
项目名称： 中国南方古生界页岩气赋存富集机理和
资源潜力评价

首席科学家： 肖贤明 中国科学院广州地球化学研究
所

起止年限： 2012. 1-2016. 8

依托部门： 中国科学院

二、预期目标

1. 总体目标

针对我国南方古生界页岩的地质地球化学特点，重点突破与页岩气评价与资源潜力预测有关的关键科学问题，建立页岩气赋存、富集、成藏的理论体系。提出适合我国南方古生界页岩气评价的指标与方法，客观评价页岩气资源潜力资源，确定有勘探开发潜力的主要页岩层位，为我国南方古生界页岩气勘探开发提供方法基础与理论指导。力争在评价指标与方法上有创新，在理论体系上有突破，在实际应用方面有针对性。通过本项目的研究，造就一支从事页岩气研究的高水平科研队伍。

2. 五年预期目标

(1) 建立有机质特性、成烃演化与页岩气形成的关系；建立粘土矿物和脆性矿物类型与沉积、成岩作用的关系，提供页岩气有机微孔和无机微孔（粒间孔、粒内孔等）预测的模型；建立有机质热演化与页岩气生成量和保存量的地质演化模型；揭示纳米级孔隙结构与页岩气赋存富集的关系，揭示页岩气的赋存机理，阐明深层页岩气赋存状态和转化特征及其与深层页岩气形成的关系，建立盆地深层页岩在温压平衡/非平衡体系下的吸附和解吸附模型；量化各种地质地球化学因素对页岩含气性的控制作用，揭示页岩气形成的控制因素，建立页岩气赋存富集的地质地球化学理论。

(2) 揭示南方古生界盆地构造演化和沉积埋藏史，结合大地热流模型反演盆地的古地温演化历史，建立南方古生界盆地构造-热演化模型；揭示构造抬升条件下页岩气储层物性的响应特征和含气性变化机制，探索多期构造变动条件下页岩气藏发育的有利构造区位；揭示构造应力场对页岩裂隙形成发育的影响，建立构造改造页岩气散失的定量模型；揭示后期构造的成因机制及对古生界盆地的叠加、破坏与改造程度，阐明页岩气保存的构造条件。为构造改造区页岩气的评价提供理论与开发基础。

(3) 建立适合我国南方古生界页岩气资源潜力的评价指标与方法，圈定有勘探开发潜力的页岩层，分层位、分地区、分埋深评价页岩气资源潜力，预测有利勘探地区。以南方古生界典型区块为靶区，揭示页岩气成藏动力特征及其对页

岩气成藏演化的控制机理，揭示页岩气成藏系统“源岩—储层—盖层”组合规律性，构建基于能量平衡理论和油气系统理论为基础的页岩气藏成藏富集规律。发展中国南方古生界页岩气富集成藏地质评价与勘探理论，形成本土化页岩气勘探评价技术方法。

（4）本项目研究成果的表现主要有两个方面：发表一批与页岩气评价与勘探相关的基础性高水平学术论文，参加页岩气相关的国际学术会议，报告我国在页岩气赋存机理与评价方面取得的重大进展。预期发表论文 100 余篇，其中 SCI / EI 论文 50 - 60 余篇。提交我国南方古生界页岩气资源潜力评价报告及相关图件，为国家勘探开发南方古生界页岩气提供科学依据。

（5）培养和造就一支从事页岩气基础研究和应用基础研究高水平的科研队伍，培养硕士、博士研究生和博士后研究人员 30 名左右

三、研究方案

1. 学术思路

我国南方古生界页岩气赋存富集机理与资源潜力评价涉及到非常复杂的理论与实际问题。本项目依托中国科学院、中国海洋石油总公司、教育部有关高等院校的参加单位的研究力量与技术条件，**抓住关键科学问题，围绕国家需求，组织优势团队开展研究。**本项目从我国南方古生界页岩的地质地球化学特点入手，通过对页岩的含气性评价与主控因素、保存条件与含气性关系、孔隙结构与储气机理等方面研究，建立页岩气形成、赋存、富集成藏的地质理论。在此基础上，研究页岩气的评价指标与方法，建立页岩气资源潜力评价理论体系，并对中国南方古生界页岩的资源潜力进行评价。结合实际勘探，进一步评价扬子地区典型区块古生界页岩气的勘探潜力，圈定页岩气的有利勘探开发区。

2. 技术途径

针对本项目主要研究内容与目标，按 6 个方面实施。

(1) 页岩气形成与含气性的影响因素

选择我国南方典型区块古生界页岩，通过实验室成烃模拟、钻井页岩样品含气量测量和地球化学分析，量化各种控制因素对页岩气含气性的影响。具体技术途径为：

①开展各种地质样品的气体化学组成和碳、氢同位素地球化学分析，包括气体录井、新鲜岩石密封脱气、岩石密封破碎脱气，获得吸附气和游离气的地质记录；结合热解模拟实验，获得气体成熟度与页岩气保存量的关系。

②开展 TOC、Rock-Eval、GC-MS、碳同位素等有机地球化学实验分析，获得页岩样品有机质丰度、类型和成熟度；开展岩石学观察、矿物组成分析、孔隙度和渗透率分析，获得页岩含气性与有机质特性、无机矿物组成、孔隙度和渗透率的关系。

③开展岩石气体保存量分析，获得页岩样品中气体的保存量与有机碳含量、成熟度、矿物组成的关系；结合有机质生气量热解模拟、页岩润湿性模拟，获得温度、压力、地层水和矿物组成等诸因素对页岩气形成的控制，建立评价页岩气保存的理论模型和方法。

(2) 页岩微孔缝结构与页岩气赋存富集

以钻井岩心、露头剖面和录井资料为基础，采用微观和宏观相结合的方法，重点解剖中海油的页岩气区块的储层特征。

通过压汞、液氮微孔结构、扫描/投射电子显微镜、等温吸附实验、含气量测试和岩石静三轴试验等分析技术，从页岩微观孔裂隙（特别是纳米级孔隙）特征入手，分析页岩气储层的微观孔裂隙结构及吸附特征，研究控制纳米级孔隙结构的主要因素，研究页岩气储存的状态，从而建立页岩气的赋存机理。

通过研究构造演化－沉积埋藏－烃源岩演化－生气作用－地下流体以及构造应力－热力－流体化学－流体动力等“五史”“四场”配置关系，解析构造活动相对稳定期与改造期对页岩微孔缝结构的影响作用及其对页岩气赋存机理的控制作用。

