

引用格式:罗胜元,陈孝红,岳勇,等.中扬子宜昌地区沉积—构造演化与寒武系页岩气富集规律[J].天然气地球科学,2020,31(8):1052-1068.

LUO Shengyuan, CHEN Xiaohong, YUE Yong, et al. Analysis of sedimentary-tectonic evolution characteristics and shale gas enrichment in Yichang area, Middle Yangtze[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(8): 1052-1068.

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.04.031

中扬子宜昌地区沉积—构造演化与寒武系页岩气富集规律

罗胜元¹, 陈孝红¹, 岳勇¹, 李培军¹, 蔡全升¹, 杨睿之²

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉中地数码科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:鄂西宜昌斜坡是四川盆地外寒武系页岩气勘探新区,与盆地内勘探不同,宜昌斜坡发育于黄陵隆起之上,页岩气富集地质条件研究薄弱。利用最新的地震、钻探和测试资料,分析认为研究区沉积、构造演化具有特殊性,先后经历了印支期隆起雏形、燕山期快速抬升剥蚀、喜马拉雅期充填改造3个关键沉积—构造阶段。宜昌地区相对稳定的构造条件,对页岩气富集成藏有4个方面的影响:①桐湾运动末期形成早寒武世隆、凹相间的古地理格局直接影响宜昌地区寒武系水井沱组富有机质页岩的展布,对页岩气的形成分布有重要的源控作用,水井沱组页岩含气量与TOC含量具有较好正相关性,指示有机质丰度是影响页岩气富集的关键因素。②印支期开始隆升、燕山期迅速隆升的黄陵岩体控制宜昌斜坡区构造沉降,使下古生界页岩层埋藏深度适中、抬升早、有机质热成熟度相对低,在中、下扬子区下古生界页岩过成熟演化背景下尤为特殊。适宜的热演化条件下,水井沱组页岩有机质纳米孔发育,构成页岩气重要储集空间。③受黄陵隆起的砥柱作用,宜昌斜坡在南方中、新生代多期次强烈构造活动中免遭构造破坏和强改造,表现为隆升剥蚀为主、局限断裂活动为辅、整体构造变形弱的特点,构造保存条件较邻区优越,加之页岩渗透性极低,使宜昌单斜构造上水井沱组页岩气仍有效保存,是当前该区勘探的主体。④寒武系页岩裂缝发育,早期构造作用形成的高角度裂缝、晚期由于重力顺层滑脱作用形成的低角度剪切缝,共同构成页岩气运移、储集的重要空间。宜昌地区页岩气的勘探突破表明,古隆起、古斜坡等稳定古构造周缘是中下扬子区下古生界页岩气勘探的潜在有利区。

关键词:页岩气;古隆起;构造演化;下寒武统水井沱组;宜昌斜坡;鄂西地区

中图分类号:TE122.2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2020)08-1052-17

0 引言

中扬子地区下古生界发育震旦系陡山沱组(Z_1d)、下寒武统水井沱组(ϵ_1s)、上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组(O_3w-S_1l)3套区域性烃源岩层,具有分布面积广、生烃条件优越等特点^[1-2],是页岩气勘探和研究的热点。当前成熟的页岩气勘探、开发区块主要集中在四川盆地及其周缘涪陵焦石

坝^[1,3-4]、渝西大足^[5]、长宁—威远^[6]、井研—犍为^[7]等地区。针对四川盆地外围页岩气的勘探评价认为^[2,8-9],盆地外复杂构造区页岩气虽具有勘探面积广、资源规模大的良好物质基础,但下古生界页岩形成时代老且经历多期次构造改造,页岩气热演化成熟度过高、保存条件较差、成藏特征十分复杂。

宜昌斜坡发育于稳定的黄陵背斜之上,由于现今地层处于单斜构造,其油气特征多被地质工作者

收稿日期:2020-03-17;修回日期:2020-04-20.

基金项目:国家科技重大专项“中扬子高演化页岩气赋存机理与富集规律研究”(编号:2016ZX05034001-002);中国地质调查局项目“宜昌斜坡页岩气有利区战略调查”(编号:DD20179615)联合资助。

作者简介:罗胜元(1986-),男,湖北武汉人,工程师,博士,主要从事页岩气及常规油气地质调查与研究. E-mail: loshyv@163.com.

忽略。近年来,中国地质调查局在鄂西地区针对陡山沱组、水井沱组和五峰组—龙马溪组黑色页岩钻探的多口井相继获得了良好的显示^[10-11],其中阳页2HF井震旦系陡山沱组1 410 m水平段压裂后获得气产量 $5.46 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[12],宜页1HF井水井沱组1 816 m水平段压裂试气获气产量 $6.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,宜页2HF井五峰组—龙马溪组506.31 m水平段压裂后获得气产量 $3.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[12],展示了该区具有良好的页岩气资源潜力。由于以往对宜昌地区的沉积特征、构造演化以及页岩气藏控制因素等缺乏研究,目前该区页岩气富集特征还不明确。本文利用最新的地震、钻探资料,分析了印支期以来的沉积沉降、构造运动对寒武系水井沱组页岩气形成和富集的控制作用,以期对鄂西油气勘探选区的进一步评价提供相关依据。

1 区域概况

1.1 页岩气勘探历程

宜昌及其周边地区的页岩气勘探自2010年开始,早期以地面调查和浅钻为主,建立不同构造部位页岩的精细剖面,基本查明了富有机质泥页岩形成的古地理、古气候和古环境特征。2011年以来中石油在荆门勘查区块相继部署了二维地震589 km(19条)、三维地震196 km²以及荆101井、荆102井、宜探1井等多口针对五峰组—龙马溪组页岩气的勘探井,评价认为志留系页岩厚度大、普遍含气,达到商业化开发需求,但也存在较大的工程施工风险,其中宜探1井五峰组—龙马溪组在2018年通过水力压裂获得稳定工业气流,随后开展了页岩气商业利用。自2013年以来,中国地质调查局在勘探区块之外的宜昌东南斜坡带相继部署了二维地震584 km(23条),先后实施了秭地1井、秭地2井、宜地2井、宜页1井、宜页2井、阳页1井等24口不同类别的调查井、参数井、评价井,首次对宜昌地区页岩气基础地质条件进行了全面系统的调查,相继于2017年6月获得宜页1井寒武系水井沱组、2017年11月获得宜页2井奥陶系五峰组—志留系龙马溪组、2018年底获得阳页2HF井震旦系陡山沱组3套页岩气勘探的突破,压裂试气均获得工业气流^[12-13],展示了该区具有良好的页岩气资源潜力。中石化在枝江—当阳勘查区块的页岩气勘探自2016年始,先后部署了二维地震勘探154 km(2条)、三维地震100.7 km²,实施了以五峰组—龙马溪组页岩气为目

标的宜志页1井,至2019年底已完成宜志页1HF井水平段的压裂,试气有望获得工业气流。除页岩气勘探外,油气勘探及地表调查还显示宜昌地区常规气显示活跃,在灯影组(Z_2dy)、天河板组—石龙洞组($\epsilon_2t-\epsilon_2sl$)、覃家庙组(ϵ_3q)以及红花园组(O_1h)均获得不同程度的油气苗、沥青显示^[14-15](表1),表明宜昌具备多层页岩气、常规天然气勘探资源潜力。

1.2 构造特征

中扬子地区自印支期以来受多期、多方向构造的叠加与复合,呈现出复杂而有序的构造面貌。平面上以南北“对冲、叠加、干涉”为特色,形成了中扬子复合盆山体系^[13]。中扬子褶皱带自北向南可以划分为3个二级构造单元^[14][图1(a)],其中宜昌斜坡又称为宜昌稳定带,构造上位于中扬子褶皱带川东北—大冶对冲干涉带内。宜昌斜坡发育在黄陵隆起之上,黄陵隆起位于江汉盆地西部,呈现一个背斜穹窿形态,东西宽约40 km,南北长70 km,为基底加沉积盖层的双层结构,其东西两侧分别为荆当盆地和秭归盆地,三者呈轴向平行、北东向展布的特点。其中黄陵隆起基底由前南华系结晶杂岩组成,宜昌斜坡区沉积盖层包括南华系—三叠系海相碳酸盐岩夹碎屑岩以及少量侏罗系至第四系的陆相碎屑岩,其围绕结晶基底由老至新呈环翼分布,最大厚度可达10.5 km,地层向周围倾斜,西翼陡、东翼缓,隆起“核部”周缘地层倾角为 $10^\circ \sim 14^\circ$,远离隆起核部地层逐级变缓,地层倾角最小为 2° ,断裂带周边地层倾角变化大。地震资料显示,宜昌斜坡为一平缓的单斜构造,褶皱不发育,寒武系底部埋深主要为1 800~5 000 m。西南部发育一级边界北西向天阳坪断裂,断距大于1 000 m。除边界断裂外,宜昌斜坡还发育十余条北东、近南北向小型逆断层,这些断层分布有限,断面倾角介于 $50^\circ \sim 90^\circ$ 之间,断距一般为50~100 m。基于井壁崩落和FMI成像资料,区域现今三轴应力呈逆冲走滑断层特征。

1.3 地层沉积特征

钻井及地表剖面揭示,宜昌斜坡震旦系至中生界地层序列齐全[图1(c)],震旦系、下古生界连片展布,而上古生界残留分布,失去勘探价值。震旦系和古生界海相地层围绕黄陵隆起呈带状展布,由海相—海陆交互相—陆相沉积组成的中生界出露于西部的秭归盆地和东部的荆门—当阳盆地,新生界均为陆相沉积,局限分布在宜都—枝城和当阳一带[图1(b)]。震旦系为一套浅海相碳酸盐岩沉积,

