

文章编号:0253-9993(2013)05-0890-06

# 下扬子芜湖地区后期构造活动特征及其对古生界页岩气保存的影响

蔡周荣<sup>1,2,3</sup>, 夏 斌<sup>1,2,3</sup>, 万志峰<sup>1,2,3</sup>

(1. 中山大学 海洋学院, 广东 广州 510275; 2. 海洋石油勘探开发广东高校重点实验室, 广东 广州 510006; 3. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘 要:**通过野外地质考察,并结合区域构造演化背景分析,对芜湖地区后期构造的活动特征进行了深入剖析,把对研究区古生界地层有重要影响的后期构造划分为印支期挤压推覆构造和燕山、喜山期伸展构造,并进一步揭示了其构造迁移规律,认为芜湖地区古生界页岩气的保存受印支期逆冲推覆构造影响较小,受燕山、喜山期伸展构造影响较大,这在该区未来页岩气勘探中应引起重视。

**关键词:**构造活动;古生界;页岩气;芜湖地区;下扬子地台

**中图分类号:**P618.13 **文献标志码:**A

## The characteristics of later tectonic activities and their influence on the preservation of the Paleozoic shale gas in Wuhu area, Lower Yangtze Platform

CAI Zhou-rong<sup>1,2,3</sup>, XIA Bin<sup>1,2,3</sup>, WAN Zhi-feng<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Guangdong University Key Laboratory of Offshore Oil Exploration and Development, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The characteristics of late tectonic activities were studied in this paper through the field geological investigation in Wuhu area. Combining with the analysis of the regional tectonic evolution, the authors propose that the later tectonic activities which had important influence on the Paleozoic strata are divided into compressive nappe structure at Indo-China period and extensional structure at Yanshan and Himalayan period. Furthermore, the study reveals the tectonic migration regularity and that the shale gas preservation of Paleozoic strata in Wuhu area was less affected by the thrust nappe tectonics of Indo-Chinese movement, while dominated by the extension tectonics of Yanshan and Himalayan movement. This cognition about the influence of late tectonic activities should be considered in the exploration of shale gas.

**Key words:** tectonic activities; Paleozoic; shale gas; Wuhu area; Lower Yangtze Platform

页岩气是主体上以吸附和游离状态赋存于泥页岩中的非常规天然气,随着我国能源消费需求的不断攀升以及美国页岩气的大规模成功开发,页岩气近几年来迅速成为我国的油气勘探和研究的热点<sup>[1-6]</sup>。我国页岩气勘探起步较晚,目前仍处于资源调查和探索研究阶段,借鉴国外成功的勘探和研究经验以及对比国内外页岩气赋存富集的地质条件,许多油气地质学者认为我国页岩气资源存在巨大的勘探开发潜力,

其资源量与美国相当,而沉积-构造演化相对稳定的扬子地台古生界泥页岩是主要勘探层系<sup>[7-10]</sup>。目前我国页岩气勘探主要集中在上扬子的黔北和川东南地区,而对下扬子页岩气形成和保存的地质条件研究相对较少<sup>[11-13]</sup>。安徽省芜湖地区位于下扬子地台内部,该区被国土资源部列为全国页岩气勘探开发区块之一,虽然经历了古生代稳定的海相沉积,发育有较好泥页岩层系,具有生成页岩气的良好沉积环境,但

收稿日期:2013-03-20 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214706);国家自然科学基金资助项目(41206035)

作者简介:蔡周荣(1979—),男,广东信宜人,讲师。E-mail: czhsy@ qq. com。通讯作者:夏 斌(1959—),男,江西吉安人,教授,博士生导师。E-mail: xb698xy@ qq. com

印支期以来下扬子地台经历了多期强烈的构造改造<sup>[14-16]</sup>,在后期强烈构造运动影响下,周缘构造活动带对芜湖地区古生界地层的影响过程如何,芜湖地区能否处于适合页岩气保存的相对稳定区?这是进行该区页岩气勘探开发中亟待研究解决的关键科学问题,也是本文探讨的主要内容。

