引用格式: 王步清,肖粤新,徐秋晨,2022. 宜昌黄陵隆起构造演化及其对中下扬子页岩气勘探的启示 [J]. 地质力学学报,28 (4):561-572. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021130

Citation: WANG B Q, XIAO Y X, XU Q C, et al., 2022. Structural evolution of the Huangling uplift, South China: Implications for the shale gas exploration in the middle and lower Yangtze River area [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 561-572. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021130

宜昌黄陵隆起构造演化及其对中下扬子页岩气勘探的启示

王步清^{1,2},肖粤新¹,徐秋晨² WANG Buqing^{1,2}, XIAO Yuexin¹, XU Qiuchen²

1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心,湖南长沙410000;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083

1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha 410000, Hunan, China;

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

Structural evolution of the Huangling uplift, South China: Implications for the shale gas exploration in the middle and lower Yangtze River area

Abstract: Significant discoveries and breakthroughs have been made in the shale gas exploration in the southern slope zone of the Huangling uplift, periphery of the Sichuan basin. Based on previous research results, regional geological data, geophysical data and drilling data, it is proposed that the uplift has experienced four structural evolution stages since the Proterozoic, including the formation of crystalline basement in the pre-Sinian period, the intrusion of rock mass in the early Sinian period, the alternation of subsidence, deposition, uplift and denudation in the Sinian-middle Jurassic period, and the rapid uplift in the late Jurassic-Paleogene period. This distinctive structural evolution history of the Huangling uplift plays an important role in the shale gas accumulation, in which the third stage assures the appropriate depth and moderate thermal evolution and porosity, and the strong basement formed in the first stage protects the relative integrity and continuity of the sedimentary cap. We also found some uplifts with similar structural evolution history, basement and cap features as the Huangling uplift in the middle and lower Yangtze River area, such as the Xuefeng uplift and Qianzhong uplift on the periphery of the Sichuan Basin, and the Huoqiu uplift in the southern North China Basin. Through further geological, geophysical and drilling work, oil/gas reservoir may be discovered in the above uplifts.

Keywords: paleo-uplift; shale gas reservoir; structural evolution; middle and lower Yangtze River area; implications for exploration

摘 要:2013年以来,在四川盆地周缘黄陵隆起南部斜坡带的下寒武统、震旦系取得页岩气勘查的重大 发现和突破,开拓了盆外复杂构造区页岩气勘查新方向。依据已有研究成果、区域地质资料、物探资料 和钻井资料等,提出黄陵隆起从元古界以来经历了前震旦纪结晶基底形成、震旦纪初的岩体侵入、震旦 纪—中侏罗世沉降沉积与隆升剥蚀交替发展、晚侏罗世—古近纪快速隆升削顶4个构造演化阶段。黄陵隆 起独特的构造演化史对页岩气成藏起到了重要作用,其中震旦纪—中侏罗世沉降沉积与隆升剥蚀交替发 展使早期烃源岩埋深适当,热演化程度和孔隙度适中;而强硬基底则保护了沉积盖层的相对完整性和连

基金项目:国家自然科学基金 (42002173);中国地质调查局地质调查项目 (DD20201111)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42002173) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20201111)

第一作者简介:王步清(1974—),男,博士,研究员,主要从事含油气盆地构造和矿产规划研究。E-mail: 23177896@ qq. com 收稿日期: 2021-09-28;修回日期: 2022-04-28;责任编辑:范二平

续性。考虑构造演化史、基底特征、盖层发育以及烃源岩等因素,对中、下扬子地区类似古隆起进行系统症理分析,发现四川盆地外围的雪峰隆起、黔中隆起与南华北盆地的霍邱隆起石油地质条件较好,通过进一步的地质地球物理和钻探工作,有望取得油气调查的发现和突破。

关键词:古隆起;页岩气藏;构造演化;中下扬子地区;勘探启示

中图分类号: P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2022) 04-0561-12 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021130

黄陵隆起具有基底加盖层的双层结构,地质 构造上位于扬子板块北缘,属于中扬子板块鄂中 断裂-褶皱构造带的次一级隆起。基底为黄陵花岗 岩体, 面积约 970 km², 是中国晋宁期花岗岩的典 型代表 (马大铨等, 2002); 盖层形成背斜, 轴向 约为 N15°E, 南北长约 75 km, 东西宽近 40 km, 主要由震旦系—三叠系组成,背斜地层倾角西陡 东缓,核部岩体出露地表,震旦系局部残留(马 大铨等, 2002)。相关学者对黄陵花岗岩体的形成 和侵位机理研究较为系统全面,对黄陵花岗岩体 的构造演化对油气成藏的影响研究相对较少(马 大铨等, 2002; 龚松林, 2004)。一种普遍的观点 认为该区受印支期、燕山期和喜马拉雅期多期构 造运动影响改造,区域构造复杂,抬升幅度大, 白垩系以上地层多剥蚀殆尽,保存条件差,认为 油气难以在该区域聚集成藏 (郭正吾, 1995)。中 国地质调查局油气资源调查中心在对四川盆地内 威远页岩气发现研究的基础上,认为古隆起边缘热 演化程度相对较低,创新提出"古老隆起边缘控 藏"页岩气成藏模式,通过实施野外地质调查, 部署时频电磁法、二维地震等工作,优选了秭地1 井、秭地2井、鄂阳页1井等多口页岩气井调查, 在黄陵隆起区震旦系陡山沱组, 寒武系牛蹄塘组、 水井沱组,以及奥陶-志留系五峰组、龙马溪组 等泥页岩地层获得页岩气重大发现和突破(李浩 涵等, 2017; 翟刚毅等, 2017a; 张君峰等, 2019; 陈科等, 2020)。相关研究初步表明黄陵隆起的构 造演化史、基底特征、构造变形特征对该区页岩 气的富集成藏具有重要的影响 (张君峰等, 2019)。那么, 黄陵隆起形成演化如何控制古生界 特别是下古生界的油气成藏,通过地质类比法, 考虑构造演化史、基底特征、盖层发育以及烃源 岩等因素,在中下扬子地区寻找沉积构造演化特 征类似的古隆起,提供新的油气调查思路和方向, 是文章研究的主要目标。