表1 宜昌地区常规天然气和页岩气显示

Table 1 Natural gas and shale gas showing in the Yichang area

层位	井号	类型	含气显示描述
陡山沱组 (Z _{1d})	阳页1	页岩气	现场解析气总含量为0.12~4.8 m ³ /t,页岩厚141 m,直井压裂产量为5 460 m ³ /d
	宜参1	页岩气	气测全烃最高达46.62%,未经人工改造情况下获得页岩气流,点火成功
	宜页1	页岩气	厚120 m,现场解析总含气量为0.40~2.0 m ³ /t,平均为1.08 m ³ /t,解析气点火可燃
	秭地1	页岩气	现场解析总含气量为0.473~1.496 m ³ /t,甲烷含量为70.26%~94.03%
	秭地2	页岩气	现场解析测试解吸气最高达0.92 m ³ /t,总含气量最高为1.67 m ³ /t
灯影组 (Z _{2dy})	阳页1	常规气	气测全烃最高1.89%,全烃异常值大于1%的地层累计厚40.5 m
	宜地4	沥青	灯一段内部及灯四段顶部均见沥青
	宜地3	常规气	石板滩段泥晶灰岩含气,现场解析总含气量为1.34~2.43 m ³ /t
	宜页1	常规气	石板滩段纹层状灰岩见气,气测全烃0.477%~1.741%,46 m厚全烃均大于1%
	宜参3	常规气	石板滩段纹层状灰岩见气,3层累计22 m全烃均大于1%,气测全烃0.477%~1.741%,试气获未平衡产能1 363~1 504 m ³ /d
	宜3	常规气	江汉盆地西缘,灯影组中部求产水产量为475 m ³ /d,气产量为8.149 m ³ /d
水井沱组 (C _{1s})	阳页1	页岩气	现场解析总含气量为0.32~4.48 m ³ /t,平均2.3 m ³ /t;其水力压裂井阳页1HF(水平段1 836 m,33段)页岩气产量为7.83×10 ⁴ m ³ /d
	宜地2	页岩气	现场解析总含气量为0.17~5.58 m ³ /t,平均为2.24 m ³ /t,总含气量大于2 m ³ /t厚46 m
	宜地4	页岩气	气测异常,全烃最高达11%;现场解析总含气量为0.5~3.13 m ³ /t,平均为1.54 m ³ /t
			气测异常,全烃由0.123%上升到18.965%,甲烷由0.11%上升到14.14%;现场解析总含气量为0.58~5.48 m ³ /t,平均为2.05 m ³ /t,含气量大于2 m ³ /t的有35 m,其水力压裂井宜页1HF井(水平段1 816 m)页岩气产量为6.02×10 ⁴ m ³ /d
	秭地1	页岩气	现场解析总含气量为0.234~1.047 m ³ /t,甲烷含量为15.8%~92.57%
	秭地2	页岩气	气测录井全烃0.57%~14.5%;现场解析总含气量为0.23~4.45 m ³ /t,平均为2.15 m ³ /t;最优质30 m层段平均含气量为2.88 m ³ /t
天河板组— 石龙洞组 (C _{2t} —C _{2sl})	阳页1	常规气	天河板组遇裂缝性天然气,全烃最高66.89%
	宜地2	常规气	灰岩段气测异常并发生井喷;全烃含量最高达9%,气液分离点火火焰高达2~3 m
	宜地4	沥青	粗晶白云岩孔缝见沥青充填
五峰组— 龙马溪组 (O _{3w} —S _{1l})	宜页3	页岩气	页岩厚38 m,现场解析气总含量最大为1.78 m ³ /t
	荆101	页岩气	现场解析总含气量为1.7~7.2 m ³ /t,平均为4.3 m ³ /t
	荆102	页岩气	现场解析总含气量为1.4~6.0 m ³ /t,平均为3.7 m ³ /t
	宜地1	页岩气	页岩厚33 m,解析气含气量为1.69~3.67 m ³ /t,解析气中甲烷占70.58%~93.43%
	宜探1	页岩气	现场解析总含气量为1.24~4.3 m ³ /t,平均为2.75 m ³ /t,水平井产气量约为(4~5)×10 ⁴ m ³ /d
	宜页2	页岩气	页岩厚28 m,现场解析气总含量为0.62~3.29 m ³ /t,平均为1.63 m ³ /t,其水力压裂井宜页2HF井(水平段506.31 m)页岩气产量为3.15×10 ⁴ m ³ /d
	宜志页1	页岩气	页岩地质特征与宜页2井类似,志页1HF井水平段长2 000多m,分24段进行大型水力压裂,试气获工业气流

包括陡山沱组和灯影组,陡山沱组下部为潮坪相黑色页岩夹白云岩,页岩厚度大,是重要的烃源岩层,上部为台地相灰色碳酸盐岩;灯影组为台地—浅滩相沉积的砂屑白云岩,是重要的常规储层。下寒武统水井沱组由滨浅海环境下沉积的页岩、泥质碳酸盐岩组成,页岩有机碳含量高,是区域主要的烃源岩;石牌组为浅水陆棚相灰绿色泥岩,沉积厚度大,是区域重要盖层。中、上寒武统为台地相沉积的砾屑灰岩、白云质灰岩,孔隙较发育,是主要的常规储层。奥陶系以陆棚相碳酸盐岩沉积为主,岩性致密。

上奥陶统至志留系为滨岸相沉积的细粒碎屑岩,其中五峰组—龙马溪组下部为陆棚滨岸相沉积的黑色硅质页岩,区域分布广,是一套重要烃源岩层系。龙马溪组上部罗惹坪组、纱帽组以浅水陆棚相黄绿色页岩、潮坪相泥质粉砂岩为主,泥岩可作为品质较好的盖层。研究区二叠系为浅海相碳酸盐岩夹碎屑岩,并在三叠系由海相沉积过渡到侏罗系内陆湖相碎屑岩沉积,白垩系局部残留在陆相中小型断陷湖盆内。研究区缺失上志留统、泥盆系、石炭系和二叠系部分地层[图1(c)]。

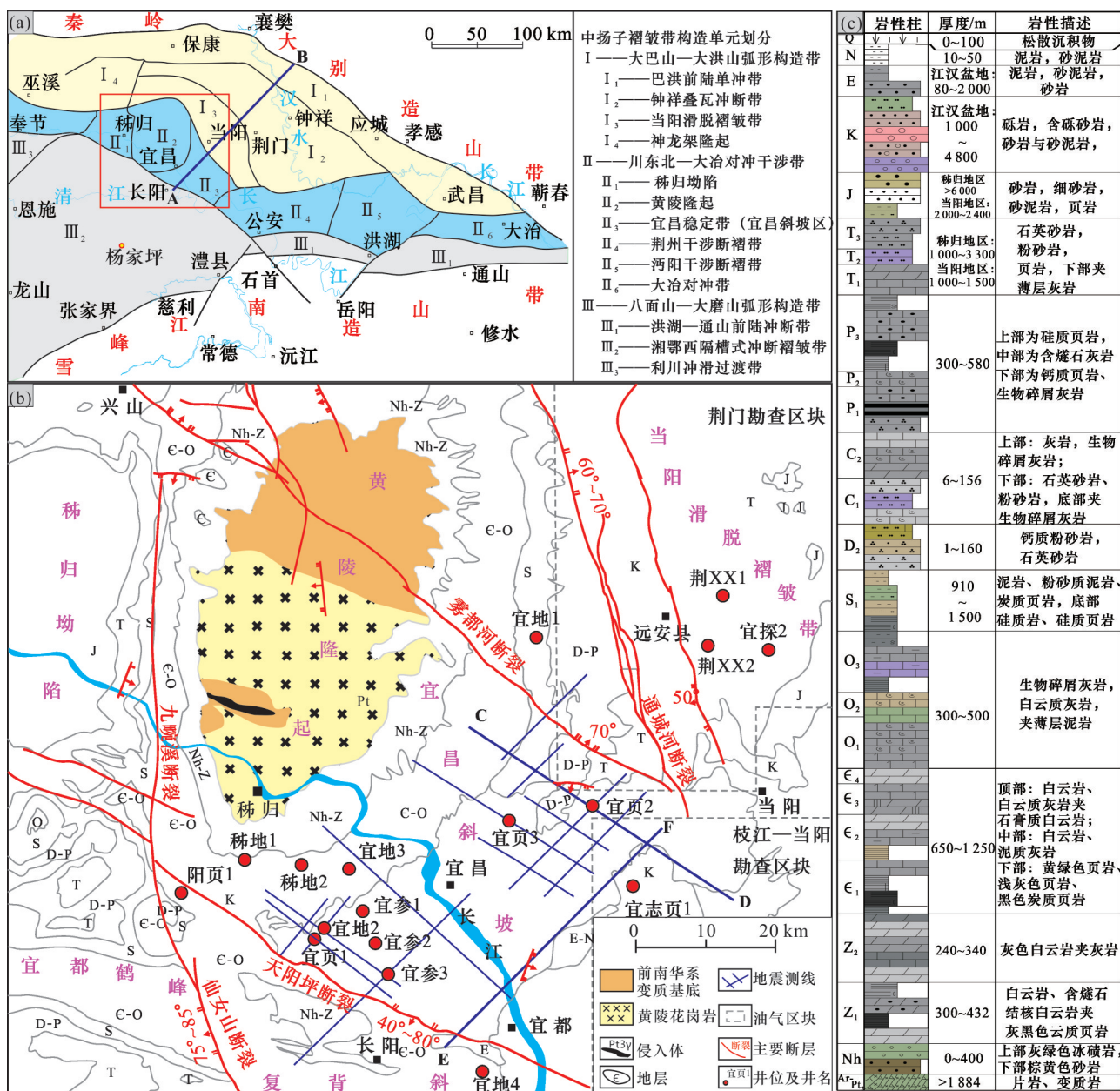


图1 研究区地质背景

Fig.1 Geological background map of the study area

(a)中扬子构造区划;(b)宜昌斜坡区构造图;(c)地层综合柱状图

2 关键期构造与沉积特征

宜昌地区自基底形成以来,经历了加里东期—海西期稳定的扬子克拉通沉积、沉降阶段和印支期以来的构造变形、变位阶段^[15],在中、上扬子区分别形成南华纪—志留纪的被动大陆边缘盆地—前陆盆地、泥盆纪至中三叠世的克拉通盆地、晚三叠世—早侏罗世的前陆盆地,以及中侏罗世—白垩纪的陆相断陷湖盆沉积(图2)。宜昌斜坡发育于稳定的黄陵隆起之上,作为中扬子区的一部分,晋宁运

动至加里东运动先后形成板内拉张裂陷沉积^[14][图2(b)]和隆后盆地沉积^[16][图2(c)],印支运动以来,宜昌地区之下的黄陵基底完全固化,随后同沉积盖层一起共同接受脆性构造的改造,其构造演化与中扬子区既相似又不同,是研究区页岩气形成、保存、改造的关键时期。

2.1 印支运动隆起雏形期

研究区位于华南板块西北部,印支期构造表现为以区域性地壳不均衡抬升运动为主,中扬子隆—拗格局开始形成,而褶皱作用不明显。自西向东,

由鄂西渝东至江汉平原区形成开江、石柱、黄陵—洪湖、钟祥—潜江系列隆起^[17-18]以及湘鄂西坳陷。黄陵背斜初现雏形,宜昌地区“一隆两坳”构造格局开始显现,“一隆”即黄陵低隆,“两坳”为秭归前陆盆地和荆当前陆盆地。区域调查表明,宜昌斜坡周缘上三叠统与中三叠统存在不整合接触关系,如西部的秭归盆地由西向东,上三叠统沙镇溪组与下伏中三叠统巴东组一、二段由整合接触过渡到角度不整合接触^[18-20];宜昌斜坡东部的荆当盆地由西北到东南,上三叠统九里岗组与下伏中三叠统由整合接触过渡为平行不整合^[21]。荆当盆地再向东,钟祥—潜江隆起区的夏3井上三叠统与下伏地层呈不整合接触^[22],缺失中三叠统巴东组、嘉陵江组。徐政语等^[23]对秭归盆地上三叠统物源的分析也表明,舌状三角洲体系自西向东推进过程中,黄陵隆起剥蚀为秭归盆地提供物源。围绕古隆起边缘发育上、中三叠统不整合接触,推测晚三叠世黄陵隆起开始控制沉积与沉降,并且隆出水面的部分遭受剥蚀[图2(d)]。