## 1 区域地质概况

下扬子芜湖地区西以郯庐断裂带与秦岭—大别造山带相隔,北为苏鲁造山带,南邻武夷造山带,其沉积—构造演化属于下扬子构造演化的一部分。前人研究成果表明,震旦纪至早三叠世处于较稳定的海相沉积,构造活动相对较弱。中三叠世以来,印支运动造成下扬子区处于华北板块、华南板块 SE—NW 向强烈的区域挤压应力场作用下<sup>[16]</sup>,大别苏鲁造山带由西向东逆冲推覆,江绍断裂亦在早、中侏罗世相向逆冲推覆,芜湖地区地壳逐渐抬升,开始进入陆相沉积阶段<sup>[16-17]</sup>。印支、燕山、喜山运动的持续作用使芜湖地区夹持于苏鲁—大别造山带和武夷造山带之间,先后经历了挤压和伸展的应力环境,造成芜湖地区周缘古生界地层的严重破坏,而中部古生界地层受到的影响程度目前还不清楚<sup>[17]</sup>(图1)。

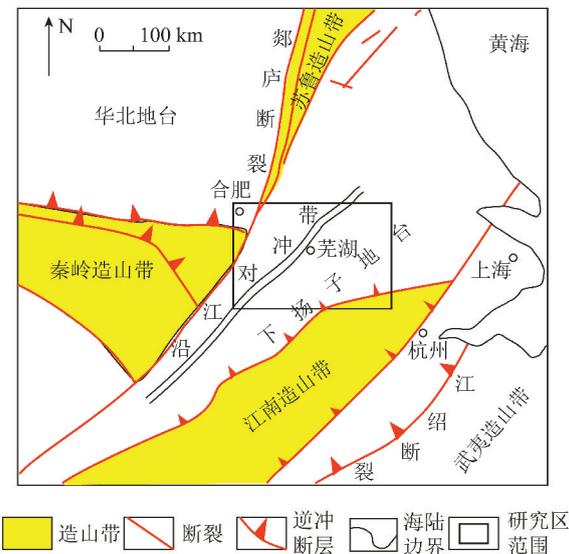


图1 研究区大地构造位置(据文献[18-19]联合修编)

Fig. 1 The tectonic location diagram of the study area  
(Modified according to the Reference[18-19])

## 2 古生界泥页岩发育特征

由于缺乏钻井和地球物理资料,芜湖地区中部古生界泥页岩发育情况还不明确,但从北边和南边造山带的地质露头分析及前人对下扬子泥页岩发育特征

的研究成果<sup>[6,20-21]</sup>来看,寒武系泥页岩分布面积小,且仅呈零星分布,目前无法判断研究区中部在第四系广泛覆盖下深部是否存在厚层下寒武统荷塘组泥页岩,下志留统高家组 and 上二叠统龙潭组地层露头发育广泛,且层位较厚,是暗色泥页岩发育的重点层位,推测这两套泥页岩在芜湖地区中部也较发育。

下志留统高家组是在海退背景下开阔大陆坡—陆棚—滨海环境中形成的泥页岩夹粉砂岩地层,在芜湖地区分布广泛,厚度大于1500 m,从下到上可分为3段:下段为灰黑色页岩;中段为黄绿色页岩、薄层长石细砂岩;上段为黄绿色中薄层长石石英细砂岩。随着海退作用以及地壳的不断抬升,高家组泥页岩从下至上粒度逐渐变粗,黏土矿物和有机质逐渐减少,其地球化学特征与苏北和苏南的高家组泥页岩地球化学特征相似,TOC含量在0.01%~3.53%,干酪根类型主要为I, II<sub>1</sub>型,热演化程度整体较高,估计 $R_o > 2.5\%$ 。另外,在芜湖地区北部的巢湖—枞阳冲断体和东南部太湖逆掩构造区的无锡—长兴一带,分别出现了2个 $R_o > 3.0\%$ 的NE向过成熟区,其余地区 $R_o$ 实测值都大于1.5%,属高一过成熟区<sup>[20-21]</sup>。

