

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

岩 溶 研 究 进 展

中国地质学会岩溶地质专业委员会

张寿越 袁道先

我国岩溶类型众多,分布广泛。

在古代典籍中曾有许多关于岩溶的记载。系统记载岩溶的科学著述当属17世纪中叶明代的《徐霞客游记》,其内容包括岩溶形态、岩溶地貌、岩溶水文、洞穴等方面。

20世纪上半期,在辛亥革命以后,科学的地质学进一步在中国传播。丁文江、朱庭祜等在云南、贵州等地的地质调查中,注意了对岩溶地貌的记述。章鸿钊在《石雅》(1921)中列有石钟乳、石龙、含水石等条目,搜集了许多不同地点的洞穴中有关上述条

目的记载。

嗣后,一些在中国工作的外籍学者也曾发表过有关山西娘子关泉华成因、上房山云水洞等的论文。1931年出版的《地质辞书》中有“喀尔斯脱”及“喀尔斯脱轮迴”的条目。德日进、杨钟健、裴文中、张席禔等在《广西与广东的新生代地层》(1935)一文中详细记载了洞穴堆积并首次讨论了广西岩溶地貌发育历史。1936年高振西的《喀斯特地形论略》和马希融的《云南石林地形学上初步之观察》属我国学者首次讨论岩溶的专文,介绍了岩溶及各种形态的定义。前者讨论了岩溶的成因及与国民经济的关系和云南、贵州、广西的岩溶,后者通过云南路南石林的描述解释了其成因、演化,并对格隆特、斯威茨、代维斯等人的岩溶理论作了介绍。张文佑《广西的石林》(1943)一文对岩溶的分布、形态术语及斯维茨的岩溶旋迴观点作了介绍,详细讨论了广西岩溶的发育。1946年王嘉荫的《喀斯特地形之地质环境》讨论了广西岩溶形成的岩性、地质构造条件并结合我国情况予以论述,还介绍了南欧、北美、澳洲、缅甸等地的岩溶。在当时的学术活动中也有关于岩溶的内容,如黄秉维的《广西卡士特地形》等。

在20世纪前半世纪,进行了大量的岩溶与洞穴的新生代地层的调查和化石的发掘。首先是北京周口店龙骨山中国猿人洞穴,继而有广西、云南、四川等地的洞穴,均分别发表了专文,但以岩溶地形发展与演化方面的论文居多。至于理论研究及通过解决国民经济中提出的问题而撰写的论文,则为数极少。

1949年中华人民共和国成立以后,随着生产建设的发展,岩溶区的资源开发、水文地质工程地质问题陆续提了出来,这就要求在研究应用问题的同时对一些岩溶基础理论问题开展研究。同时,岩溶学科本身也提出了一系列问题要求解决。因此,岩溶研究便蓬勃地开展起来,在取得了丰富的基础资料以后,也逐渐建立起有关理论并形成了岩溶学。

中国岩溶区域研究

碳酸岩^①与碳酸岩系是岩溶作用的物质基础。

在辽阔的中国疆域内,碳酸岩系的分布面积达到五分之一以上,其中出露的碳酸岩系约占领土的八分之一。除了内蒙古、宁夏、黑龙江、吉林、福建、台湾等省(区)的分布极为零星以外,其余的21个省(区)均有较大面积的碳酸岩系出露。尤以湘西、鄂西、贵州、广西、滇东等地出露较为集中,在太行山区、鲁中及晋西北、昆仑山脉及青藏高原也有较大面积出露。

全国各个碳酸岩系分布的地区都已测制了地层剖面,不同程度地进行了岩石学与沉积学研究,并划分出岩溶层组类型。晚古生代碳酸岩系分布最为广泛。依据研究程度较高的中国东部地区资料,在不同地质历史时期各主要大地构造单位的碳酸岩系中钙含量具有随时代变新而增长的趋势,镁含量总趋势是逐渐减少,唯三叠纪略有变化。

碳酸岩系在诸营力综合作用下,结果是岩溶发育的状况具有地带性和非地带性。

从岩溶发育和分布规律方面来讨论诸种岩溶现象成因上的相似性和差异性。由于气候因素(纬度地带性、垂直地带性)基本上决定什么样的外营力作用居于优势,以及溶蚀作用在各项外营力作用中的地位,因此,地带性的(气候的)规律起着主导作用,按照气候因素划分为区域。