2.2 燕山运动剥蚀期

宜昌地区的早燕山运动以快速隆升、剥蚀为主,冲断、挤压变形为辅,黄陵背斜及周缘进入快速冷却抬升期并遭受大量剥蚀,锆石和磷灰石裂变径迹等低温热年代学研究表明,160~110 Ma和45 Ma以来黄陵隆起发生2期快速隆升剥蚀^[24-27]。由东至西剥蚀强度增强、剥蚀厚度变大,造成下白垩统依次与下伏三叠系(宜页2井)、志留系(宜页3井)呈角度不整合接触。宜昌斜坡东部石炭系、二叠系至三叠系剥蚀厚度不超过1 500 m;东南部宜参3井仅残留80 m厚龙马溪组下部页岩,绝大部分志留系至三叠系剥蚀殆尽;西南部宜页1井上奥陶统、志留系至三叠系剥蚀殆尽,根据单井地层厚度粗略推算剥蚀厚度达2 500~3 000 m。部署于宜昌斜坡东翼的宜页2井、宜页3井相邻约15 km,奥陶系—志留系可以很好地对比,宜页2井发育较为完整的中上泥盆统、石炭系、二叠系、三叠系嘉陵江组,宜页3井白垩系石门组直接覆盖在下志留统纱帽组之上,缺失泥盆系—三叠系,缺失地层厚度接近1 400 m(图3)。

除了大规模隆升剥蚀外,研究区在燕山运动快速隆升背景下还发生重力滑脱作用,在区内形成剪切变形或弧形展布的拆离断层,沉积盖层内的剪切变形通常发育在显著的岩性界面或岩性软弱层附近,如在震旦系陡山沱组页岩、寒武系水井沱组页

岩、志留系页岩以及下三叠统薄层灰岩中集中发育^[28]。剪切变形以顺层展布为主、局部剪层为辅,卷入地层的厚度十分有限,具有明显的层滑特点。地表调查发现,顺层滑脱褶皱及相关断层指示隆起东部岩石向东、西部岩石向西分别发生了变形,揭示滑脱拆离由隆升中心向周缘360°方向滑移剪切特点^[29]。此外,重力滑脱产生褶皱,造成从隆起中心向外侧地层有增厚的现象,一些柔性地层表现尤为明显,如二叠系梁山组的煤系地层可从几十厘米增厚至十几米^[29];长阳背斜处的中寒武统滑脱层和下寒武统页岩滑脱层的断裂发生叠置,使寒武系局部增厚^[28];而在滑脱带后缘常发生地层减薄或缺失。除了地表调查外,区域钻井也揭示宜昌斜坡区震旦系陡山沱组受到滑脱变形带的影响,宜页1井实钻取心显示,陡二段灰黑色白云质页岩、泥质白云岩发育深度为2 243.0~2 388.0 m,其中2 244.1~2 277.8 m、2 318.4~2 359.2 m深度段岩心十分破碎,页岩取出地面后自然逐层脱落、呈球形风化状散开,底部泥岩中揉皱滑动变形明显,推测滑脱体切穿了震旦系陡山沱组软弱页岩并形成了破裂。

2.3 喜马拉雅运动充填、改造期

中扬子区在燕山晚期—喜马拉雅早期为断拗构造发展时期,主要表现为伸展断陷活动,宜昌地区构造相对稳定。晚白垩纪至古近纪,发育以K₂—E为主的陆相断陷或山间拗陷型盆地,接受山麓洪积及辫状河砂砾岩沉积,这些断陷或山间盆地构造不整合于中、下三叠统及古生界之上[图2(f)]。除了形成山间红盆充填之外,喜马拉雅运动对地层也有改造作用。该期黄陵背斜处于整体隆升、冷却阶段^[25],宜昌地区有明显的隆升剥蚀,导致缺失渐新统、中新统,上三叠统、侏罗系、上白垩统也遭受强烈剥蚀,只在局部地方见到少量残存。喜马拉雅运动还造成边界断层的活化和逆冲,在宜昌长阳高家堰地区,天阳坪断层断层两侧呈现出古生界大规模覆于白垩系红盆之上[图2(f)],断面倾向东南,主要断层破碎带宽5~20 m,断层两盘垂直于断面的张节理、剪节理及牵引褶皱发育。

总体来看,宜昌地区是印支运动以来构造变形薄弱区,统一的基底不仅有利于宜昌斜坡在南方中、新生代发生的多期强烈构造活动中免遭构造改造和破坏,其有限的埋深、整体抬升剥蚀、局限分布的断裂构造为页岩气的形成、富集和保存发挥了关键作用。