在上述研究基础上，从页岩基块弹性能、气体弹性能和水体弹性能等储层弹性的多种表现形式着手，研究能量动态平衡系统的演化过程，以能量动态平衡理论和油气系统论为基础，研究页岩气系统的生－储－盖组合特征，探讨页岩气富集规律。

(3) 构造演化与页岩气的改造和保存

从盆地的形成演化历史出发，突出对构造改造的反演和对盆地热史的恢复，抓住构造抬升过程中温度和压力条件的变化对页岩气藏含气性能的影响和吸附-解吸附机理等关键问题开展工作。

在构造演化方面选取上、中、下扬子的典型盆地或者区块进行解剖，通过详细地表调查考察盆地地层序列、沉积充填史、构造特征等，揭示盆地类型及形成的动力学背景；通过地震资料解释、构造平衡与恢复、物理及数值模拟等方法深入研究典型盆地剖面，确定其各个时期的沉积环境、变形特征、构造演化与成因机制。在对盆地的形成与改造以及原型盆地恢复研究中，通过对区内代表性盆地的边界断裂、盆内变形形迹、应力场分布特征等分析，分析其形成时间、构造性质和属性、多期演化及时空差异；研究早期构造对盆地形成与演化的制约以及后期构造的成因机制与对下古生界盆地的叠加、破坏与改造。

在区域热演化史研究方面,选择典型地区、以 2-3 个典型井位或剖面为基础,恢复古地温梯度,结合沉积、构造和岩浆活动历史分析,分析盆地古生界埋藏史和热演化史,结合构造演化,建立构造-热演化模型。

在构造抬升对页岩气含气性能影响研究,将借鉴煤层气的相关理论和不同成熟度页岩的吸附模拟实验及数值模拟等手段,从页岩储层在构造抬升过程中异常压力的成因机理入手,通过构造抬升过程的定量模拟研究,分析储层压力在整个构造抬升过程中的动态演化过程,评价构造抬升造成的页岩气散失;通过模拟压力变化,研究构造演化过程对页岩吸附量和饱和度的影响。

(4) 深层页岩储集物性及含气性

针对盆地深层高温压条件,主要通过模拟实验,结合地质样品,对比研究深层页岩有机质和粘土矿物显微孔隙结构、孔隙率、页岩气赋存状态及随压力梯度的变化,研究水、CO₂、烃类与矿物的反应及对储集物性的影响,评价深层页岩的含气性。具体技术途径如下:

① 运用 Paterson 气体介质高温高压流变仪,结合高压原位 Raman 和高压原位同步辐射角色散 X 射线衍射仪,研究高压-超高压状况下页岩干酪根和粘土矿物组成等岩石物性特征和随压力梯度的变化;

② 通过系列模拟实验研究深层高温高压条件下页岩烃类与无机成分之间的后成岩反应等对岩石储集结构的影响、以及超临界流体对甲烷吸附容量的影响。

③ 运用高压-超高压吸附仪研究不同类型页岩、页岩干酪根、粘土矿物、页岩微裂缝隙等储集结构的甲烷气体吸附解吸附性能,建立压力范围在 200 至 700 bar 页岩不同组成单元甲烷气体吸附解吸附性能和等温吸附平衡曲线,以此来模拟研究 2000 至 7000m 埋深范围页岩气吸附和脱附性能。

④ 通过不同系列页岩和干酪根样品的吸附实验,研究高温高压条件下页岩气的赋存形式及其随压力梯度的变化。

(5) 南方古生界页岩气资源潜力评价

研究工作分四步实施:

① 通过国内外文献资料调研,对比分析主要页岩气资源潜力评价方法的特点及应用条件;研究我国南方古生界页岩的地质地球化学特点,从地质与地球化学等方面与美国页岩气盆地进行对比,优选适合的资源潜力评价方法。

② 确定页岩气评价的限定指标,包括 TOC 下限, Ro 范围、页岩最小厚度等一系列参数。主要是根据本项目相关研究成果及页岩气含气实际分析数据,结合国外勘探开发实际数据与经验,有针对性的提出上述各项限定指标。

③ 确定有页岩气资源潜力的页岩的地质地理分布。对我国南方古生界页岩的展布与地球化学成熟有大量的研究成果,可作为面上资料,再选择几个有代表性的剖面进行精细的地质地球化学分析,从点到面圈定有效的页岩分布。

④ 页岩气资源潜力评价。根据优选适合的资源潜力评价方法、确定的地球化学限定指标、页岩典型含气数据,模拟计算页岩气总资源量、不同时代地层(上二叠统暗色页岩、下志留统暗色页岩、下寒武统)页岩气资源量、不同区块、不同埋藏深度页岩气资源量,预测有利的勘探开发区。

(6) 南方古生界典型区块页岩气勘探潜力评价

本项目选择的典型区块是中国海洋石油总公司获得的上、下扬子古生界页岩气区块。按如下技术途径开展研究:

① 以现有和新采集的地震资料为基础,结合典型野外地质剖面的详细调查,综合应用钻井、测井、地震、地质和分析化验资料,研究上扬子区古生界页岩形成的构造背景、沉积演化特征及其控制因素,构建南方古生界典型区块重要构造事件背景下层序地层格架中的黑色页岩发育模式,揭示沉积环境与页岩发育的关系,明确典型区块页岩分布范围和厚度及各层段分布规律。

② 运用 X—衍射、阴极发光、扫描电镜等分析技术,查明页岩矿物组成、组构特征、变质程度、孔隙结构特征和储集空间类型和分布特征;通过岩石力学测试并与高分辨/微地震资料、测井资料相结合,揭示裂缝发育规律及成因机制,通过与美国页岩气储层特点比较性研究,建立页岩储层缝孔识别技术方法和评价标准;结合所获得的点面资料,评价页岩储集特点,预测高效页岩储集分布。

③ 以课题 1—5 提炼的页岩气评价的理论与方法为指导,从页岩有机质丰度、热演化、厚度、埋深、页岩强度、页岩储层的结构及页岩吸附气量等方面,评价资源量和勘探潜力;综合上述相关资料,进行页岩含气量分布的工业成图,圈定页岩气富集区带,进而确定勘探靶区;