上二叠统龙潭组为一套滨岸沼泽相的含煤沉积,可以为3部分:下部为灰黄、青灰色中厚层细粒岩屑长石英砂岩及含砾砂岩,夹黑色薄层泥岩;上部为青灰、灰黑、灰黄色薄层泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩,夹煤线;顶部为灰黑色中厚层泥晶白云质生物碎屑灰岩,含燧后团块及条带。根据野外露头实地测量,龙潭组在芜湖北部地区厚度约为40 m,主要分布在俞府大村向斜核部炭井村一带及平顶山向斜平顶山四周,但掩盖较多,剖面不全,但3部分岩性可以分得出来,区内顶部灰岩呈透镜状,与上覆大隆组硅质岩沉积易于划分。整套地层由北向南逐渐增厚,前人研究表明其最大厚度可能超过240 m。据芜湖地区南部地球化学测量结果,该套泥页岩有机碳含量较高,TOC含量平均值为1.85%,并且从南往北有逐渐降低的趋势, $R_o$ 在1.5%~2.3%,属高成熟区<sup>[20-21]</sup>。

从以上泥页岩的发育特征分析可知,芜湖地区古生界具备了形成页岩气的烃源岩条件。

## 3 后期构造活动特征

### 3.1 构造发育特征

芜湖地区所在的扬子地台位于特提斯构造域与太平洋构造域的交汇处,经历了古生界较稳定的海相沉积之后,中生代以来强烈的构造活动奠定了现今的构造格架,尤其是印支运动在本区表现最为明显。由

于芜湖地区中部则只有零星古生界地层出露,大部分被第四系覆盖,笔者主要对芜湖西北部靠近苏鲁一大别造山带的巢湖地区以及位于沿江构造带上的铜陵、繁昌地区的构造发育特征进考察,并对比两者的构造活动的差异性。

研究区西北部巢湖地区古生界地层出露较完整,构造以 NNE—SSW 向褶皱为主,并伴随有一系列的纵断层、横断层和斜断层,主断裂以 NE 向为主,古生界地层普遍经过强烈的构造改造,形成多条大型 NE 向逆冲推覆带,造成地层的缺失或倒转,除了逆断层外,西北部还发育许多张性小断层,但普遍断距不大,

只对地层有小范围错动(图 2(a));芜湖西南部铜陵、繁昌地区古生界地层亦出露广泛,构造以 NE 向断裂和褶皱为主,还有较多岩体出露,地层发生倾斜但未发现倒转和逆冲推覆现象(图 2(b)),此外,铜陵、繁昌地区还发育多条大型 NE 向正断层,断距较大,下盘普遍为第四系所覆盖。对比巢湖和铜陵、繁昌地区的构造特征可知,两者构造发育存在明显的差异,西北部逆冲推覆构造作用强烈,正断层规模小,岩浆作用不强;西南部褶皱构造较弱,逆冲推覆构造不发育,但正断层规模较大,岩浆作用相对比较强(图 2(c),(d))。