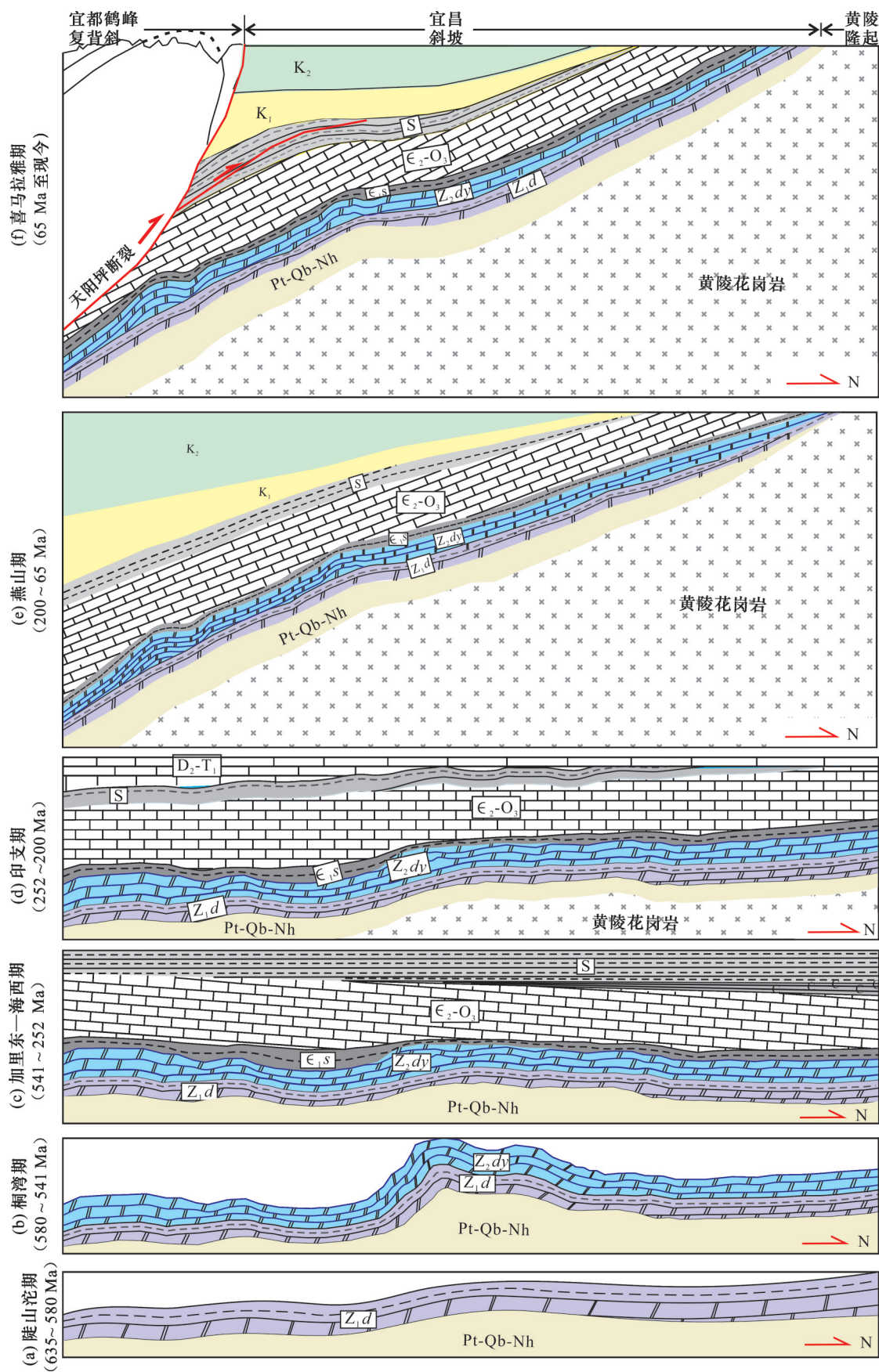


图2 宜昌地区构造—沉积演化简图

Fig.2 Tectonic and sedimentary evolution of the Yichang area

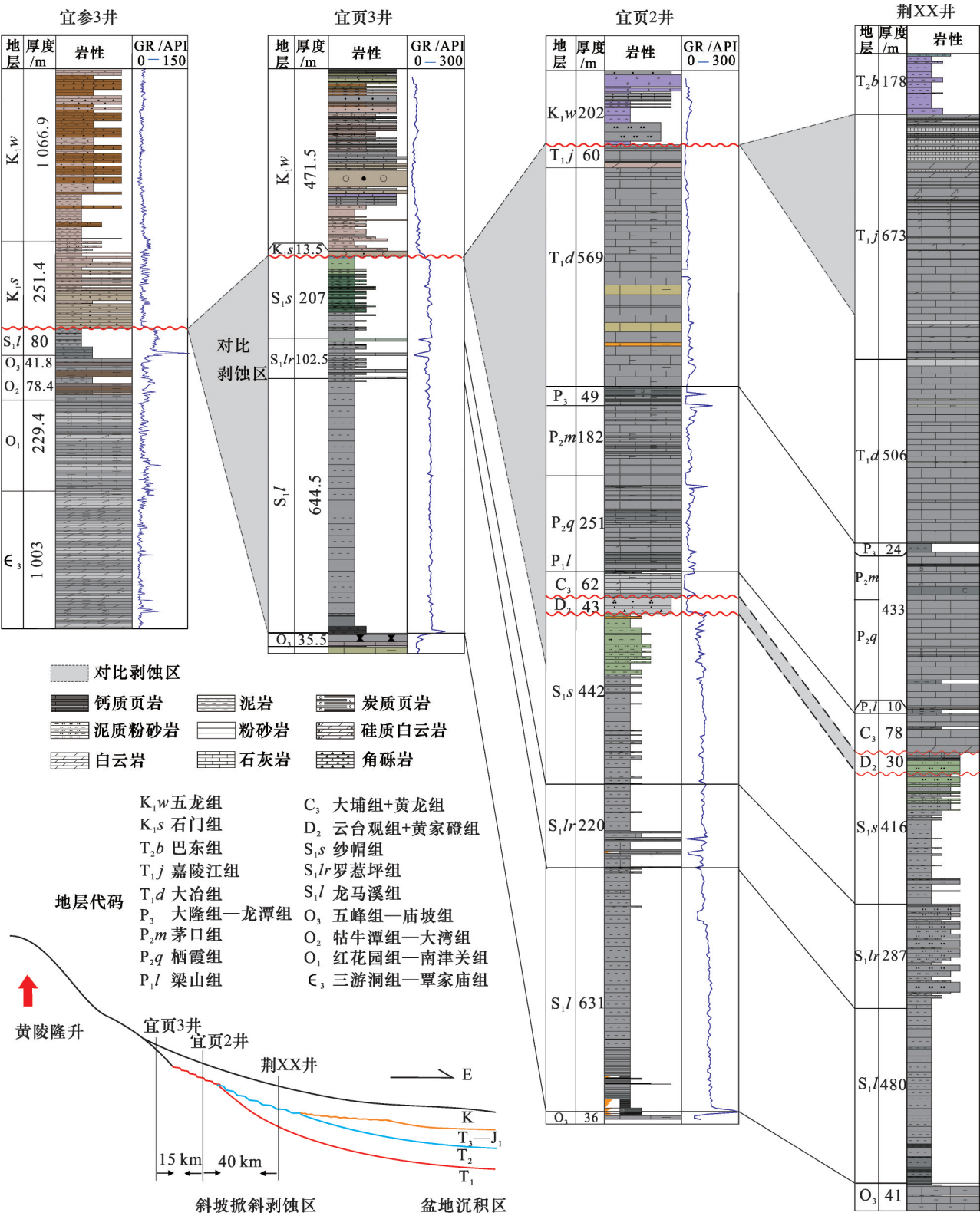


Fig.3 Stratigraphy comparison of Silurian-Triassic in Yichang slope(see Fig.1 for corresponding well location)

3 页岩气富集规律

3.1 桐湾运动对深水陆棚页岩展布的控制

扬子克拉通北缘存在多期次、持续的岩浆事

件,表明华南陆块参与了Rodinia超大陆的拼合与裂解过程^[30]。从宜昌晓峰一带出露的晓峰基性—超基性岩套之上,依次发育含火山碎屑的南华系红色碎屑岩、埃迪卡拉系—下寒武统黑色页岩以及中、

上寒武统膏盐的沉积建造序列与坳拉槽沉积建造序列相似,可以大致推测宜昌地区开始于新元古代的板内拉张活动一直延续到早寒武世。

寒武系水井沱组富有机质页岩是板内拉张或构造热沉降形成的台内凹陷沉积产物,出现了沉积相的分异[图4(a)],黑色页岩沉积受早寒武世出现的隆、凹相间的古地理格局制约[图4(b)]。穿越宜昌斜坡的阳页1井、宜页1井、宜参3井的钻探证实寒武系水井沱组富有机质页岩的厚度与下伏灯影组残留厚度呈相互消长的镜像关系(表2)。自西向东,水井沱组页岩厚度逐渐减小,灯影组碳酸盐岩厚度增大。位于西侧陆棚相带的阳页1井富有机质

页岩厚度为141 m,灯影组厚度为176.5 m,该处灯影组以薄层状灰岩为主,灯影组与水井沱组间发育厚约75 m的岩家河组,两者之间为低角度不整合接触。斜坡相带的宜页1井、宜地2井富有机质页岩厚度分别为86 m和72 m;向东过渡到台地边缘浅滩相的宜参3井,水井沱组厚度锐减至5.22 m,暗色页岩不发育,灯影组厚达662.8 m,主要为喀斯特缝洞极其发育的台缘浅滩相灰白色鲕粒白云岩、粉晶白云岩,明显的不整合指示宜参3井灯影组经历了长期的陆上暴露和喀斯特化。位于宜昌斜坡东侧的宜页3井水井沱组下部以灰黑色灰质页岩夹瘤状灰岩为主,黑色页岩厚度小于15 m,富含三叶虫、腕

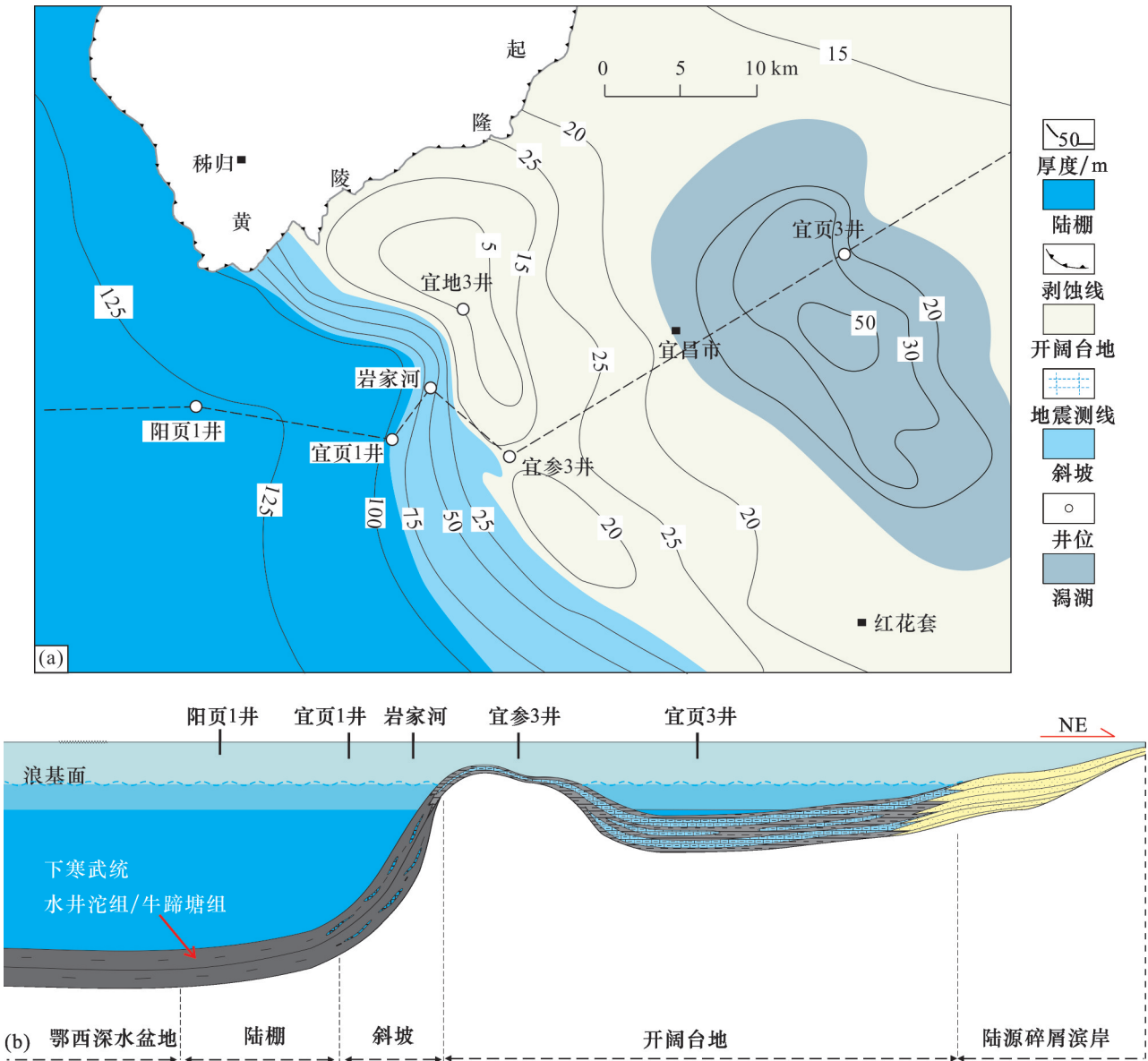


图4 宜昌地区早寒武世沉积相平面展布

Fig.4 Sedimentary characteristics of the Early Cambrian in Yichang area

(a)水井沱组沉积相与页岩等厚度;(b)寒武系晚期东西沉积相模式[剖面位置见图4(a)]

表2 宜昌地区典型水井沱组沉积厚度、页岩地球化学及含气特征特征

Table 2 Comparison of sedimentary thickness between typical wells, shale geochemical characteristics and gas content in Yichang area

井号	古地理位置	灯影组厚度 /m	水井沱组厚度 /m	连续页岩厚度 /m	TOC>2% 页岩厚度/m	页岩 TOC / %	页岩 R_o / %	现场解析含气量 /(m ³ /t)
宜探2	台地	523.0	55.0	38.0	-	-	-	-
宜页3	台内洼陷	-	84.0	48.0	15	(0.18~4.77)/1.34	-	(0.20~0.94)/0.33
宜参1	台缘隆起	617.0	9.0	3.0	-	< 0.5	-	-
宜地3	台缘隆起	624.4	8.6	4.05	-	< 0.5	-	-
宜参3	台缘隆起	662.8	5.2	2.65	-	< 0.5	-	-
宜地5	台缘隆起	615.3	18.0	13.99	-	< 0.5	-	-
宜参2	台缘斜坡	429	62.2	31.98	13.7	(0.1~7.91)/1.91	-	-
稀地2	台缘斜坡	420.8	79.6	63.3	22.66	(0.25~5.02)/2.34	(1.97~2.59)/2.33	(0.23~4.45)/2.15
宜地2	台缘斜坡	-	101.6	72.32	28.0	(0.52~5.96)/2.26	(2.26~2.37)/2.35	(0.17~5.58)/2.24
宜页1	台缘斜坡	235.0	136.1	86.0	36.7	(0.43~10.45)/2.7	(2.18~2.30)/2.26	(0.58~5.48)/2.05
稀地1	陆棚	247.72	>290	104.81	44.1	(0.53~8.72)/2.14	(1.43~1.79)/1.61	(0.23~1.05)/0.59
阳页1	陆棚	176.5	469.5	141.0	41	(1.0~5.5)/2.2	(2.5~3.7)/2.7	(0.32~4.48)/2.30

注:(a~b)/c表示(最小值~最大值)/平均值

足类化石以及黄铁矿,该井灯影组未钻穿,综合岩性、生物组合推测该水井沱组为局限台地相沉积。

总体上看,水井沱组富有机质页岩厚度变化大,斜坡—陆棚相带是页岩发育的有利相带,其页岩厚度是台地边缘隆起带的2~10倍。有机地球化学方面,水井沱组页岩 TOC 含量为 0.43%~10.45%,TOC 含量大于1%的暗色页岩连续累计厚度为 68~80 m,TOC 含量大于2%的富有机质页岩累计厚度为 30~40 m(表2),生烃条件好,是研究区最重要的烃源岩层系。深水陆棚相优质页岩是页岩气富集的基础,前人^[10,31]对页岩古环境、古生产力、硅质成因等做了大量研究,因篇幅有限,本文仅关注页岩含气性方面。宜页1水井沱组一岩家河组连续含气页岩段厚 176.03 m(1 762.24~1 938.27 m),钻井过程中气显频繁,现场解析页岩含气量在 0.31~5.48 m³/t 之间,连续含气量大于 2 m³/t 的累计厚度达 44.05 m,含气量随深度增加而增大,这一趋势与 TOC 的垂向变化趋势基本一致。对宜页1井、阳页1井和宜地2井的统计显示(图5),TOC 含量与现场解析的含气量呈正相关关系,表明了有机碳对页岩含气量的重要控制作用。

