

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.009

公益性油气地质调查“十三五”工作进展与“十四五”远景展望

许光¹, 韩志军¹, 张君峰², 包书景², 周新桂², 石砥石², 陈树旺³, 张家强², 公繁浩³
XU Guang¹, HAN Zhijun¹, ZHANG Junfeng², BAO Shujing², ZHOU Xingui², SHI Dishu²,
CHEN Shuwang³, ZHANG Jiaqiang², GONG Fanhao³

1. 中国地质调查局资源评价部, 北京 100037;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083;

3. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110086

1. Resource Evaluation Department, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Oil and Gas Resources Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. Shenyang Center, China Geological Survey, Shenyang 110086, Liaoning, China

摘要:“十三五”期间,公益性油气调查立足支撑国家能源安全保障工作定位,针对新区、新层系、新类型、新领域开展基础地质调查和战略选区评价,相继在长江经济带页岩气、松辽盆地陆相页岩油气、北方新区新层系油气,以及煤层气等非常规油气地质调查领域取得了突破性成果,解决了一批油气基础地质问题和工程技术难题。初步构建起长江经济带页岩气勘探开发新格局,有力推动了松辽盆地陆相页岩油气勘探开发进程。优选的勘查区块有效支撑国家油气勘查开采体制改革,助推形成了多处油气页岩气资源基地。“十四五”时期,油气地质调查需要依靠科技创新和信息化两大引擎,突出大型盆地整体结构调查和综合评价,聚焦非常规、深层油气,优选优质勘查区块,着力支撑油气勘查开采体制改革与矿产资源管理改革,推动构建公益性与商业性油气勘探有效衔接新机制,服务油气资源产业高质量发展。

关键词:公益性调查;油气地质调查;页岩气;页岩油;煤层气;“十三五”;“十四五”

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)07-1226-11

Xu G, Han Z J, Zhang J F, Bao S J, Zhou X G, Shi D S, Chen S W, Zhang J Q, Gong F H. Progress of public oil and gas geological survey during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1226-1236

Abstract: Based on fully supporting the basic orientation of national energy and resource security, China Geological Survey has strengthened oil and gas investigation in new areas, new strata, new types and new fields during the 13th Five-Year Plan period. It has successively made a number of breakthroughs in shale gas investigation in the Yangtze River economic belt, shale oil investigation in Songliao Basin, oil and gas investigation in new strata systems and new area of North China. Furthermore, it solved a number of basic geology and engineering problems on oil and gas exploration. It has greatly promoted the exploration of shale gas in the Yangtze River economic belt and shale oil in Songliao Basin, and effectively supported the reform of national oil & gas exploration system. During the 14th Five-Year Plan period, China Geological Survey will adhere to the orientation of non-profit, rely on the "two engines" of scientific

收稿日期:2021-02-05; **修订日期:**2021-06-15

资助项目:中国地质调查局项目《能源矿产地质调查》、《陆域油气资源战略选区与评价》(编号:DD20190117)、《冀北-辽西中新元古界油气地质调查》(编号:DD20190098)、《松辽盆地北部及外围石炭—二叠系油气地质调查》(编号:DD20190097)、《宜昌斜坡页岩气有利区战略调查》(编号:DD20179615)和国家重点研发计划课题《白垩纪中期松辽盆地及邻区陆相储集层与烃源岩研究》(编号:2019YFC0605404)

作者简介:许光(1984-),男,博士,高级工程师,从事油气资源调查评价管理与研究。E-mail: xguang@mail.cgs.gov.cn

innovation and informatization, work on large basin overall structure investigation and comprehensive evaluation oil & gas investigation and unconventional oil& gas investigation, support the reform of oil& gas exploration system, building an effective connection mechanism between non-profit and commercial oil& gas exploration, contributing to the high quality development of oil & gas resources industry.

Key words: public investigation; oil and gas investigation; shale gas; shale oil; coal bed methane; 13th Five-Year Plan; 14th Five-Year Plan

油气资源是重要的战略资源,其长期稳定供给是国家安全、经济发展和社会民生的重要保障。随着中国经济社会高速发展和油气勘探开发进程的深化,中国油气对外依存度不断攀升,油气勘探领域向深水、深层、非常规延伸,油气管理体制逐步进入深水区^[1-11]。“十三五”时期,为贯彻落实党中央决策部署,支撑油气勘查开采体制改革,服务商业性勘探开发,公益性油气地质调查工作力度持续加强,不断为国家油气勘查事业筑牢基础。

公益性油气调查立足“基础性、公益性、战略性”工作定位,坚持“科技创新驱动、基础调查先行、战略选区突破、勘查示范引领”的工作原则,针对新区、新层系、新类型和新领域开展了基础地质调查、战略选区调查和勘查示范^[12]。累计圈定油气远景区 160 处,有利区 120 处,优选油气勘查区块 16 个,解决了一批制约油气突破的重大地质问题和工程技术难题,取得南方地区长江经济带页岩气、北方地区山前带新领域和石炭二叠系新层系常规油气、松辽盆地页岩油、煤系气等重大突破。公益性油气调查拓展了勘探领域,引领了勘探方向,为保障国家能源安全、促进社会经济发展做出了重要贡献。本文系统梳理回顾公益性油气调查“十三五”时期调查成果、理论及工程技术进展,分析当前国家能源资源需求形势,对“十四五”油气调查进行了思考和展望。

1 “十三五”公益性油气调查进展

1.1 发展完善海相页岩气成藏理论,开辟页岩气勘探新区新层系

中国商业性页岩气勘探主要集中在四川盆地内,主要勘探开发层系为五峰组—龙马溪组。为推动构建页岩气勘探开发新格局,公益性页岩气调查创新性地提出复杂构造区页岩气成藏富集新认识,重点针对长江上游贵州正安、云南大关,中游湖北宜昌,下游安徽等重点地区的震旦系、寒武系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系开展调查评价,取得多处突破和发现^[13-21],开辟了页岩气勘探新区、新层

系,建立了选区评价、钻探工程、压裂试气技术方法体系,为引领服务国内页岩气勘探开发起到重要作用。

1.1.1 圈定远景区和有利区

中国南方扬子地区是页岩气调查勘查重点地区,但除四川盆地外的中下扬子、滇黔桂等地区构造改造强烈,地质条件复杂。在对这些地区古生界海相页岩气形成、富集、保存等成藏条件调查研究的基础上,提出了深水陆棚相富有机质页岩是页岩气形成的物质基础,适中的有机质热演化和区域稳定的构造是页岩气形成、保存的必要地质条件,地层超压是页岩气富集高产的关键因素,即深水陆棚相、稳定构造保存、地层超压控产的“三位一体”页岩气富集高产理论认识^[13-14]。以该页岩气成藏富集理论为指导,先后圈定了黔北正安、鄂西宜昌、陕南汉中、川东大竹、滇北大关、黔北金沙、鄂西建始、湘中涟源、皖南无为、赣中乐平—萍乡等 25 个页岩气远景区,在震旦系陡山沱组、寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组和石牛栏组、二叠系大隆组、龙潭组、孤峰组 8 个层组获得页岩气重要发现,为页岩气调查突破奠定基础。

