

页岩气勘探开发基础理论与关键技术

1 立项背景及意义

页岩气是指赋存于富有机质泥页岩及其夹层中，主要以吸附和游离状态存在的非常规天然气，是一种清洁高效的能源资源。全球沉积岩中泥页岩约占总量的60%，因此页岩气资源的前景异常巨大。美国页岩气产量由2005年的196亿立方米快速增至2014年的3806亿立方米，成为世界第一产气大国，对世界能源格局产生重大影响，被称作“页岩气革命”。页岩气革命还直接带动了页岩油技术的突破。据国土资源部2015年发布的《中国页岩气资源调查报告》（2014年）估计，我国页岩气可采储量达25万亿立方米（图1），其中海相、海陆交互相、陆相三种类型三分天下。勘探开发页岩气将有效缓解我国能源紧张的现状，且可显著改善大气环境。

我国页岩气盆地具有多类型沉积相、高演化程度和多期构造改造的地质特点，含气量的相对富集区（甜点区）在哪里？可采性如何评价？页岩油气中的页岩凝析气和湿气蕴含着宝贵的凝析油，我国页岩凝析气和湿气的分布与富集规律，以及开发页岩凝析气的相态转化规律与控制技术都亟待解决。页岩储层渗透率极低，且页岩气大多赋存于微纳米孔隙中。如何在地下数千米深处形成密集裂缝网络？从微纳米尺度到千米井场尺度的多尺度特征，从气体布朗运动到达西流动的多流态特征，以及固-气-液多相多场耦合特征等，这些均属前沿科学问题。水平井高精度地质导向是水平钻井的核心技术，当前水平井定位和导向技术由于测量点往往远离钻头达15 m—20 m以上，必须研制近钻头成像随钻地质导向仪以提高导向的实时性和精度。

2 取得的进展

2.1 建立了页岩气富集层位地层划分标准

专项以高分辨率生物地层学为基础，配合化学地层学、定量地层学等多学科综合地层研究。以华南下古生界两套重要烃源岩——五峰组和龙马溪组黑色页岩为例，依据最新的笔石生物地层研究，可将其划分为10—13个笔石带，每个笔石带厚数十厘米至数米，平均时限约0.8百万年，该划分方案的精度远高于依据常规方法建立的三分或四分方案，而且更高分辨率的定量地层学工作还可将这一精度进一步提高。此外，该地层划分与对

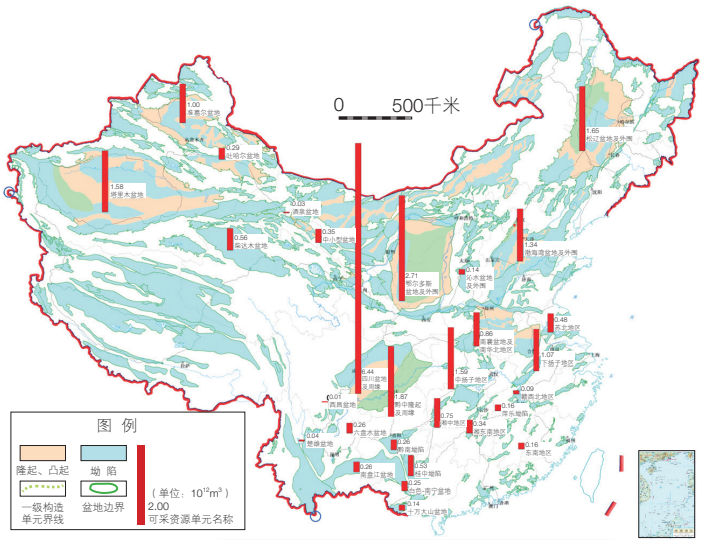


图1 中国页岩气储量

资料来源：国土部《中国页岩气资源调查报告》，2015

比方案具备良好的等时性，较好地避免了因古地理、地层分布、构造活动、变质和风化作用等造成的偏差，可广泛应用于钻井岩芯和露头剖面的高精度地层划分与对比，从而为有机质富集的时空规律识别提供准确的时间框架。