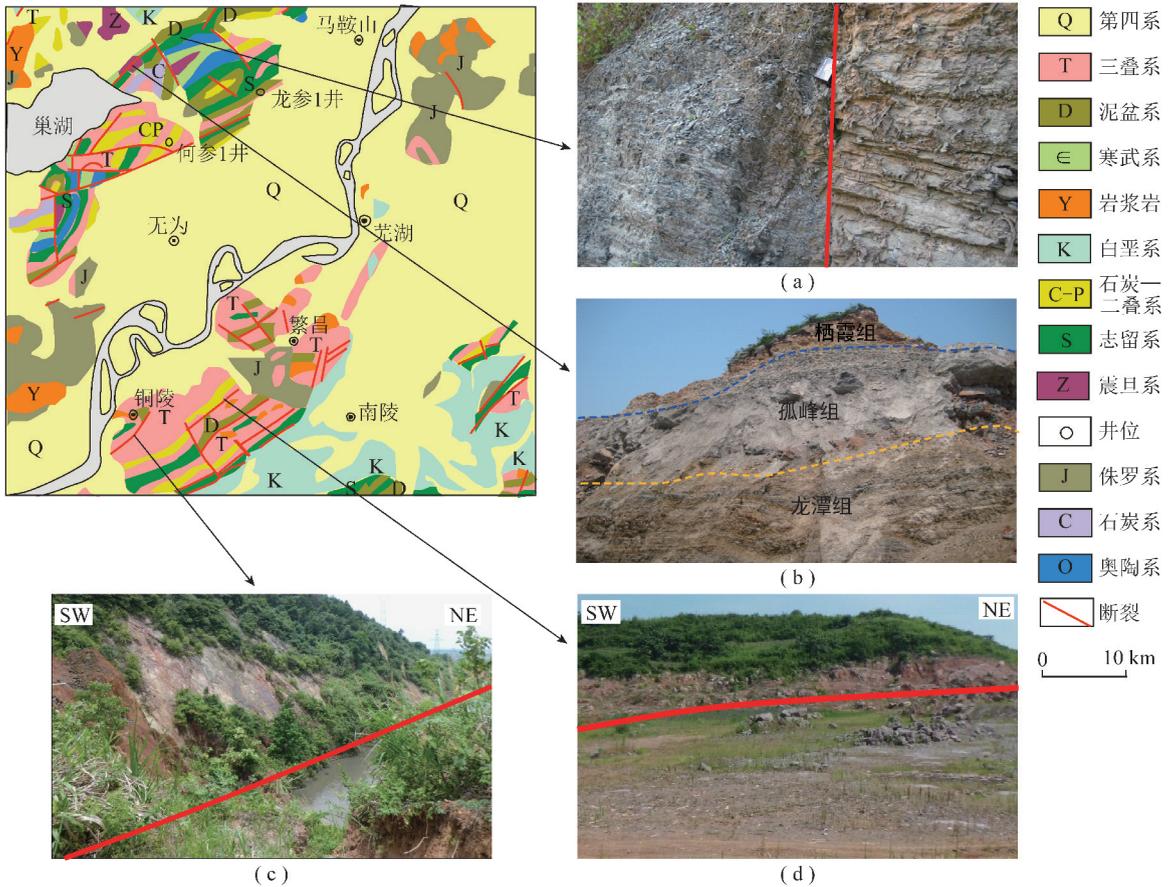


图 2 研究区西北部与西南部构造特征对比

Fig. 2 The comparison chart of the tectonic characteristics between northwest and southwest of the study area

(a) 芜湖地区西北部(巢湖)高家边组张性小断层;(b) 芜湖地区西北部(巢湖)逆冲推覆作用致使地层倒转,正常层序为栖霞组在下,龙潭组在上;(c),(d) 芜湖地区西南部(铜陵)大型张性断层

### 3.2 后期构造活动迁移规律

前人研究表明,下扬子地台印支运动以来至少经历了 3 期构造变形:第 1 期为中三叠世末—早、中侏罗世印支期的逆冲推覆构造;第 2 期为晚侏罗—早白垩世燕山期的走滑拉分构造;第 3 期为晚白垩世以来喜山期的伸展拆离构造<sup>[16-17]</sup>。其中第 2 期可以拆为南北向和东西向两个拉张分量,在南北方向上可以与第 3 期合并。因此后期构造活动对下扬子地台的影

响大致可以分为两期,中三叠世末—中侏罗世印支期的逆冲推覆构造以及晚侏罗世以来燕山、喜山期的伸展拆离构造。芜湖地区构造发育的差异性与这两期构造作用密切相关。

印支运动是中国东部构造—沉积格局的转折点,下扬子地台由海相过渡至陆相沉积,在大别—苏鲁造山带和江南—雪峰基底拆离大型推覆体(其前锋可能为江南造山带)南北挤压作用下<sup>[22]</sup>,形成了以长江

为中心的南北对冲带,笔者通过野外构造特征考察,并结合 FLAC 数值模拟实验(模拟参数见表1),表明芜湖西北部巢湖地区由于靠近大别—苏鲁造山带,遭受了强烈的褶皱、逆冲推覆、断裂等构造变形,但芜湖西南部铜陵、繁昌地区位于沿江对冲带上,处于两大构造带的中部,褶皱、逆冲断裂等挤压构造变形较弱,印支期挤压构造应力场表现为从南、北两端向芜湖地区中部迁移减弱的特征(图3(a));燕山、喜山期,受西太平洋板块俯冲方向改变以及俯冲后撤的影响,下扬子地台在由南向北的伸展拆离与多米诺式拉张断