1 区域地层和区域构造

1.1 区域地层

黄陵隆起核部由晚太古代—早元古代中深变 质岩和以新元古代黄陵花岗岩基为主的侵入体组 成(马大铨等, 2002),两翼发育震旦系—白垩系 的海相碳酸盐岩和碎屑岩沉积盖层 (邓铭哲, 2018),主要包括震旦系南沱组、莲沱组、陡山沱 组、灯影组, 寒武系牛蹄塘组、石牌组、天河板 组、石龙洞组和覃家庙组等,奥陶系南津关组、 红花园组、大湾组、牯牛潭组、庙坡组、宝塔组、 五峰组、志留系龙马溪组、新滩组、罗惹坪组、 纱帽组, 泥盆系云台观组、黄家磴组、写经寺组, 石炭系黄龙组,二叠系梁山组、栖霞组、茅口组/ 孤峰组、龙潭组、吴家坪组/大隆组, 三叠系大冶 组、嘉陵江组、巴东组等,以及侏罗系、白垩系 等地层(图1)。沉积盖层围绕基底由老至新呈环 状分布,盖层地层向四周倾斜,东翼稍缓,倾角 一般 8°~15°, 西翼较陡, 一般倾角为 30°~40°。 秭地1、秭地2、鄂宜参2、鄂阳页1、鄂阳页2等 钻井证实该区发育三套页岩层系,分别为震旦系 陡山沱组、寒武系牛蹄塘组(水井沱组)和奥陶 系五峰组-志留系龙马溪组。震旦系陡山沱组岩 性主要为黑色炭质页岩、灰色中层含炭白云岩及 硅质页岩等; 寒武系牛蹄塘组岩性主要为薄层黑 色炭质页岩、夹多层中层灰岩、薄层硅质岩等;奥 陶系五峰组—志留系龙马溪组岩性主要为富含有机 质的黑色炭质泥页岩、硅质岩(翟刚毅等, 2017a; 周磊等, 2018; 周志等, 2018; 陈科等, 2020)。

1.2 区域构造

黄陵隆起位于扬子板块北缘中段,北秦岭-大 别造山带,西南为湘鄂西隔槽式褶皱带,东南临 江汉盆地,处于两大造山带之间的相对稳定区, 构造活动强度相对较弱(徐大良等,2013)。隆起 主体上为一轴向呈北北东向,西陡东缓,轴面东



图 1 黄陵隆起及周边地质简图 (据程裕淇等, 2004修改) Fig. 1 Geological sketch map of the Huangling uplift and its periphery (modified from Cheng et al., 2004)

倾的短轴背斜,背斜核部地层遭受剥蚀,两翼地 层较为齐全。在背斜周缘还发育神农架背斜、秭 归向斜、香龙山背斜、长阳张家河背斜以及当阳 向斜等构造,背斜长轴有近东西向、近南北向、 北北西向及复杂轴向等多种构造线方向(图2); 隆起周缘被汉水断裂、仙女山断裂、天阳坪断裂、 通城河断裂、雾渡河断裂、阳日湾断裂等不同走 向的断裂构造所切割,显示黄陵隆起在不同时代 受到不同方向的压扭应力作用。该区发育的主要 不整合有: 震旦系与前震旦系的角度不整合、寒 武系与震旦系的平行不整合、泥盆系与志留系的 平行整合、石炭系与泥盆系的平行不整合、侏罗 系与三叠系及其他下伏地层的局部角度不整合、 白垩系与侏罗系及其他下伏地层的角度不整合、 新近系与古近系及其他下伏地层的角度不整合等。 表明该区在震旦系沉积之后主要经历了加里东运 动、印支运动、早燕山运动及喜马拉雅运动等几 次大的构造运动。

2 黄陵隆起形成及演化过程

基于野外地质调查资料、钻测井资料、地震 剖面解译及已有研究资料(杨巍然,1987;戴少 武,1996;徐政语和林舸,2001;熊成云等, 2004;徐大良等,2013;邓铭哲,2018),认为黄 陵隆起的构造演化可划分为4个阶段:即2500~ 800 Ma年变质结晶基底形成阶段(图3a); 800 Ma年左右的黄陵花岗岩体侵入与形成阶段 (图3b);800~160 Ma年区域整体沉降接受沉积与 隆升剥蚀交替发展阶段(图3c);160 Ma—现今快 速隆升、背斜形成及核部剥蚀阶段(图3d)。其中 第3个阶段可划分为2个时期:即震旦纪—寒武纪 稳定沉积时期,奥陶纪—中侏罗世的沉降接受沉 积和隆升剥蚀交替发展时期;第4个阶段可细分为 3个时期:即晚侏罗世的挤压隆升期,白垩纪—古 近纪的伸展构造发育期,渐新世末期—现今的强 烈隆升期。

2.1 变质结晶基底形成阶段

在 2500~800 Ma 这漫长的地质年代里, 黄陵 隆起区经历了结晶基底形成和岩体侵入侵位 2 件大 事。黄陵隆起在前南华纪主要经历了 4 次构造运 动,分别为阜平、吕梁、四堡、晋宁构造运动, 晋宁运动后, 古陆块固结, 结晶基底形成。阜平 运动在该区表现为古元古界与太古界平行不整合, 不整合面经强烈韧性再造和取代, 呈现出平行不 整合的接触关系。吕梁运动在该区表现为中元古



- 图 2 黄陵隆起大地构造位置图 (据郭战峰等, 2006 修改)
- Fig. 2 Tectonic location map of the Huangling uplift (modified from Guo et al. , 2006)



图 3 黄陵隆起构造演化模式图

Fig. 3 Structural evolution pattern graph of the Huangling uplift

界和古元古界的角度不整合,是黄陵-川中古陆块的 主要形成阶段,吕梁运动之后黄陵隆起区成为扬子 板块的组成部分。四堡运动在该区表现为新元古代 青白口纪马槽园群与中元古界神农架群之间的角度 不整合,扬子古陆块经四堡运动后基本固结。晋宁 运动在黄陵隆起区核部北缘表现为南华系陡山沱组 与新元古代青白口纪马槽园群的平行不整合接触 (熊成云等,2004);在无马槽园群沉积的地区,表 现为南华系莲沱组、南沱组,陡山沱组与黄陵杂岩 或黄陵花岗岩基的超覆不整合。

