

科技创新提升地质调查硬实力

——中国地质调查局岩溶地质研究所古岩溶研究综述



□ 本报记者 姜焕琴

时光追溯到1996年。彼时，地质行业正处于低谷时期，地质调查单位未来发展之路在哪里？地质职工的基本保障在哪里？一系列让地质行业困惑的问题，同样让当时的自然资源部中国地质调查局岩溶地质研究所（以下简称“岩溶所”）领导头疼不已。

变则通，通则达。在困境中，唯有求变，唯有不断创新才能走出一片新天地。自1996年始，在历届所领导的支持下，岩溶所碳酸盐岩油气研究团队以鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、塔里木盆地和四川盆地及南方下古生界碳酸盐岩中发育的古岩溶为研究对象，积极开展古岩溶（碳酸盐岩岩溶储层）研究，基本查明了碳酸盐岩油气田古潜山或不同期次沉积间断碳酸盐岩古岩溶发育特征，初步揭示了碳酸盐岩油气田岩溶储层形成控制因素，建立了不同成因的岩溶储层地质模式，不仅为碳酸盐岩油气田勘探与开发提供了重要岩溶地质基础，也为岩溶所指明了发展方向。

拓展研究领域 迎来发展曙光

上世纪90年代初，地质行业进入瓶颈期，时任岩溶所领导在求变中不仅为该所带来了发展曙光，也为岩溶地质事业培养了一大批急需人才。

为了寻求发展机会，时任岩溶所领导积极与中石油、中石化等有关公司、研究单位联系，争取碳酸盐岩型油藏古岩溶研究相关科研项目。上世纪90年代，夏日元等人开展了“九五”国家科技攻关项目专题“鄂尔多斯盆地中东部奥陶系风化壳储层溶蚀孔洞研究”和“九五”国家科技攻关项目专题“鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶特征研究”等，初步解决了科研资金问题，揭示了鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶储层形成机理，为长庆油田碳酸盐岩型油藏勘探、开发提供了地质依据。

为培养岩溶地质发展急需人才，上世纪90年代末期，岩溶所分别对中石化西北局勘探开发研究院、中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院等单位的100多名技术人员进行了多期岩溶地质理论培训，在不断壮大岩溶研究力量的同时，也为岩溶所的发展带来了新的契机。碳酸盐岩古岩溶研究团队于1999年~2001年分别实施了“黄骅坳陷周边奥陶系岩溶发育模式及坳陷区岩溶储层研究”“轮南潜山勘探目标区碳酸盐岩缝洞预测及其连通性模拟研究”等项目，构建了黄骅坳陷周边奥陶系岩溶发育模式，确定了轮南地区有利储层分布规律。

2001年~2005年，岩溶所与中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院、中国石化长庆石油勘探局进一步加强合作，碳酸盐岩古岩溶研究团队在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地分别实施了“干旱及潮湿环境下典型碳酸盐岩露头区缝洞系统特征研究”“鄂尔多斯盆地中央古隆起两侧下古生界岩溶古地貌及储层研究”等项目，初步构建了不同古岩溶缝洞类型结构模式，为塔里木盆地碳酸盐岩缝洞型油藏评价提供了岩溶地质理论依据。同时，岩溶所在桂林对中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院60

多名技术人员进行了4期岩溶地质理论、野外岩溶地质描述培训。

2006年~2010年，夏日元等实施了国家自然科学基金项目“碳酸盐岩储层古岩溶模式及其对油气藏的控制机制研究”、国家“973”项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”第一课题“碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究”等。期间，岩溶所进一步加强了与中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院合作，在桂林对中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院40多名技术人员进行了2期岩溶地质理论、野外岩溶地质描述培训。同时，梁彬等在塔里木盆地实施了“轮古地区岩溶储层分布规律研究”“轮古潜山+轮古7井区以东奥陶系古岩溶特征研究”等项目，初步形成了古岩溶地貌恢复与刻画技术等，为建立塔里木地区古潜山风化壳岩溶储层形成地质模型提供了理论依据。