④ 在上述研究的基础上,可进一步根据钻探需求,在有利的勘探靶区,开展页岩气层测井评价和高效测试方法的先导研究。

3. 可行性分析

页岩气赋存于烃源岩中,属于残留烃,页岩气评价与烃源岩评价具有相似性,但各有侧重。根据美国页岩气多年勘探实践,地球化学方法(尤其是有机地球化学方法)是页岩气评价的基本方法。中国科学院广州地球化学研究所、南京大学、兰州大学、中国科学院地质地球物理研究所兰州油气研究中心等项目参加单位在石油天然气地球化学、岩石矿物地球化学方面具有国内领先的科研设备,可作为页岩气的研究的基本条件。页岩气的储集空间主要是纳米级孔隙,吸附态气的赋存机理非常类似于煤层气。评价其含气性、研究其赋存富集机理,需要专用的仪器设备。中国科学院广州地球化学研究所在“十一五”期间,在实验平台上进行了前沿性布局,引进并改造了 PCTPro-E&E 高压气体吸附分析仪(法国),建设了先进的生烃、排烃动力学实验室。中国矿业大学是我国研究煤层气综合实力较强的实验室,拥有研究页岩孔隙结构与储集特性分析的设备,如: 9310 型压汞微孔测定仪、Autosorb-1 型比表面积孔径测定仪、剪力仪(SJ-1A)、岩石高频谱测试仪(TH8201)、自主研发的岩体三轴试验机。此外,项目课题组还将自行研制可施压高达 70MPa 的气体吸附仪,用于深层页岩含气性研究。这些专有仪器设备为本项目在页岩气赋存富集机理研究方面取得突破提供了重要的技术条件。

项目承担单位中国海洋石油总公司在扬子地区获得了页岩气矿区权,并已着手部署地震资料采集,启动先导性实验,计划 2011-2012 年内钻 5-8 口探井配套开展相关的综合研究,建设先导性实验基地,是本项目研究的示范地区。2010 年中海油分别对 Chesapeake 公司 Eagle Ford 页岩和 Enduring 公司 Eagle Ford 页岩油气等项目进行了评价,并购入 Chesapeake 公司 Eagle Ford 页岩油气项目(Eagle Ford Shale Project)共 33.3%的权益。为开展与美国页岩气盆地研究提供了条件。项目其它各参加单位,在四川盆地生烃、成藏研究方面有多年的研究历史,积累了大批古生界烃源岩样品与相关分析资料,并可通过项目合作、露头剖面等多种方式进一步获得为本项目所需的样品与资料。因此,本项目对于我国南方古生界页岩气的研究具有获得样品与相关地质资料的条件。

本项目由中国科学院广州地球化学研究所、中国海洋石油总公司下属的研究中心与湛江分公司、南京大学、兰州大学、中国矿业大学、中国科学院地质与地球物理研究所、中国石油大学(北京)等单位共同承担,组成了一支精干的团队。具有开展页岩气基础理论与方法研究的实力。

因此，本项目凝炼的科学问题准确，承担单位具备开展相关工作的条件，有相当好的前期工作基础，具备取得重大突破的关键条件，可望在我国南方古生界页岩气赋存富集机理与资源潜力评价的基础理论研究方面取得重大突破。

4.创新与特色

本项目的研究内容紧密围绕与我国南方古生界页岩气资源潜力评价相关的关键科学问题，具有国际前瞻性，并体现中国本土特色；在技术思路上，紧抓重点，采用多学科结合，具有明显的创新；在研究方法上，将采用各种先进分析技术手段，结合自主研发技术，形成本项目的技术优势。本项目的创新与特色具体说明如下：

（1）我国南方古生界页岩有机质热演化程度很高（ R_o 一般在2% - 4%），主体超过了美国页岩气盆地的成熟度范围（ R_o 一般在1% - 2.5%），而且受到印支、喜马拉雅期构造运动的强烈改造作用。这种经历多期构造运动和高演化状态下的页岩的储集性能、含气性特征及其成因机制在国内外几乎未涉及，而这些问题是我国南方古生界页岩气资源潜力评价必须解决的关键科学问题。开展复杂构造改造条件下页岩气的保存研究，针对了我国南方古生界的特殊性，将丰富页岩气形成与保存的地质理论。

（2）开展深层（3000 - 7000m）页岩含气性相关研究是目前国际上尚未广泛开展领域，对于我国南方古生界页岩气资源潜力评价及勘探开发有潜在的实际应用价值，研究目标和内容不仅具有国内领先性，也是国际前瞻性的研究课题。

（3）采用多方法、多手段综合描绘富有机质页岩纳米级孔隙类型、孔隙度渗透率与有机质特性、无机矿物组成的量化关系，为页岩气气藏描述提供了理论与方法。这方面的研究在国外刚刚起步，在国内具有领先性。

（4）在技术手段方面，本项目具有明显特色与先进性。如：使用自主研发的生排烃动力学实验装置，模拟页岩气的生成与保存；应用高分辨扫描电子显微镜、透射电子显微镜、压汞微孔测定仪（9310型）、比表面积孔径测定仪（Autosorb-1型）、剪力仪（SJ-1A）、岩石高频谱测试仪（TH8201）测定页岩孔隙（包括纳米级孔隙）结构特征、研究页岩气赋存机理；应用自主研发的岩体三轴试验机，模拟页岩渗透性，模拟页岩气系统中能量动态平衡，探讨页岩气富集规律。此外，本项目正在研发的超高压气体吸附仪（温度可高达200℃，压力可达70MPa），可

模拟深层页岩甲烷气体吸附/解析附行为；应用自主研发的紫外灯电离源飞行时间质谱仪(烃类检测精度可达 40ppb)经进一步改进可进行游离烃在线定量测定，剖析页岩气赋存机理；应用 U-Th/He 低温热年代学技术，恢复盆地受热历史。这些技术手段的综合,形成了页岩气研究的先进技术平台。

5. 课题设置

根据上述总体研究思路和技术路线，围绕拟解决的关键科学问题、主要研究内容和总体目标，本项目共设置了 6 个课题。

课题一：页岩气形成与含气性的影响因素研究

研究目标：建立气体组成、页岩含水饱和度、温度和压力与气体保存量的关系，提供页岩气保存量的地质模型；建立有机质特性、成烃演化与有机质纳米微孔形成的关系，提供页岩气生气强度模型；建立粘土矿物和脆性矿物特性与沉积、成岩和成烃作用的关系，提供页岩气保存方式（游离、吸附）模型；结合页岩气生成量、保存量和保存方式模型，量化各种因素对页岩气含气性的影响，为页岩气原地气体保存量预测提供方法和理论依据。

