

doi: 10.12029/gc20220416

邵威, 黄正清, 李建青, 周道容. 2022. 浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组页岩气成藏地质条件及有利区带优选[J]. 中国地质, 49(4): 1262–1274.

Shao Wei, Huang Zhengqing, Li Jianqing, Zhou Daorong. 2022. Shale gas reservoir-forming conditions and exploration prospecting in the Cambrian Hetang Formation of southwestern Zhejiang and northeastern Jiangxi Province[J]. *Geology in China*, 49(4): 1262–1274(in Chinese with English abstract).

浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组页岩气成藏地质条件及有利区带优选

邵威, 黄正清, 李建青, 周道容

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016)

摘要:【研究目的】浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组广泛发育暗色泥页岩, 是下扬子地区页岩气调查的重点层位。目前该区勘探程度低, 导致对该区页岩气成藏条件认识不清。【研究方法】通过寒武系荷塘组暗色泥页岩发育的地质背景、有机地球化学参数以及野外调查等方面研究, 对该区页岩气资源潜力进行了评价, 对有利区进行了优选。【研究结果】浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组炭质硅质页岩在研究区内分布广泛, 沉积厚度达 35~200 m, 其中在开化—常山—玉山地区的平均厚度超过 50 m; 有机质丰度高(1.48%~23.53%), 镜质体反射率适中(2.01%~3.0%), 有机质处于成熟—过成熟阶段。研究区荷塘组地层发育微孔隙、微裂缝等孔隙类型, 储集性能较好。等温吸附实验测得炭质硅质页岩吸附气含量平均为 5.93 kg/t, 表明荷塘组炭质硅质页岩具有较好的吸附能力, 有一定的吸附性。【结论】以在高热演化程度环境中找热演化程度较低的区域和在复杂的构造背景中寻找相对稳定的区域为准则, 研究认为开化—常山—玉山地区寒武系荷塘组炭质硅质页岩分布厚度适中, 有机质丰度高, 成熟度相对较低, 页岩气保存地质条件较好。

关键词:页岩气; 成藏条件; 荷塘组; 油气勘查工程; 常山; 浙江; 江西

创新点:浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组页岩具备页岩气富集的物质基础; 热演化程度是下扬子地区寒武系荷塘组页岩气能否富集的关键。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)04-1262-13

Shale gas reservoir-forming conditions and exploration prospecting in the Cambrian Hetang Formation of southwestern Zhejiang and northeastern Jiangxi Province

SHAO Wei, HUANG Zhengqing, LI Jianqing, ZHOU Daorong

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

收稿日期: 2019-11-29; 改回日期: 2022-06-15

基金项目: 中国地质调查局项目“下扬子地区寒武系页岩地球化学特征与含气性研究”(2016ZX05034001-003)资助。

作者简介: 邵威, 男, 1988年生, 工程师, 主要从事页岩气地质方面的研究工作; E-mail: 18013912742@163.com。

通讯作者: 黄正清, 男, 1965年生, 高级工程师, 主要从事页岩气地质及地球化学方面的研究工作; E-mail: 463968827@qq.com。

[Objective]The dark shale of the Cambrian Hetang Formation widely occurred in southwestern Zhejiang and northeastern Jiangxi is the key target of shale gas exploration in the Lower Yangtze region. However, due to the present low exploration level of this interval, understanding of the shale gas accumulation conditions is still insufficient. **[Methods]**Based on the analysis of geological background, organic geochemical indicators and field stratigraphic outcrop investigation of the dark shale, the shale gas resource potential is evaluated and the favorable areas are optimized. **[Results]**The dark shale ranges from 35 to 200 meters in thickness with an average of over 50 meters in Jiangshan–Changshan area and is characterized by medium to high content of organic matter (TOC ranging from 1.48% to 23.53%) and high to over maturity (R_o ranging from 2.01% to 3.0%). The organic matters are highly and over highly matured. Abundant micropores and microfractures were observed in the shales, indicating the high quality shale reservoirs. The isothermal adsorption experiment shows that the carbonaceous shale has strong adsorption ability, which reaches 5.93 kg/t on average. **[Conclusions]**It is suggested that the region of Jiangshan–Changshan area in western Zhejiang is favorable for shale gas exploration on the basis of relatively low thermal evolution of organic matter and stable stratigraphic structure preservation conditions.