3.2 黄陵岩体隆升对页岩热成熟度的影响

黄陵隆起低温热年代学锆石和磷灰石裂变径迹的研究表明,在 160~110 Ma 和 45 Ma 以来发生 2 期快速隆升剥蚀^[24-27,32],该构造隆升对宜昌斜坡区油气成藏有重要的影响。一个显著的特征是黄陵隆

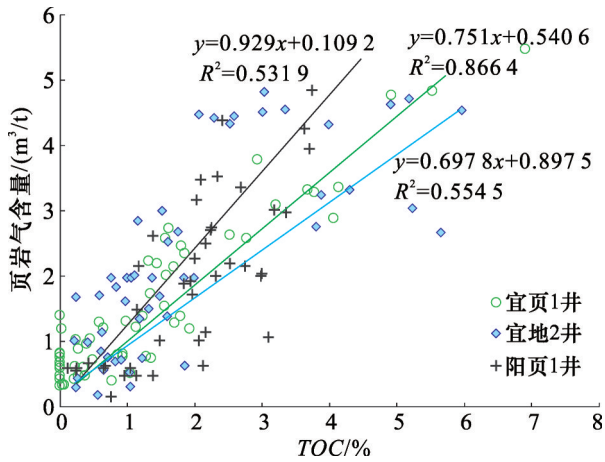


图5 宜昌地区水井沱组页岩解析气含量与 TOC 关系 (阳页1井数据见文献[11])

Fig.5 Relationship between gas content and TOC in Shuijingtuo shale in Yichang area (data of Well Yangye 1 from Ref.[11])

起的构造隆升使区域上寒武系烃源岩的成熟度相对低,进而影响页岩生、排烃时间。

区域调查揭示,水井沱组页岩热演化程度由黄陵隆起向四周呈逐渐增高的趋势[图6(a)]。临近隆起区的稀地1井泥页岩的 R_o 等效值为 1.43%~1.79%,平均值为 1.61%,相对较低;南侧的长阳鸭子口白竹岭剖面中泥页岩的 R_o 等效值为 2.56%~2.67%,平均值为 2.62%;宜都背斜聂河地区钻探的 ZK05 井中泥页岩的 R_o 等效值分布在 2.46%~3.15% 之间,平均值为 2.85%。研究区西侧兴山峡口镇建阳坪剖面中泥页岩的 R_o 等效值为 2.73%;南

阳镇剖面中泥页岩的 R_o 等效值为2.19%~3.07%,平均值为2.63%。受黄陵古隆起的抬升演化和隔热作用,由隆起周缘向外热成熟度 R_o 逐渐增高的现象表明,靠近古隆起区域地层抬升强度大、埋深小,远离古隆起区域抬升强度小、深埋较大。页岩埋藏、生烃史模拟表明,宜昌地区寒武系烃源岩在印支期以前长期处于持续沉降埋藏状态,下寒武统烃源岩在早奥陶世晚期进入生油高峰,在晚三叠世中期达到生气高峰,在早中侏罗世页岩埋深达到最大,随后发生快速抬升,烃源岩热演化也定型于燕山期,现今寒武系水井沱组泥岩 R_o 等效值在2.4%~3.2%之间,处于过成熟晚期干气阶段。寒武系页岩适宜

的热演化程度有利于有机质纳米孔隙的形成,氩离子抛光扫描电镜观察显示[图6(b)],水井沱组页岩发育丰富的纳米级有机质孔隙,孔隙呈弯月形、不规则形状,面孔率为5%~20%,有机孔孔径主要集中在1.4~47.2 nm范围内,与川南筇竹寺组页岩孔隙具有相似的特征^[33],这些有机质纳米孔隙构成页岩气重要储集空间^[34]。

宜昌斜坡区页岩埋深浅、生烃时间晚、烃源岩热成熟度低,对中、下扬子区下古生界广泛分布的高演化、生烃枯竭的页岩而言,页岩气成藏极为有利。宜昌地区在水井沱组获得工业气流也印证了热成熟度对盆外页岩气勘探的重要影响。

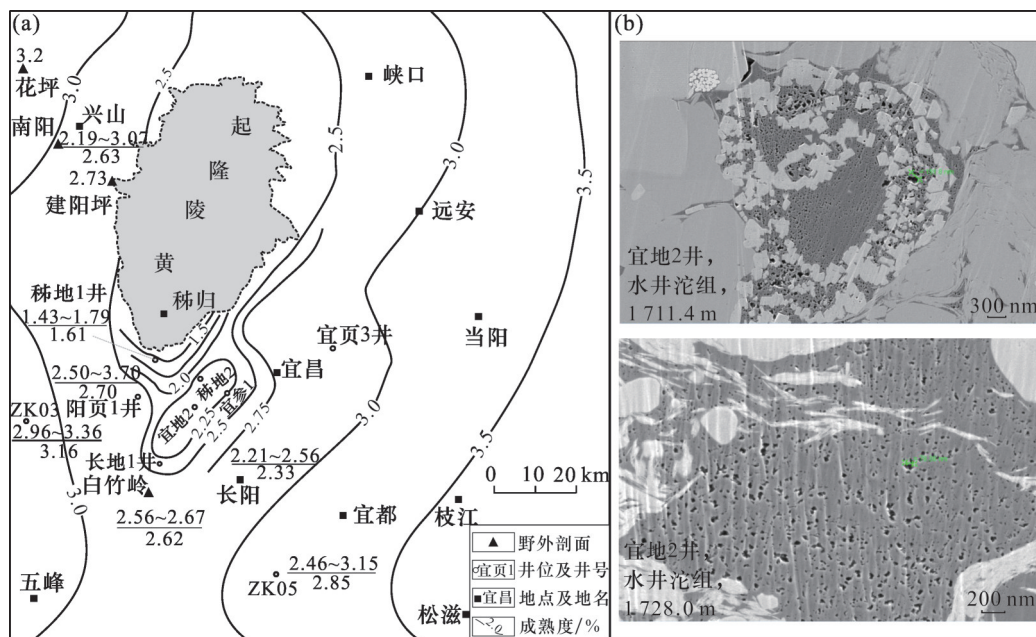


图6 宜昌地区水井沱组有机质热演化程度平面分布^[35](a)和典型井页岩有机纳米孔隙照片(b)

Fig 6 Thermal maturity reflected by equal vitrinite values of the Shuijingtuo shale in Yichang area^[35] (a) and nanopores associated with organic matter in typical well (b)

3.3 古隆起对构造破坏的砥柱作用

燕山早期构造运动具有构造强度大、范围广的特点,是研究区主要的构造形成期。扬子板块周缘的华南海槽和秦岭海槽相继闭合造山,华南板块近南北向挤压应力沿隆起两翼释放,形成近东西向剪切应力,在东西向剪切应力和南北向挤压应力的作用下,形成了南北2个弧形构造体系,即向西南突出的大巴山—大洪山弧形构造带和向北突出的八面山—大磨山褶皱弧形带[图1(a)]。2个构造带在中扬子地区中部交会,形成了以断褶、断块构造为特征的川东北—大冶对冲干涉构造带^[20,28,35],对冲交接的部位大致位于黄陵—荆州—簪洲—大冶一线,

宜昌斜坡位于对冲干涉构造带内,远离南北两侧造山带,其构造活动较南北两侧弱。

东西向构造大剖面显示(图7),中扬子东西分带的构造格局十分明显,自东至西方向,应力传递具有递减特征,构造样式依次为逆冲推覆构造—叠瓦状逆冲—断褶构造,地层冲断变形逐渐减弱。东北侧的秦岭—大别造山带是弧形构造带中变形变位最强烈的地区,表现为显著的逆冲推覆构造,常见“飞来峰”,并伴随以震旦系陡山沱组为滑脱面的强烈剪切拆离变形。巴洪冲断带以基底卷入型断层和断层滑脱褶皱为主,地层沿切入基底的深大断裂整体发生逆冲,冲断形成的构造高部位遭受剥

蚀^[28]。中部的钟祥叠瓦冲断带以叠瓦状前展的盖层滑脱断层和转折褶皱为特征,滑脱层深度大,断层多为切穿全部地层深达基底的大断层。至江汉平原西侧的当阳滑脱褶皱带,变形强度明显减弱,挤压作用将上三叠统一中侏罗统卷入变形,形成宽缓褶皱,褶皱内部的所有断层都向下终止于志留系底部的页岩层^[36],油气保存条件较好。

鄂西地区在早燕山期受到强烈的挤压和抬升作用下,下寒武统水井沱组烃源岩生烃停止,进入

改造和残余油气藏形成期。在燕山主幕的强烈挤压作用下,形成逆冲断层和高角度断层相关的隔挡式褶皱,伴随发育大量构造裂缝^[28]。早燕山运动伴随着对中、古生界油气盖层的剥蚀和强烈改造,晚侏罗世—早白垩世间的剥蚀量在4~8 km之间,局部可达10 km^[37],构造核部多已出露上寒武统一下古生界志留系,油气藏保存条件遭受破坏,形成沿江南隆起带分布、被燕山构造运动破坏的系列古油藏^[38]。