2.2 花岗岩体侵入就位阶段

黄陵背斜核部前南华纪岩浆岩十分发育,从

基性岩一超基性岩至中酸性岩类均有分布,尤以 花岗岩类最为发育(熊成云等,2004)。黄陵花 岗岩侵位时间在 832~750 Ma 之间,其形成与北 面"秦岭洋"在晋宁期晚期向扬子板块之下俯冲 消减 有 关(马 大 铨 等,2002)。冯 定 犹 等 (1991)认为黄陵三斗坪岩体形成年龄为 832± 12 Ma; 似斑状黑云母花岗闪长岩体形成年龄为 819±7 Ma; 粗粒花岗岩脉形成年龄为 769±1 Ma。 在约 832~819 Ma 期间,基底平均抬升了约 1.2 km,从而得到黄陵岩体新元古代平均古隆升 速率约为0.09 km/Ma (龚松林,2004)。黄陵隆 起南侧地震剖面显示,震旦系陡山沱组沉积时,

含量高。震旦系灯影组沉积时至上侏罗统沉积 之前,基底稳定,地层厚度南北基本一致,因 此,黄陵隆起早期隆升作用主要影响震旦系陡 山沱组沉积,且这种影响是区域的,不限于现 今黄陵隆起的范围。



图 4 黄陵隆起南侧地震解释剖面 (据陈科等, 2020 修改)

Fig. 4 Seismic interpretation profile of the southern Huangling uplift (modified from Chen et al., 2020)

2.3 区域整体沉降接受沉积与隆升剥蚀交替发展 阶段

震旦纪灯影期至中侏罗世长约 650 Ma 年时间 内,黄陵隆起区域基底稳定,整体以垂直运动为 主,或沉降接受沉积,或区域抬升遭受剥蚀,造 成了平行不整合或局部角度不整合,黄陵隆起周 边盖层缺失上志留统、下泥盆统和下石炭统,表 现为上石炭统与上泥盆统、上泥盆统与中志留统 区域平行不整合;侏罗系和三叠系表现为局部角 度不整合。

加里东运动末期(奥陶纪末、志留纪沉积时 期),受南北陆间裂谷海槽闭合造山的影响,研究 区整体隆升,志留系和下泥盆统部分缺失,上泥 盆统与中志留统形成区域平行不整合,总体上没 有使下古生界发生明显的褶皱变形或大规模抬升 (郭飞飞等,2010)。区域上隆起区形成东西向古 构造体系,中扬子"两隆夹一坳"格局形成,两 隆为南北水下肩部隆起,一坳为中部周缘前陆盆 地,其中早志留世发育远源沉积,为一套黑色泥 质页岩、硅质岩等(徐政语和林舸,2001)。

海西运动期(泥盆纪—早三叠世),黄陵隆起 区处于稳定的克拉通盆地,构造变形弱,以接受 沉积为主,中上泥盆世—早三叠纪发育台地相碳 酸盐岩,夹薄层暗色泥页岩,以及滨岸相碎屑岩 沉积,其中二叠系和部分下三叠统以富含有机质 的碳酸盐岩、泥灰岩、泥页岩为主,为优质烃源 岩。泥盆纪末期研究区整体抬升、遭受剥蚀,缺 失下石炭统沉积,形成了上石炭统与上泥盆统的 区域平行不整合。

印支运动期(中三叠世末—早侏罗世),黄陵 隆起区整体开始隆起,局部接受剥蚀,在其北侧 形成大巴山-大洪山冲断褶皱带,在其东南侧形成 洪湖-崇阳-通山冲断褶皱带。区域上,地壳在整 体抬升的背景下发生差异隆起,形成了北西向隆 坳相间的构造格局(戴少武,1996;郭兵等, 2008;郭飞飞等,2010)。在黄陵隆起区,冲断褶 皱作用并不是普遍存在的,侏罗系与三叠系的角 度不整合只在局部发育。

2.4 基底快速隆升、背斜形成及核部剥蚀阶段

关于黄陵背斜的形成和定型时间,沈传波等 (2009)和徐大良等(2013)通过总结大量来自黄 陵背斜核部的低温热年代学数据,认为黄陵背斜 于晚侏罗世至早白垩世发生快速隆升,中侏罗世 之前,黄陵背斜周缘没有明显的褶皱变形,以差 异隆升变形为主。葛肖虹等(2010)认为黄陵背 斜经历3期变形:印支运动—晚燕山运动的构造变 形;晚白垩世—始新世晚燕山运动—早喜马拉雅 运动的伸展隆升或变质核杂岩的形成;渐新世— 中新世早中喜马拉雅运动期间的挤压褶皱构造变 形。戴少武(1996)和徐政语等(2004)依据黄 陵背斜所在区域内晚三叠世地层的缺失,认为黄 陵背斜形成于晚三叠世。邓铭哲(2018)等认为 黄陵背斜及其邻近构造单元形成发育于晚三叠世、 晚侏罗世、早白垩世晚期至晚白垩世、古近纪晚 期至今4个关键时间段。综合已有研究成果、地震 剖面解释和区域地质填图成果,文中倾向于黄陵 背斜于晚侏罗世开始发生挤压隆升,因为地震剖 面解释成果显示黄陵背斜西翼遂宁组沉积时期开 始发育生长地层,是挤压构造开始发生的重要标 志之一(图5)。



图 5 黄陵隆起西翼构造剖面 (据邓铭哲, 2018修改)

Fig. 5 Structural section of the western flank of the Huangling Uplift (modified from Deng, 2018)

(1) 晚侏罗世时期

西翼秭归向斜核部地层厚度大,往黄陵隆起 地层厚度逐渐减薄,呈现出明显的生长地层特征, 上侏罗统 (J₃s) 在秭归向斜最厚处比其东翼 (即 黄陵隆起西翼) 出露地表处厚 300 m 左右,这基 本可以代表黄陵隆起区当时抬升的幅度。

(2) 白垩纪一古近纪时期

对应晚燕山运动和早喜马拉雅运动, 黄陵地 区从挤压环境转换为伸展拉张环境,广泛发育负 反转构造,形成一系列垒堑式构造和断陷式盆地 (罗小平, 2006), 沉积了一套内陆断陷盆地相的 红色碎屑岩系(徐大良等, 2013)。从区域地层分 布来看,黄陵背斜西翼未见白垩系分布,而在东 南翼,可见大范围白垩系分布,与下覆地层呈角 度不整合, 表明从抬升幅度上具有西高东低的特 征。同时,背斜东边的拉张断层更发育,为白垩 纪断陷盆地的形成提供了构造背景。到古近纪时, 继续保持伸展环境,沉积模式由白垩纪的断陷沉 积转为古近纪的坳陷沉积 (郭飞飞等, 2010), 在 江汉盆地及黄陵背斜东南翼, 沉积了厚度较大的 古近系。在总体伸展环境下,由于构造运动的强 度差异,局部发育古新统沙市组与白垩系渔阳组、 始新统荆沙组与新沟咀组之间的角度不整合(葛 肖虹等, 2014)。