陷构造作用下,形成了一系列的断陷型盆地,同时由于软流圈上涌造成岩浆活动频繁<sup>[23]</sup>,岩体主要分布在皖南的祁门—宁国一线,从南往北逐渐减少,铜陵、繁昌地区有较多岩体出露,而西北部的巢湖地区则基本不发育,因此推测,燕山、喜山期以来下扬子地台的拉张中心可能位于皖南祁门—宁国一线,其拉张应力场向南、北两端迁移减弱,芜湖西南部的铜陵、繁昌地区靠近拉张中心,其拉张作用较强,大型张性断裂发育,而芜湖西北部巢湖则远离拉张中心,张性断裂规模较小(图3(b))。

表1 研究区构造应力场模拟参数

Table 1 The simulation parameters of the tectonic stress field in study area

模型单元	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	抗张强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
砂岩(K-Q)	2 450	10.0	16.67	7.50	1.50	30
灰岩(C-T)	2 700	11.0	22.60	1.58	6.72	42
泥灰岩(Z-S)	2 700	10.9	19.10	2.29	21.00	37
基底	2 550	0.833 3	1.111	1.00	2.00	20
断层		0.108 0	1.570	3.00	10.00	15

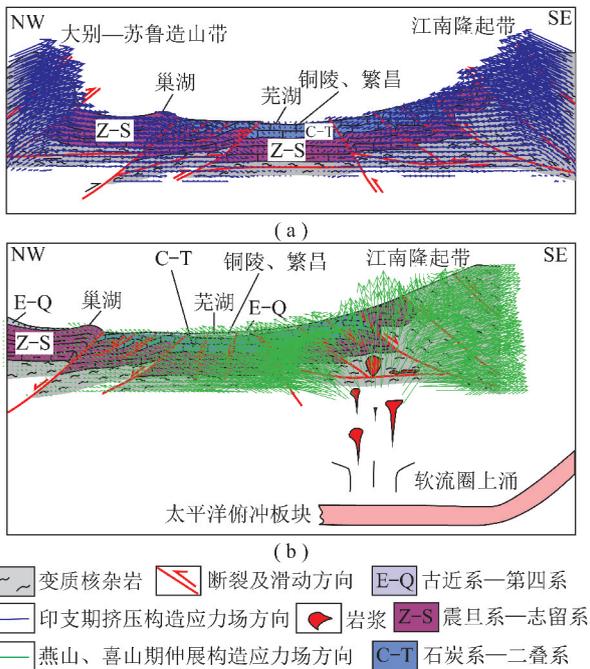


图3 研究区构造应力场迁移模式(来自 FLAC 数值模拟实验,模拟参数见表1)

Fig. 3 The migration ideograph of the tectonic stress field in the study area(from numerical simulation)

通过以上分析进一步明确了后期构造在芜湖地区的迁移规律:印支期挤压推覆构造作用分别从北边大别—苏鲁造山带和南边江南造山带向芜湖地区迁移减弱,芜湖地区古生界地层受逆冲推覆构造影响受相对较小;燕山、喜山期伸展构造作用以皖南祁门—

宁国一线为中心,向南、北两边迁移减弱,芜湖地区受伸展构造影响相对较大。

#### 4 后期构造活动对古生界页岩气保存的影响

页岩气的形成机理复杂,构造条件是最关键地质因素之一,北美页岩气资源丰富,其中最主要的原因是北美具有长期稳定的台地沉积环境,并且除了台地周缘造山带的构造作用较强外,整体上地台的后期构造活动较弱<sup>[18-19,24-25]</sup>。我国扬子地台古生代也经历了相当长时期稳定的台地沉积环境,芜湖地区存在古生界下志留统高家边组和上二叠统龙潭组两套有利的泥页岩,具有厚度大、分布广、有机质丰富等特点。对比国内外页岩气形成的地质条件及地球化学特征可以看出,芜湖地区具备了形成页岩气的有利沉积环境,但页岩气能否富集和保存的最关键因素是后期构造的影响。