研究内容：以我国南方古生界页岩气主控因素为核心科学问题，重点开展四个方面的研究：① 气体成因、来源和组成对页岩含气性的影响，包括古生界富有机质泥页岩气体地球化学特征；气体录井、新鲜岩石密封脱气、岩石密封破碎脱气与页岩气保存量研究；富有机质页岩生气量模拟研究；吸附气和游离气的地质记录研究；② 有机质特征对页岩含气性的影响研究，包括古生界富有机质页岩有机地球化学特征；富有机质页岩生气史分析；富有机质泥岩页岩纳米级孔隙形成与成烃演化；③ 矿物对页岩含气性的影响研究，包括古生界富有机质泥岩矿物成分、岩石类型及来源研究；富有机质泥岩孔隙度、渗透率和矿物组成的关系；④ 页岩含水性对页岩气保存的影响研究，包括湿度、温度和压力对富有机质页岩对气体的吸附模拟；干酪根（疏水单元）和粘土矿物（亲水单元）润湿性；气体吸附与孔隙大小和结构关系研究；在综合的基础上，量化各种控制因素包括有机质的丰度、类型和热成熟度、粘土矿物的类型、脆性矿物的类型和含量、页岩的含水饱和度、温度和压力与页岩含气性的关系，评价页岩气的主控因素。

课题负责人：张同伟

主要学术骨干：张铭杰，胡沛青，妥进才，王永莉

承担单位：兰州大学、中国科学院地质地球物理研究所

经费比例：15%

课题二：页岩微孔缝结构与页岩气赋存富集研究

研究目标：阐明各成藏要素对页岩气储集性能的影响，揭示页岩中纳米级孔隙及微裂缝结构网络与页岩气赋存富集的关系，建立页岩气的赋存机理，探讨页岩气富集规律。

研究内容：以页岩气赋存、富集成藏机理为核心科学问题，重点研究四个方面的内容：（1）页岩储层特征，包括研究矿物页岩组成、显微孔隙与裂隙特征、及其与有机质类型、丰度、矿物等的关系，重点解剖中海油的黔北页岩气区块的储层特征。（2）页岩气赋存机理，从页岩微观孔裂隙（特别是纳米级孔隙）特征入手，从有机质丰度、成熟度、生烃强度、含气饱和度、岩石脆度、孔隙度等页岩气成藏的要素等方面，研究各要素对页岩气储集性能的影响，特别是储层微观孔裂隙（纳米级）结构及其吸附特征，研究页岩气储存的吸附态、游离态、溶解态等特征，建立页岩气的赋存机理研究页岩埋藏深度、有机质丰度、成熟度、生烃强度、含气饱和度、岩石脆度、孔隙度等页岩气成藏的要素，研究各要素对页岩气储集性能的影响特征，特别是储层微观孔裂隙（纳米级）结构及其吸附特征，进而研究页岩气储存的吸附态、游离态、溶解态等特征，从而建立页岩气的赋存机理；（3）页岩气富集规律研究，以能量平衡理论和油气系统理论为基础，研究页岩气系统的“源岩—储层—盖层”组合特征，结合含气性评价，探讨页岩气藏富集规律。

课题负责人：朱炎铭

主要学术骨干：李贤庆、郭英海、夏筱红、汪吉林

承担单位：中国矿业大学，中国矿业大学（北京）

经费比例：15%

课题三：构造演化与页岩气的改造和保存研究

研究目标：通过对南方盆地多期构造演化和古地热场的解析，确定页岩气成藏的关键地质时期，定量评价地层抬升过程中温度压力条件的变化及对页岩气储

层物性和含气性的影响，揭示构造变动条件下页岩气赋存形式的变化特点及吸附与解吸机理，阐明构造-热演化对页岩气藏的影响机制。

研究内容：主要包括四个方面。（1）南方盆地构造演化及页岩气形成的地质背景分析：研究中国南方古生界以来的构造背景，揭示研究区各个时期不同类型盆地形成的构造背景，沉积环境和动力学背景；研究代表性盆地沉积剖面，确定其各个时期的沉积环境、成因机制与后期叠加、破坏与改造，探索典型地区的盆地原型。（2）南方盆地古生界构造-热演化及对页岩气藏的控制作用：通过地层、钻孔和地震资料与地层回剥技术，研究典型地区埋藏史，勾勒区域构造-沉积埋藏特征；通过多种古温标（ R_o 、磷灰石裂变径迹及U-Th/He低温热年代学数据）对南方地区重点盆地目标层系不同地质时期的热史进行综合研究，重建盆地烃源岩的热演化史，建立构造-热演化模型。（3）地层抬升过程中页岩气赋存形式的变化特征及可能的页岩气散失特征，建立地层抬升过程中页岩气的散失模型。（4）构造改造对页岩储层物性和含气性能的影响：定量模拟研究储层压力在整个构造抬升过程中的动态演化过程，揭示不同压力下不同层次的孔裂隙系统的变化特征，阐明构造改造对页岩纳米孔隙的影响机制，并通过模拟压力变化研究构造演化过程对页岩吸附量和饱和度的影响；解析构造活动复杂区页岩气的保存条件，阐明构造作用对页岩气保存的影响。

课题负责人：尹宏伟

主要学术骨干：刘绍文、王勤、邱楠生、刘大永

承担单位：南京大学，中国石油大学（北京）、中国科学院广州地球化学研究所

经费比例：15%

课题四：深层页岩储集物性及含气性研究

研究目标：阐明深层页岩气的赋存方式及随压力梯度的变化关系，建立页岩高压-超高压甲烷吸附和脱附等温曲线，分析深层页岩有机无机反应以及超临界流体对页岩储集物性和页岩含气性的影响，评价深层页岩的含气性。此外，该课题自行研发一套全自动计算机软件控制、可施加压力高达70MPa的气体吸附仪，用于测试和模拟研究埋深2000至7000m页岩气吸附解吸附性能。

研究内容：（1）深层页岩气的产出赋存状态及其受深部压力梯度变化的影响；（2）深层页岩残余烃、干酪根吸附和解析附性能及受压力梯度变化的影响，实验分析有机质干酪根等温吸附/脱附平衡曲线，确定有机质和干酪根甲烷吸附容量与有机碳含量、有机质成熟度的关系以及与压力梯度变化的关系；（3）深层页岩粘土矿物物性特征及其吸附和解吸附特征研究，包括研究深层页岩粘土矿物组成及结构演变特征，主要粘土矿物甲烷等温吸附容量和解吸附特征，建立甲烷吸附解析附等温平衡曲线；无机气体、水对甲烷气体的溶解吸附性；（4）高压-超高压模拟研究深层页岩甲烷气体的吸附和脱附过程特征，建立不同类型不同成熟度页岩甲烷吸附脱附等温曲线；（5）深层页岩高温压条件下烃类气体、CO₂、矿物和水之间的化学反应对页岩储集性能的影响作用，以及超临界 CO₂ 流体、水、矿物的气体吸附作用和程度。