1.1.2 建立“逆断向斜控藏”模式,上扬子地区贵州安页 1 井获得突破

中国页岩气勘探开发主要集中在四川盆地内的涪陵、长宁、威远、昭通等地的正向构造部位。盆地外的复杂构造区残留向斜是否具有页岩气及油气勘探开发前景,一直是油气地质界关注的重要问题。在对南方复杂构造区不同构造样式页岩气富集保存条件分析的基础上,创新建立了“逆断向斜控藏”页岩气成藏模式^[13-14],突破了以往“正向构造带找油找气”的传统认识。研究认为,安场向斜西翼在挤压作用过程中发育小型逆断裂,具有规模小、不通天、封闭性较好的特点,可起到侧向封堵作用,为常规油气成藏提供圈闭条件,也有利于在断层下盘形成相对富集的页岩气藏。以此模型为指导,精细刻画了黔北安场向斜地层分布和断裂发育特征,采用波速压力预测、地震频谱烃类检测等技

术,发现向斜两翼逆断层下盘存在异常地层压力和烃类异常显示。部署的安页 1 井获得二叠系栖霞组油气、志留系石牛栏组致密气、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩气和奥陶系宝塔组天然气的“四层楼”重大突破(图 1)。其中,石牛栏组经压裂测试获 $10.22\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流。优选的正安区块 2017 年首次以拍卖方式出让,后续勘查开发效果良好,目前正在推进建设页岩气产能基地。

1.1.3 建立“古老隆起控藏”模式,中扬子鄂西地区页岩气调查取得突破

中国南方地区页岩气勘查开发主力层系为上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组。在对四川盆地威远气田解剖的基础上,认为古隆起的刚性基底对页岩气具有“隔热保整”作用,其周缘富有机质页岩热演化程度适中、构造相对简单,是页岩气富集成藏的有利位置,提出“古老隆起控藏”页岩气成藏模式(图 2),据此理论指导在黄陵背斜东南翼部署的 4 口参数井,在震旦系陡山沱组、寒武系牛蹄塘组(水井沱组)和志留系龙马溪组 3 套层系均获工业气流突破。鄂阳页 2HF 井震旦系陡山沱组获产量 $5.53\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $19.82\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业

气流,是迄今全球最古老的页岩气藏,为中国页岩气勘查向深部进军提供了一套新的层系。鄂宜页 1HF 井在寒武系牛蹄塘组获产量 $6.02\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $12.38\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,鄂阳页 1HF 井获产量 $7.83\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $28.85\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,是四川盆地外寒武系首次获得工业气流,开辟了页岩气勘查新区。鄂宜页 2HF 井在志留系龙马溪组获 $3.15\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $5.76\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。上述成果实现了中国页岩气开发区域向中游拓展,层系向震旦系、寒武系拓展^[16-19]。潜力评价结果显示,鄂西地区页岩气资源量达 $11.68\times 10^{12}\text{ m}^3$,具有建设年产能 $100\times 10^8\text{ m}^3$ 的资源基础,为构建长江经济带页岩气勘查开发新格局和低碳清洁能源开发提供了资源基础。

此外,该模式指导在汉南古陆东南翼部署的镇地 1 井、陕南页 1 井获得下寒武统牛蹄塘组厚层页岩气发现,在贵州丹寨雪峰古隆起西南缘黔南凹陷部署的贵丹地 1 井首次获得寒武系乌训组新层系页岩气发现,寒武系、震旦系其他多个层位获得页岩气调查发现^[20]。调查实践证明古隆起周缘是页岩气富集成藏的有利地区,具有良好的勘探前景。

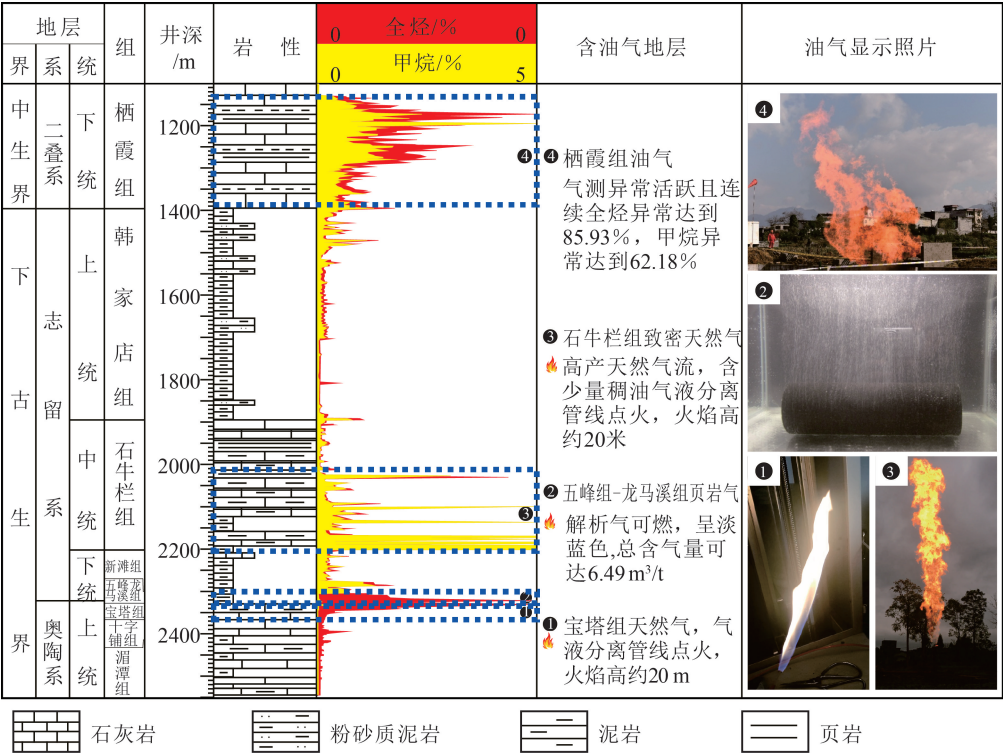


图 1 安页 1 井“四层楼”式油气页岩气分布(据参考文献[14]修改)
Fig. 1 "Four-storey" oil and gas, shale gas distribution map of well Anye1

1.1.4 建立“残留复向斜差异富集成藏”模式,滇东北页岩气调查取得新突破

奥陶系五峰组—志留系龙马溪组在四川盆地的展布范围是制约页岩气勘探的主要因素。一般认为,龙马溪组深水陆棚有利沉积相区分布于马边—雷波—盐津一线西北,向西南页岩层厚度迅速减薄。通过露头、钻井及地震资料追踪对比,笔石生物地层格架精细刻画,目标层地球化学精准标定,提出四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相带可向西南拓展 100 km,优质页岩分布范围扩大近 6000 km²[22-24]。调查研究建立了滇东北地区残留复向斜“沉积控源、成岩控储、构造控保”页岩气差异富集成藏模式,优选出云南昭通大关—永善有利目标区,部署实施的云大页 1 井取得多层页岩气发现,直井压裂获 5280 m³/d 工业气流,实现了新区页岩气调查突破,证实滇东北昭通大关—永善地区页岩气资源潜力大,勘探开发前景良好。