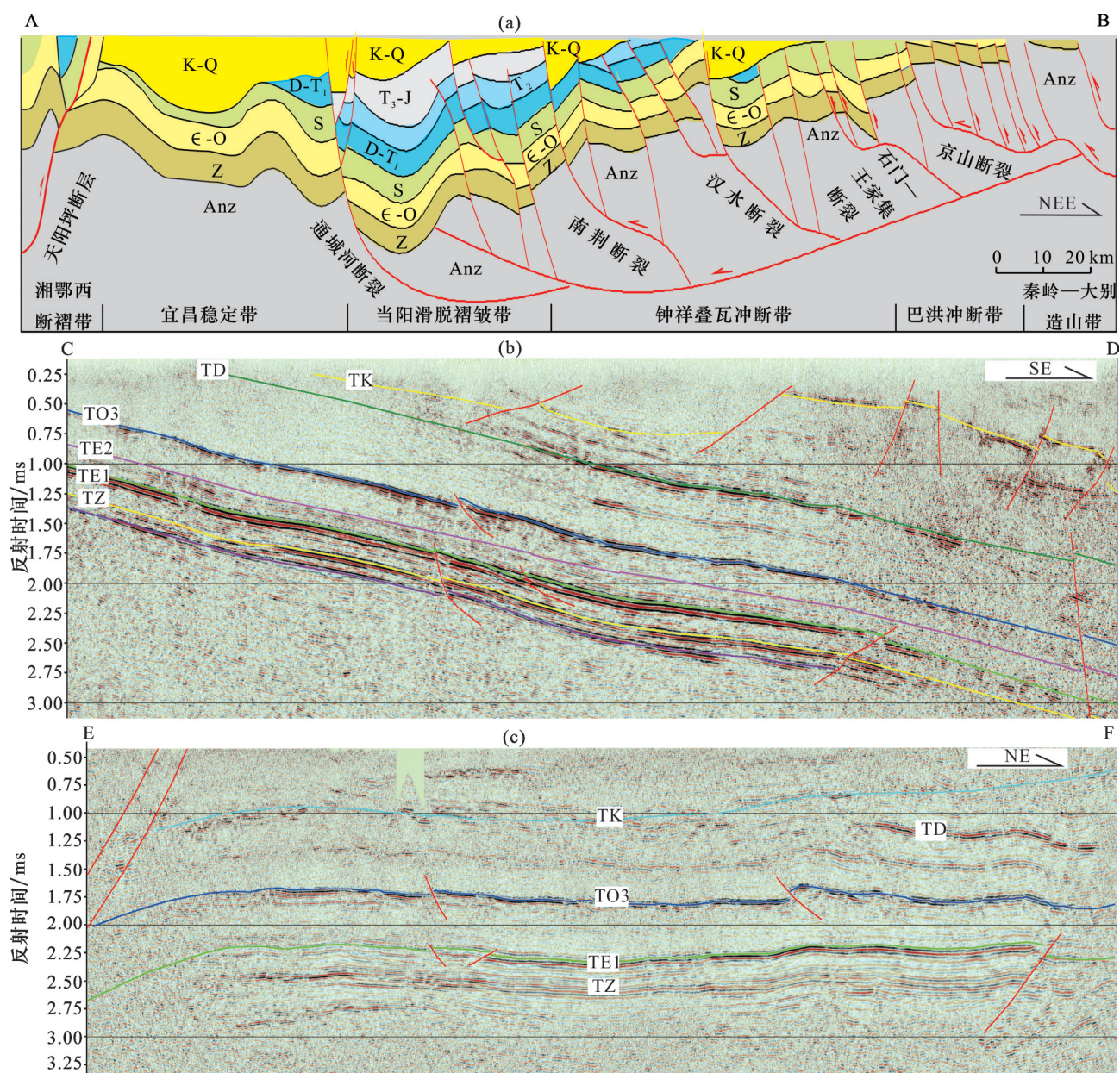


图7 宜昌及周边地区地震剖面

Fig.7 Seismic profile in the Yichang and around areas

(a)剖面AB,北东向宜都—随州地震地质解释大剖面^[39],剖面位置见图1(a);(b)剖面CD,南东向宜昌—当阳地震剖面,剖面位置见图1(b);(c)剖面EF,北东向长阳—当阳剖面,剖面位置见图1(b)。其中:TK、TD、TO3、TE2、TE1、TZ分别代表白垩系、泥盆系、奥陶系五峰组、寒武系覃家庙组、寒武系水井沱组、震旦系陡山沱组地层底界

与鄂西地区不同,由于黄陵隆起的砥柱,宜昌斜坡具有特殊的隔热保整作用。宜昌黄陵基底由古老变质岩系、侵入的新元古代酸性和基性岩体构成,除部分出露地表外,大部分位于沉积盖层之下。深部地球物理资料可以有效显示地下岩体分布,前人采用布格异常、剩余重力异常、以及航磁化极一阶垂向导数异常为背景,参考地表露头岩体显示,推断宜昌地区存在6大岩体,其中天阳坪岩体和黄陵庙岩体分布范围大、形态较规则^[30],黄陵庙岩体还是我国特大水利枢纽工程三峡大坝所在地。宜昌斜坡覆盖在天阳坪岩体之上,与黄陵隆起具有统一的基底,该基底使宜昌斜坡带在南方中、新生代发生的多期次强烈构造活动中免遭构造改造和破坏。当推覆构造前峰扩展到古隆起时受到阻挡,围绕古隆起构造形迹发生了明显转向,大巴山—大洪山弧形构造带的逆冲块体构造方向由南转变为北东向,致使弧形构造带呈东西向S形展布^[28-29]。发育于黄陵结晶基底之上的宜昌斜坡构造强度明显弱于邻区,构造样式以南东倾向的平缓单斜、宽缓断背斜为主,地层连续性好,褶皱和断裂规模明显偏小,在志留系局部地区发育位移量较小的逆冲断层,在寒武系层内的断层规模小,多数未穿透上寒武统的膏岩盖层(图7)。

燕山期构造作用对宜昌斜坡区油气成藏具有以下的影响:①宜昌单斜构造已形成,大部分油气在燕山期受极大破坏、彻底散失,如靠近隆起花岗岩暴露区的宜昌龙王洞中寒武统碳酸盐岩顺层裂

缝中发育的沥青^[40],即为油气沿层内断层或局部断块运移至中寒武统碳酸盐岩储层后,顺单斜地层运移至地表造成的。②局部早期聚集的油气调整至构造高部位、少部分成藏(图8),如宜地2井钻遇天河板组裂缝性灰岩发生井喷,气液混合喷出地表约20 m高,持续数小时,气液分离点火火焰高2~3 m,分析认为气藏被破坏后沿裂缝(或断层)向上倾方向运移,最终在中寒武统天河板组中聚集,储集空间由半充填的构造缝、溶蚀缝、压溶缝和晶间溶孔组成,由天河板组中部20 m厚的泥灰岩形成顶封层。③水井沱组页岩气藏虽经缓慢逸散,由于页岩渗透率低,现今仍有效保存在泥页岩微米—纳米级有机孔和无机孔隙中,这部分非常规天然气是当前该区勘探的主体。

3.4 微裂缝对页岩气影响

宜昌地区寒武系遭受多次构造改造,发育了密度不一的微裂缝、裂隙,这些形成于不同期次、发育在不同位置的裂缝对页岩气勘探具有不同的意义。一方面,钻穿天阳坪断裂的阳页1井在灯影组至石龙洞组碳酸盐岩层中多次发生井漏、放空和垮塌现象,钻探过程中地层承压能力差、钻井液密度窗口范围小。表明在推覆体边缘,逆冲作用在中—上寒武统白云岩、灰岩脆性地层中产生截切地层的高角度裂缝,这类裂缝多分布在靠近断层的上盘灰岩地层中(图8),构成流体散失的通道。另一方面,在隆起上的斜坡区域,早燕山期黄陵背斜处于主隆升期,由于其刚性岩体的砥柱,加之泥岩具有一定塑性,逆

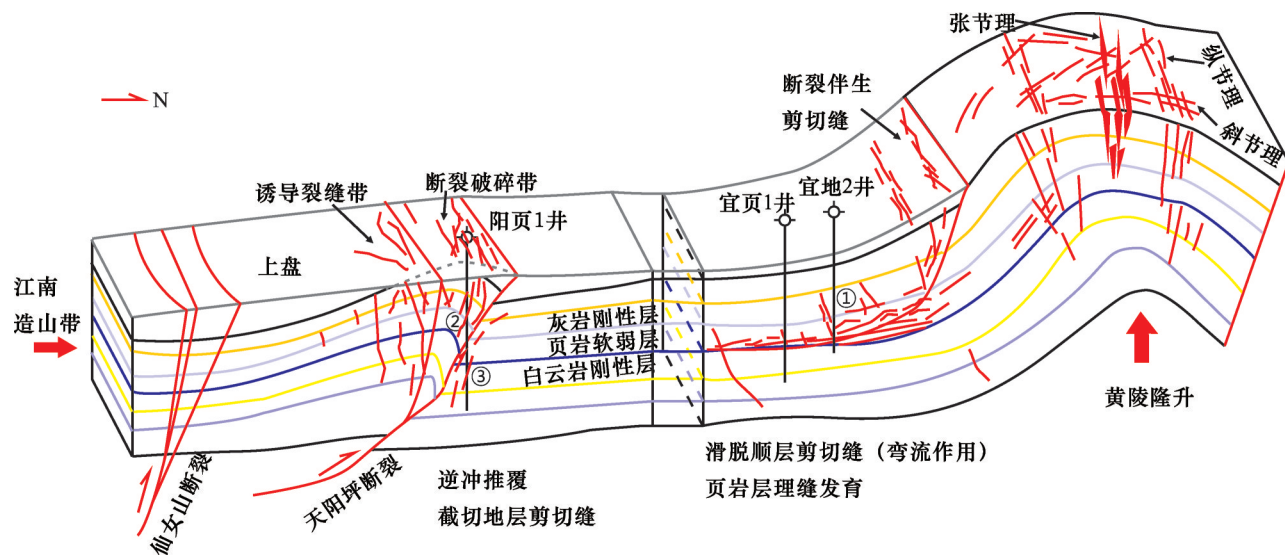


图8 宜昌地区寒武系地层裂缝发育模式

Fig.8 Crack development pattern in Yichang slope area

①宜地2井天河板组裂缝性气藏发生井喷;②阳页1井中、上寒武统地层重复;③灯影组—石龙洞组多次发生井漏和放空现象

冲推覆在斜坡上易发生弯流作用,断裂沿着页岩软弱层顺层滑动,并在页岩层内形成大量的微裂缝(图8,图9),宜昌地区寒武系页岩中微裂缝表现出构造和滑脱作用双重控制的特点。宜页1井页岩裂缝可分为构造裂缝和页理缝,目的层段1820~1874 m成像测井资料识别出高阻缝222条、高导缝2条、微断层10条,FMI图像上显示高阻缝规模大、多切穿井筒,在其周边常出现伴生的规模小、未切穿井筒的次级高阻缝[图9(a),图9(b)],反映出该区天然裂缝规模大且密度较高。页岩岩心观察,裂缝宽度在毫米级至微米级不等[图9(e),图9(f)],宽裂缝(缝宽约为0.1 cm)出现频次低、相隔间距大;伴生的诱导裂缝较窄,宽度在0.1 mm左右,出现的频次高、间距小;微裂缝多为高角度缝,裂缝倾角主要分布范围为 $65^{\circ}\sim 75^{\circ}$,裂缝走向与其西南部的天阳坪断层走向接近,高角度缝分布频次和走向特征表明受区域构造应力的控制^[41-42]。