课题负责人：宋之光

主要学术骨干：潘长春、吉利民、袁鹏、贾望鲁

承担单位：中科院广州地球化学研究所，中科院地质地球物理研究所

经费比例：15%

课题五：南方古生界页岩气评价方法与资源潜力预测

研究目标：根据中国南方古生界页岩的地质地球化学特点，建立适合的页岩气评价指标与资源潜力评价方法；根据中国南方古生界页岩的地质地理分布、地球化学指标的限定，评价页岩气资源潜力，预测有利勘探区。研究成果可为我国南方古生界页岩气勘探开发提供科学指导。

研究内容：（1）资源潜力评价限定的指标研究，包括：页岩的含气性；工业页岩气藏形成的有机碳下限标准、成熟度上限、埋藏深度上限与下限；具有勘探开发前景的页岩最小厚度限定。（2）资源潜力评价方法研究，包括：多种方法的应用条件与对比；针对我国南方古生界页岩的地质地球化学特点，研究上述各种方法对的适用性，提出适合的资源潜力评价方法；（3）资源潜力评价，包括：晚古生界页岩气的资源潜力，早古生界页岩气的资源潜力；上述三套页岩层在不同埋藏深度（<2000m, 2000-4000m, >4000m）的资源潜力；页岩气资源的地质地理分布，预测有利勘探地区。

课题负责人：肖贤明

主要学术骨干：王飞宇，田辉，刘祖发，孟召平

承担单位：中科院广州地球化学研究所，中国石油大学（北京），中山大学，中国矿业大学(北京)

经费比例：20%。

课题六：南方古生界典型区块页岩气勘探潜力评价

研究目标：主要针对黔北与安徽两个页岩气典型区块性和页岩，建立古生界重要构造事件背景下层序地层格架，明确沉积环境与页岩发育的关系，圈定黑色页岩分布；建立页岩储层缝孔识别技术方法，预测有利页岩储层分布区；揭示页岩含气富集规律；评价页岩气资源量、评价勘探潜力和确定有利靶区。

研究内容：重点以黔北及安徽芜湖为研究靶区，通过地质地球物理资料分析与解释，建立多期重要构造事件背景下古生界层序地层格架，剖析沉积环境与页岩发育的关系，研究页岩的发育模式并预测黑色页岩的分布；开展典型区块页岩生气地球化学特性研究，建立逼近地下条件生气模式，圈定有效页岩气源灶；研究页岩储层缝孔特征及成因机制，建立缝孔发育模式、识别技术方法和评价标准，预测有利页岩储层分布区；研究页岩气含气性、赋存特点及主控因素，总结富集规律；研究构造演化－沉积埋藏－烃源岩熟化－生气作用－地下流体活动“五史”、“四场”特征与配置关系及其对页岩气成藏演化的控制机理，建立成藏模式；预测资源量，评价勘探潜力；综合评价有利的页岩气富集区带，提出/圈定页岩气勘探靶区；同时，根据钻探需求，开展页岩气层测井评价和高效测试方法先导研究。

课题负责人：黄保家

主要学术骨干：蔡东升、李绪深、夏斌、卢鸿

承担单位：中海石油（中国）有限公司湛江分公司，中海石油研究中心、中山大学，中科院广州地球化学研究所

经费比例：20%。

6. 课题设置的思路、各课题间的有机联系以及与项目预期目标的关系

本项目共设 6 个课题。课题的设置从三个层面考虑：

第一层面针对我国南方古生界页岩气的地质地球化学特点与研究现状,解决影响页岩气资源评价与勘探潜力的关键科学问题。共设置了4个课题。课题1:页岩气形成与含气性的影响因素研究,这是页岩气研究的基本科学问题,而我国在该领域缺乏系统研究。课题2:页岩微孔缝结构与页岩气赋存富集研究,这既是国际上研究不够深入的问题,也将结合我国南方古生界的特殊性,从页岩不同级别孔隙结构的角度研究与探索页岩气的赋存状态,吸附与解吸附机理。该问题既是理论性问题,其成果又可指导勘探开发。课题3:构造演化与页岩气的改造和保存研究,中国南方古生界地层除成熟度高外,另一特点是大部分地区受到强烈抬升剥蚀与构造改造,深入研究在这种特殊地质背景下页岩含气性变化与赋存机理,对于我国南方页岩气资源潜力评价、勘探开发具有重要的意义。课题4:深层页岩储集物性及含气性研究,这是针对中国南方古生界页岩曾埋藏很深、且在广大区域现今埋藏仍然较深、超过美国工业页岩气的开发深度这一具体地质情况设置的一个课题。盆地深层页岩气赋存特点在美国也鲜有报道。深层页岩气的资源潜力直接影响到中国南方古生界页岩气的潜在资源量。这4个方面基本上涵盖了页岩气评价的重要科学问题。

第二个层面上的考虑是,在结合上述研究基础上,建立我国南方古生界页岩气评价的理论体系,评价资源潜力,预测有利勘探区。由此设立了课题5:南方古生界页岩气评价方法与资源潜力预测。该课题既有综合性,又涉及与其它课题不同的研究内容。

第三个层面是典型区块分析,设立了课题6:南方古生界典型区块页岩气勘探潜力评价。在研究内容上设计了有关页岩气区块评价与勘探的基础地质地球化学研究,并将逐步融入上述5个课题的成果,结合勘探进展,重点研究页岩气资源潜分布规律与勘探开发潜力,预测有利的开发地区。

因此,本项目设置的6个课题是基于我国南方古生界页岩气的地质地球化学特点,从关键科学问题切入,研究页岩气评价方法与建立资源潜力理论体系,再结合典型区块进行理论与生产实践(图1)。各课题之间既有侧重,又有关联,构成一个有机整体,最终融合成一个既有理论与方法创新、又具有实际应用价值的高水平研究成果,可为我国南方古生界、及类似特点的地区页岩气勘探开发提供理论指导与方法基础。