1.1.5 下扬子地区油气页岩气调查取得新进展

下扬子地区地质条件复杂,油气、页岩气调查一直未有大突破。地质调查表明,下扬子地区是发育于扬子地块的古生代海相残留盆地,自上而下主要发育 3 套有利的页岩层系:海相—海陆过渡相的二叠系、海相的志留系—奥陶系和寒武系。基础地质调查显示,该区依然存在推覆体下盘、后缘凹陷等“动中找静”的良好构造部位,据此圈定无为、南陵、望江、宣城等多个有利区[25]。

在安徽宣城泾县部署实施港地 1 井,取得二叠系页岩气、煤层气、致密砂岩气及页岩油“三气一油”的发现[26-27]。油气赋存呈现“上油下气”的特征,最上部为页岩油,下部依次为页岩气、煤层气和致密砂岩气。其中,大隆组发现 70 m 厚的黑色富有机质泥页岩,TOC 平均 2.0%, R_o 平均 1.2%,含油层段约 30 m。龙潭组煤系厚 0.7 m,煤层含气量 7.2 m³/t;致密砂岩气层段厚 6 m,致密砂岩含气量 0.5 m³/t。该井证实下扬子地区虽经历了多期构造改造,但具备基础油气成藏条件和油气勘探前景。

皖南无为、泾县、宣城等地区的钻井在三叠系周冲村组、殷坑组,二叠系孤峰组、大隆组取得多处油气显示,其中皖为页 1 井钻遇三叠系超高压含气层,为下一步调查指明了方向[25, 28-29]。

1.1.6 形成页岩气选区评价、钻探工程和压裂试气技术体系

选区评价、水平井钻探和压裂试气是制约中国

南方复杂构造区页岩气勘查突破的主要难点。通过页岩气调查,探索形成了南方页岩气选区评价、钻探和压裂试气三大技术体系。综合开展野外页岩剖面高精度数字化测量、泥页岩化学成分测量、地质调查井钻探、地球物理勘查等方法,快速锁定富有机质页岩的空间展布、地球化学特征、岩石矿物学特征、储集性能等评价指标,形成页岩气调查选区评价技术和“甜点”识别技术[15]。探索形成含硅高钙古老地层水平井钻探技术,在鄂西宜昌地区震旦系、寒武系优质储层钻遇率超 90%。应用“快提排量、高砂比粉砂胶液段塞、停泵二次加砂、缝内转向、液氮增能”等复杂裂缝压裂改造工艺,形成了常压—低压低温高钙应力差异大储层压裂改造技术体系。探索采用膜制氮气举和电潜泵排液工艺,成功应用于常压—低压储层页岩气试气,填补了国内该领域技术工艺的空白。

1.2 陆相页岩油气富集成藏理论新认识引领松辽盆地页岩油气新领域调查突破

页岩油指赋存于富有机质泥页岩及其粉砂岩、砂岩、碳酸盐夹层中的自生自储、连续分布的石油聚集。松辽盆地是中国东北部的大型中—新生代沉积盆地,页岩油气资源丰富,但随着勘探程度的提高,面临开发难度大、后备资源接替不足的难题[30-34]。美国通过“页岩革命”实现了页岩油的规模勘探开发。但与美国的海相页岩不同,中国以松辽盆地为代表的主要盆地均发育陆相泥页岩,具有非均质性强、粘土矿物含量高、储层物性差等不利因素,勘探开发难度大[35]。

公益性地质调查部署实施了松辽盆地陆相页岩油气调查科技攻坚,提出松辽盆地青山口组一段泥页岩基质型页岩油富集成藏模式和选区评价新认识,总结形成沙河子组陆相页岩气富集规律,指导在齐家凹陷、古龙凹陷、三肇凹陷、长岭凹陷、梨树断陷 5 个典型地区联合部署实施参数井(图 3),均获得工业油气流突破[36-39]。拓展了陆相页岩油气勘探新领域,对东北老工业基地振兴具有重要意义。

1.2.1 页岩油选区评价新认识推动松辽盆地北部页岩油调查突破

在齐家—古龙凹陷划分出 5 种泥页岩相类型,研究认为大规模发育的泥页岩基质型页岩油是调查勘探的主要类型,首先提出该类型页岩油具备规

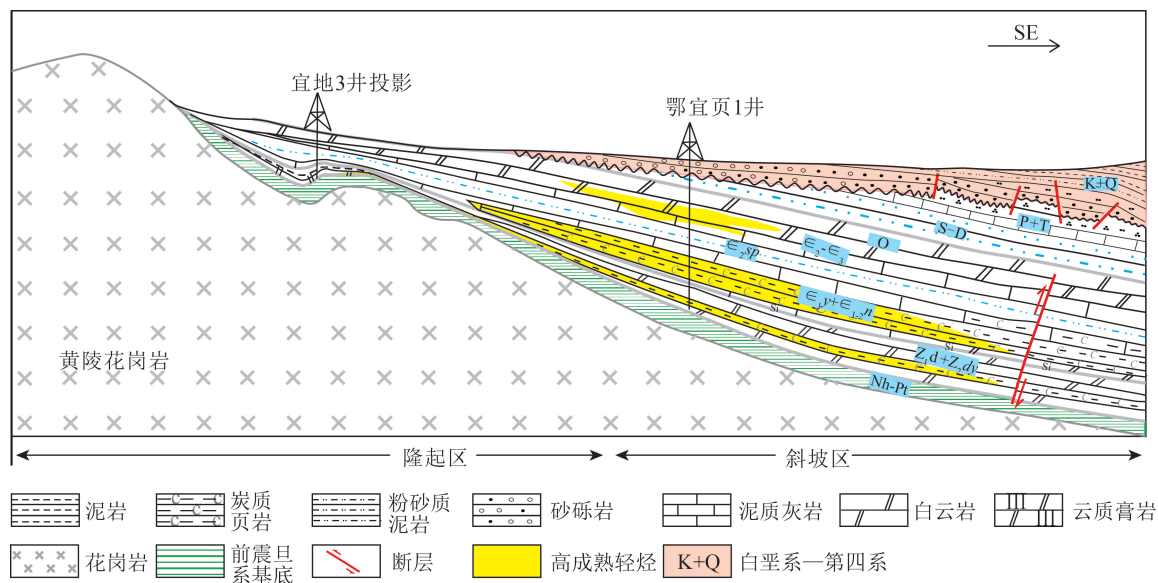


图2 古隆起控藏型页岩气成藏模式示意图

Fig. 2 Pattern of paleo-uplift controlled shale gas enrichment and accumulation

P+T—二叠系—三叠系; S-D—志留系—泥盆系; O—奥陶系; E_2-E_3 —中上寒武统; E_{2sp} —石牌组; E_{1-2n} —牛蹄塘组; E_{1y} —岩家河组; Z_1d+Z_2d —震旦系; Nh-Pt—前震旦系

模开发的资源基础和技术可行性。综合评价指出,有效孔隙度、渗透率、脆性指数、TOC为陆相盆地页岩油富集的主控因素。创新提出页岩油储层划分标准,Ⅰ类页岩油储层的标准为TOC大于2.0%、S₁大于2.0%,孔隙度大于7%,渗透率大于0.1 mD。利用岩性、物性、电性、含油气性、烃源岩、脆性和地应力“七性”关系,确定了松辽盆地北部页岩油分布的有利区,根据有机质丰度、成熟度、含油量、裂缝、压力和脆性“六要素”,确定了页岩油甜点区,优选了页岩油参数井井位。在齐家凹陷、古龙凹陷联合部署实施了松页油1HF井、松页油2HF井,分获14.37 m³/d和10.06 m³/d工业油流,取得泥页岩基质型页岩油调查突破。