(3) 渐新世末期—现今

对应晚喜马拉雅运动,黄陵地区大幅隆升, 其周缘发育挤压坳陷,以河流相、滨浅湖沉积相 为主。区域上表现为中新统广华寺组与渐新统荆 河镇组角度不整合,以及第四系平原组与下覆地 层的不整合。根据构造平衡剖面演化的结果,黄 陵地区隆升幅度超过 6000 m,现今表现为大型穹 窿构造,隆起南北长 73 km,东西宽 36 km,卷入 变形的盖层从南华系到第四系,黄陵背斜核部盖 层地层被剥蚀,出露晚太古代一早元古代的变质 岩、花岗岩和深成杂岩体(徐大良等,2013),出 露面积达 2600 km²。由于基底地层较为强硬,且 快速隆升,使盖层地层以整体褶曲变形为主,断 裂相对不发育,保护了盖层的完整性。

3 黄陵隆起构造演化史对页岩气成藏 富集的影响

2013年以来,中国地质调查局在黄陵隆起南 翼实施的秭地1井和秭地2井获得下寒武统牛蹄 塘组和震旦系陡山沱组的页岩气重大发现(李浩 涵等,2017),在后期部署实施的鄂阳1井和鄂 阳页2HF井在宜昌地区寒武系和震旦系获得重大 突破,发现了迄今全球最古老页岩气藏,取得盆 外复杂构造区寒武系、震旦系页岩气勘查重大突破(张君峰等,2019)。鄂阳页1井位于宜昌长阳贺家坪镇,完钻井深3509m,在震旦系南沱组冰积砾岩完钻,钻获牛蹄塘组和陡山沱组两套目的层,该井牛蹄塘组黑色页岩厚度141m,现场含气量最高可达4.48m³/t;陡山沱组黑色页岩厚度达116m,含气量最高达4.8m³/t,在陡山沱组进行了直井压裂试气,获得5460m³/d页岩气直井产量。鄂阳页2HF井获得5.53×10⁴m³/d、无阻流量19.82×10⁴m³/d的稳定高产页岩气流(翟刚毅等,2017a)。证实震旦系陡山沱组是中国页岩气勘探又一个新的主力层系。黄陵隆起东南翼古老地层页岩气为何能富集成藏,黄陵隆起东南翼古老地层页岩气为何能富集成藏,黄陵隆起东的形成演化起了什么样的积极作用?研究分析认为主要有3点原因。

(1) 黄陵隆起区热流值和古地温梯度比区域 上要低, 使早期烃源岩成熟度不至于过高, 生烃 能力得到有效保留。黄陵隆起区 800 Ma 年左右发 生岩浆侵入活动、此后再无大规模的岩浆侵入活 动,坚硬厚实的基底隔开了盖层与深部热流交换, 使沉积盖层地温梯度偏低,只有 2.2℃/100 m (袁 玉松等, 2006)。较低的地温梯度及黄陵基底的隔 热作用,使得黄陵隆起区烃源岩成熟度比区域上 对应层位的烃源岩成熟度偏低。位于黄陵隆起区 的秭地2井震旦系陡山沱组二段富有机质页岩 R。 为 2.56%~3.19%, 平均值为 2.83% (李浩涵等, 2017);区域上,湘西北地区震旦系陡山沱组暗色 泥页岩 R₀ 为 3.0%~4.0%,高于黄陵隆起区(彭 波等,2017;翟刚毅等,2020)。位于黄陵隆起区 秭地1井和秭地2井的生烃模拟史结果表明:牛蹄 塘组页岩 R₀ 为 1.43%~2.59%, 平均为 2.33% 左 右;区域上,渝东北地区牛蹄塘组页岩镜质体反 射率分布范围在 3.0%~4.0% (陈科等, 2020), 最高的超过4.0%。热流方面,研究区的热流值也 比区域上偏低,平均为44 mW/m²。而在区域上, 最高古热流值达 78 mW/m²,晚二叠世持续降低到 侏罗纪末期的54 mW/m²,但仍比黄陵隆起的热流 值高 10 mW/m² 左右 (卢庆治, 2007)。较低的热 流值和地温梯度使黄陵隆起区曾经短期深埋(大 于 7000 m) 的烃源岩成熟度不至于过高, 生烃能 力得到有效保留。

(2)变形方式以连续整体抬升为主,隆起两 翼地层具有较好的连续性和完整性。在黄陵隆起 刚性基底的保护下,使得其上覆盖层包括震旦系 到侏罗系等一系列地层具有较好的横向连续性和 完整性。在大地构造位置上,黄陵隆起处于秦岭-大别造山带、四川盆地、湘鄂西隔槽式褶皱带和 江南陆内造山带的交接部位,构造变形复杂、强 烈。黄陵隆起周缘地区断裂、褶皱发育,地层系 统连续性差;黄陵隆起由于坚硬刚性基底的存在, 其变形方式以宽缓褶皱变形和整体隆升为主,在 隆起两翼具有较好的连续性和完整性。虽然盖层 地层在古隆起背斜核部被削顶,页岩气保存条件 变差。但是伴随古隆起发育的小规模逆冲断层 (图 4),一定程度上阻挡了页岩气的侧向运移,改 善了保存条件。

(3) 下古生界沉积后, 多次整体隆升, 使烃 源岩没有被长期深埋。钻井、地震资料和野外地 质露头调查资料显示,震旦系、寒武系、奥陶系、 志留系连续沉积。以鄂阳页1井为例,震旦系陡山 沱组厚 200 m, 灯影组厚 165 m; 寒武系牛蹄塘组 厚 460 m, 石牌组厚 170 m, 天河板组厚 100 m; 五峰-龙马溪组厚度小于 500 m。志留纪末期的晚 加里东运动、石炭纪末的海西运动、三叠纪末的 印支运动, 黄陵隆起区多次整体隆升, 使得先期 沉积的优质烃源岩不至于埋藏过深,有机质热演 化程度过高,孔隙度过低。中侏罗世时,黄陵隆 起区烃源岩层埋藏深度达到最大值,但很快晚侏 罗世开始的燕山运动和后期的喜马拉雅运动, 使 深埋地层 (盖层地层最大埋深达 8000 m) 很快抬 升,如鄂宜页1井牛蹄塘组、陡山沱组优质页岩现 今在斜坡的深度是 2900~3400 m 左右, 有机质热 演化程度 R₀ 在 2.5%~3% 左右,适合油气生成和 成藏。