2.2 获得了我国页岩凝析气资源量及其分布

专项通过国际合作采集了约2000口美国页岩井数据，建立了页岩油、凝析气、湿气和干气的出现概率模型，提出了其分布预测的新阈值（图2），提高了预测的可靠性。

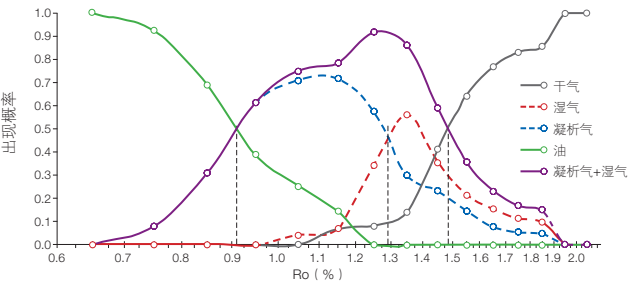


图2 页岩油、凝析气、湿气和干气的分布概率模型与成熟度预测阈值

在全球适用性论证的基础上，综合应用新阈值以及有机质类型、含量、厚度和埋藏深度等参数，首次对我国45个盆地（地区）页岩凝析气和湿气资源进行了评价，优选出94个有利区，并对全国页岩凝析气和湿气有利区的资源量进行了计算，预计资源总量在114亿吨油当量以上，与美国相当（图3）。

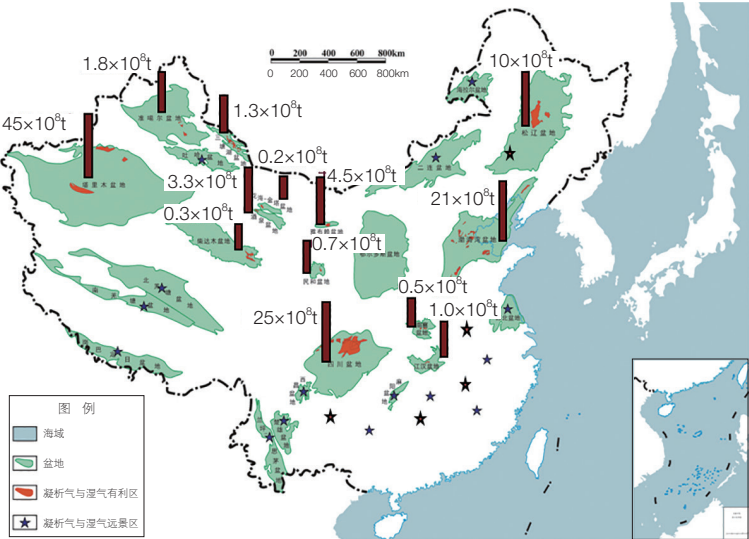


图3 我国页岩凝析气和湿气有利区与资源量分布图(10⁸t, 亿吨)

2.3 建立了甲烷在微纳孔隙中吸附力计算模型

专项发展了精确范德华力场，可准确预测甲烷等气体分子密度及其在微纳多孔材料中的赋存量。气体间精确范德华力场可以准确预测气体分子密度（包括甲烷、二氧化碳、氮气、乙烯、氧气和氢气），特别在高压情况下模拟精度明显优于4种经典力场（图4）。

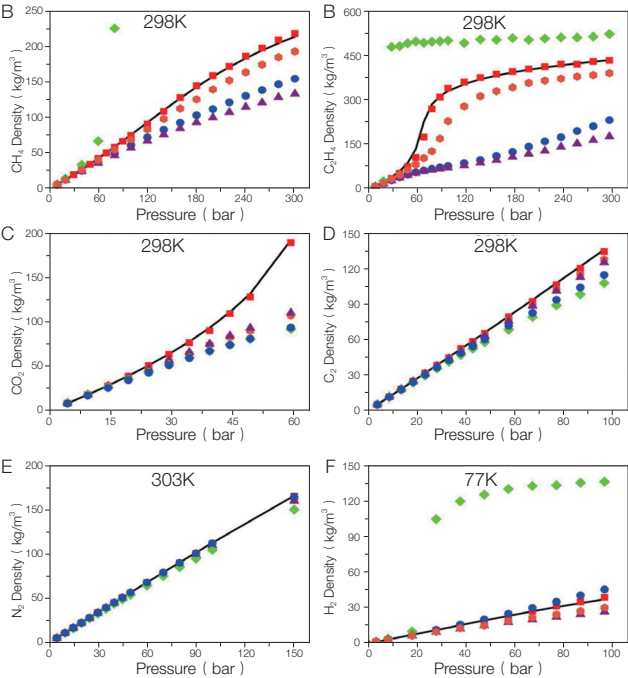


图4 模拟的甲烷、二氧化碳、氮气、乙烯、氧气和氢气密度与实验值和其他经典力场对比

黑线：实验数据。红点：精确范德华力场模拟结果。蓝点：Pcff力场模拟。绿点：UFF力场模拟结果。紫点：Dreiding力场模拟结果。橙点：Compass力场模拟结果