2011年~2015年，在开展地质调查项目“雪峰山西侧地区海相油气地质调查”课题“雪峰山西侧岩溶储层的形成和分布规律研究”与“中上扬子重点地区岩溶储层形成及分布研究”工作期间，碳酸盐岩古岩溶研究团队开展了原国土资源部公益性行业科研专项“塔里木盆地古潜山奥陶系风化壳油藏岩溶储层预测”、国家“973”项目“地表和近地表条件下岩溶缝洞充填过程及机理研究”“轮南—哈拉哈塘地区奥陶系岩溶地貌特征及岩溶储层综合评价”“哈拉哈塘地区岩溶地貌特征及岩溶储层综合评价”“麦盖提斜坡岩溶体系与储层建模研究”“塔中Ⅱ区鹰山组层间岩溶储层展布规律研究”“塔河油田主体区碳酸盐岩缝洞型油藏古岩溶储层发育特征研究”等，初步建立了一套适合碳酸盐岩型油藏古岩溶研究方法，把岩溶垂向分带理论与古岩溶缝洞结构模式应用到了古潜山井下古岩溶研究，指导了碳酸盐岩型油藏勘探与开发。期间，岩溶所与中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院进一步加强合作，在桂林、贵州等地对中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院技术人员60多人进行3期岩溶地质理论、野外岩溶地质描述培训。2014年，岩溶所与中石油塔里木油田分公司勘探开发研究院签订了战略联盟合作备忘录。

2015年~2019年，岩溶所分别与中国石化西北局勘探开发研究院、中石化胜利油田分公司勘探开发研究院、中石油西南油气田分公司勘探开发研究院等单位合作，碳酸盐岩古岩溶研究团队在塔里木盆地、四川盆地、克拉玛依盆地分别实施了“顺北1井区奥陶系断溶体油藏岩溶特征研究”“四川盆地二叠、三叠系岩溶特征研究”“四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组岩溶特征研究”“蜀南地区茅口组岩溶储层发育机理与分布规律研究”“胜利西部排66火成岩储层岩溶作用研究”等项目，把在塔里木盆地碳酸盐岩油气藏古岩溶研究建立的研究方法、理论应用到了其他碳酸盐岩油藏盆地岩溶储层研究中，为建立碳酸盐岩油藏古岩溶储层地质模型提供了理论依据。

同时，岩溶所在桂林等地对中石化西北局勘探开发研究院100多名技术人员进行了4期岩溶地质理论、野外岩溶地质描述培训。2018年12月，该所与中石化西北局签订碳酸盐岩岩溶储层研究战略联盟。2019年与中石化西北局签订共建“岩溶地质实验基地”协议，并落实了2019年~2021年碳酸盐岩古岩溶

储层研究课题；与中石油塔里木油田分公司、中石化胜利油田分公司、中石化西北分公司达成合作意向，将开展“塔河奥陶系古潜岩储层发育特征及控因分析与测试”“胜利油田潜山油藏储层岩溶作用研究”“塔北、塔中地区碳酸盐岩断控岩溶储层形成机理与分布规律研究”等。

加强地质调查 摸清资源家底

随着生态文明建设的深入推进，我国油气资源需求日益增长，加强国家油气基础性、公益性地质调查，摸清资源家底，是时代发展的需要。自1996年起，岩溶所积极开展碳酸盐岩油气储层（古岩溶）调查研究，开拓了岩溶研究新领域，进一步了解了碳酸盐岩岩溶储层资源状况。

——西南地区海相碳酸盐岩油气岩溶储层地质调查面积约30×10⁴平方千米，对碳酸盐岩油气岩溶储层发育特征进行了调查，初步圈定4个碳酸盐岩油气有利远景区块。岩溶所对西南地区下古生界碳酸盐岩古岩溶作用背景、西南地区下古生界海相碳酸盐岩岩性组合特征及岩溶作用强度、西南地区下古生界海相碳酸盐岩岩溶缝洞系统发育特征、西南地区下古生界海相碳酸盐岩岩溶储层特征、西南地区下古生界海相碳酸盐岩岩溶储层形成机制与控制因素等进行了系统调查与分析，初步确定了西南地区下古生界碳酸盐岩岩溶储层有利层系及有利区块。

——在厘定碳酸盐岩型油藏古潜山界面沉积间断的基础上，进行了不同沉积间断类型的古岩溶地貌恢复，建立了不同地貌单元岩溶储层发育模式，为建立碳酸盐岩型油藏勘探与开发岩溶储层形成地质模型提供了理论依据。针对塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地碳酸盐岩型油藏的储油构造特点，在厘定碳酸盐岩型油藏古潜山面沉积间断的基础上，根据沉积间断面上覆、下伏地层特点，利用地震构造层位数据，采用印模法、残厚趋势面法、构造趋势面法或残厚趋势面与印模残差组合法等恢复了不同沉积间断类型的古潜山岩溶地貌，提出了相对应的古岩溶地貌类型划分指标体系，进行了二级地貌单元、三级地貌单元划分及岩溶古流域、古水动力条件刻画；建立了岩溶古地貌、地表河流、地下暗河等地震响应模式，提出了古滨海岩溶、古岛屿岩溶的概念，并在古岩溶地貌特征、古岩溶作用条件分析的基础上，建立了不同地貌单元岩溶缝洞（或岩溶储层）发育及控制机制。