由于斜坡存在一定的坡度,寒武系页岩中滑脱

作用同样十分明显,宜页1井水井沱组底部1870.27~1871.51 m[图9(c)]和中部1853.85~1854.33 m[图9(d)]2个层段均发生了沿着页岩软弱层的顺层滑动,变形产生的镜面擦痕与层面斜交,呈波浪状,多被方解石、白云石等矿物全部或部分充填。同时,早期高角度裂缝被后期水平裂缝切割[图9(f)],直接证明了由于黄陵隆起隆升、重力引起的滑脱作用发生在区域构造挤压抬升之后。临井稀地2井寒武系水井沱组页岩裂缝脉体的薄片镜下研究表明:①早期高角度方解石脉体和晚期的顺层方解石—白云石复合脉体,均形成于K₂晚燕山运动时期的构造挤压和抬升阶段;②脉体中检测出高密度的甲烷包裹体,顺层裂缝中脉体甲烷包裹体密度要明显高于高角度裂缝方解石中的^[43],高角度方解石脉体中甲烷包裹体均一温度范围为 $86.1\sim 100.5^{\circ}\text{C}$,高于顺层裂缝中复合脉体中甲烷包裹体均一温度($82.9\sim 91.1^{\circ}\text{C}$);③高角度裂缝中方解石脉体的形成经历了由还原环境向氧化环境转变,而顺层裂缝中复合脉

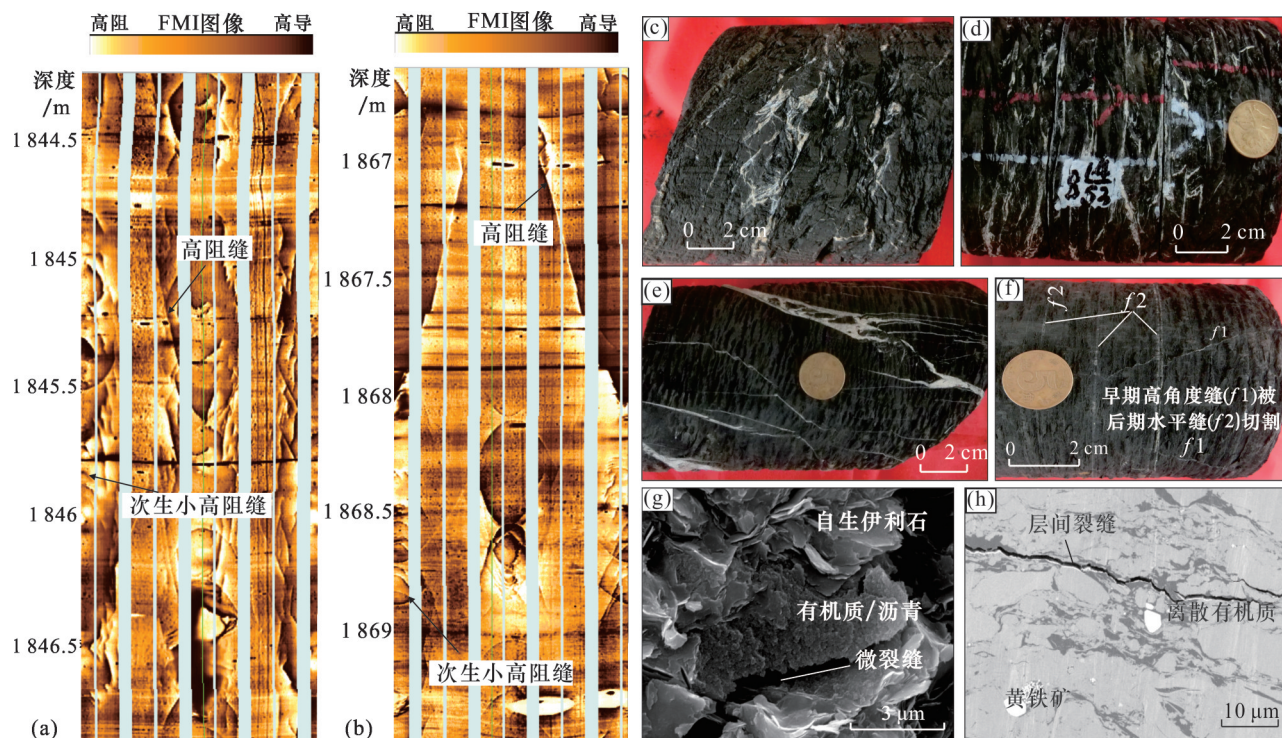


图9 典型井裂缝分布

Fig.9 The fracture distribution in typical wells

(a)宜页1井水井沱组1840~1847 m FMI测井显示高阻缝发育;(b)宜页1井水井沱组1866.5~1869.5 m FMI测井显示高阻缝和次生高阻缝发育;(c)宜页1井水井沱组,1864.72 m,炭质泥岩层间揉皱变形强烈,方解石脉水平充填,镜面擦痕明显;(d)宜页1井水井沱组,1854.21 m,炭质泥岩为一滑脱变形层,整段中水平裂缝发育,被黄铁矿和方解石局部充填;(e)宜页1井水井沱组,1831.53 m,炭质泥岩,高角度微裂缝呈雁列式密集分布,裂缝密度18条/m,较宽裂缝出现频次低、相隔间距大,伴生的微小裂缝出现频次高,间距小;(f)宜页1井水井沱组,1842.95 m,炭质泥岩中见2组相交的高角度裂缝,方解石脉体充填,注意早期高角度裂缝被后期水平裂缝切割;(g)宜地2井水井沱组,1858.50 m,有机质与微裂缝伴生;(h)宜地2井水井沱组,1864.72 m,微裂缝切割离散有机质

体长期保持在还原环境中^[43]。以上现象表明,早期区域构造应力形成的高角度裂缝对寒武系页岩气的局部封闭条件产生了破坏,造成页岩气部分散失;而晚期地层抬升、顺层滑脱形成的低角度裂缝对局部封闭条件的破坏作用有限。这种由于推覆作用形成的构造裂缝和顺层滑脱作用形成的剪切缝,成为页岩气运移、储集的重要空间,对宜昌地区水井沱组页岩气的保存有重要作用。

4 结论

桐湾运动末期形成早寒武世隆、凹相间的古地理格局,控制着宜昌地区寒武系水井沱组富有机质页岩的展布,陆棚相和斜坡相页岩沉积厚度大,TOC含量高,是控制页岩气富集的关键因素。古隆起周缘页岩具有埋藏深度适中、抬升早的特点,造成寒武系古老页岩成熟度相对低,有利于页岩气的富集和保存。受黄陵隆起的砥柱作用,印支期以来该区以频繁的隆升运动为主,断层分布局限于层内,整体构造变形弱,保存条件优越。水井沱组页岩裂缝发育,早期构造作用形成高角度裂缝造成页岩气部分散失,晚期由于重力顺层滑脱作用形成的低角度剪切缝对页岩气破坏作用有限。宜昌地区的勘探实践证实,印支期古隆起、古构造斜坡周缘、逆冲推覆构造下盘是中下扬子区页岩气的有利勘探区。

致谢:感谢审稿人给予的宝贵建议。

参考文献(References)

- [1] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
ZOU C N, DONG D Z, WANG S J, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6):641-653.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.
MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):561-574.
- [3] 董大忠,高世葵,黄金亮,等.论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J].天然气工业,2014,34(12):1-15.
DONG D Z, GAO S K, HUANG J L, et al. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12):1-15.
- [4] 何治亮,胡宗全,聂海宽,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气富集特征与“建造—改造”评价思路[J].天然气地球科学,2017,28(5):724-733.
HE Z L, HU Z Q, NIE H K, et al. Characterization of shale gas enrichment in the Wufeng-Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its evaluation of geological construction-transformation evolution sequence[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5):724-733.
- [5] 张成林,张鉴,李武广,等.渝西大足区块五峰组—龙马溪组深层页岩储层特征与勘探前景[J].天然气地球科学,2019,30(12):1794-1804.
ZHANG C L, ZHANG J, LI W G, et al. Deep shale reservoir characteristics and exploration potential of Wufeng-Longmaxi Formations in Dazu area, western Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(12):1794-1804.
- [6] 王玉满,黄金亮,王淑芳,等.四川盆地长宁、焦石坝志留系龙马溪组页岩气刻度区精细解剖[J].天然气地球科学,2016,27(3):423-432.
WANG Y M, HUANG J L, WANG S F, et al. Dissection of two calibrated areas of the Silurian Longmaxi Formation, Changning and Jiaoshiba, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(3):423-432.
- [7] 孟宪武,田景春,张翔,等.川西南井研地区筇竹寺组页岩气特征[J].矿物岩石,2014,34(2):96-105.
MENG X W, TIAN J C, ZHANG X, et al. Characteristics of shale gas of the Qiongzhusi Formation in Jingyan area of south-west Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(2):96-105.
- [8] 聂海宽,金之钧,边瑞康,等.四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集[J].石油学报,2016,37(5):557-571.
NIE H K, JIN Z J, BIAN R K, et al. “Source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(5):557-571.
- [9] 李昌伟,陶士振,董大忠,等.国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J].天然气地球科学,2015,26(5):986-1000.
LI C W, TAO S Z, DONG D Z, et al. Comparison of the formation condition of shale gas between domestic and abroad and favorable areas evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5):986-1000.
- [10] 陈孝红,危凯,张保民,等.湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J].中国地质,2018,45(2):207-226.
CHEN X H, WEI K, ZHANG B M, et al. Main geological factors controlling the distribution and development of shale gas in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as well as its enrichment patterns[J]. Geology in China, 2018, 45(2):207-226.