根据页岩的干酪根成分中常见原子类型，设计了若干种有机分子与甲烷等气体分子相互作用，并由此拟合出气体分子—有机质间精确范德华力场参数，可准确预测实验测量结果（图5）。

2.4 开发了页岩气开采计算模拟系列软件

专项建立了孔隙-裂隙的空间几何模型，揭示了页岩储层的多尺度破裂机制，建立了不同类型裂缝起裂扩展的理论模型，研发了页岩压裂的数值模拟软件（图6）；研究了微地震震源机制及动力学特征，提出了高分辨率微震偏移成像方法，并研发了多功能微地震监测及数据处理软件（图7）；建立了考虑吸附和多流

动机理的渗流数学模型，开发了分别基于PEBI和混合网格的页岩气藏数值模拟软件和数值试井软件，具备了历史拟合与产能预测功能（图8）；形成了一套具有自主知识产权，能够模拟水力压裂、微震监测、产能预测的页岩气开采过程一体化软件系列，并在工程中得到了初步应用。

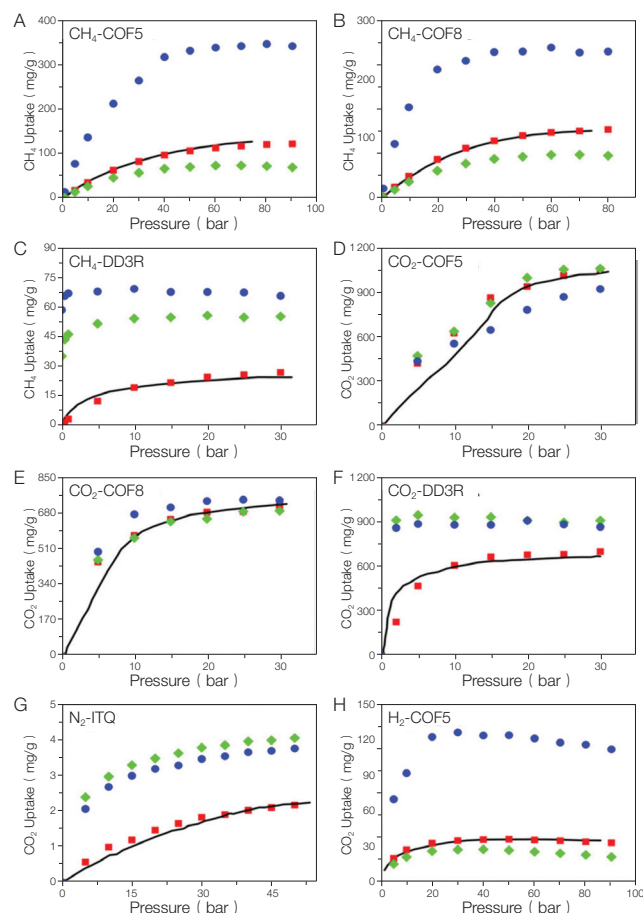


图5 模拟的甲烷、二氧化碳、氮气和氢气在微纳多孔材料中的吸附量黑线：实验数据。红点：精确范德华力场模拟结果。蓝点：UFF力场模拟。绿点：Dreiding力场模拟结果