——探索塔里木盆地三大隆起奥陶系风化壳古岩溶作用机制，建立了多旋回古岩溶发育演化模式，为岩溶储层空间分布分析提供了理论依据。塔里木盆地三大隆起存在早表生岩溶、裸露风化壳岩溶和埋藏岩溶三大类型，早表生岩溶发育于碳酸盐岩沉积成岩早期，是碳酸盐岩沉积初期由于海平面振荡式升降，岩层短期暴露，发生脱水干裂，受雨水冲刷和入渗、淋滤溶蚀产生的岩溶；裸露风化壳岩溶包括加里东中期和两西期两个期次，其中两西早期古岩溶作用最为强烈；埋藏岩溶为侏罗纪时期，阿克库勒地区进入拉张断陷盆地发育阶段，由于塔北隆起的整体沉降，岩溶系统转入埋藏、封闭环境，加上处于封闭环境，岩溶作用强度及规模远不及裸露阶段。

——初步查明了碳酸盐岩型油藏岩溶储层形成控制因素与岩溶储层分布规律，建立了不同岩溶垂向分带与油气关系，特别是利用表生岩溶带理论改变了开发并钻探方式，为碳酸盐岩油气勘探与开采提供了地质依据。以塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、四川盆地碳酸盐岩型油藏岩溶储层研究为对象，在钻井岩性描述、测井录井分析及地震解释的基础上，结合野外露头岩溶缝洞结构模式研究，利用古岩溶形成条件、古岩溶地貌类型、古岩溶形态特征及深岩溶作用机制等现代岩溶理论，研究古岩溶发育分布对油气储层的控制规律、古岩溶区域上分区差异性、垂向上分带性、时代分期性，并对下岩溶缝洞进行了垂向分带划分，即表层岩溶带、垂向渗透溶蚀带、径流溶蚀带、潜流溶蚀带。同时，对各带岩溶缝洞形成机理及控制因素进行了深入研究，认为岩溶层组、古岩溶地貌、古水系及古断裂构造共同控制岩溶储层的发育，建立了岩溶古地貌、地表河流、地下暗河、滨岸岩溶带及岩溶岛屿岩溶缝洞地震响应模式。

——开展了碳酸盐岩油藏岩溶储层岩溶缝洞精细刻画，对岩溶缝洞充填及演变进行了深入研究，认为岩溶缝洞发育规模、缝洞连通性及充填演变特征对岩溶油气藏具有明显控制作用。对碳酸盐岩岩溶缝洞的研究主要包括4个方面：一

是岩溶缝洞类型特征与成因研究；二是岩溶缝洞发育分布规律研究；三是岩溶缝洞型储层物性关系研究；四是碳酸盐岩岩溶储层建模（即岩溶缝洞模式研究）。对岩溶储层岩溶缝洞精细刻画主要包括以下几个层次：一是岩溶缝洞特征的观察与描述，主要是通过露头区与岩芯观察，研究缝洞的产状、组系特征、发育程度、成因表征、充填状况与发育规律等；二是岩溶缝洞识别，利用钻、录井资料、常规测井资料、常规地震资料以及裂缝测井资料等识别裂缝；三是岩溶缝洞系统预测，利用地震、测井、构造应力场模拟等方法均可以进行缝洞预测。

——通过露头区岩溶缝洞调查、井下岩芯地质描述以及测井和地震资料综合分析，建立了六大类10种缝洞系统发育模式，为岩溶储层形成地质模型的建立提供了理论依据。根据塔里木盆地海相碳酸盐岩缝洞系统发育特征及其与油气储集关系的差异，将缝洞系统分为地下河系统型、岩溶洞穴型、溶蚀孔洞型、溶蚀缝型、礁滩溶孔型和白云岩孔洞型六大类型，其中，地下河系统型又划分为单支管道、管道网络和构造廊道3个亚类；岩溶洞穴型又划分为厅堂型、竖井型和溶洞型3个亚类。