进一步区划按照大地构造单位,因为它反映地质历史中碳酸岩沉积相的发育状况及碳酸岩系遭受地壳构造变动的特征,亦即在岩溶层组类型、岩溶发育历史、碳酸岩体的间隙空间方面具有相似性。

最后一级区划根据岩溶地貌景观类型,因为它是内、外营力综合作用结果的反映。

中国科学院地质研究所岩溶学研究组根据上述原则将中国岩溶区域划分为4个岩溶地区,8个岩溶区及14个岩溶亚区。

南京大学地理系将我国岩溶按气候条件划分为热带、亚热带、温带三大类型及高寒地区和干旱地区的岩溶。按碳酸岩出露情况划分为裸露型、覆盖型与埋藏型。

地质部水文地质工程地质研究所按成因对中国南方部分地区划分为:溶蚀、侵蚀溶蚀、溶蚀侵蚀、构造溶蚀、溶蚀构造五种岩溶类型,并根据裸露与埋存情况、地质构造条件及地貌景观进一步划分。该所与南方许多省地质局水文地质队合作编制了东经102°~112°,南至国界及广东省界、北纬32°以南的包括岩溶化地层层组类型分布,岩溶(地貌)类型分布、岩溶水文地质等图件在内的百万分之一比例尺中国南方岩溶图系。

也有按岩溶水力特征将我国岩溶划分为渗流为主的北方型和管道流为主的南方型的。

地质部及基建工程兵所测制的岩溶区域1/20万水文地质图已完成多幅,提供了较为详尽的基础资料。

桂林、都安、洛塔、独山、普定、娘子关等小区

① 本文所称碳酸岩实指沉积碳酸盐类岩石——编者注。

域岩溶研究均陆续有研究成果发表。

岩溶学理论研究

岩溶理论研究在许多方面基于中国地质背景而具有特色,也由于与碳酸岩岩石学、沉积学、地质力学、地貌学等地学领域及化学、流体力学、水文学等非地学领域各学科相结合并互相渗透,从60年代以来已发展成为具有若干个小学科的岩溶学。

首先是对碳酸岩、碳酸岩系与岩溶层组类型的研究。随着碳酸岩岩石学的进展,已经从简单地讨论岩石化学成分、结构特征、岩层组合形式与岩溶发育的关系逐渐地深入到研究碳酸岩的组成及其岩相特征。选择或拟定适用于岩溶研究的碳酸岩矿物成分分类及结构~成因类型。由于碳酸岩相特征及其变化反映沉积环境及沉积条件,反映沉积以后地质历史时期的各种变化,而不同的碳酸岩相和不同的成岩变化在岩层组合方面具有差异性。根据碳酸岩成分和岩层组合特点可以划分为遵循着一定相带规律的剖面上具不同水文地质意义的岩溶层组类型。他们分别受深陆棚与海盆、台地边缘、台地三个大的沉积环境中各个碳酸岩相带的控制。它们在碳酸岩系岩性特征、陆源碎屑、生物群、次级沉积体、典型微相等方面均有其特征,具有一定分布规律。可据以对一定地层单位岩溶发育给予评价。

其次是天然水对碳酸岩溶蚀作用的研究。它包括一系列物理化学实验资料的引用和实验研究及理论解释,也包括岩溶发育各种因素的模拟试验及野外岩溶调查和动态观测。

引用物理化学实验资料对水中的碳酸、温度及 CO_2 分压对水中钙、镁碳酸盐矿物及岩石溶解的影响、溶液化学组分对其溶解碳酸岩能力的影响等均有专文讨论。对复杂和简单组分水溶液中温度对碳酸岩溶度的影响和不同水化学类型的天然水中碳酸岩的溶解曾进行实验,结果表明随温度上升而溶洞增加并于70~80℃时达到峰值。后一试验表明,在不同地球化学环境中,由于白云石和方解石溶解性能不同而使岩溶发育与演变不同,导致脱白云化作用或因碳酸钙的析出而将原有空隙充填或封存。

碳酸岩溶蚀试验指标反映溶蚀速度的大小,它主要受矿物成分的控制,灰岩类该指标高于白云岩类,不溶物含量低时对其影响不明显。泥晶碳酸岩具有较高的值,亮晶碳酸岩普遍为低值。碳酸岩溶蚀量包括化学溶解量及物理破坏量两部分,以前者为主,后者占溶蚀量的比例绝大多数在40%以下,取决于碳酸岩结构~成因类型。溶蚀指标的值不可直接用以评价岩