齐家-古龙凹陷页岩油调查突破后,主攻区域转移到东部三肇凹陷。三肇凹陷地层压力系数为1.13, R_o 为0.88%,与齐家-古龙凹陷相比,属于常压、中低成熟度地区。研究提出,高有机质、纹层状构造是该区页岩油富集成藏的主控因素,开展青一段页岩油储层精细解析和动态评价,优选部署实施松页油3井直井压裂获得3.46 m³/d工业油

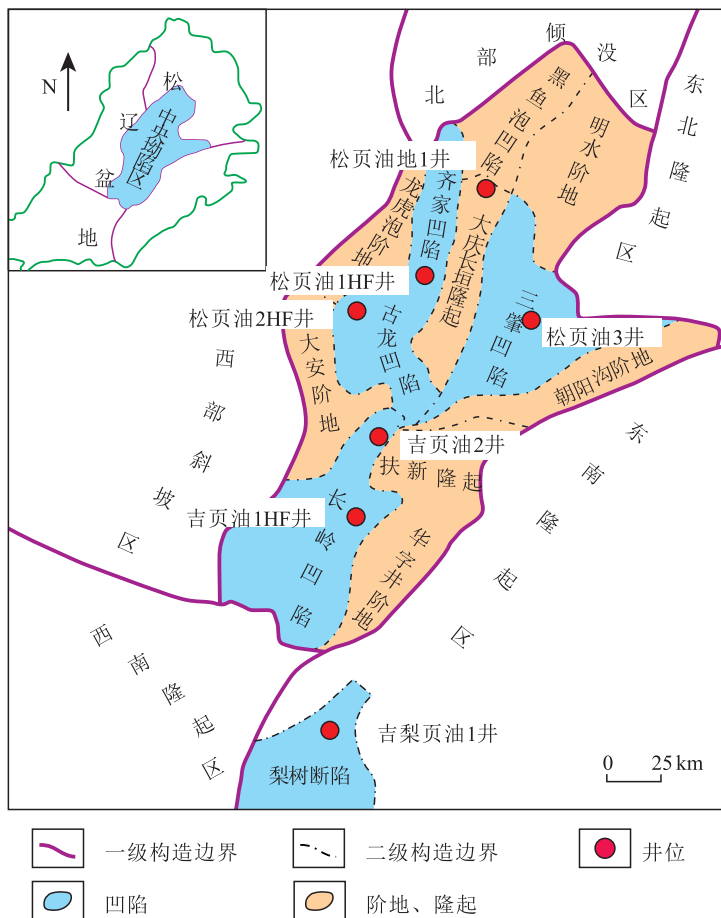


图3 松辽盆地页岩油调查工作部署

Fig. 3 Deployment diagram of shale oil survey in Songliao Basin

流,实现了常压、中等热演化区页岩油调查突破。

1.2.2 深化松辽盆地南部页岩油成藏认识,长岭凹陷页岩油调查取得突破

松辽盆地南部长岭凹陷页岩油成因机制与北部地区存在显著差异。通过深化长岭凹陷青一段页岩油成藏认识,揭示稳定的构造背景、缓长斜坡的沉积古地形、稳定的水动力条件是青一段高粘土富有机质页岩成因,查明了该区优质页岩分布规律,建立了层理型、纹层型和互层型 3 种层组模式,指出层理型和纹层型是页岩油主要产层。构建基于有利岩相分布、含油性、可动性、储层物性、可压性等多因素综合评价的陆相页岩油甜点评价指标体系和评价方法,圈定松南页岩油有利区 2 处,优选乾安有利区联合部署实施吉页油 1HF 井获 $16.4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业油流,取得陆相高粘土矿物含量页岩油调查突破。

1.2.3 探索形成陆相页岩气富集成藏新认识,梨树断陷页岩气调查实现突破

针对松辽盆地梨树断陷沙河子组陆相页岩气开展科技攻坚,查明了区域火山活动期富有机质混积页岩形成机理,认为白垩纪早期的火山活动促进了松辽盆地沙河子组优质页岩的形成。建立了松辽盆地南部陆相页岩气 2 种有效的富集模式:纹层型富钙质混积页岩和夹层型富硅质页岩。揭示了层序地层格架控制页岩气成藏组合、构造差异抬升控制页岩气富集带的成藏规律。基于地质-地球物理建模,形成了基于双相介质波动方程理论的烃类检测技术,有效预测了梨树断陷沙河子组页岩油气储层平面分布,部署实施了吉梨页油 1 井,在下白垩统沙河子组钻遇 51 m 厚的优质页岩,压裂测试获 $7.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 页岩气流,取得了松辽盆地断陷层陆相页岩气调查突破。

1.2.4 形成陆相页岩油气钻探、压裂技术方法体系

在陆相页岩油气调查过程中,针对陆相泥页岩水平井钻探、压裂试气等进行攻关,探索形成适用于该地区页岩油气调查的技术方法体系。应用直螺杆+复合片钻头组合方式实现大套泥页岩段快速钻进取心,首次成功应用水基泥浆完成 739 m 泥岩水平井钻探。探索形成地质与地球物理联合建模水平井导向技术,在 1252 m 水平段实现 1.94 m 靶层 100% 钻遇率。针对泥页岩储层特点,采用覆膜石英砂、酸性压裂液体系、段塞加砂、液态 CO_2 增能

新技术,首次在页岩油压裂中使用超临界 CO_2 大型复合压裂工艺,实现高粘土页岩储层大规模体积压裂。探索形成了适用于该地区的水平井体积压裂储层改造技术和试油排采方式。这些技术对陆相页岩油气勘探开发具有重要的示范推广应用价值。

1.3 北方新区新层系油气调查拓展新层系新领域

北方地区包括渤海湾、鄂尔多斯、柴达木、准噶尔、塔里木等大型盆地,是中国商业性油气勘探开发重点地区,层系上多位于中生代地层。“十三五”期间,公益性油气调查重点聚焦盆-山结合带的复杂构造区和尚未规模勘探开发的石炭系—二叠系新层系,开展了塔里木盆地整体结构与深部油气调查,在塔里木盆地西北缘、准噶尔盆地南缘、柴达木盆地东部、银额盆地等地区取得了油气调查突破^[40-47],对开拓勘探新领域具有引领示范作用。

1.3.1 塔里木盆地整体结构调查取得新进展

塔里木盆地面积 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国陆上最大的含油气盆地,石油天然气资源丰富。但油气探明率低,盆地结构、油气成藏条件、资源潜力等重大地质问题亟需解决,尤其深层油气地质研究薄弱。针对盆地油气基础地质问题,立足公益性工作定位,联合中石油、中石化等单位共同开展盆地地震资料系统评价和拼接处理技术持续攻关,建立覆盖全盆地的地震大剖面测网,进行全盆地重、磁、电、震联合解译。攻关形成盆地级地震资料拼接处理技术,实现了塔里木盆地测线成网、正则化处理,形成了贯通全盆的 34 条高品质地震大剖面(图 4)。对盆地一、二级构造单元进行了梳理和划分,提出柯坪断隆为盆地一级构造单元的新认识,确立了塔里木盆地“五隆五坳”的构造格局。通过盆地模拟评价深部寒武系、震旦系油气资源潜力大,圈定柯坪断隆等 4 个油气远景区和沙井子构造带等 8 个有利区,为战略选区突破奠定了基础。