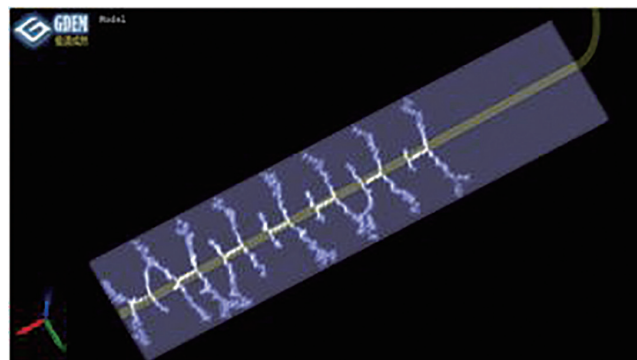


图6 建立了缝网扩展断裂准则，开发了水力压裂缝网模拟软件

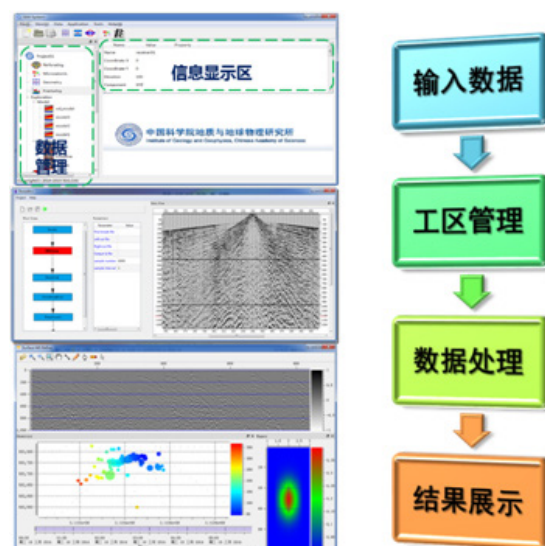


图7 开发了多功能地震监测及数据处理软件

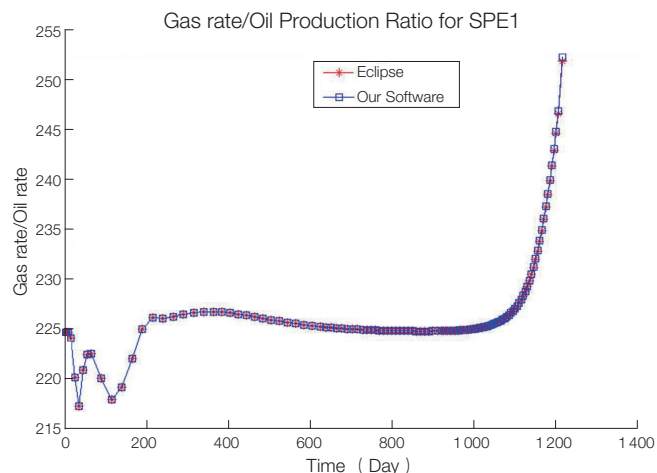


图8 产能预测软件与国际知名软件Eclipse对比

2.5 研制了近钻头随钻地质导向仪工业样机

专项将随钻地质导向系统前移至钻头部位，研发近钻头成像随钻地质导向仪器，提高导向精度和实时性，攻克了几大技术难点，包括高温环境下惯性传感器（加速度计、磁传感器）温度补偿技术（图9），强振动、强冲击、高速旋转环境下重力加速度测量技术，强磁干扰（钻头、螺杆钻具等磁性体）环境下地磁场测量技术（图10），开发了一套存储式近钻头成像随钻地质导向仪，具备近钻头动态井眼轨迹和方位伽马成像测量功能。下井前仪器通过了高温、高压、振动和扭矩等实验室测试。



图9 高温采集电路
尺寸 22 cm×2.54 cm，功率 2.1 W，耐温 175℃

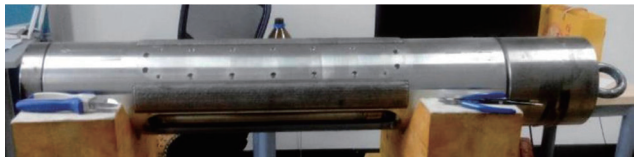


图10 无磁钢下井试验样机
直径 6.5 英寸，耐压达 130 MPa，抗扭达 42 kN·m，抗振 13 Grms

2.6 研制了储层深部地应力测试仪

项目研发了触头式光学显微钻测一体化地应力测试系统，采用光学显微位移实时测量，能耐高温、高压和防水，采用探头内部自动记录装置，实现了钻进测量一体化。可以指导页岩气开采水平钻井的合理布置及压裂方案的设计。目前已经完成了样机研制，主要包括光学显微测量系统、实时自动记录系统、钻测一体化连接系统、钻头系统等（图 11），成功开展了钻测一体化的实验室及现场测试（图 12）。