4 讨论:对中、下扬子页岩气勘探的 启示

利用已有研究成果及油气调查资料(崔金栋, 2013;邓大飞,2014;陈相霖等,2018,2021;梅庆 华,2015;彭中勤等,2019;谭元隆等,2021), 发现中、下扬子地区还发育一系列具有类似地质 条件的古隆起,如乐山-龙女寺古隆起、汉南古隆 起、黔中古隆起、雪峰古隆起、九岭古隆起、浙 西许村古隆起、霍邱古隆起等(表1)。通过综合 分析构造演化、烃源岩、热演化史、储盖组合、 埋藏深度等主要控制油气成藏的要素,认为皖北 霍邱古隆起、黔中古隆起、雪峰古隆起、汉南古 隆起、皖南歙县许村古隆起等油气地质条件较好, 有可能获得油气发现和突破,是下一步开展页岩 气和油气地质调查的有利地区,为中下扬子页岩 气调查提供了新的方向。

表1 中、下扬子地区部分古隆起地质特征

Table 1 Geological characteristics of paleo-uplifts in the middle-lower Yangtze River area

古隆起 名称	地理位置	形成 时代	隆起性质	基底	主要盖层	烃源岩发育特征			粉坭亚沥
						烃源岩层	TOC/%	$R_{0} / \%$	- 剱1-西本邸
黄陵	湖北宜昌	晚侏 罗世	挤压隆升	晚太古代— 早元古代变 质岩和新元 古代花岗岩	震旦系—白垩系	陡山沱组 牛蹄塘组 龙马溪组	2. 3 5. 35 2. 56	2.5~3.0 1.4~2.8 1.9~2.3	李浩涵等,2017; 翟刚毅等,2017a; 陈科等,2020
乐山 - 龙 女寺	四 川 乐 山 、 内江	石炭 纪末	剥蚀古隆起	前震旦系花 岗岩	震旦系—第四系, 缺 泥 盆 系、石 炭系	陡山沱组 龙马溪组	3. 20 1. 65	4.0 2.55	梅庆华, 2015
汉南	陕西汉中- 四川巴中	志留 纪末	克拉通边缘 翘倾古隆起	元古界结晶 基底	震旦系—侏罗系	牛蹄塘组	4.22	2.66	陈相霖等,2018
雪峰	湘 西、 黔 东、桂北	志留 纪末	陆内抬升与 挤 压 褶 皱 隆起	前震旦褶皱 基底	震旦系—第三系	牛蹄塘组 龙马溪组	1 ~ 22 1 ~ 4	2. 0~3. 55 2. 0~2. 5	邓大飞等,2014; 彭中勤等,2019
黔中	贵 州 翁 安 、 修文	奧陶 纪末	克拉通内构 造隆起	中元古界褶 皱基底	寒武系—三叠系	牛蹄塘组 龙马溪组 石炭—二叠系	2~6 1~4 0.23~3.67	3.5~4.5 2.5~3.5 1.75~2.2	陈相霖等,2021 翟刚毅等,2017b
九岭	江 西 宜 丰 、 奉新	奧陶 纪末	板块内部挤 压隆起	晋宁期花岗 岩	南华系—寒武系	王 音 铺—观 音 堂组	3.4	3.2	李建青等,2018
许村	皖南歙县			花岗闪长岩	寒武系	荷塘组	2~8	1.9~3.5	李建青等,2018
霍邱	安 徽 长 峰 、 合肥	三叠 纪末	剥蚀古隆起	太古界花岗 岩	寒武系—二叠系、 侏罗系	寒武系 石炭—二叠系	4~8 3	3~4 1.2	石砥石等, 2019

(1) 霍邱古隆起

霍邱古隆起为发育于侏罗系之下的剥蚀古隆 起,位于合肥坳陷北部的长丰-合肥一带,面积为 7500 km² 左右,其中有利区远景区面积在 2250 km² 左右 (石砥石等, 2019)。 合深 3 井及地震资 料表明该区侏罗系直接不整合覆盖于太古界花岗 片麻岩之上, 而在其西缘、南缘和东缘沉积了一 定厚度石炭系—二叠系和寒武系—奥陶系。霍邱 古隆起早期的沉积与南华北盆地其他区域类似, 印支运动时期,由于南缘大别造山带向北的挤压 应力作用,该区抬升隆起,早期沉积的寒武系--奥陶系、石炭系—二叠系大部分区域被剥蚀,仅 在隆起周缘还有一定残存,主要为下太古界地层。 侏罗纪时期,该区处于前陆坳陷-前陆斜坡带,接 受了巨厚的河湖相沉积。古隆起及周缘有4种类型 的油气藏可以探索:①寒武—奥陶系、石炭—二 叠系自身的页岩气或致密气藏;②古生界尖没带 附近的花岗岩,花岗岩致密坚硬,在应力作用下 易产生裂缝,形成裂缝型气藏;③侏罗纪沉积时, 合肥坳陷处于前陆盆地, 霍邱隆起区远离造山带, 发育湖沼相沉积,可能发育岩性气藏;④侏罗系 和下覆地层有一个区域不整合面,古生界二次生 烃可能运移至不整合面聚集形成不整合气藏 (图 6)。

(2) 黔中古隆起

黔中古隆起位于黔中的修文、翁安一带,一 般认为黔中古陆是从滇黔桂古陆分异出来的一个 近东西向分布于贵州中部的狭长古陆 (梅冥相, 1994)。该古隆起最终形成水上隆起的时间为奥陶 纪末五峰组沉积时期(崔金栋, 2013)。黔中古隆 起始终被烃源灶包围且紧邻资阳-宜宾生烃中心、 川南生烃中心、川东生烃中心,晚加里东期、早 印支期、晚印支期,各生烃中心生成的油气分别 向黔中古隆起及其北斜坡运聚,是油气运移的有 利指向区(张宏光, 2015)。2021年, 中国地质调 查局部署于黔中古隆起南缘的黔水地1井未经储层 压裂改造即获得稳定页岩气流,现场解析含气量 最高 1.18 m³/t, 总含气量最高 2.58 m³/t, 气测全 烃最高为 76.27% (陈相霖等, 2021)。在古隆起 区域, 沉积了寒武系牛蹄塘组、志留系龙马溪组、 中泥盆统泥岩等烃源岩,页岩气、油气成藏物质 基础雄厚。