Key words: shale gas; reservoir-forming condition; Hetang Formation; oil and gas exploration engineering; Changshan; Zhejiang; Jiangxi

Highlights: The shale of Cambrian Hetang Formation in southwest Zhejiang–northeast Jiangxi has the material basis of shale gas enrichment; Thermal evolution is the key to the enrichment of shale gas in the Cambrian Hetang Formation in the Lower Yangtze area.

About the first author: SHAO Wei, male, born in 1988, engineer, engaged in the study of oil and gas geology; E-mail: 18013912742@163.com.

About the corresponding author: HUANG Zhengqing, male, born in 1965, senior engineer, engaged in the study of shale gas geology and geochemistry; E-mail:463968827@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. 2016ZX05034001–003).

1 引言

页岩气是指主体以吸附、游离等方式存在于暗色页岩及其间所夹砂质、粉砂质泥岩地层中的一种非常规天然气资源(张金川等, 2003, 2004; 王祥等, 2010)。中国富含有机质泥页岩分布广泛, 具备页岩气成藏条件, 页岩气资源潜力巨大(李玉喜等, 2009), 上扬子地区涪陵、长宁、昭通、威远等页岩气田相继开发, 中扬子地区在宜昌也实现了页岩气勘探突破(陈科等, 2020)。浙西地区自20世纪50年代进行油气勘探以来, 积累了大量的研究成果。前人研究证实浙西地区寒武系发育一套海相的沉积地层, 暗色页岩分布广泛, 沉积厚度大。但由于中国页岩气研究起步较晚、浙西地区地质演化复杂等原因, 目前对该地区页岩气成藏条件的研究程度较低。为此, 通过野外踏勘、样品采集、室内试验分析等手段, 结合页岩气研究的最新进展, 对浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组的页岩气成藏地质条件及资源勘探前景进行了分析。

2 区域地质背景

浙西南—赣东北地区主要由北东向展布的开化

—淳安断裂和江山—绍兴拼合带夹持, 内部分为开化—桐庐凹陷、常山—诸暨凸起和江山—绍兴浅凹, 其中常山—诸暨凸起和江山—绍兴浅凹包括金衢盆地, 整体格局为两凹夹一隆(韩瑶, 2013)(图1a)。

浙西南—赣东北地区在寒武纪处于相对稳定的克拉通盆地背景, 主要发育多套海相地层(严兆彬, 2018)。灯影组沉积末期, 下扬子地区发生了一次快速海退过程, 部分地区露出水面, 形成了古陆。下扬子地区在早寒武世早期, 受地壳拉张裂陷作用, 受巢湖—泰州与贵池—常州两同沉积断层的影响, 形成了两盆夹一台的构造格局, 浙西南—赣东北地区位于南部盆地, 两断裂所限的地带相对抬升形成稳定的克拉通台地, 在此两断裂相背的北带(巢湖—滁州—盐城), 南带(石台—淳安—临安)地区地壳下沉, 在盆地南部、北部分别发育了两个坳槽, 形成深水陆棚盆地(陈秀其等, 2018)。浙西南—赣东北地区位于南部盆地, 发育了盆地、深水陆棚、浅水陆棚3种沉积相类型。