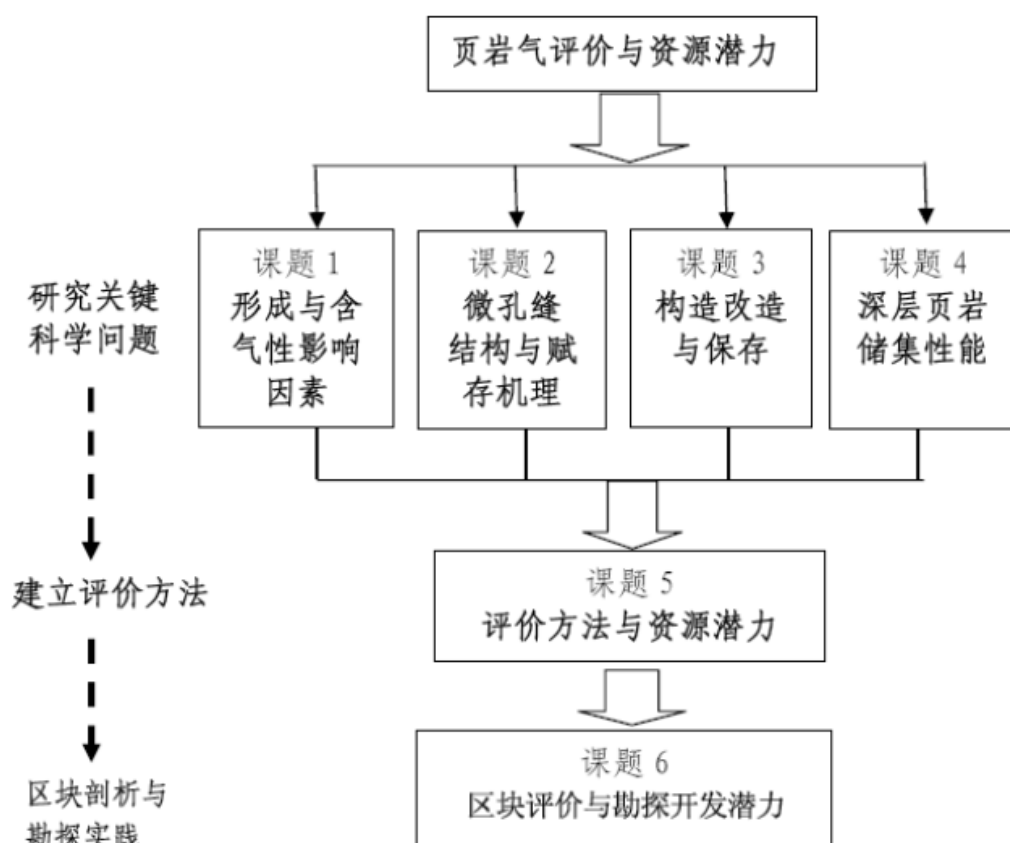


图 1 课题设置的思路与课题间的联系框图

四、年度计划

| | 研究内容 | 预期目标 |
|-----|---|--|
| 第一年 | <p>(1) 开展文献资料调研, 对南方古生代地层代表性地区、典型钻井进行野外采样, 实测剖面, 开展沉积环境、储层评价研究, 获得典型泥页岩样品。</p> <p>(2) 开展南方典型盆地类型与动力学分析, 盆地现今地热特征及古地温研究。</p> <p>(3) 研究南方古生界富有机质泥页岩地球化学特征、油气生成演化及与页岩生烃强度; 研究有机质丰度、类型和成熟度对页岩气形成和页岩含气性的影响。</p> <p>(4) 对比研究南方古生代页岩与美国代表性页岩气盆地页岩在地质地球化学特征、含气性等方面的异同。</p> <p>(5) 以黔北及安徽芜湖中海油页岩气区块为重点研究靶区, 通过地质地球物理资料分析与解释, 研究古生界层序地层格架。</p> | <p>(1) 确定南方典型盆地类型及动力学背景, 构建南方典型盆地典型剖面/典型钻井古温标数据库。</p> <p>(2) 总结南方古生代页岩的地质地球化学特点与含气性, 及其与美国页岩气盆地的异同。</p> <p>(3) 建立南方古生代页岩有机质特性、成烃演化与页岩气形成的关系</p> <p>(4) 发表相关论文 10-15 篇, 其中 EI/SCI 论文 3-5 篇。</p> <p>(5) 与产业部门联合, 建立页岩气研究与实践基地。</p> |
| 第二年 | <p>(1) 研究南方古生界典型富有机质泥页岩样品的气体地球化学特征、矿物组成特征、有机质特征与温压条件对气体吸附与解吸附的影响;</p> <p>(2) 研究南方古生界页岩储层微观孔隙结构, 特别是纳米级孔隙结构; 研究页岩气的吸附态、游离态、溶解态等各相态间耦合关系;</p> <p>(3) 开展南方典型盆地重点剖面构造变形特征与变形机制研究, 研究不同组构页岩的储层物性。</p> <p>(4) 研究南方古生界页岩气的温压流体场等页岩气成藏动力学特征及页岩气系统的“源岩—储层—盖层”组合特征。</p> <p>(5) 研究南方古生界页岩气评价的限定指标, 包括 TOC 的下限、成熟度 Ro 上限与下限标准、页岩的最小厚度; 页岩地层脆性矿物特征。</p> <p>(6) 对勘探示范区块, 研究沉积环境、油气生成地质模型, 预测黑色页岩分布。</p> | <p>(1) 建立我国南方古生界富有机质页岩热演化程度与页岩气生成量和保存量的地质演化模型。</p> <p>(2) 揭示纳米级孔隙结构与页岩气赋存富集的关系, 揭示页岩气的赋存机理。</p> <p>(3) 建立南方古生界盆地构造-热演化模型, 揭示构造抬升条件下页岩气储层物性的响应特征和含气性变化机制。</p> <p>(3) 根据中国南方古生界页岩的地质地球化学特点, 构建适合的页岩气评价指标体系。</p> <p>(5) 对勘探示范区块, 确定主要层位页岩的地质地理分布; 圈定有效页岩气源灶;</p> <p>(6) 发表相关论文 20-25 篇, 其中 EI/SCI 论文 10-15 篇。</p> |