图6 霍邱隆起及周缘构造单元划分图

Fig. 6 Structural units of the Houqiu uplift and its periphery



图7 过霍邱古隆起南北向结构剖面及可能的气藏类型 (平面位置见图6)

Fig. 7 NS-trending structural section over the Huoqiu uplift and possible gas reservoir types (see Fig. 6 for the planar position)

(3) 雪峰古隆起

雪峰古隆起位于湖南西部、贵州东南及广西 的西北一带,是以晚前寒武纪浅变质岩系为主体 的隆起带,形成于加里东运动末期,晚印支运 动一燕山运动进一步强化(邓大飞,2014)。该区 发育下寒武统牛蹄塘组和下志留统龙马溪组两套 烃源岩,雪峰隆起北缘加里东期烃源岩生排烃史、 储层演化史和构造发育史三者匹配关系良好,有 利于油气聚集和成藏。2012—2018年,中国地质 调查局针对雪峰古隆起边缘下寒武统牛蹄塘组富 有机质页岩先后部署实施了一系列地质调查井, 均发现良好的页岩气显示 (彭中勤等, 2019)。

(4) 汉南古隆起

汉南古隆起位于汉中南部,寒武系牛蹄塘组 页岩围绕汉南古隆起周缘广泛发育,具有沉积厚 度大、有机质丰度高、热演化成熟度相对较低等 特点,具备页岩气生成和储集条件,有较大资源 潜力。古隆起前震旦系出露水面,主要为元古界 结晶基底,志留纪末的构造运动使东缘隆起、向 西掀斜,发育多个水下高地和次级隆起(徐政语 和林舸,2001)。古隆起紧邻川东北生烃中心,是 油气运聚的指向处,具有良好的页岩气和常规油 气勘探前景,已钻井陕南地1井在汉南古隆起识别 出寒武系牛蹄塘组和五峰—龙马溪组两套优质页 岩含气层段,总有机碳含量大于4%(陈相霖等, 2018)。

(5) 皖南歙县许村古隆起

许村古隆起出露面积约 130 km²,形成于 820 Ma左右,基底为花岗闪长岩。相关调查研究 证实,许村花岗岩侵入到元古界上溪群,并被震 旦系下统休宁组不整合覆盖,因此,许村花岗岩 体是一个早期的古岛弧,即古隆起(孙家齐等, 1995)。其周缘沉积下寒武统荷塘组页岩,页岩厚 度 320 m 左右,TOC 值为 2%~8%, *R*。值为 1.9%~3.5%, 烃源岩相关指标较好。

5 结论

(1)黄陵隆起东南翼古老地层页岩气富集成 藏,黄陵隆起的形成演化起到了积极的作用:一 是黄陵隆起区热流值和古地温梯度比区域上要低, 使早期烃源岩成熟度不至于过高,生烃能力得到 有效保留;二是变形方式以连续整体抬升为主, 隆起两翼地层具有较好的连续性和完整性;三是 下古生界沉积后,多次整体隆升,使烃源岩没有 被长期深埋。

(2) 黄陵隆起东南斜坡有多口地质调查井获 得油气突破,其构造演化史对页岩气富集成藏有 积极作用和影响。初步的地质地球物理资料表明: 中、下扬子地区黔中古隆起、雪峰古隆起、霍邱 古隆起等区域页岩气地质条件较好,有可能获得 页岩气突破,可进一步开展页岩气地质调查工作。 致谢:中国地质调查局长沙自然资源综合调查中 心曾亮助理工程师在图件清绘方面提供了帮助, 在此表示感谢!

References

- CHEN K, ZHAI G Y, BAO S J, et al., 2020. Tectonic evolution of the Huangling Uplift and its control effect on shale gas preservation in South China [J]. Geology in China, 47 (1): 161-172. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X L, BAO S J, ZHAI G Y, et al., 2018. The discovery of shale gas within Lower Cambrian marine facies at Shan Nandi-1 well on the margin of Hannan palaeouplift [J]. Geology in China, 45 (2): 412-413. (in Chinese in Chinese with English abstract)
- CHEN X L, YUAN K, LIN T, et al., 2021. Discovery of shale gas within Upper Paleozoic marine facies by Qian Shuidi-1 well in the

northwest of Yaziluo rift trough, Sichuan Province [J]. Geology in China, 48 (2): 661-662. (in Chinese in Chinese with English abstract)

- CHEN Y Q, GEN S F, XIE L Z, et al., 2004. 1:5 million geological map of China (the Second Edition) [A]. Beijing: Institute of geology, Chinese Academy of Geological Sciences.
- CUI J D, 2013. Sedimentary response to tectonic evolution of the Central Guizhou Uplift and its adjacent areas [D]. Changsha: Central South University. (in Chinese with English abstract)
- DAI S W, 1996. Discussion on the regional structural features of Jianghan Basin since the Indosinian movement [J]. Journal of Geomechanics, 2 (4): 80-84. (in Chinese with English abstract)
- DENG D F, 2014. Study on the intracontinental structure of the enrichment of marine paleo-reservoirs in the northern margin of Jiangnan-Xuefeng Uplift, Southern China [D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- DENG M Z, 2018. Structural modeling of the Huangling anticline and its peripheral structural belt [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- FENG D Y, LIN Z C, ZHANG Z C, et al., 1991. Intrusive ages and isotopic characteristics of massives in the South of Huangling granitoids [J]. Hubei geology, 5 (2): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- GE X H, WANG M P, LIU J L, 2010. Redefining the Sichuan Movement and the age and background of Qingzang Plateau's first uplift: the implication of Huangling anticline and its enlightenment [J]. Earth Science Frontiers, 17 (4): 206-217. (in Chinese with English abstract)
- GE X H, LIU J L, REN S M, et al., 2014. The formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic continental tectonics in eastern China [J]. Geology in China, 41 (1): 19-38. (in Chinese with English abstract)
- GONG S L, 2004. The ancient Uplift rate study of Huangling Pluton based on Al-in-hornblende barometer [J]. Journal of east China Institute of Technology, 27 (1): 52-58. (in Chinese with English abstract)
- GUO B, LIU S G, LIU S, et al., 2008. Structural features and evolution in the piedmont belt in the middle segment of Longmen Mountains [J]. Lithologic Reservoirs, 20 (4): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- GUO F F, KANG J Y, SUN J F, et al., 2010. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation model for marine strata in Jianghan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 22 (1): 23-29. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z F, YANG Z W, LIU X M, et al., 2006. Characteristics of Palaeozoic Tectonic Structures and Oil and gas Prospecting in Jianghan Plai [J]. Institute of Marine Origin Petrolrum Geology, 11 (2): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- GUO Z W, 1995. South China's petroleumexploration (9): problems, should be paid attention to in research [J]. South China Petroleum Exploration, 1 (2): 3-4. (in Chinese with English abstract)
- LI H H, SONG T, CHEN K, et al., 2017. The discovery of shale gas

from Sinian Formation at ZD-2 well in western Hubei [J]. Geology in China, 44 (4): 812-813. (in Chinese with English abstract)