- [11] 翟刚毅, 包书景, 王玉芳, 等. 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, 2017, 38(4): 441-447.
ZHAI G Y, BAO S J, WANG Y F, et al. Reservoir accumulation model at the edge of palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 441-447.
- [12] 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.
ZHANG J F, XU H, ZHOU Z, et al. Geological characteristics of shale gas reservoir in Yichang area, western Hubei[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(8): 887-899.
- [13] 张文荣, 熊洁明, 文可东. 中扬子地区南、北对冲式逆掩推覆构造形成演化[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(2): 1-9.
ZHANG W R, XIONG J M, WEN K D. The formation and evolution mechanism of the nappe tectonics with north-south ramps in the middle Yangtze area and its geologic condition related to oil and gas generation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1992, 19(2): 1-9.
- [14] 戴少武, 刘少峰, 程顺有. 江汉及邻区盆地耦合关系与油气[M]. 西安: 西北大学出版社, 2000: 68-81.
DAI S W, LIU S F, CHENG S Y. Coupling Relation Between Basin and Mountain and Oil and Gas in Jianghan Basin and Its Adjacent Regions[M]. Xi'an: Northwest University Press, 2000: 68-81.
- [15] 郭战峰, 刘新民, 盛贤才, 等. 东秦岭一大别造山带南侧加里东期古隆起特征及油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 181-185.
GUO Z F, LIU X M, SHENG X C, et al. Petroleum geological significance and characteristics of Caledonian paleouplift in the southern margin of east Qinling and Dabie orogenic belt[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(2): 181-185.
- [16] 李忠雄, 陆永潮, 王剑, 等. 中扬子地区晚震旦世一早寒武世沉积特征及岩相古地理[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 151-162.
LI Z X, LU Y C, WANG J, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies palaeogeography of the Late Sinian and Early Cambrian in middle Yangtze region[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 151-162.
- [17] 刘新民, 付宜兴, 郭战峰, 等. 中扬子区南华纪以来盆地演化与油气响应特征[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2): 160-165.
LIU X M, FU Y X, GUO Z F, et al. Characteristics of basin evolution and hydrocarbon response in middle Yangtze region since Nanhua period[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(2): 160-165.
- [18] 余武, 沈传波, 杨超群. 秭归盆地中生代构造—热演化的裂变径迹约束[J]. 地质前缘, 2017, 24(3): 116-126.
YU W, SHEN C B, YANG C Q. Constraints of fission track dating on the Mesozoic-Cenozoic tectonic-thermal evolution of the Zigui Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 116-126.
- [19] 左文超. 论印支运动在湖北境内表现特点——兼论省内盖层褶皱形成主要时期[J]. 湖北地矿, 2000, 14(3-4): 16-22.
ZUO W C. Expression characteristics of Indosinian movement in Hubei: Concurrently discussing the major period forming the mantle folds in this area[J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2000, 14(3-4): 16-22.
- [20] 何治亮, 汪新伟, 李双建, 等. 中上扬子地区燕山运动及其对油气保存的影响[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 1-11.
HE Z L, WANG X W, LI S J, et al. Yanshan movement and its influence on petroleum preservation in middle-upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 1-11.
- [21] 赵小明, 童金南, 姚华舟, 等. 三峡地区印支运动的沉积响应[J]. 古地理学报, 2010, 12(2): 177-184.
ZHAO X M, TONG J N, YAO H Z, et al. Sedimentary response to the Indosinian movement in Three Gorges area[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(2): 177-184.
- [22] 付宜兴, 张萍, 李志祥, 等. 中扬子区构造特征及勘探方向建议[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 308-314.
FU Y X, ZHANG P, LI Z X, et al. The tectonic characteristics and their significance for hydrocarbon exploration in mid-Yangtze area[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 308-314.
- [23] XU Z Y, JIANG S, YAO G S, et al. Tectonic and depositional setting of the Lower Cambrian and Lower Silurian marine shales in the Yangtze Platform, South China: Implications for shale gas exploration and production[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 170: 1-19.
- [24] 沈传波, 梅廉夫, 刘昭茜, 等. 黄陵隆起中—新生代隆升作用的裂变径迹证据[J]. 矿物岩石, 2009, 29(2): 54-60.
SHEN C B, MEI L F, LIU Z Q, et al. Apatite and zircon fission track data, evidences for the Mesozoic-Cenozoic uplift of Huangling dome, central China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(2): 54-60.
- [25] XU C H, ZHOU Z Y, CHANG Y, et al. Genesis of daba arcuate structural belt related to adjacent basement upheavals: Constraints from fission-track and (U-Th)/He thermochronology[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(11): 1634-1646.
- [26] 李天义, 何生, 何治亮, 等. 中扬子地区当阳复向斜中生代以来的构造抬升和热史重建[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 213-224.
LI T Y, HE S, HE Z L, et al. Reconstruction of tectonic uplift and thermal history since Mesozoic in the Dangyang synclinalorium of the central Yangtze area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 213-224.
- [27] 袁玉松, 孙冬胜, 周雁, 等. 中上扬子地区印支期以来抬升剥蚀时限的确定[J]. 地球物理学报, 2010, 53(2): 362-369.
YUAN Y S, SUN D S, ZHOU Y, et al. Determination of onset of uplifting for the Mid-Upper Yangtze area after Indosinian

- event[J]. Chinese Journal of Geophys, 2010, 53(2): 362-369.
- [28] 邓铭哲. 黄陵背斜及邻区构造建模[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2018:137-140.
- DENG M Z. Structural Modeling of the Huangling Anticline and Its Peripheral Structural Belt[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2018:137-140.
- [29] 王军, 褚杨, 林伟, 等. 黄陵背斜的构造几何形态及其成因探讨[J]. 地质科学, 2010, 45(3): 615-625.
- WANG J, CHU Y, LIN W, et al. Structural geometry and the origin of the Huangling anticline[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(3): 615-625.
- [30] 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩ELA-ICPMS 锆石 U—Pb 同位素年代学的约束[J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 387-396.
- LING W L, GAO S, CHENG J P, et al. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2): 387-396.
- [31] 郭旭升. 南海海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014, 88(7): 1209-1218.
- GUO X S. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China: Understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(7): 1209-1218.
- [32] JI W B, LIN W, FAURE M, et al. Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, south China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 86(2): 59-75.
- [33] 李贤庆, 王元, 郭曼, 等. 川南地区下古生界页岩气储层孔隙特征研究[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1464-1471.
- LI X Q, WANG Y, GUO M, et al. Pore characteristics of shale gas reservoirs from the Lower Paleozoic in the south of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1464-1471.
- [34] JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone)[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(8): 16-21.
- [35] 朱清波, 杨坤光, 程万强. 江南隆起带北缘新生代构造演化的石英 ESR 年代学研究[J]. 现代地质, 2011, 25(1): 31-38.
- ZHU Q B, YANG K G, CHENG W Q. Structural evolution of northern Jiangnan uplift: Evidence from ESR dating[J]. Geoscience, 2011, 25(1): 31-38.
- [36] 邓铭哲, 何登发. 当阳地区地质结构及其对宜昌地区志留系页岩气勘探的意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2018, 45(4): 487-500.
- DENG M Z, HE D F. The geological structure in the Dangyang area and its significance to the shale gas exploration in Yichang area, China[J]. Journal of Chengdu university of technology, Science & Technology Edition, 2018, 45(4): 487-500.
- [37] 赵宗举, 朱琰, 邓红婴, 等. 中国南方古隆起对中、古生界原生油气藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 10-17.
- ZHAO Z J, ZHU Y, DENG H Y, et al. Control of paleoup-lifts to the Meso-Paleozoic primary oil and gas pools in the south of China[J]. Experimental Petroleum Geology, 2003, 25(1): 10-17.
- [38] 李双建, 高波, 沃玉进, 等. 中国南海相油气藏破坏类型及其时空分布[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 43-49.
- LI S J, GAO B, WO Y J, et al. Destruction types and temporal-spatial distribution of marine hydrocarbon reservoirs in south China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 43-49.
- [39] 李昌鸿, 刘新民, 付宜兴, 等. 江汉平原区中、古生界构造特征及演化[J]. 地质科技情报, 2008, 27(2): 34-38.
- LI C H, LIU X M, FU Y X, et al. Tectonic features and evolution of Mesozoic-Paleozoic in Jiangnan plain region[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(2): 34-38.
- [40] XU G S, LIANG J J, GONG D Y, et al. Fluid migration paths in the marine strata of typical structures in the western Hubei-eastern Chongqing area, China[J]. Petroleum Science, 2013, 10(1): 1-18.
- [41] 罗胜元, 何生, 王浩. 断层内部结构及其对封闭性的影响[J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 154-164.
- LUO S Y, HE S, WANG H. Review on fault internal structure and the influence on fault sealing ability[J]. Advance in Earth Sciences, 2012, 27(2): 154-164.
- [42] GALE J F W, HOLDER J. Natural Fractures in the Barnett shale: Constraints on Spatial Organization and Tensile Strength with Implications for Hydraulic Fracture Treatment in Shale-Gas Reservoirs[C]. 42nd U.S. Rock Mechanics-2nd U.S.-Canada Rock Mechanics Symposium. San Francisco: American Rock Mechanics Association, 2008.
- [43] 刘力, 何生, 翟刚毅, 等. 黄陵背斜南翼牛蹄塘组二段页岩岩心裂缝脉体成岩环境演化与页岩气保存[J]. 地球科学, 2019, 44(11): 3583-3597.
- LIU L, HE S, ZHAI G Y, et al. Diagenetic environment evolution of fracture veins of shale core in second member of Niutang Formation in southern limb of Huangling anticline and its connection with shale gas preservation[J]. Earth Science, 2019, 44(11): 3583-3597.

Analysis of sedimentary–tectonic evolution characteristics and shale gas enrichment in Yichang area, Middle Yangtze

LUO Sheng-yuan¹, CHEN Xiao-hong¹, YUE Yong¹, LI Pei-jun¹, CAI Quan-sheng¹, YANG Rui-zhi²

(1. *Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China*

2. *Wuhan Zondy Cyber-Tech co., Ltd., Wuhan 430074. China*)

Abstract: The Yichang slope, located in western Hubei Province, is a new area for shale gas exploration of the Cambrian strata outside the Sichuan Basin. Few studies have focused on the shale gas enrichment characteristics of the Yichang slope, which developed on the ancient Huangling anticline. Based on the analysis of sedimentary, structural and the latest seismic and drilling data, as well as laboratory test, the sedimentary, tectonic and hydrocarbon accumulation characteristics are analyzed. Compared to other region of the Middle Yangtze, it is conformed that the study area has experienced three important key tectonic stages, namely the embryonic uplift in the Indosinian Period, the rapid uplift and denudation in the Yanshan Period, and the filling and reconstruction in the Himalayan Period, respectively. The relatively stable tectonic conditions in Yichang area have important influences on shale gas accumulation: (1) At the end of the Tongwan tectonic movement, the paleogeographic pattern of early Cambrian had a direct influence on the distribution of organic shale in Yichang area, and played an important role in controlling the formation and distribution of shale gas. A positive correlation between gas content and TOC content indicate that the abundance of organic matter is the key factor influencing shale gas enrichment. (2) The Huangling anticline, which began to rise in the Indosinian tectonic movement and rose rapidly in the Yanshan movement, controlled the structural subsidence of the Yichang area. The Lower Paleozoic shale strata is characterized by suitable burial depth, earlier tectonic uplifting than the west Hubei area. This relatively lower thermal maturity of the organic matters in the Sinian-Early Paleozoic shale is particularly special among the high maturity background in the south China. Organic nanopores formed an important shale gas storage space. (3) This ancient anticline played an important role in protecting the Yichang slope from suffering structural alteration and destruction during the multi-stage strong tectonic activities of the Mesozoic and Cenozoic in the South China. Tectonic activities are characterized by structural uplift with limited fracture activity and weaker tectonic deformation. Although significant uplift and erosion of overburden rocks occurred in the Late Indosinian orogeny, the Yichang area was not significantly influenced during the tectonic movement comparing to the surrounding area. The Shuijingtuo shale in Yichang area is characterized by suitable structure preservation and low permeability. Shale gas is preserved effectively in this monoclinical structure and becomes the main exploration target in this area. (4) Bedding slip joint related to stratum slip shear joint during thrusting was an important reservoir space for shale gas. Shale gas exploration of the Yichang area confirmed that the paleo-uplift, the periphery of the paleo-tectonic slope, and the fault footwall of the thrust nappe structure are favorable exploration areas for shale gas.

Key words: Shale gas; Uplift; Hydrocarbon accumulation; The Lower Cambrian Shuijingtuo Formation; Yichang slope; Western Hubei

Foundation items: The National Science and Technology Major Project (Grant No. 2016ZX05034001-002) ; The Geological Survey Project of China Geological Survey (Grant No. D20179615).