前面构造特征分析可知,对古生界页岩气保存主要的影响有两期构造,即印支期的挤压构造以及燕山、喜山期的伸展构造,前者从南、北两造山带向芜湖地区以逆冲推覆形式传播,对芜湖地区北缘和南缘古生界页岩层系破坏严重,造成大范围古生界地层出露而失去页岩气保存条件,但芜湖地区处于两大构造活动带的中心,逆冲推覆构造应力场具有从南、北两边向中心迁移减弱的特征,加上逆冲推覆构造大多只影响浅层,因此虽然印支期构造活动在芜湖地区北缘和南缘表现强烈,但在芜湖中部地区可能只表现为弱的

褶皱构造,对古生界地层及页岩气的保存破坏程度较小。燕山、喜山期的构造活动呈现与印支期构造活动相反的特征,其拉张的应力场从中部向南、北两边迁移减弱,芜湖地区靠近拉张的中心区,其拉张作用较强,铜陵、繁昌地区大型张性断层比西北部的巢湖地区强的构造差异性也印证了这一点,而张性断层的发育对页岩气的保存显然是不利的。

印支运动对下扬子地台边缘的地层产生了巨大的破坏作用,为众多地质学家重视,而忽视了相对较弱的燕山、喜山运动。通过以上分析笔者认为印支运动主要对台地边缘起破坏作用,而对台地内部影响不大,加上挤压构造的封堵作用在一定程度上有利于对页岩气保存,而燕山、喜山运动则从地台的中部开始拉张,持续时间长,加上岩浆活动的影响,对页岩气的保存非常不利。因此,后期构造对下扬子芜湖地区页岩气保存影响最大的可能是燕山、喜山期的伸展构造作用,而不是印支期的挤压推覆构造,这在该地区页岩气勘探中应引起重视。

## 5 结论与认识

(1) 芜湖地区发育下志留统高家边组 and 上二叠统龙潭组两套优质的古生界泥页岩层系,为页岩气的形成提供了必要的烃源岩条件,中三叠世以后为陆相沉积环境,并经历了印支运动、燕山运动以及喜山运动的改造,在长期强烈构造活动影响下的芜湖地区进行页岩气勘探是巨大的挑战。

(2) 后期构造对芜湖地区古生界地层的改造及页岩气保存的影响可划分为印支期挤压推覆构造以及燕山、喜山期的伸展构造。两者的构造迁移规律为:印支期挤压构造从大别—苏鲁造山带和江南造山带以逆冲推覆的形式向芜湖地区迁移减弱芜湖地区夹持于两大构造活动带之间,属于相对构造稳定区;燕山、喜山伸展构造从皖南祁门—宁国一线向南、北两边以拆离伸展形式迁移减弱,芜湖地区靠近伸展构造带的中心,受其影响较大。

(3) 对芜湖地区页岩气保存影响最大的可能不是来自印支期的挤压构造,而是燕山、喜山期的伸展构造。芜湖地区中部很可能存在未被印支期构造改造或改造较弱的较完好古生界泥页岩层系,但燕山、喜山期持续的拉张构造对页岩气的保存有较大的破坏作用,这应在未来勘探中引起重视。

## 参考文献:

[1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.

- [2] Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett shale, Fort Worth Basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2):155-175.
- [3] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort Worth basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):523-533.
- [4] Curtis Mark E, Sondergeld Carl H, Ambrose Raymond J. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(4):665-677.
- [5] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6):136-140.  
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):136-140.
- [6] 龙幼康. 中扬子地区下古生界页岩气的勘探潜力 [J]. 地质通报, 2011(S1):344-348.  
Long Youkang. Lower Paleozoic shale gas exploration potential in the central Yangtze Area, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011(S1):344-348.
- [7] 刘洪林, 王红岩, 刘人和. 中国页岩气资源及其勘探潜力分析 [J]. 地质学报, 2010, 84(9):1374-1378.  
Liu Honglin, Wang Hongyan, Liu Renhe. China shale gas resources and prospect potential [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9):1374-1378.
- [8] 张金川, 边瑞康, 荆铁亚, 等. 页岩气理论研究的基础意义 [J]. 地质通报, 2011, 30(2-3):318-323.  
Zhang Jinchuan, Bian Ruikang, Jing Tieya, et al. Fundamental significance of gas shale theoretical research [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3):318-323.
- [9] 李世臻, 乔德武, 冯志刚, 等. 世界页岩气勘探发现现状及对中国的启示 [J]. 地质通报, 2010, 29(6):918-924.  
Li Shizhen, Qiao Dewu, Feng Zhigang, et al. The status of worldwide shale gas exploration and its suggestion for China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(6):918-924.
- [10] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景 [J]. 地质通报, 2011, 30(S1):324-336.  
Dong Dazhong, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Resource potential exploration and development prospect of shale gas in the whole world [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(S1):324-336.
- [11] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3):525-532.  
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3):525-532.
- [12] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例 [J]. 地质学报, 2012, 86(2):349-361.  
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: A case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2):349-361.