1.3.2 塔西北温宿-柯坪山前带多层系油气调查取得突破

温宿凸起位于塔里木盆地西北部,面积约 4500 km^2 。基于油气地质调查和综合研究分析,认为温宿凸起大规模分布的风化壳、三角洲砂体与持续活动的断裂共同构成了高效油气输导体系,沟通了北部拜城-乌什凹陷侏罗系烃源岩灶,沿断裂、不整合面、砂层等通道运移聚集形成油气藏。建立了新构

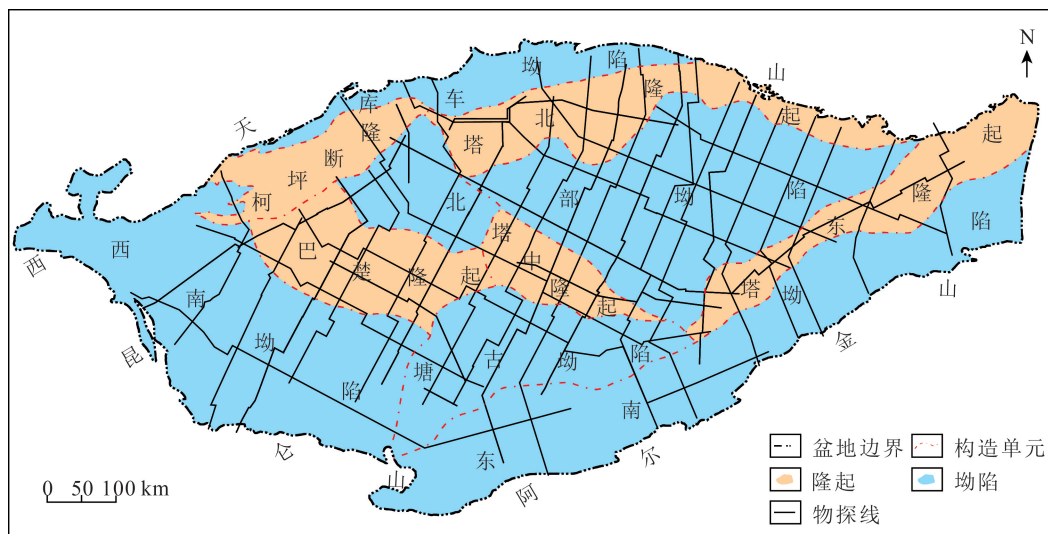


图4 塔里木盆地构造单元划分及大剖面测线位置图(据参考文献[42]修改)

Fig. 4 Division of structural units and location map of large section in Tarim Basin

造运动控制下的多层系多类型晚期复式成藏模式(图5),明确了下部潜山类(碳酸盐风化壳+变质岩裂缝油气藏)、中上部构造-岩性类油藏具有空间分布有序、叠合连片的特点。部署的新温地1井获 $42.74 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业油流;新温地2井获 $22.26 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业油流。提交的温宿区块经中曼公司后续勘探落实新近系吉迪克组探明储量 $3056 \times 10^4 \text{ t}$,含油面积

8.39 km^2 ,发现了温宿油田。

遵循塔西北温宿—柯坪地区多层系立体调查工作思路,聚焦沙井子构造带开展新区新层系油气调查,首次提出塔里木盆地志留纪为潮控型海湾复合沉积体系,明确潮控三角洲是塔西北最主要的勘探类型。建立了塔西北沙井子构造带“断裂主控、多期冲注、晚期为主”的油气成藏模式,揭示了复杂

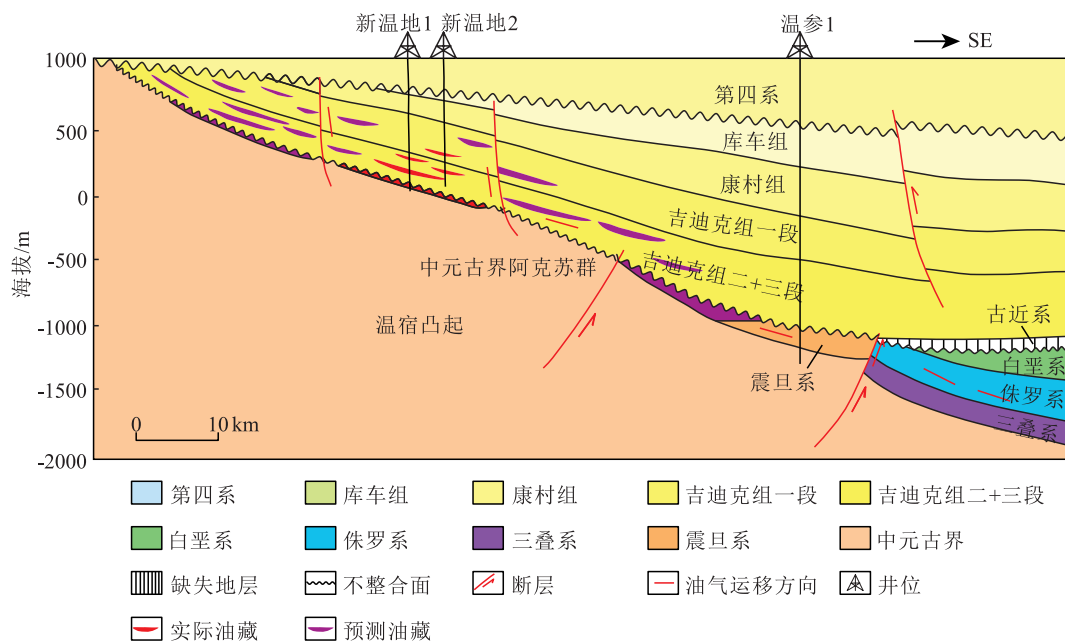


图5 温宿凸起油藏模式图(据参考文献[46]修改)

Fig. 5 Reservoir pattern of Wensu uplift

山前带构造和构造-岩性类油气藏分布规律。部署实施的新苏地 1 井志留系钻遇气层和气水同层合计 18.7 m。经压裂射开 6.9 m 气层和 3 m 气水同层, 分获 $1.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $1.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流, 取得塔西北志留系油气调查突破。此外, 根据地质调查成果优选柯坪西区块, 服务区块中标公司部署柯探 1 井获得 $104 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流。上述工作证明, 塔西北柯坪—温宿地区具备建设大型油气资源基地的地质条件。

1.3.3 复式油气成藏模式新认识引领准噶尔盆地南缘博格达山前带油气调查突破

准噶尔盆地东南部博格达山周缘勘探程度低, 油气成藏条件、资源潜力等重大基础地质问题亟需解决。通过构造样式分析和构造演化恢复, 首次提出博格达山周缘为二叠系芦草沟组沉积和沉降中心的新认识, 建立了芦草沟组咸化、深水、富有机质优质烃源岩发育模式, 提出博格达山前构造带纵向油气接力, 横向环状分布的复式油气成藏新模式(图 6)。认为深层二叠系芦草沟组主要发育源储一体、大面积分布的岩性油气藏, 中深层梧桐沟组主要发育断裂输导、岩性主控、成藏期早的致密油藏, 浅层三叠系克拉玛依组主要发育断裂输导、构造主控、成藏期晚的构造类气藏。厘定了油气成藏主控因素, 揭示了山前带油气藏多层系、多类型、有序分