根据岩性组合、生物群特征及所处地质构造单元等方面的特征, 下扬子地区下寒武统可分为2个地层分区: 下扬子地层分区和江南地层分区(安徽

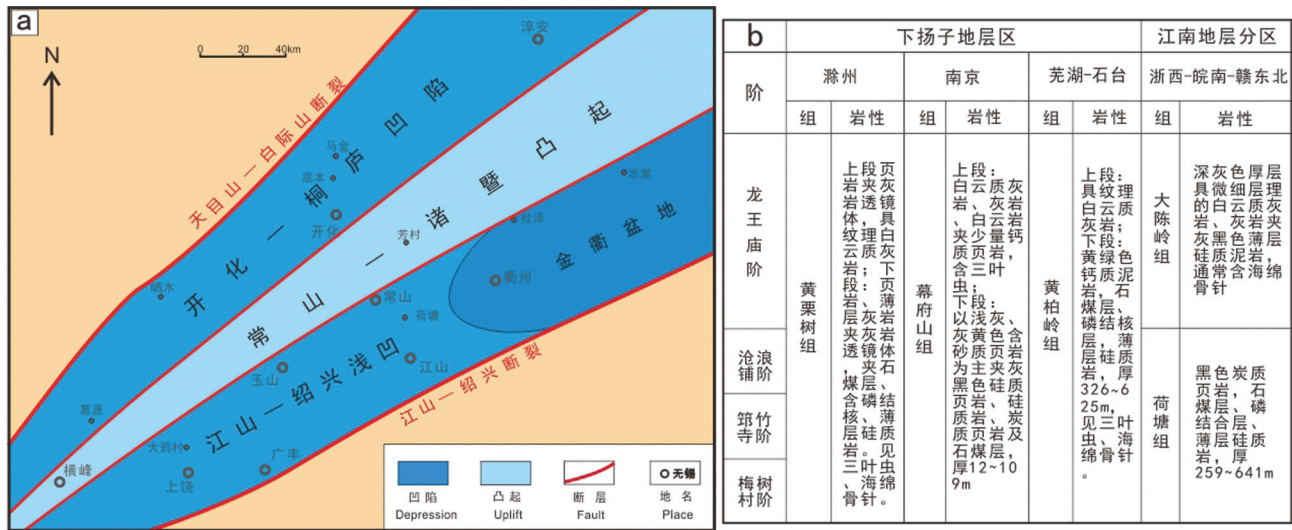


图1 浙西南—赣东北地区构造单元划分及地层对比图
Fig.1 Tectonic units and stratigraphic correlation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

省地层志, 1988)。下扬子地层分区划分出3个地层小区：滁州地层小区、南京地层小区、芜湖—石台地层小区。滁州地层小区为黄栗树组，南京地层小区为幕府山组，芜湖—石台地层小区为黄柏岭组；浙西南—赣东北地区属于江南地层分区的浙西—皖南—赣东北小区，自下而上可划分为荷塘组、大陈岭组(图1b)。

3 荷塘组页岩沉积特征

寒武纪浙西南—赣东北地区为边缘海，且其经历了一次完整的海进—海退的过程。该时期沉积环境以静水、低能和滞留为主，炭质泥岩、含炭硅质岩、石煤层发育。

早寒武世荷塘期，浙西南—赣东北地区处于海侵时期，形成静水滞流海盆和平缓斜坡环境(章伟, 2014)。在上饶—开化—淳安一带，海水较深，在深水缺氧的环境下，沉积速率缓慢，沉积了黑色炭质页岩、炭质硅质页岩、石煤和块状。洋流活动携带来丰富的营养物质，菌藻类生物大量繁殖，经过死亡堆积和变质作用，形成了石煤层。且其水平层理发育，反映了滞流盆地相沉积。在其东南侧的广丰—江山—衢州一带海水相对较浅，沉积了黑色含炭白云质泥岩、黑色粉细砂岩、粉—粗晶灰岩，为浅水陆棚相沉积(图2, 图3)。

4 荷塘组页岩有机地球化学特征

4.1 有机质类型

有机质类型是衡量页岩生气潜力的重要因素。浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组暗色页岩主要为海相烃源岩，包括炭质页岩、含炭硅质页岩、石煤和炭质泥岩等。有机质类型以腐泥型为主。硅质炭质页岩的显微组分富含腐泥组(一般>70%)，反映了硅质炭质页岩有机质类型较好，一般为I—II干酪根。由于下扬子地区寒武纪时，生物主要以浮游生物为主，还没有高等植物的出现，从生物发育史角度可大致确定荷塘组有机质类型应以I型为主(张飞燕, 2018)。