- LI J Q, Zheng H J, Teng L, et al., 2018. Basic information of petroleum investigation in Lower Yangtze [R]. Nangjing: Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey. (in Chinese).
- LU Q Z, MA Y S, GUO T L, et al., 2007. Thermal history and hydrocarbon generation history in Western Hubei-Eastern Chongqing area [J]. Chinese Journal of Geology, 42 (1): 189-198. (in Chinese with English abstract)
- LUO X P, 2006. The relationship between Mesozoic-Cenozoic structural evolution and marine petroleum in the middle Yangtze region [J]. Lang & Resources Herald (S1): 1-2. (in Chinese)
- MA D Q, DU S H, XIAO Z F, 2002. The origin of Huangling granite batholith [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 21 (2): 151-161. (in Chinese with English abstract)
- MEI M X, 1994. On the central Guizhou "old land" [J]. Guizhou Geology, 11 (3): 199-206. (in Chinese with English abstract)
- MEI Q H, 2015. Tectonic evolution and formation mechanism of Leshan-Longnüsi paleo-uplift, Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- PENG B, LIU Y C, QI F C, et al., 2017. Shale gas accumulation conditions of Neoproterozoic Doushantuo Formation in NW Hunan province [J]. Lithologic Reservoirs, 29 (4): 47-54. (in Chinese with English abstract)
- PENG Z Q, TIAN W, MIAO F B, et al., 2019. Geological features and favorable area prediction of shale gas in lower Cambrian Niutitang Formation of Xuefeng Ancient Uplift and its periphery [J]. Earth Science, 44 (10): 3512-3518. (in Chinese with English abstract)
- SHEN C B, MEI L F, LIU Z Q, et al., 2009. Apatite and zircon fission track data, evidences for the Mesozoic-Cenozoic Uplift of Huangling dome, Central China [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 29 (2): 54-60. (in Chinese with English abstract)
- SHI D S, WANG B Q, WANG S J, 2019. Annual progress report of strategic investigation project of oil and gas resources in Hefei basin and its periphery [R]. Beijing: Oil and Gas Survey Center, China Geological Survey. (in Chinese) SUN J Q, ZHU W B, MA R S, 1995. Reassessment on the emplacement type of the Hsucun granodiorite in She County, Southern Anhui [J]. Geology of Anhui, 5 (1): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- SUN J Q, ZHU W B, MA R S, 1995. Reassessment on the emplacement type of the hscucun granodiorite in She County, Southern Anhui [J]. Geology of Anhui, 5 (1): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- TAN Y L, WANG Z X, FENG X Q, et al., 2021. Structural preservation conditions analysis of oil and gas in complex structural area: a case study of structural analysis in the Well Wanjingdi-1, Anhui, China [J]. Journal of Geomechanics, 27 (3): 441-452.
- XIONG C Y, WEI C S, JIN G F, et al., 2004. Pre-Sinian paleostructural Framework and major geological events in the Huangling anticline, Western Hubei [J]. Journal of Geomechanics, 10 (2): 97-112. (in Chinese with English abstract)

- XU D L, PENG L H, LIU H, et al., 2013. Meso-Cenozoic tectono-sedimentary response of multi-phased uplifts of Huangling Anticline, Central China [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 29 (2): 90-99. (in Chinese with English abstract)
- XU Z Y, LIN G, 2001. Phanerozoic tectonic evolution and its influence on the petroleum system in the middle Yangtze region [J]. Geotectonica et Metallogenia, 25 (1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- XU Z Y, LIN G, LIU C Y, et al., 2004. A discussion on amalgamation course between the South China and North China blocks: evidences from deformational characters in the Jianghan superimposed basin [J]. Chinese Journal of Geology, 39 (2): 284-295. (in Chinese with English abstract)
- YANG W R, 1987. "Opening" and "closing" history in east Qinling area [J]. Earth Science, 12 (5): 487-493. (in Chinese with English abstract)
- YUAN Y S, MA Y S, HU S B, et al., 2006. Present-day geothermal characteristics in South China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 49 (4): 1118-1126. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI G Y, BAO S J, WANG Y F, et al., 2017a. Reservoir accumulation model at the edge of palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei Province [J]. Acta Geoscientia Sinica, 38 (4): 441-447. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI G Y, BAO S J, PANG F, REN S M, et al., 2017b. Peservoirforming pattern of "four-storey" hydrocarbon accumulation in Anchang syncline of northern Guizhou Province [J]. Geology in China, 44 (1): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI G Y, WANG Y, LIU G H, et al., 2020. Accumulation model of the Sinian-Cambrian shale gas in western Hubei Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 26 (5): 696-713. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H G, 2015. Structural evolution of Sichuan Basin and its periphery and its influences to hydrocarbon accumulation [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 41 (8): 126-129. (in Chinese)
- ZHANG J F, XU H, ZHOU Z, et al., 2019. Geological characteristics of shale gas reservoir in Yichang area, western Hubei [J]. Acta Petrolei Sinica, 40 (8): 887-899. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L, WANG Z X, LI H J, et al., 2018. Accumulation pattern of organic matter in shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, Chuangdong-Wuling Shan area [J]. Journal of Geomechanics, 24 (5): 617-626. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Z, REN S M, BAO S J, et al., 2018. The discovery of tight gas and shale gas in Silurian strata in Jianshi, Hubei Province [J]. Geology in China, 45 (4): 855-856. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈科, 翟刚毅, 包书景, 等, 2020. 华南黄陵隆起构造演化及其对页 岩气保存的控制作用 [J]. 中国地质, 47 (1): 161-172.
- 陈相霖,包书景,翟刚毅,等,2018. 汉南古隆起周缘下寒武统(陕 南地1井)发现海相页岩气 [J].中国地质,45(2):412-413.

