.1.2 暴露岩溶作用期（淋滤水文地质期）

晚奥陶世至早石炭世末，华北地台整体抬升，奥灰进入淋滤水文地质作用期，该期持续时间约138Me，此间奥灰经历了一次大规模岩溶作用，原中生沉积水被大气降水渗入混合、交替，发展成为岩溶—孔隙型淡水。

#### 3.1.3 埋藏岩溶作用期（埋藏封闭水文地质期）

自中石炭世开始，华北地台整体下降，接受了中石炭世至二叠纪的沉积，奥灰进入埋藏封闭作用水文地质期。由于二叠纪后期发生的海西运动以上升为主，作用强度不大，从本区未见三叠纪陆相碎屑岩（本区西部钻孔见到的石干峰组时代归属尚有争议，暂将本区以缺失三叠系处理）来看，本期应发展至二叠纪末期，即持续时间约72Ma，由于古海水的渗入混