4.2 有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩的重要指标，而评价烃源岩有机质丰度的重要指标则是总有机碳含量(TOC)、生烃潜量(S₁+S₂)和氯仿沥青“A”(何金先等, 2011)。本文在浙西南—赣东北地区选取总有机碳含量成为评价该地区古生界泥页岩生烃能力指标。有机碳含量是页岩气聚集最重要的控制因素之一，不仅控制着页岩的颜色、密度、放射性等物理化学性质，并在一定程度上控制着页岩的弹性和裂缝的发育程度，更重要的是控制着页岩的含气量(聂海宽等, 2012)。本文选择表1所示评价标准。

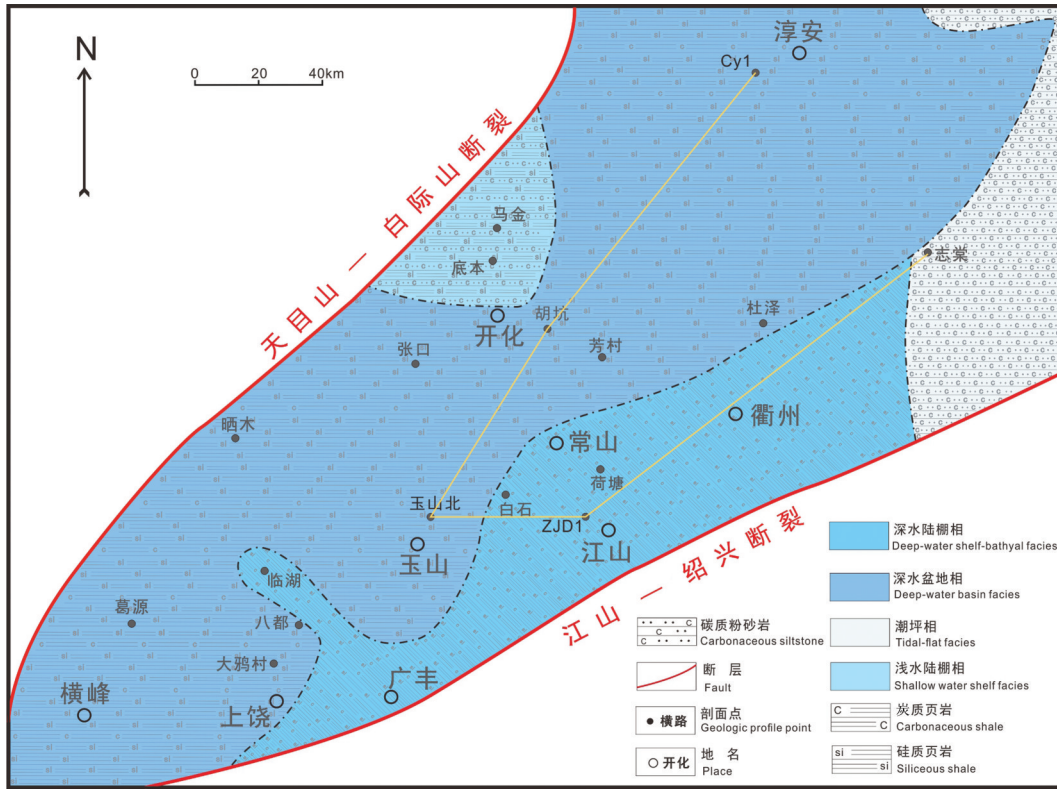


图2 浙西南—赣东北地区早寒武世荷塘组岩相古地理图

Fig.2 Sedimentary facies distribution of Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province area