- 陈相霖,苑坤,林拓,等,2021.四川垭紫罗裂陷槽西北缘(黔水地 1井)发现上古生界海相页岩气 [J].中国地质,48(2): 661-662.
- 程裕淇, 耿树方, 谢良珍, 等, 2004. 1:500 万中国地质图 (第二版) [A]. 北京: 中国地质科学院地质研究所.
- 崔金栋,2013. 黔中隆起及周缘构造演化的沉积响应 [D]. 长沙: 中南大学.
- 戴少武, 1996. 江汉盆地印支期以来区域构造特征探讨 [J]. 地质 力学学报, 2 (4): 80-84.
- 邓大飞,2014. 雪峰隆起北缘海相古油气巨量富集的陆内构造研究 [D]. 武汉:中国地质大学.
- 邓铭哲,2018. 黄陵背斜及邻区构造建模 [D]. 北京:中国地质大学 (北京).
- 冯定犹,李志昌,张自超,1991. 黄陵花岗岩类岩基南部岩体侵入时代和同位素特征 [J]. 湖北地质,5 (2):1-12.
- 葛肖虹,王敏沛,刘俊来,2010. 重新厘定"四川运动"与青藏高 原初始隆升的时代、背景:黄陵背斜构造形成的启示 [J]. 地学 前缘,17 (4):206-217.
- 葛肖虹,刘俊来,任收麦,等,2014.中国东部中-新生代大陆构造的形成与演化 [J].中国地质,41 (1):19-38.
- 龚松林,2004.角闪石全铝压力计对黄陵岩体古隆升速率的研究 [J].东华理工学院学报,27 (1):52-58.
- 郭兵,刘树根,刘顺,等,2008. 龙门山中段前山带构造特征及其形 成演化 [J]. 岩性油气藏,20 (4):59-64.
- 郭飞飞,康建云,孙建峰,等,2010. 江汉盆地构造演化与海相地层 油气成藏模式 [J]. 岩性油气藏,22 (1):23-29.
- 郭战峰,杨振武,刘新民,等,2006. 江汉平原古生界构造结构特征 及油气勘探方向 [J]. 海相油气地质,11 (2): 9-16.
- 郭正吾, 1995. 南方海相地层油气勘探研究中应注意的几个问题[J]. 南方油气地质, 1 (2): 3-4.
- 李浩涵,宋腾,陈科,等,2017. 鄂西地区(秭地2井) 震旦纪地层发现页岩气 [J]. 中国地质,44 (4): 812-813.
- 李建青,郑红军,滕龙,等.2018.下扬子油气、页岩气油气调查 基本情况 [R].南京:中国地质调查局南京地质调查中心.
- 卢庆治,马永生,郭彤楼,等,2007.鄂西-渝东地区热史恢复及烃 源岩成烃史 [J].地质科学,42 (1):189-198.
- 罗小平,2006. 中扬子区中新生代构造演化与海相油气关系 [J]. 国土资源导刊 (S1):1-2.
- 马大铨,杜绍华,肖志发,2002. 黄陵花岗岩基的成因 [J]. 岩石矿 物学杂志,21 (2):151-161.
- 梅冥相, 1994. 论"黔中古陆"[J]. 贵州地质, 11 (3): 199-206.
- 梅庆华,2015.四川盆地乐山一龙女寺古隆起构造演化及其成因机制[D].北京:中国地质大学(北京).

- 彭波,刘羽琛,漆富成,等,2017. 湘西北地区新元古界陡山沱组页 岩气成藏条件 [J]. 岩性油气藏,29 (4):47-54.
- 彭中勤,田巍,苗凤彬,等,2019. 雪峰古隆起边缘下寒武统牛蹄塘 组页岩气成藏地质特征及有利区预测 [J]. 地球科学,44 (10): 3512-3528.
- 沈传波,梅廉夫,刘昭茜,等,2009. 黄陵隆起中-新生代隆升作用 的裂变径迹证据 [J]. 矿物岩石,29 (2):54-60.
- 石砥石,王步清,王胜建,2019. 合肥盆地及周缘油气资源战调查项目年度进展报告 [R]. 北京:中国地质调查局油气资源调查中心.
- 孙家齐,朱文斌,马瑞士,1995. 皖南歙县许村花岗闪长岩体定位 问题的再评价 [J]. 安徽地质,5 (1):26-31.
- 谭元隆,王宗秀,冯兴强,等,2021.复杂构造区油气构造保存条件 分析:来自皖泾地1井的构造解析 [J].地质力学学报,27
 (3):441-452.
- 熊成云,韦昌山,金光富,等,2004. 鄂西黄陵背斜地区前南华纪古 构造格架及主要地质事件 [J]. 地质力学学报,10 (2):97-112.
- 徐大良,彭练红,刘浩,等,2013. 黄陵背斜中新生代多期次隆升的 构造-沉积响应 [J]. 华南地质与矿产,29 (2):90-99.
- 徐政语,林舸,2001.中扬子地区显生宙构造演化及其对油气系统 的影响 [J].大地构造与成矿学,25 (1):1-8.
- 徐政语,林舸,刘池阳,等,2004. 从江汉叠合盆地构造形变特征看 华南与华北陆块的拼贴过程 [J]. 地质科学,39 (2):284-295.
- 杨巍然, 1987. 东秦岭"开""合"史 [J]. 地球科学, 12 (5): 487-493.
- 袁玉松,马永生,胡圣标,等,2006.中国南方现今地热特征 [J]. 地球物理学报,49 (4):1118-1126.
- 翟刚毅,包书景,王玉芳,等,2017a. 古隆起边缘成藏模式与湖北 宜昌页岩气重大发现 [J]. 地球学报,38 (4):441-447.
- 翟刚毅,包书景,庞飞,等,2017b.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,44 (1):1-12.
- 翟刚毅,王玉芳,刘国恒,等,2020. 鄂西地区震旦系—寒武系页岩气成藏模式 [J]. 地质力学学报,26 (5):696-713.
- 张宏光,2015.四川盆地及周缘古隆起演化对下组合油气成藏的影响 [J].内蒙古石油化工,41 (8):126-129.
- 张君峰,许浩,周志,等,2019. 鄂西宜昌地区页岩气成藏地质特征 [J].石油学报,40 (8): 887-899.
- 周磊,王宗秀,李会军,等,2018. 川东一武陵山地区下寒武统牛蹄 塘组页岩有机质富集模式 [J]. 地质力学学报,24 (5): 617-626.
- 周志,任收麦,包书景,等,2018. 湖北建始地区志留系钻获致密砂 岩气和页岩气 [J]. 中国地质,45 (4):855-856.