布的规律。部署新吉参 1 井压裂测试, 在二叠系芦草沟组和三叠系克拉玛依组分别获得 $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $1.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流, 取得 2 个层系油气调查突破。后续在西部永丰次凹部署实施新永地 1 井获工业天然气流。调查成果引领带动了区域内油田公司加大区块内的勘探力度, 优选提交的永丰、大有等区块成功出让, 有效引领了博格达山前带转变为勘探热点地区。

1.3.4 柴达木盆地、银额盆地石炭二叠系油气调查取得新发现

针对柴达木盆地深部的石炭系开展调查攻坚, 建立了柴达木盆地石炭系多类型晚期成藏模式, 认为石炭系在二叠纪末与早更新世 2 次生烃, 以早更新世生烃为主。改变了柴达木地区“古生界为变质结晶基底, 存在古老陆块”的传统认识, 调查确认石炭系未变质, 具备油气基础地质条件。优选柴东欧南凹陷有利区, 部署柴页 2 井含气性测试工程, 压裂试气获得无阻流量 $1180.70 \text{ m}^3/\text{d}$, 稳定产量 $488.3 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气流, 证明石炭系是柴达木盆地第四套油气勘探层系, 资源前景广阔。

针对银额盆地地层、构造、沉积演化和油气成藏开展调查评价, 提出石炭系—二叠系地层残留厚度大、烃源岩发育、储集类型多样和具备保存条件的新认识, 明确了银额盆地为古生代与中生代叠合

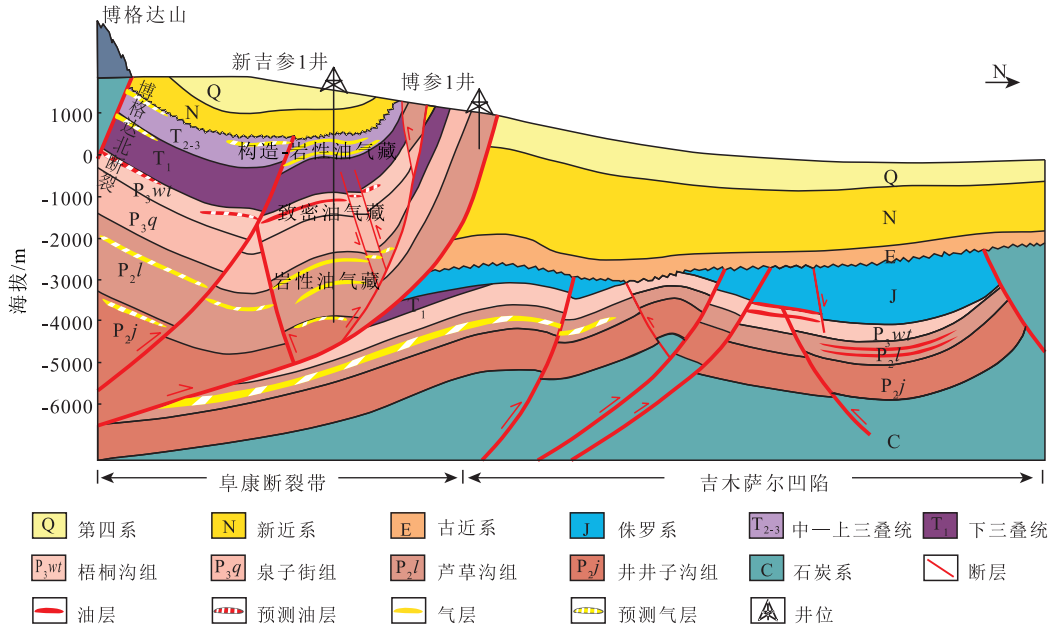


图 6 博格达山周缘复式油气成藏模式(据参考文献[43]修改)
Fig. 6 Compound hydrocarbon accumulation pattern around Bogeda mountain

含油气盆地。通过钻探获取的古生物化石资料与火山岩、侵入岩锆石 U-Pb 同位素年龄,建立了银额盆地主要构造单元石炭纪、二叠纪—中生代层序地层剖面与地层格架,深化了盆地沉积—构造演化认识。在吉格达凹陷部署的蒙额参 3 井在石炭纪侵入岩获日产油 $2.64 \text{ m}^3/\text{d}$,二叠系砂岩日产油 $1.66 \text{ m}^3/\text{d}$ 。这是中国北方古生代侵入岩首次发现油气流,也是首次在银额盆地石炭系钻获具有工业价值的油气流,拓展了油气调查新层系、新类型。

1.3.5 形成北方山前带地区油气调查技术方法

针对盆山结合部山前带地区进行地球物理技术方法攻关,形成了以拟三维层析反演静校正、多域联合去噪和叠前时间偏移成像为核心的一体化地震资料处理技术,建立了以露头、钻井和地震联合标定为基础,以多期冲断构造建模和三维射线追踪速度场构建为核心的山前带地震资料解释技术。针对低渗透储层测井识别和评价难度大,建立了不同层系、不同类型储层物性及含油气性测井评价体系。形成“地层—岩性圈闭地球物理描述”、“大口径油气调查井钻探”和“防砂控砂地层含油性测试”等关键配套技术,推动了山前带油气调查勘查技术进步,保障了山前带新领域油气调查突破。

1.4 煤系气调查取得新进展

中国煤层气资源丰富,已在沁水盆地、鄂尔多斯盆地实现商业性开发,但其他地区进展缓慢,储产量增长低于预期。为推动国内煤层气产业发展,公益性煤层气地质调查明确提出“煤系非常规天然气综合调查评价”的工作理念和方法,由传统单一煤层气调查转为煤系地层多类型天然气综合调查,创新形成多因素甜点区评价方法,探索形成储层改造与排采工艺,在 4 个新区 3 种类型煤层气(煤系气、采动区采空区煤层气、低阶煤层气)调查中取得突破性进展^[48-51],为国内煤层气产业发展开辟了新领域。

1.4.1 煤系“三气”调查取得重要突破

将煤系中互层的、富含气的多煤层、泥页岩层、致密砂岩层作为目标,聚焦煤系中煤层气、页岩气、致密砂岩气“三气”开展综合调查评价。提出了“煤系生烃能力强、构造简单稳定、地层超压弱含水”的煤系气“富气高产”地质选区理论,指出向斜控藏模式下“构造简单、弱水性、原生结构煤、含气性好、煤层集中度高、超压储层区”为煤系气富集高

产的甜点区,优选了黔西六盘水、川南宜宾、东北鸡西鹤岗 3 个有利区开展工作。部署实施的杨煤参 1 井、川高参 1 井和 2 井、鸡煤参 1 井和黑鸡地 1 井均取得高产工业气流。其中,川高参 1 井最高量为 $8307 \text{ m}^3/\text{d}$,杨煤参 1 井最高量为 $5011 \text{ m}^3/\text{d}$,创南方地区煤层气直井单井产量新高,开辟了煤系“三气”勘探新领域,有效示范引领了煤系气产业发展。