——建立了鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古岩溶与油气富集关系。鄂尔多斯盆地古岩溶成因类型可分为表生和埋藏两大时期，在古岩溶地貌恢复的基础上，不仅分别建立了古风化壳垂向岩溶发育模式、埋藏期压释水岩溶发育模式，还建立了鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳古岩溶与油气富集关系：岩溶台地区发育的垂向型岩溶规模较大，风化壳的厚度中等，以溶洞型、断裂型和埋藏热水岩溶型储层为主，非均一性较强；岩溶坡地处于地下水强径流带，以稳定性较好的层状溶蚀孔洞型储层为主，风化壳的厚度较大，是天然气富集的最有利区；岩溶盆地地地下水排泄区，垂向渗透带和深循环带的厚度较薄，水平径流带的厚度相对较大，储层物性总体变差。岩溶盆地中的残丘部位岩溶发育的条件较好，主力气层保存完整，仍有较好的储层区块；岩溶坡地与岩溶盆地的接触部位为水动力转换带，岩溶作用强烈，为储层有分布带；树枝状沟槽网络的发展控制了气藏的分布和天然气的富集区。

——提出了黄骅坳陷奥陶系古岩溶发育演化模式及其与油气富集关系。黄骅坳陷奥陶系古岩溶经历了3个演化阶段，具有7种发育模式，每个阶段古岩溶均强烈发育的叠合区为最有利的发育区。第一阶段为加里东晚期—海西早期，发育了向斜翼部侵蚀洼地排泄型和向斜轴部山间洼地排泄型古岩溶，建立了加里东晚期—海西早期古岩溶发育模式，即向斜翼部侵蚀洼地排泄型模式；第二阶段为印支—燕山早期，具有溶丘洼地裸露型和断陷盆地浅埋藏型两类古岩溶，建立了印支—燕山期古岩溶发育模式，即裸露溶丘洼地型模式、浅埋藏断陷盆地型模式；第三阶段为燕山晚期—喜山期，发育了倾斜式断块压释水岩溶、深埋褶断凸起释水岩溶和深大断裂带高位掀斜断块水岩溶，建立了燕山晚期—喜山期古岩溶发育模式，即倾斜式断块压释水岩溶模式、埋褶断凸起释水岩溶模式、深大断裂带高位掀斜断块水岩溶模式。

——初步建立西南地区碳酸盐岩与页岩气成藏关系，为解决南方页岩气勘探与开发中的页岩气成藏碳酸盐岩岩溶控制问题提供了地质理论依据。我国南方古生界暗色页岩与碳酸盐岩互层发育是南方地区古生界的基本地质特征，因此在南方古生界开展页岩气勘探开发，既要考虑碳酸盐岩对页岩气成藏、开采、钻井施工等的影响，又要考虑碳酸盐岩本身成藏条件。2019年，岩溶所地质调查项目“南方重点地区1:5万页岩气地质调查（岩溶所）”“贵州凯里—都匀地区页岩气地质调查（岩溶所）”实施了贵都地1井、鄂阳地3井页岩气—岩溶地质条件勘探工作，调查、勘探工作均取得重要成果，基本查明研究区近地表碳酸盐岩分布特征及岩溶发育特征、页岩气目的层与目的层底板碳酸盐岩成藏条件，专报《雪峰山西缘页岩气调查取得重要进展》（第10期）得到中国地调局的肯定。

斩获丰硕成果 保障能源安全

自上世纪90年代，岩溶所先后完成国家973项目课题、国家自然科学基金、原国土资源部行业专项及中石油、中石化科技项目共计30多项。该所始终坚持地质调查工作公益性、基础性、战略性的定位，不断提高资源勘查与开发科研创新，积极将现代岩溶理论应用于碳酸盐岩油气藏古岩

溶储层研究，支撑和服务于碳酸盐岩油气藏勘探与开发，取得了一系列重要成果。

——建立一套碳酸盐岩油气田古岩溶储层研究方法，对碳酸盐岩油气藏勘探与开发具有重要指导意义。以鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和塔里木盆地、四川盆地及南方下古生界碳酸盐岩中发育的古岩溶为研究对象，采用古地貌成因组合分析法、古水动力相关分析法、地球化学分析、类比分析法、综合地球物理探测方法以及岩溶储层介质结构定量评价和预测等技术手段，建立了一套适合碳酸盐岩油气藏的古岩溶研究方法—岩溶成因组合分析法，掌握了古岩溶的形成条件、影响控制因素及其与油气富集关系，识别出了多种岩溶储层成因类型，建立了碳酸盐岩岩溶储层形成与演化地质模式，实现了对油气聚集有利岩溶储层的预测，在岩溶型储层成因机理和空间分布规律研究方面取得了重要新进展。