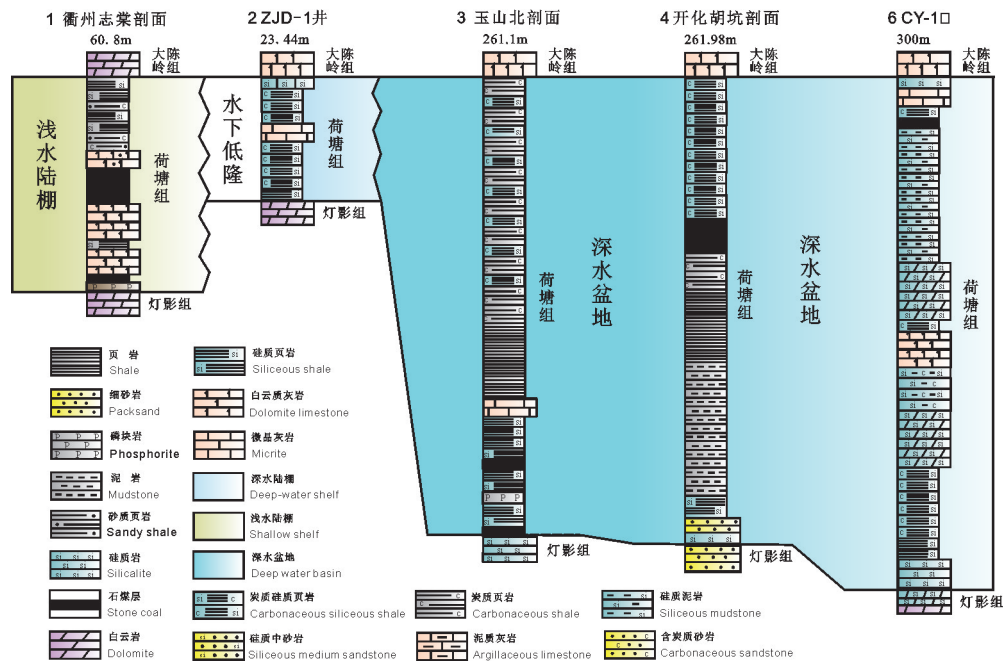


图3 浙西南—赣东北地区早寒武世荷塘组地层剖面图

Fig.3 Stratigraphic columns of Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

表1 页岩有机质丰度评价标准
Table1 Evaluation criteria for shale organic matter abundance

级别	TOC/%	总烃/(mg/g)	热解/(mg/g)	HI/(mg/g)
好含气页岩	>2	>500	>6	250~450
较好含气页岩	1~2	200~500	4~6	100~250
差含气页岩	1~0.5	100~200	2~4	<100
非含气页岩	<0.5	<100	<2	

由于下寒武统荷塘组大多处于过成熟演化阶段,造成生烃潜量(S_1+S_2)及残留氯仿沥青“A”普遍较低,其中生烃潜量介于0.022~0.436 mg/g,已经不能准确反映荷塘组页岩的生烃能力,所以本文主要采用有机碳含量(TOC)对下寒武统荷塘组页岩进行评价(袁玉松等,2006)。

下寒武统荷塘组野外露头和岩心测试样品共47个,主要岩性为炭质页岩、硅质泥岩、硅质页岩和含炭硅质页岩。不同的岩性TOC含量差别较大,其中TOC测试样品44个,测试结果(表2)分析表明,

下寒武统荷塘组泥页岩TOC分布范围跨度较大,最小值为1.48%,最大值为23.52%,平均为6.16%,为好的含气页岩。炭质页岩样品19个,TOC值为1.48%~23.52%,平均为5.52%,为好的含气页岩;硅质页岩样品8个,最小值为2.99%,最大值为15.79%,平均7.44%,为好的含气页岩;硅质炭质页岩样品7个,TOC最小值为1.57%,最大值为15.30%,平均为7.26%,为好的含气页岩;硅质泥岩样品10个,TOC值介于1.49%~15.33%,平均为5.58%,为好的含气页岩。