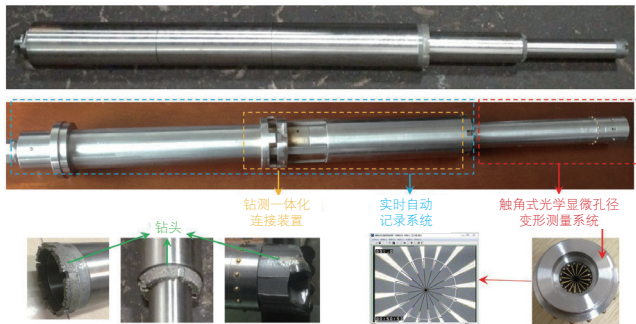


图11 地应力测试设备样机（整体结构）



图12 钻测一体化连接部件及钻进测试试验结果

2.7 建立了页岩气微纳尺度研究测试平台

专项建立的页岩微纳尺度研究平台，主要包括核磁共振（NMR）、微米CT、矿物分析-扫描电镜（AMICSCAN）、聚焦离子束-扫描电镜（FIB-SEM）双束系统、氦氖镓三束离子显微镜三束系统，代表了当前页岩多尺度表征的世界先进水平，为页岩气基础研究项目提供了重要的测试手段和技术支撑（图13）。

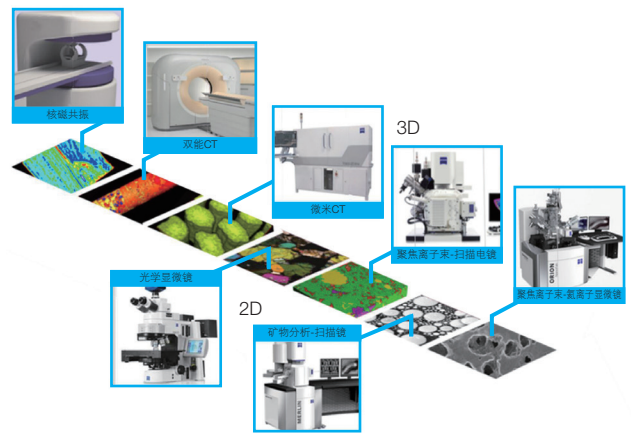


图13 建成的页岩气微纳尺度研究测试平台

3 独创性

通过建立的页岩气富集层位地层划分标准，为华南五峰组-龙马溪组黑色页岩建立了高精度的地层划分与对比标准，为各种油气地质学相关研究提供了准确的地质时间标尺。研究了我国页岩凝析气和湿气的分布与富集规律，以及开发中页岩凝析气的相态转化规律与控制技术，填补了我国在该方面研究的空白。

建立了甲烷在微纳孔隙中吸附力计算模型，从理论预测出发，能够预测页岩中甲烷气体的赋存量，在相关领域该项研究处于国际领先地位。

开发形成的集水力压裂、微震监测、产能预测的页岩气开采中三大环节的数值模拟软件包系列，填补了国内页岩气产业在此方面的空白，模拟技术所基于的理论方法及模型均达到或超过了目前国际上的主流模拟软件。研制的近钻头成像随钻地质导向仪率先提出了在近钻头环境下组成完整的近钻头井眼轨

迹参数，实现动态环境下井斜、工具面角的精确测量。近钻头测量技术可实现井眼轨迹连续监测，消除MWD技术间断测量带来的盲区。研发的基于铤体天线的短距电磁遥传技术，可以实现近钻头成像数据通过钻测量系统向地面的实时上传。

研制的储层深部地应力测试仪采用均布触针感知孔壁变形，通过光学显微测量识别探针位移量，钻测一体化实现了一次钻进完成测量、解除两个动作，测量钻孔形态便可计算主应力方向。

建立的页岩气微纳尺度研究测试平台，测试分析样品从二维到四维，尺度从米到微米，分辨率从1 mm到0.5 nm，创新性地把单轴压缩机放到700 nm分辨率微米CT内，实现了岩石压缩—破裂过程和应力—应变过程几乎同步监测。

4 对产业的意义

通过建立的页岩气富集层位地层划分标准，从黔北，经四川盆地东缘，至鄂西北神农架地区，完成了一系列五峰组-龙马溪组基干剖面的综合地层学研究工作；完成了焦页1井、4井、7井、8井，巫溪1井、2井、威202井、203井、204井，宁211井等在内的30余口勘探或生产井的综合地层学研究工作。

完成的全国页岩凝析气和湿气资源进行的分布预测，为我国页岩油气产业发展战略的制定或调整提供了重要依据。下一步拟研究页岩凝析气的相态转化规律和相态控制技术，可为页岩凝析气的高效开发提供技术支撑。