溶发育程度。

上述实验结果虽可用物理化学中关于溶液平衡、离子水化、溶液扩散、盐效应等理论阐明溶蚀作用实质,但由于天然水是极其复杂的溶液,还缺乏系统的实验和测定。因而许多问题未获得完满的解释,至于运用数学形式将溶蚀理论表达出来则差距更大。

第三、岩溶水文地质学与岩溶水文学。岩溶水文地质结构类型反映出剖面上岩溶层组类型与平面上为地质构造所控制的岩溶水动力单元的空间组合关系,具有补给、径流、排泄系统,是岩溶水力学计算及岩溶水文学研究基础之一。

因水文地质结构类型及排泄条件的差异形成具不同岩溶发育特征的岩溶水动力剖面,通常的岩溶水动力分带仅是一种特定形式。

岩溶水最基本的特征是分布的不均匀性,但此种不均匀性存在程度的差别。岩溶含水层与岩溶水特征与岩溶发育的方式、阶段和程度有关,为岩溶发育的诸影响因素所制约,统一地下水面与孤立水流是岩溶水不均匀性程度差异的两种形式,它们有时可共居于一个岩溶水文地质结构类型之中。

岩溶水力学的理论研究较为薄弱,但已从早期的稳定流方法逐渐发展为包括非稳定流方法、实验室模拟方法、数学地质方法等多方面的研究,建立并不断完善各种渗流的数学模型,大量引进数值计算方法并应用了计算技术,研究的问题已从二维发展到三维,从单一含水层发展到多含水层。

岩溶水文学研究也逐渐被重视,目前多应用水均衡方法及随机模型数理统计法研究。

第四、岩溶发育的地质构造背景。包括两个方面,其一是前已述及的区域性大地构造特征。对某一具体范围内岩溶发育而论则是地质构造现象或构造形迹的影响,主要是不同形态、不同性质的褶皱与断裂对岩溶发育的影响。地壳变形与破裂的特征,控制着岩体岩溶水动力单元的形式。而在一个单元内部则断层及裂隙是岩溶水运动的主要通道。然而不同力学机制的断裂,岩体破裂程度、破裂形式和充填情况差异很大,特别是碳酸岩中的断裂,常为方解石脉所充填,其水文地质意义也不相同。

运用地质构造现象的地质力学分析方法研究岩溶发育的方向、规模,确定径流带等已有许多实例。

第五、岩溶形态学及岩溶形态的形成演化。岩溶形态术语迄今没有统一,已分别提出不同的分类及命名方案。有的主张以形态特征为命名依据,有的持形态与成因相结合观点划分为属于地表及不同地下水动力带的溶蚀、蚀余、堆积、岩溶水文等类型,个体岩

溶形态的研究较薄弱。

岩溶形态的演化方向受新构造运动的性质所支配,在地壳隆起以后长期处于相对稳定地区,其演化在景观上遵循着一定顺序,成为一个岩溶旋迴的不同阶段,在近似气候带情况下,连续分布从地壳相对稳定逐渐到强烈隆起的区域所表现的岩溶现象与同一岩溶旋迴不同演化阶段的岩溶现象之间有着许多相似性。但岩溶地貌形态不能视为一个简单的连续的演化过程。

岩溶形态组合反映不同地带、不同阶段上岩溶发育的特点,构成岩溶地貌景观类型。

岩溶形态学定量研究仍然十分薄弱。

运用岩溶形态分析方法预测暗河的展布曾获得较好的效果。

深部岩溶类型划分及其成因机理已有专文论述,它受到水动力条件及水化学条件的影响。岩溶化程度随深度增加而逐渐减弱只是一般规律。

第六、岩溶发育历史与洞穴年代学。通常把新生代以前发育的岩溶称为古岩溶。根据目前研究程度,把代表与地壳历史发展过程中一个阶段的构造运动相适应的时期称为一个古岩溶时期。每个时期还有着许多沉积间断,分别发现了许多古岩溶遗迹,他们与沉积固体矿产及石油、天然气资源密切相关。

中生代末以来的岩溶发育历史可分为不同时期,有的地区表现为不同高程的残余地形面及洞穴。这些残余地形面上常有残余岩溶形态,如青藏高原上现已逐渐遭到破坏的第三纪热带森林。贵州高原在分水岭地带岩溶强烈发育,与从河谷到分水岭岩溶发育逐渐减弱的一般规律不相符合,也与残留地形面上从第三纪到今天岩溶持续发育有关。