在平面上,研究区内有机碳含量高值区(>5%)位于横峰—玉山—常山—淳安一带(图4),其中临湖—八都和常山—淳安一带TOC均高于10%。

4.3 有机质成熟度

有机质成熟度是衡量页岩实际生烃能力的重要指标,决定着页岩有机质向烃类的转化程度(帅琴等,2012)。在下扬子地区早古生代地层中,由于高等植物的缺乏,造成镜质体稀少缺失,常用固体

表2 浙西南—赣东北地区下寒武统有机碳含量(TOC)统计

Table 2 TOC data of shale from Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

序号	样品编号	岩性	TOC/%	序号	样品编号	岩性	TOC/%
1	JH02	硅质炭质页岩	9.75	23	L3D001	硅质页岩	3.43
2	JH10	硅质炭质页岩	2.83	24	L4D009	炭质页岩	1.48
3	JH13	硅质炭质页岩	15.30	25	L4D010	硅质泥岩	3.76
4	JH14	硅质炭质页岩	13.23	26	L4D014	炭质页岩	2.90
5	JH17	硅质炭质页岩	2.86	27	L4D018	炭质页岩	3.10
6	JH18	炭质页岩	2.37	28	L4D019	炭质页岩	2.18
7	JH20	炭质页岩	4.09	29	L5D001	硅质页岩	6.03
8	JH24	硅质泥岩	1.49	30	L5D003	硅质页岩	12.08
9	JH30	炭质页岩	4.87	31	L5D005	炭质页岩	2.39
10	JH32	炭质页岩	4.55	32	L5D006	炭质页岩	4.69
11	JH37	炭质页岩	2.82	33	L5D010	炭质页岩	3.59
12	JH38	硅质炭质页岩	1.57	34	L5D012	硅质页岩	15.79
13	JH39	炭质页岩	5.91	35	L5D014	硅质页岩	10.43
14	JH42	炭质页岩	6.00	36	L5D015	硅质页岩	5.00
15	JH43	炭质页岩	18.60	37	ZJD1-20	硅质泥岩	3.72
16	JH46	硅质炭质页岩	5.18	38	ZJD1-21	硅质泥岩	3.78
17	JH49	硅质页岩	3.78	39	ZJD1-25	硅质泥岩	2.51
18	JH50	炭质页岩	4.61	40	ZJD1-26	硅质泥岩	4.81
19	JH52	炭质页岩	3.34	41	ZJD1-27	硅质泥岩	15.33
20	JH53	炭质页岩	23.52	42	ZJD1-28	硅质泥岩	3.90
21	JH58	炭质页岩	3.83	43	ZJD1-29	硅质泥岩	12.32
22	L2D002	硅质页岩	2.99	44	ZJD1-30	硅质泥岩	4.13

沥青反射率 R_b 来代替镜质体反射率进行评价。镜质体反射率(R_o)是目前评价有机质成熟度的最佳参数,其具有不可逆性,且 R_o 随着热演化程度的升高而稳定增大,可以较为准确的确定有机质的成熟度(成海燕,2009)。一般认为,镜质体反射率 $R_o=0.5%$ 为石油生成的下限,当 R_o 值 $<0.5%$ 时,其处于为未熟阶段; R_o 在 $0.5%~1.3%$ 为成熟带(石油主要生成带); R_o 在 $1.3%~2.0%$ 为高成熟带(湿气带及凝析油带); $R_o > 2.0%$ 为过成熟带(干气带)(沈忠民等,2009)。

浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组47个样品中,测试 R_o 的样品有35个,其值为 $2.01%~3.43%$,平均为 $2.83%$, R_o 值均大于 $2%$ (表3)。从测试结果分析,该地区下寒武统荷塘组炭质硅质页岩的热演化程度处于过成熟生气阶段。

下扬子地区下寒武统有机质热演化程度普遍较高,本文遵循“高中找低”的原则,即在热演化程度普遍较高的环境中寻找较低值区域。从浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组页岩 R_o 平面分布图中可以看出,大部分地区 R_o 值均大于 $3.0%$,以横峰—上饶—江山—常山地区为低值中心,开化—玉山一带热演化程度依然低于 $3.0%$,其余地区均为高值