1.4.2 东北鸡西—鹤岗采动区、采空区煤层气探索取得突破

煤田采动区、采空区普遍赋存的瓦斯气即甲烷气,一般直接排放进入大气中成为温室气体排放源。中国绝大部分煤矿没有开展采动区、采空区煤层气开采利用工作。为了探索利用这部分资源,在东北鹤岗、鸡西盆地煤炭采动区、采空区开展工程示范,部署实施的黑鹤参 1 井、黑鸡地 3 井和黑鸡地 4 井均取得高产工业气流。鹤岗煤矿采空区黑鹤参 1 井折算纯甲烷产量 $1.42 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。鸡西煤矿采空区黑鸡地 3 井折算纯甲烷产量 $7500 \text{ m}^3/\text{d}$;采动区黑鸡地 4 井单井最高折算纯甲烷产量 $3.56 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工程示范表明采动区、采空区瓦斯气体可以作为有效资源规模开发利用,这对减少温室气体排放、降低瓦斯爆炸风险和产业转型具有重大意义。

1.4.3 新疆淮南低阶煤煤层气获工业气流

北美地区煤层气主要是低阶煤煤层气。中国高阶煤、中阶煤、低阶煤的煤层气资源各占 1/3,但目前主要开采中、高阶煤煤层气。为了探索低阶煤煤层气勘探开发技术可行性和资源可动用性,在新疆淮南地区部署实施了新乌参 1 井,取得单井最高日产 $4012 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,实现了淮南地区低阶煤煤层气调查突破,对中国新疆等地区广泛发育的低阶煤层气勘探开发具有重大引领借鉴意义。

1.4.4 形成煤系气压裂试气技术方法体系

针对煤系地层地质、工程特殊性,创新优化煤系储层压裂工艺,实现了对目标煤层及煤系泥页岩层、致密砂岩层的有效改造,具有广泛应用价值。射开主力煤层、扩射顶底板,采用“大排量、高砂比、多级段塞、分段阶梯式加砂”的压裂工艺,实现了黔西煤系“三气”单井综合压裂改造;射开主力煤层,限制射孔孔眼,采用“大排量、阶段性提升排量、中低砂比、多级段塞”压裂工艺,实现了川南地区单煤层最大规模的水力压裂改造;采用“小排量、高压加砂”的压裂工艺,实现了鸡西盆地深部煤系砂泥岩

致密储层压裂。

创新优化煤系“三气”合层排采工艺,获得高产稳产工业气流。以控制井底流压“连续、平稳、缓慢”下降为核心,建立了动液面、井底流压、套压一体化控制模型,形成了分段优化的精细压差控制的“三气”合层排采技术,杨煤参1井、川高参1井、鸡煤参1井、新乌参1井等均获高产稳产,填补了国家在西南地区煤层气高效排采的空白,示范引领效果显著。

2 公益性陆域油气调查“十四五”工作思考

“十四五”时期,中国经济社会发展对油气资源需求仍将持续增加,对外依存度居高不下,加大国内油气供给是保障国家能源安全的关键。国家“十四五”规划纲要明确提出要推进能源革命,加强国内油气勘探开发,开展战略性矿产找矿突破战略行动。“碳达峰、碳中和”目标的制定为天然气、页岩气等低碳清洁能源发展带来了重大机遇和挑战。这都为公益性油气调查工作指明了方向,注入了发展动力。随着国家油气勘查开采体制改革和矿产资源管理体制改革的深入推进,油气矿业权区块全面实施竞争性出让,为公益性油气调查工作提出了具体需求。随着勘探程度深入,勘探对象日益复杂,页岩油气等非常规油气、深层—超深层油气正逐渐成为重要的勘探领域,这为油气调查工作提出了更高的要求。

“十四五”时期,公益性油气调查应坚持需求导向、问题导向、目标导向,做到点上突破与面上区域评价相结合、科学理论攻关指导与技术方法创新应用相结合、资源潜力技术经济 and 环境影响“三位一体”综合评价与提交优质有效勘查区块相结合,重点开展以下四方面工作。

一是坚持科技创新引领,加强油气基础地质调查。针对制约油气勘探突破的重大基础地质问题与工程难题开展科技攻关,探索塔里木、四川等大型盆地深层、南方复杂构造区、页岩油气等非常规油气形成的地层、沉积、构造等基础地质条件,探索形成油气成藏富集新理论、新认识,创新建立油气调查评价技术方法体系和标准体系,推动油气地质学科发展。

二是坚持信息化引领,向地质大数据要产能。开展物探钻探资料统筹分析与综合研究,强化国内

油气调查勘查数据整合,推动油气调查勘查信息数据库建设,构建大型沉积盆地三维地质模型,开拓油气勘探新区、新层系、新领域,将地质大数据转化为生产力。

三是坚持“三性”工作定位,加强油气调查与战略侦察。瞄准国家重大需求,开展基础调查与综合评价,查明长江经济带、滇黔桂、新疆、西藏等重点地区、重点层系油气和页岩油气资源潜力,摸清资源家底,圈定远景区和有利区。重点针对长江下游、滇黔桂、塔西北、淮南等开展油气战略选区调查,优选勘查区块支撑油气勘查开采体制改革。

四是服务勘查区块后续勘探开发。在地质研究、综合评价、井位部署、生产开发 and 环境影响评估等方面提出地质解决方案,探索全生命周期服务油气资源基地建设。

3 结 语

“十三五”期间,公益性油气调查立足支撑国家能源安全保障工作定位,针对新区、新层系、新类型、新领域开展基础地质调查和战略选区评价,相继在长江经济带页岩气、松辽盆地陆相页岩油气、北方新区新层系油气、煤层气等非常规油气地质调查等领域取得了突破性成果,解决了一批油气基础地质问题和工程技术难题。初步构建起长江经济带页岩气勘探开发新格局,有力推动了松辽盆地陆相页岩油气勘探开发进程。优选的勘查区块有效地支撑了国家油气勘查开采体制改革,助推形成多处油气页岩气资源基地。

“十四五”时期,油气地质调查需要依靠科技创新和信息化两大引擎,突出大型盆地整体结构研究和综合评价,聚焦非常规、深层油气,着力支撑油气勘查开采体制改革与矿产资源管理改革,推动构建公益性与商业性油气勘探有效衔接新机制,服务油气资源产业高质量发展。

致谢: 本文是全体油气地质调查工作者共同的成果,审稿专家提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 王志刚,蒋庆哲,董秀成,等.中国油气产业发展分析与展望报告蓝皮书(2019—2020)[M].北京:中国石化出版社,2020:1-345.
- [2] 张大伟.创新勘探开发模式提升中国油气勘探开发力度[J].中国国土资源经济,2019,32(8):4-7.
- [3] 自然资源部油气资源战略研究中心.新时代矿产资源管理研究[M].北