第四纪以来的部分洞穴堆积中有化石可资确定堆积物时代。这些洞穴在一些地区常可与河流阶地对比,但在较广大范围内据此对比时应慎重。

第七、洞穴学问题。包括洞穴形态及其成因和演变、洞穴堆积、洞穴古生物与洞穴考古、洞穴矿物、洞穴水文、洞穴环境、洞穴生物、洞穴编录及洞穴勘探技术等方面。

在一些地区曾进行过一般性的洞穴普查与编录,少数洞穴作过详细调查。但迄今仍无确切统计数字。

洞穴古生物与洞穴考古研究深入。近年来对北京周口店龙骨山洞穴的综合研究取得了系统的成果。

洞穴学的其他方面或属空白或处于零星的资料积累阶段。

岩溶学研究的应用问题

中华人民共和国建立以前,岩溶地区的应用问题

研究有限,在国民经济中也曾处理过一些岩溶问题。如少数天然洞穴被用来设立工厂或仓库,勘查过三峡水力发电工程地质,华北泉水分布、成因及水质、水量以及泉水利用等问题曾有专文讨论。

50年代以来,由于国民经济建设的需要推动了岩溶研究,提供了岩溶区评价、改造、利用的依据。它们是:建筑物基础与天然洞室的稳定性;基坑与坑道涌水量的预测;水利枢纽区与水库区的渗漏;岩溶区土地利用及水资源评价与利用;石油及天然气的岩溶储集层;古岩溶固体矿产;文化旅游事业等。

水利电力建设、道路建设、矿山开采、工业及民用建筑等常常受到岩溶洞穴及岩溶水的危害,要求研究岩溶发育和分布规律。

在我国许多河流水利资源的开发中,岩溶问题常决定工程设施是否成立或影响工程效益和寿命。为此在长江流域、黄河流域、珠江流域的西江、北江等干流及他们的主要支流清江、乌江、雅砻江、红水河及其上游南、北盘江、柳江以及新安江、太子河等流域进行了岩溶调查研究。

在岩溶地区已建成一些大、中型水利水电工程,并进行了系统的总结。目前在岩城区修建最大的水电站是坝高167米,装机容量63万千瓦的乌江渡水电站。论证水库与枢纽区岩溶渗漏问题时,应该重点研究岩溶层组类型及岩溶化强度、河谷地质结构、地下分水岭及渗漏类型等。贵州猫跳河、广西龙江梯级开发的完成是典型的实例。

中小型水利工程在充分利用岩溶地形地貌及水文地质条件的基础上,通过工程措施修筑地表及地下水库或抬高地下水位已有大量的工程实践。总结出了一些有效的工程措施。它们可以归纳为:灌浆、铺盖、堵塞集中渗漏通道;修筑截水墙;设置排水(气)装置;围堵反复泉及落水洞;基础下的泉水导至库外等。

碳酸岩地区的道路建设尤其是修筑铁道的路基、桥梁与隧道时,常常遇到岩溶水的渗入、洞穴的崩塌及充填物危及工程进度及稳定性。在黔桂、川黔、贵昆、成昆、湘黔、襄渝等铁道干线的勘测设计,施工及运营期间进行了大量研究并获得了工程处理的经验,大巴山隧道施工中成功地作出了岩溶涌水的预报。

在自然或人工影响下,建筑物基础因地下水动力条件的变更常导致上覆松散沉积层中产生塌陷,已提出潜蚀、真空吸蚀、液化等方面的解释,研究了地基稳定性的评价及工程处理措施。广西桂林还根据稳定性分区作出土地利用规划。

天然洞室的利用不仅要研究其基础、侧壁及顶拱的稳定性,还有地下水及洞室环境改变所带来的问题。

许多沉积固体矿产与热液有色金属矿床的开发与岩溶密切相关。通过主要的岩溶充水矿床水文地质研究划分出其勘探类型,论述了他们的水文地质特征。实践检验表明,采用大流量、大降深,较长时间抽水,是目前解决孔洞~裂隙型及溶洞型岩溶充水矿床评价的可行办法。针对各种矿床水文地质勘探类型分别应用非稳定流数值方法、数理统计方法及岩溶水文学等方法预测涌水量进而考虑地下水的综合治理及开发利用。

丰富的岩溶水资源、岩溶储集层中石油和天然气的开采及岩溶洞穴中固体矿产的开发也要求研究岩溶发育和分布规律,充分利用其有利的一面。

岩溶水是一项重要的资源,其评价涉及岩溶水的赋存状态;岩溶水文地质结构;岩溶水的物理化学和水文地质参数;地下水的渗流场、温度场等规律;水圈中大气水、地表水与地下水的互相转化;开采的经济技术条件等方面,在上述研究的基础上选择合适评价方法。许多工矿企业均以岩溶水为供水水源,北京、天津、上海以及一些工业集中的地区,已经利用或拟开辟深部岩溶水源。岩溶水也是一种有发展前途的蓄能介质。