| | 研究内容 | 预期目标 |
|-----|--|---|
| 第三年 | <p>(1) 研究南方古生界富有机质泥页岩气体保存量的地质记录, 研究湿度对页岩气保存的影响;</p> <p>(2) 针对南方古生代埋藏特点, 研究深层高温高压条件下页岩气形成机制, 烃类气体、矿物组成、CO₂ 以及水之间的化学反应对页岩储集性能和含气性的影响作用。</p> <p>(3) 研究原型盆地恢复及后期构造改造, 进行不同组构页岩压裂实验与裂缝系统形成与演化的数值模拟。</p> <p>(4) 评价页岩气资源潜力有多种方法的应用条件, 针对南方古生代不同区块、不同层位页岩的地质地球化学特点, 勘探程度, 建立有针对性的资源潜力评价方法</p> <p>(5) 对勘探示范区块, 研究页岩储层缝孔特征、成因机制与主控因素研究, 揭示地质历史演化过程中页岩孔-裂隙的演变规律, 研究页岩气成藏动力学特征“五史”“四场”配置关系。</p> | <p>(1)建立南方古生界典型页岩气体组成、有机质特性、矿物组成、温度和压力与气体生成量和保存量的关系。</p> <p>(2)建立南方典型盆地原型特征与构造演化模型, 确定关键构造变革时期重点页岩层系储层物性的主要影响因素。</p> <p>(3)针对南方古生代页岩的地质地球化学特点与勘探程度, 建立有针对性的资源潜力评价方法。</p> <p>(4)建立页岩储层缝孔发育模式、识别技术方法,构建页岩气成藏动力学特征“五史”“四场”配置关系及其对页岩气赋存机理的控制作用。</p> <p>(5)发表相关论文 20-25 篇, 其中 EI/SCI 论文 10-15 篇。</p> |
| 第四年 | <p>(1) 研究南方古生代富有机质泥岩游离气和吸附气的地质记录; 研究有机质纳米孔形成演化与有机质热演化的关系, 研究页岩中微孔缝结构网络系统及页岩气的赋存机理。</p> <p>(2) 研究南方古生代构造抬升造成的页岩储层压力的演变, 及其对页岩气含气性的影响, 研究构造改造程度与页岩含气性的关系。</p> <p>(3) 研究南方古生代有页岩气资源潜力的页岩的地质地理分布与评价模型。重点研究层位包括: 上二叠统暗色页岩、下志留统暗色页岩、下寒武统暗色页岩; 重点建立的模型包括: 气体吸附与解吸附地质模型, 游离烃地质模型, 其它赋存气扩散模型, 页岩总含气地质模型。</p> <p>(4) 对勘探示范区块, 研究页岩含气性、赋存特点及富集主控因素, 开展页岩气含量分布的工业成图, 圈定页岩气富集区带。</p> | <p>(1)量化各种地质地球化学因素对页岩含气性的控制作用, 建立相关定量评价模型。</p> <p>(2)确定中国南方典型盆地页岩气主要生烃期次及构造改造对页岩储层物性及含气性的影响。</p> <p>(3)圈定南方古生代有页岩气资源潜力的页岩的地质地理分布, 建立不同区块、不同层位页岩含气量地质模型。</p> <p>(4)提供勘探示范区块页岩气含量分布的工业成图, 圈定页岩气富集区, 评价勘探潜力。</p> <p>(5)发表相关论文 20-25 篇, 其中 EI/SCI 论文 10-15 篇。</p> |

| | 研究内容 | 预期目标 |
|-------------|---|--|
| 第 五 年 | <p>(1) 综合评价影响页岩气保存量的主要控制因素, 综合研究页岩气赋存机理和成藏富集规律。</p> <p>(2) 综合评价南方古生代深层页岩的储集物性与含气性的主控因素。</p> <p>(3) 综合研究构造改造地区页岩气的散失与保存条件、机理, 分析构造作用对页岩气保存与开采的影响。</p> <p>(4) 对南方古生代地层, 根据优选适合的资源潜力评价方法、确定的地球化学限定指标、页岩典型含气数据, 模拟计算南方古生代页岩气资源量, 预测有利的勘探开发区。</p> <p>(5) 对勘探示范区块, 综合评价勘探潜力和有利的页岩气富集区带, 实施钻井勘探, 开展页岩气层测井评价和高效测试方法先导研究。</p> <p>(6) 项目结题总结。</p> | <p>(1) 量化各种地质地球化学因素对页岩含气性的控制作用, 建立页岩气赋存富集的地球化学理论。</p> <p>(2) 明确构造改造过程中页岩气散失与保存机理, 确定中国南方典型盆地页岩气有利成藏层系及区块。</p> <p>(3) 提交我国南方古生界页岩气资源潜力评价报告及相关图件。</p> <p>(4) 对勘探示范区块, 形成中国南方古生界的页岩气地质勘探评价技术与方法的示范。</p> <p>(5) 发表相关论文 20 – 25 篇, 其中 EI/SCI 论文 10 – 15 篇。</p> <p>(6) 项目结题, 提交综合研究报告。</p> |

一、研究内容

1. 关键科学问题

页岩气评价与勘探面临与常规油气评价完全不同的科学问题与理论，加之我国在该领域实质性研究工作做得不多，国外现有理论与方法对于我国南方古生界页岩气评价不可直接应用，有关南方古生界页岩气的形成、含气性、赋存特点、富集成藏机理、资源潜力等方面都存在许多基础研究的难点。本项目将重点攻克如下关键科学问题：

（1）页岩气的赋存机理

尽管页岩气以吸附或游离态为主要存在方式这一机理得到了普遍的认可，但却难以解释美国 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩惊人的高产页岩气系统等问题。页岩具有多微孔性、孔径小、低渗透等特点。页岩中纳米级孔隙结构赋气的复杂性，成为建立页岩气赋存机理的一个瓶颈。目前的研究表明，页岩气的赋存形式可能存在游离态、吸附态、溶解态和其它状态（如固溶态）等多种形式。因此，从纳米级孔隙结构的研究入手，分析纳米孔隙与微裂缝之间的复杂孔裂隙结构或网络，揭示页岩中页岩气的多态耦合关系，探讨页岩气成藏的赋存机理，是当前急需解决的科学问题。

（2）构造改造对页岩含气性的影响

构造改造(地层抬升)导致地层的温压条件发生变化,页岩原有的孔裂隙系统遭到破坏,吸附气解吸为游离气而快速逸散,导致页岩含气量减少。同时,也使页岩基质膨胀,微裂缝发育,页岩储层物性显著改善。因此,构造改造涉及到非常复杂的吸附与解吸附机理问题。在构造改造过程中页岩储层压力的动态演化过程及对页岩储层物性的影响,页岩中气体的存在形式、数量等如何演化、页岩气散失机理,构造变动条件下页岩储层物性变化的宏观和微观机制等重要力学理论问题,均缺乏深入研究,成为制约页岩气勘探和开发的重要科学问题。