——实现5项古岩溶储层研究科技与理论创新，为碳酸盐岩油气田勘探、开发提供技术与地质理论依据。一是古岩溶地貌恢复与刻画技术。利用多种古地貌恢复方法，恢复了不同沉积间断类型的古岩溶地貌，提出了相对应的古岩溶地貌类型划分指标体系，进行了岩溶地貌单元划分及古水文条件刻画，建立了不同地貌单元岩溶发育模式。二是建立了古岩溶垂向分带理论。以现代岩溶理论为指导，根据岩溶垂向发育特征与岩溶地下水运动方式，建立了岩溶垂向分带，即表层岩溶带、垂向渗透溶蚀带、径流溶蚀带、潜流溶蚀带。不同岩溶带岩溶缝洞发育特征与充填演变具有明显差异，表层岩溶带、径流溶蚀带岩溶储层相对发育。三是岩溶储层古岩溶缝洞结构模式建模技术。通过现代岩溶缝洞及古岩溶缝洞发育特征调查与描述，结合井下岩溶缝洞岩溶缝洞发育特征，建立了古岩溶缝洞结构模式，即缝洞主体、缝洞顶破碎带、缝洞边破碎带、缝洞间破碎带、缝洞底破碎带，并对各结构带进行了描述。四是岩溶储层形成地质模型建模技术。通过现代岩溶地质野外调查与井下古岩溶对比，以岩溶动力学理论为指导，提供了古岩溶地貌恢复与水动力条件刻画，分析了岩溶储层形成控制因素，建立了不同古地貌条件下岩溶发育结构模式及岩溶储层形成地质模型。五是岩溶储层有利区块评价与预测理论。初步查明了碳酸盐岩油气藏盆地岩溶储层分布规律，建立了岩溶储层评价指标体系，并对各碳酸盐岩油气田有效区块进行了预测与评价。

——揭示碳酸盐岩储层古岩溶演变规律，支撑和服务碳酸盐岩型油藏勘探与开发。掌握了古岩溶型油气储层发育与分布规律，建立了塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和黄骅坳陷奥陶系古岩溶发育演化模式。特别是塔里木盆地碳酸盐岩古岩溶储层研究，以埋深5000米~6000米的奥陶系古岩溶地貌、岩溶储层研究成果为指导，指导部署10余口油气高产井，为塔河油田二次开采增产提供了技术支持。

——建立了一支优秀的碳酸盐岩油气田岩溶储层研究团队。通过20多年的碳酸盐岩古岩溶储层研究，建立了一支优秀的碳酸盐岩油气储层研究团队，培养博士研究生8人、硕士研究生10人、油气地质科技骨干12人。同时，为中石化西北局分公司、中石油塔里木油田分公司、中石油西南油气田分公司勘探开发研究院培训了200多名技术人员，提高了我国碳酸盐岩油气藏勘探与开发技术水平。

经过20多年的探索，岩溶所掌握了岩溶型油气储层发育与分布规律，为岩溶研究开拓了新领域，分别建立了塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、黄骅坳陷奥陶系古岩溶发育演化模式；探索了碳酸盐岩古岩溶识别方法，揭示了古岩溶对油气聚集的控制规律；2015年获“一种地貌恢复方法和装置”专利，“一种碳酸盐岩溶蚀过程模拟试验装置”专利；“碳酸盐岩缝洞系统模式与成因研究”获2013年国土资源科学技术奖二等奖；“塔里木盆地古潜山奥陶系风化壳油藏岩溶储层预测”被评为2017年度部行业专项十大优秀成果。

在谈到下一步工作时，岩溶所有关负责人表示，将积极申请国家科研项目，加强与中石油、中石化有关科研单位的合作，选择不同类型大中型含油气盆地，开展古岩溶和油气资源综合调查和研究，进行碳酸盐岩储层古岩溶控制机制与储层潜力评价，为国家油气战略决策提供科学依据，指导油气勘探部署。

世上没有绝望的处境，只有对处境绝望的人。面对发展之艰，岩溶所一步一个脚印地走，一棒接着一棒地干，坚持业务发展与人才发展同步，最终创造了属于自己的精彩！□