石油和天然气的岩溶储集层需要研究古岩溶发育和分布规律及其水文地质发展历史。它涉及岩溶发育时期古环境及与现代岩溶发育的对比;岩溶空洞充填物的形成及与深地层水的关系;水文地质发展历史分析与油气藏的形成与破坏,在我国东部油田及四川天然气田均开展了有关的研究。

金刚石、锡砂、辰砂等洞穴砂矿和洞穴磷矿以及铝土、铁等与古岩溶有关的层状沉积矿产具有重要工业价值,已有一些专文讨论,广西平果铝土矿为典型实例。

碳酸岩系中的“超低温热液”固体金属与非金属矿床,经研究与岩溶有关,如广西发现的碳酸岩系中方解石脉内的大型优质水晶矿床。通过长江中下游的矽卡岩型热液金属矿床研究,某些接触交代型矿床可能与膏盐层及其溶解形成的角砾岩在成因上有联系。

岩溶地区环境地质也逐渐受到注意,如通过暖亚热带南缘的广西弄岗岩溶区常绿季雨林带的综合考察,探讨岩溶区生态平衡问题。广西、贵州、云南、山东的一些城市对岩溶水动态观测和污染调查,提出了环境评价和防治措施,对岩溶水自净问题初步研究表明,碳酸岩可能作为工业废水的一种净化剂。

洞穴探查与岩溶研究测试技术

探测技术方面最广泛应用的仍然是电法勘探,取得了显著成效与经验。其他方法如无线电波透视、地质雷达、钻井摄影与电视、伽玛辐射、地震勘探、声波探测、航空及卫星照片、红外遥感及遥测技术等,已经不同程度地应用于岩溶研究,有的已初步取得效果。洞穴探险技术仍然很不完善。

岩溶地下水示踪技术除通常使用的荧光示踪剂、氯化钠、漂浮物以外,还应用了石松孢子。放射性同位素 I^{291} 、 Cr^{51} 、 H^3 示踪剂和离子示踪剂铵和碘等的应用也获得初步结果。

洞穴堆积物年代测定目前已使用的有 C^{14} 方法、不平衡轴系方法、矿物热发光方法、古地磁方法、裂变径迹方法等。前述方法对北京周口店中国猿人洞穴堆积的研究已获得初步成果。钟乳石液体包裹体的氧、碳稳定同位素比值及其古温度的确定已有报导。

岩溶地质模拟的研究目前主要是溶蚀试验。

天然水及碳酸岩的测试技术一般仍应用常规手段,某些专门研究中也应用了扫描电子显微镜等进行岩石学的微观研究。

计算技术目前主要应用于岩溶水力学方面研究对某些探测技术结果的数据处理。

为进行岩溶水文动态分析,在一些代表性地区建立了观测站,配备了水位、雨量自动记录装置,有的地区还开展了洞穴观测及暴雨效应观测。

岩溶与洞穴的探查和测试技术方面仍是比较薄弱的环节,需要加强以便深入研究岩溶作用的机制。

60年来岩溶研究已经从最初作为一种地形现象来描述逐渐深入到探讨其本质。特别是近30多年间,岩溶取得了迅速的进展,已发展成为一门独立的学科。但在岩溶地区的生产实践中,仍然存在一些薄弱环节,一是地质预测不准,二是由于岩溶化岩体内部结构的复杂性,岩溶水文地质工程地质评价缺乏切实可行的办法,三是缺乏一套适用于岩溶地区地形地质特点的探测技术方法。这些问题的解决不但有待于工作方法和测试手段的改进,而且也需要岩溶学某些基础工作和基础理论的深入研究,在这方面,岩溶地球化学、岩溶水运动模式,洞穴成因演化的研究,和引入沉积岩石学、地史学、构造地质学、地貌学等方面的最新成果,是值得认真注意的。岩溶不仅要求地质学、地理学的许多学科进行研究,还要求物理学、化学、生物学、技术科学及应用科学有关的许多学科参与研究并发展边缘学科。我国具有岩溶与洞穴研究的优越自然条件,在目前研究工作的基础上,在广大科学技术人员努力下,定能在岩溶学的主要领域继续作出应有的贡献。