- [13] 黄文明,刘树根,马文辛,等.川东南—鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J].地质通报,2011,30(S1):364-371.  
Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei-eastern Chongqing areas, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(S1):364-371.
- [14] 郭念发.下扬子盆地与区域地质构造演化特征及油气成藏分析[J].浙江地质,1996,12(2):19-27.  
Shu Nianfa. Evolutionary gound of basin and regional structure in Lower Yangtze Area[J]. Geology of Zhejiang, 1996, 12(2):19-27.
- [15] 李海滨,贾东,武龙,等.下扬子地区中—新生代的挤压变形与伸展改造及其油气勘探意义[J].岩石学报,2011,27(3):770-778.  
Li Haibin, Jia Dong, Wu Long, et al. The Mesozoic-Cenozoic compressional deformation, extensional modification and their significance for hydrocarbon exploration in Lower Yangtze Region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3):770-778.
- [16] 庄建建,杨风丽,赵文芳.下扬子区印支—早燕山期的构造特征及应力场模拟[J].高校地质学报,2010,16(4):474-482.  
Zhuang Jianjian, Yang Fengli, Zhao Wenfang. Tectonic characteristics and numerical stress field simulation in Indosinian-early Yanshanian stage, Lower Yangtze Region[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(4):474-482.
- [17] 丁道桂,王东燕,刘运黎.下扬子地区古生代盆地的改造变形[J].地学前缘,2009,16(4):61-72.  
Ding Daogui, Wang Dongyan, Liu Yunli. The deformation of the Paleozoic basins in lower Yangtze Aeas[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4):61-72.
- [19] Martineau D F. History of the Newark East field and the Barnett shale as a gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):399-403.
- [20] 潘继平,乔德武,李世臻,等.下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J].地质通报,2011,30(2-3):337-343.  
Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Shale-gas geological conditions and exploration prospect of the Paleozoic marine strata in lower Yangtze area, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3):337-343.
- [21] 刘小平,潘继平,董清源,等.苏北地区古生界页岩气形成地质条件[J].天然气地球科学,2011,22(6):1100-1108.  
Liu Xiaoping, Pan Jiping, Dong Qingyuan, et al. Geological conditions of shale gas forming in Paleozoic Subei Area[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6):1100-1108.
- [22] 朱光,徐嘉炜,刘国生,等.下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J].中国区域地质,1999,18(1):73-79.  
Zhu Guang, Xu Jiawei, Liu Guosheng, et al. Tectonic pattern and dynamic mechanism of the foreland deformation in the Lower Yangtze Region[J]. Regional geology of China, 1999, 18(1):73-79.
- [22] Lan Tingguang, Fan Hongrui, Santosh M, et al. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Mesozoic Dadian alkaline intrusive complex in the Sulu orogenic belt, eastern China; Implications for crust-mantle interaction[J]. Chemical Geology, 2011, 285:97-114.
- [23] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [24] Clarkson Christopher R, Jensen Jerry L, Pedersen Per Kent. Innovative methods for flow-unit and pore-structure analyses in a tight siltstone and shale gas reservoir[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2):355-374.
- [25] John W, Roger R. The shale shaker: an investor's guide to shale gas[J]. Oil and Gas Investor, 2007(1):2-9.