- 京:地质出版社,2019:279-280.
- [4] 中华人民共和国自然资源部.全国中国石油天然气资源勘查开采情况通报(2019 年度) [EB/OL]. (2020-07-28) [2021-01-12]. http://gi.mnr.gov.cn/202007/t20200729_2534777.html.2020.
- [5] 胡素云,李建忠,王铜山,等.中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J].石油实验地质,2020,42(5):813-823.
- [6] 郑民,李建忠,吴晓智,等.中国主要含油气盆地油气资源潜力及未来重点勘探领域[J].地球科学,2019,44(3):833-847.
- [7] 贾承造.中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J].石油学报,2020,41(12):1445-1464.
- [8] 新华网.习近平主持召开中央财经领导小组会议[EB/OL].(2014-06-17) [2021-01-12]. <http://dublincore.org/documents/dc-xml-guidelines/>.2014.
- [9] 中共中央国务院.关于深化石油天然气体制改革的若干意见[EB/OL].(2017-05-21) [2021-01-12]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-05/21/content_5195683.htm.2017.
- [10] 韩亚琴.中国油气资源勘查开采管理改革的几点思考[J].中国国土资源经济,2020,33(10):49-53.
- [11] 韩亚琴.浅析中国油气探矿权勘查投入考核方式[J].中国国土资源经济,2019,32(12):17-20,85.
- [12] 张大权.能源基础地质调查[N].中国矿业报,2017-12-08.
- [13] 翟刚毅,包书景,庞飞,等.武陵山复杂构造区古生界海相油气实现重大突破[J].地球学报,2016,37(6):657-662.
- [14] 翟刚毅,包书景,庞飞,等.贵州遵义地区安场向斜“四层楼”页岩油气成藏模式研究[J].中国地质,2017,44(1):1-12.
- [15] 包书景,李世臻,徐兴友,等.全国油气资源战略选区调查工程进展与成果[J].中国地质调查,2019,6(2):1-17.
- [16] 陈孝红,张保民,陈林,等.鄂西宜昌地区晚奥陶世一早志留页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J].地球学报,2018,39(3):257-268.
- [17] 陈孝红,张保民,张国涛,等.湖北宜昌地区奥陶系五峰组一志留系龙马溪组页岩气高产工业气流[J].中国地质,2018,45(1):199-200.
- [18] 张君峰,许浩,周志,等.鄂西宜昌地区页岩气成藏地质特征[J].石油学报,2019,40(8):887-899.
- [19] 张抗,白振瑞.第三次全国油气勘探战略展开的优先指向[J].中外能源,2020,25(6):1-18.
- [20] 淡水,闫剑飞,包书景,等.雪峰隆起西南缘(贵丹地1井)震旦一寒武系获多层系页岩气重大发现[J/OL].中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210105.0915.004.html>.2021.
- [21] 张子亚,张聪,石砥石,等.宁蒗—盐源地区(云宁地1井)泥盆系获天然气重大发现[J].中国地质,2019,46(2):432-433.
- [22] 杨平,汪正江,余谦,等.四川盆地西南缘五峰—龙马溪组页岩气资源潜力分析[J].中国地质,2019,46(3):601-614.
- [23] 杨平,汪正江,余谦,等.滇东北木杆向斜奥陶系五峰组一志留系龙马溪组页岩气资源潜力评价[J].石油实验地质,2019,41(05):638-647.
- [24] 张娣,余谦,陆俊泽,等.云南永善—大关地区五峰组—龙马溪组黑色页岩生物地层划分与沉积环境探讨:以新地2井为例[J].地球科学,2020,45(3):739-751.
- [25] 郑红军,周道容,殷起春,等.下扬子页岩气地质调查新进展及突破难点思考[J].地质力学学报,2020,26(6):852-871.
- [26] 石刚,黄正清,郑红军,等.下扬子地区二叠系“三气一油”钻探发现[J].中国地质,2018,45(2):416-417.
- [27] 石刚,徐振宇,郑红军,等.下扬子地区“三气一油”钻探发现及成藏地质条件——以皖南港地1井钻探发现为例[J].地质通报,2019,38(9):1564-1570.
- [28] 吴通,李建青,章诚,等.下扬子无为凹陷中三叠世周冲村组天然气成藏物质基础分析[J].华东地质,2020,41(4):425-433.
- [29] 李建青,章诚,黄正清,等.下扬子复杂构造区超高压含气层的发现及油气富集关键要素[J].地质通报,2021,40(4):577-585.
- [30] 王玉华.大庆油田勘探形势与对策[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):23-33.
- [31] 孙龙德,王广昀.论大庆油田振兴发展战略[J].大庆石油地质与开发,2019,38(5):1-7.
- [32] 孙龙德.古龙页岩油[J].大庆石油地质与开发,2020,39(3):1-7.
- [33] 崔宝文,蒙启安,白雪峰,等.松辽盆地北部石油勘探进展与建议[J].大庆石油地质与开发,2018,37(3):1-9.
- [34] 王广昀,王凤兰,赵波,等.大庆油田公司勘探开发形势与发展战略[J].中国石油勘探,2021,26(1):55-73.
- [35] 孙龙德,刘合,何文渊,等.大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J].石油勘探与开发,2021,48(3):453-463.
- [36] 李士超,张金友,公繁浩,等.松辽盆地北部青山口组一、二段泥岩七性特征及页岩油有利区优选[J].地质论评,2017,63(S1):71-72.
- [37] 李士超,张金友,公繁浩,等.松辽盆地北部白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选[J].地质通报,2017,36(4):654-663.
- [38] 周志,阎玉萍,任收麦,等.松辽盆地页岩油勘探前景与对策建议[J].中国矿业,2017,26(3):171-174.
- [39] 张君峰,徐兴友,白静,等.松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(4):637-652.
- [40] 卢进才,牛亚卓,姜亭,等.中国北方石炭系一二叠系油气地质调查与勘探进展[J].地质通报,2018,37(1):7-15.
- [41] 陈树旺,张健,郑月娟,等.松辽盆地西部斜坡区上古生界油气地质调查进展与发现[J].中国地质调查,2019,6(1):1-9.
- [42] 周新桂,杜治利.北方新区新层系油气地质调查与勘探进展及成果[J].中国地质调查,2019,6(4):1-10.
- [43] 周新桂,高永进,杜小弟,等.新疆博格达山前带油气调查进展[J].中国地质调查,2020,7(1):1-6.
- [44] 卢进才,魏建设,姜亭,等.银额盆地居延海拗陷原油物理化学特征与油源探讨[J].地质通报,2020,39(10):1589-1600.
- [45] 李宗星,彭博,马寅生,等.柴达木盆地石炭系油气调查最新进展[J].中国地质调查,2019,6(4):79-87.
- [46] 张君峰,高永进,杨有星,等.塔里木盆地温宿凸起油气勘探突破及启示[J].石油勘探与开发,2019,46(1):14-24.
- [47] 高永进,张君峰,张远银,等.塔里木盆地西北部新苏地1井首获志留系工业气流[J/OL].中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200915.1033.011.html>.2020.
- [48] 毕彩芹,单衍胜,逢磷,等.鸡西盆地煤炭资源枯竭矿区钻获高含气量煤系储层[J].中国地质,2018,45(6):1306-1307.
- [49] 毕彩芹,单衍胜,朱韩友,等.四川南部地区川高参1井获煤层气高产工业气流[J].中国地质,2018,45(5):1076-1077.
- [50] 单衍胜,毕彩芹,张家强,等.准噶尔盆地南缘探获中侏罗统低煤阶煤层气高产工业气流[J].中国地质,2018,45(5):1078-1079.
- [51] 毕彩芹,胡志方,汤达祯,等.煤层气研究进展与待解决的重要科学问题[J].中国地质,2021,48(2):402-423.