通过精确范德华力场建立的孔隙特征与甲烷赋存状

态的直接联系，结合页岩凝析气藏分布区内页岩有机质的类型和成熟度等，能揭示页岩凝析气的分布规律，为大规模开采提供理论基础。

开发的页岩气开采计算模拟软件系列可以对储层压裂进行预测计算及反演评价，直接服务于页岩气工业化开发过程中压裂的设计优化，摆脱国外软件在我国压裂行业的垄断。

近钻头成像随钻地质导向技术同时具备几何和地质导向功能，测量点零滞后，适用于薄层、超薄层中地质导向需求，将在未来非常规、深层、深海油气勘探开发中发挥重要作用。

储层深部地应力测试仪推动了深部页岩储层地应力测试技术的发展，完成了地应力测试的技术储备，满足国家在页岩气勘探开发中的重大需求。

5 对我国学科、产业推进、人才培养等未来部署的建议

需要针对我国特殊的地质条件，形成一系列页岩气勘探开发的理论体系、关键技术、配套装备及软件系列，推动国内相关学科的整体发展。

专项目前亟待开展相关技术与方法的现场试验与验证工作，需要与国内相关油气产业部门在页岩气甜点区评价、水平井设计钻进、储层压裂改造设计优化等关键技术方面开展密切合作，实现其在工程现场的初步应用，力争能够找到示范区开展井场试验，推动我国页岩气产业软硬件国产化，摆脱国外技术垄断。

（依托单位：中科院地质与地球物理所）

专家点评

与传统经典力场相比，项目中发展的范德华分子力场较为准确地预测了不同压力下的气体密度及气体在几类微孔材料中的吸附性能，为此类问题的研究提供了先进可靠的理论方法。由于该力场中的原子类型是针对干酪根中的常见元素设计开发，开发出的范德华分子力场将可用于预测甲烷分子在干酪根中的赋存量，并进一步为预测页岩中甲烷储量奠定基础。

点评专家

王 昕 教授，英国皇家化学会会士。研究领域为能源及环境技术中的纳米材料开发及电催化机理研究。发表 *SCI* 论文 150 余篇，专利 7 项。论文被引 8 500 余次，H 指数 51。担任 *RSC Advances* 副主编。

专家点评

所建立的微纳结构成像与数字岩石物理实验室拥有一套世界上最先进的成像设备，并且他们已经开发了一系列解决制样、成像和在纳米尺度特征描述页岩样品的重大问题的解决方法：例如开发了高分辨率的矿物结构成像，解决了样品在不镀膜情况下的电子显微镜成像放电问题，成功制得了极薄片样品（3 nm 厚），还开发了一套独特的页岩分析中疑难问题的解决方法等等。我已经在加拿大和一些别的地方带头做关于页岩油和页岩气资源储层特征分析和评估的项目好几年了，以我的学术判断和经验，由该专项建设的微纳尺度页岩气研究平台达到世界一流水平。

点评专家

湛卓恒 博士，加拿大地质调查局研究科学家，研究领域包括非常规资源的特征评价、常规/非常规油气评估、天然气水合物资源特征评价方法、地下水随气候变化的可变性、气候变化对地下水资源的影响、地下水资源的存储等。

专家点评

通过多尺度压裂试验，揭示了页岩缝网形成机制及演化规律，建立了缝网扩展断裂准则，实现了基于页岩天然裂缝结构的三维压裂模拟。实现了 Gauss–Lervenberg–Marquardt 算法，以及历史拟合与产能预测功能。研发了储层压裂的微地震监测技术，提出了两种高分辨率成像新方法。研究了大规模压裂过程的环境效应，建立了地下水和土壤的环境背景值数据库，在国内首次提出通过地下水中的甲烷同位素分析确定页岩气开采的甲烷泄露情况。

开发了具有自主知识产权，可以模拟水力压裂、微震监测、产能预测的页岩气开采过程一体化软件系列，可望替代目前国内压裂工程设计和现场监测过程中所采用的进口软件，在软件的理论基础和价格方面具有竞争优势。

点评专家

潘哲君 澳大利亚联邦科学与工业研究组织（CSIRO）能源研究所资深研究员，从事页岩气、煤层气和 CO₂ 埋存方面研究。共发表论文 130 余篇，其中 *SCI* 收录 80 余篇，6 篇为 ESI 前 1% 高引论文，*SCI* 总被引 1 600 余次，H 指数为 21。