（3）深层页岩储集物性

深层页岩的储集物性以及含气性是一个在世界范围内尚缺乏研究、但又极具中国地质特色的科学问题。与北美地区页岩气产层大多埋深在 2000 - 3000m 以内不同,中国南方古生界页岩在地质历史时期埋藏深度普遍达到 7000 - 10000m,

在四川盆地目前主体埋深大多还在 4000 – 7000m 埋深范围。在深部高温高压条件下，页岩有机质性状、微孔隙结构、气体赋存状态、岩石脆性及力学性质等都与浅层有很大的不同，而且受烃类、CO₂、矿物和原生水及裂隙水等之间的化学反应、压实、压溶等成岩作用等的影响与改造。因此，研究深层页岩的储集结构、吸附性能以及对页岩含气性的影响将是评价我国南方古生界页岩气资源潜力评价的关键。

2. 主要研究内容

围绕南方古生界页岩上述关键科学问题，本项目主要开展以下 4 方面的研究：

（1）页岩烃类生成与演化、含气性及控制因素研究

研究古生界富有机质页岩地球化学特征、油气生成演化及与页岩生烃强度的关系；研究古生界富有机质页岩气成因、来源和组成，重点分析有机质丰度、类型和成熟度对页岩气形成和页岩含气性的影响；研究古生界富有机质页岩岩石类型、矿物成分、孔隙度、渗透率及其与矿物组成的关系、富有机质页岩中气体保存与成岩作用的关系，评价矿物对页岩含气性的影响；研究干酪根（疏水单元）和粘土矿物（亲水单元）润湿性、富有机质页岩气体的吸附性能，评价湿度对页岩气保存的影响；研究富有机质页岩中吸附气和游离气的比例关系及变化，评价温度、压力及埋藏深度对页岩气赋存状态与保存的影响；研究深层高温高压条件下页岩气形成机制，包括气体的生成机制，烃类气体、矿物组成、CO₂ 以及水之间的化学反应对甲烷生成以及页岩储集性能和含气性的影响作用；在综合的基础上，量化各种控制因素（有机质的丰度、类型和热成熟度、粘土矿物的类型、脆性矿物的类型和含量、页岩的含水饱和度、温度和压力）与页岩含气性的关系，评价页岩气的主控因素。

（2）页岩气赋存、富集机理与成藏条件研究

研究富有机质页岩微观孔裂隙（特别是纳米级孔隙）的类型、孔隙结构、纳米级孔隙形成及演化过程；研究富有机质页岩中无机微孔的发育与矿物成分、成岩作用的关系，评价各地球化学要素（如：有机质丰度、成熟度、生烃强度、含气饱和度、岩石脆度、孔隙度）与地质要素（温度、压力、埋藏深度）对页岩气储集性能的影响；研究页岩储存的吸附态、游离态和溶解态等特征，研究页岩储

层微观孔裂隙（纳米级）结构与气体赋存状态的关系，揭示页岩气的赋存机理与控制因素；结合本项目的典型区块，从成藏动力学角度，分析构造演化－沉积埋藏－烃源岩热演化与生气作用－地下流体以及构造应力－热力－流体化学－流体动力等“五史”“四场”配置关系及其对页岩气富集的控制机理，分析页岩气成藏条件；以能量动态平衡理论和油气系统理论为基础，研究页岩气系统的“源岩－储层－盖层”组合特征，揭示页岩气成藏富集规律。

（3）构造改造对页岩气保存、富集成藏的影响研究

南方古生界海相盆地经历了多期构造运动，地温场发生多次变化。现今页岩气的富集程度是构造演化对页岩气保存和破坏的综合叠加结果。本项目将通过典型地区的解剖，研究我国南方新元古代以来沉积盆地的形成与演化，恢复早古生界、晚泥盆世-三叠纪、侏罗纪－白垩世和古近世等时期的原型盆地；研究印支期以来的构造体制转换、变形样式、主要断裂特点及其空间变化与差异；分析盆地的边界断裂、盆内变形形迹、应力场分布特征等，研究盆地的结构类型、形成时间、构造性质和属性、多期演化及时空差异、盆地深部热体制转换与热史演化、关键构造变革时期页岩气储层温度和压力条件的变化及页岩气赋存特点；在此基础上，着重分析古生界以来主要构造单元的活动规律以及演化过程，厘定盆地构造演化的阶段、改造历史和抬升回返的时间、长短及程度，恢复和重建盆地的热演化历史，建立构造-热演化模型，定量评价构造抬升造成的页岩储层压力的变化程度，揭示构造抬升过程中页岩储层物性的变化特征和对页岩气含气性能的影响，建立构造改造过程中页岩气散失的定量模型。

（4）页岩气的评价指标与方法、资源潜力预测与典型区块剖析

从构造热演化历史、生油气潜力、TOC、成熟度、页岩厚度、页岩现埋深、含气性、页岩矿物组成、孔隙性质等方面，对比研究我国南方古生界页岩与北美页岩气盆地地质地球化学的特点，研究页岩气不同资源潜力评价方法的应用条件，发展适用于我国南方古生界的页岩气资源潜力评价方法；研究页岩 TOC、Ro 范围、页岩厚度、有机质类型、矿物组成等方面对页岩气富集成藏的影响，在获得大量第一手样品测量数据的基础上，构建我国南方古生界页岩气资源潜力评价的关键参数，评价中国南方古生界页岩气资源潜力评价，研究不同区块、不同层位页岩气资源潜力的分布特征。以上扬子地区黔北及下扬子地区安徽芜湖等地作为古生界的典型区块，重点研究下志留系和下寒武统黑色页岩的沉积分布与地球

化学特征，圈定有利页岩气聚集的沉积相带和烃源灶；建立页岩储层缝孔识别技术方法，预测有利页岩储层分布区；研究页岩含气性、赋存特点及主控因素，总结页岩气富集规律，建立成藏模式；综合页岩有机质丰度、热演化、厚度、埋深、页岩强度、页岩储层的结构及页岩吸附气量等，评价资源量和勘探潜力，进行页岩含气量分布的工业成图，圈定页岩气富集区带，提出页岩气钻探靶区；同时，根据钻探需求，开展页岩气层测井评价和高效测试方法先导研究。