区, R_o 值大于 $3.0%$ (图5)。整体看来,研究区下寒武统荷塘组页岩处于过成熟阶段。对比国内外页岩气开发实践,具商业开发价值的页岩气层系 R_o 为 $1.1%~3.0%$ (丰国秀等,1988;邹才能等,2010),当页岩的 $R_o > 3.0%$ 时,有机质会出现碳化现象,页岩吸附能力明显下降(Curtis,2002)。因此有利区域 R_o 值应尽量限制在 $3%$ 以内。

5 暗色泥页岩储集特征

5.1 页岩矿物特征

页岩由多种矿物组成,其中包含大量的黏土矿物、碎屑矿物及自生矿物。矿物组成决定着页岩气藏的品质,影响着气体的含量(聂海宽等,2012)。根据全岩X射线衍射分析和扫描电镜观察结果显示,浙西地区下寒武统荷塘组暗色泥页岩的主要矿物为石英($21.50%~98.80%$,平均 $75.58%$)、黏土矿物($1.20%~33.30%$,平均 $11.69%$)、长石($0~18.20%$,平均 $4.45%$)、碳酸盐($0~43.70%$,平均 $5.28%$,其中方解石 $0~4.80%$,平均 $0.26%$ 、白云石 $0~43.70%$,平均 $5.02%$),次要矿物为黄铁矿($0~13.70%$,平均 $1.92%$)、重晶石等(图6)。其中,石英的含量又是最高的。

表3 浙西南—赣东北地区下寒武统有机质成熟度(R_o)统计

Table 3 Rodata of shale from Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

序号	样品编号	岩性	$R_b/\%$	$R_o/\%$ (EqVRo)	序号	样品编号	岩性	$R_b/\%$	$R_o/\%$ (EqVRo)
1	JH02	硅质炭质页岩	4.52	3.19	18	JH53	炭质页岩	4.65	3.27
2	JH10	硅质炭质页岩	4.29	3.05	19	JH58	炭质页岩	4.69	3.30
3	JH13	硅质炭质页岩	4.37	3.10	20	L2D002	硅质页岩	3.28	2.43
4	JH14	硅质炭质页岩	3.74	2.71	21	L3D001	硅质页岩	4.44	3.14
5	JH17	硅质炭质页岩	4.53	3.20	22	L4D009	炭质页岩	2.87	2.17
6	JH18	炭质页岩	3.71	2.69	23	L4D010	硅质泥岩	3.12	2.33
7	JH20	炭质页岩	2.85	2.16	24	L4D014	炭质页岩	4.02	2.88
8	JH30	炭质页岩	4.35	3.09	25	L4D018	炭质页岩	3.10	2.32
9	JH32	炭质页岩	4.13	2.95	26	L4D019	炭质页岩	3.40	2.50
10	JH38	硅质炭质页岩	3.78	2.74	27	L5D001	硅质页岩	2.86	2.17
11	JH39	炭质页岩	4.05	2.90	28	L5D003	硅质页岩	4.58	3.23
12	JH42	炭质页岩	4.32	3.07	29	L5D005	炭质页岩	4.41	3.13
13	JH43	炭质页岩	4.74	3.33	30	L5D006	炭质页岩	4.90	3.43
14	JH46	硅质炭质页岩	4.31	3.06	31	L5D010	炭质页岩	3.50	2.56
15	JH49	硅质页岩	4.43	3.14	32	L5D012	硅质页岩	4.38	3.11
16	JH50	炭质页岩	4.32	3.07	33	L5D014	硅质页岩	2.61	2.01
17	JH52	炭质页岩	3.82	2.76	34	L5D015	硅质页岩	2.69	2.06

注:沥青随机反射率(R_b)为实测值,等效镜质体反射率(EqVRo)值仅供参考,公式:EqVRo=0.618Rb+0.4(王晔等,2019)。

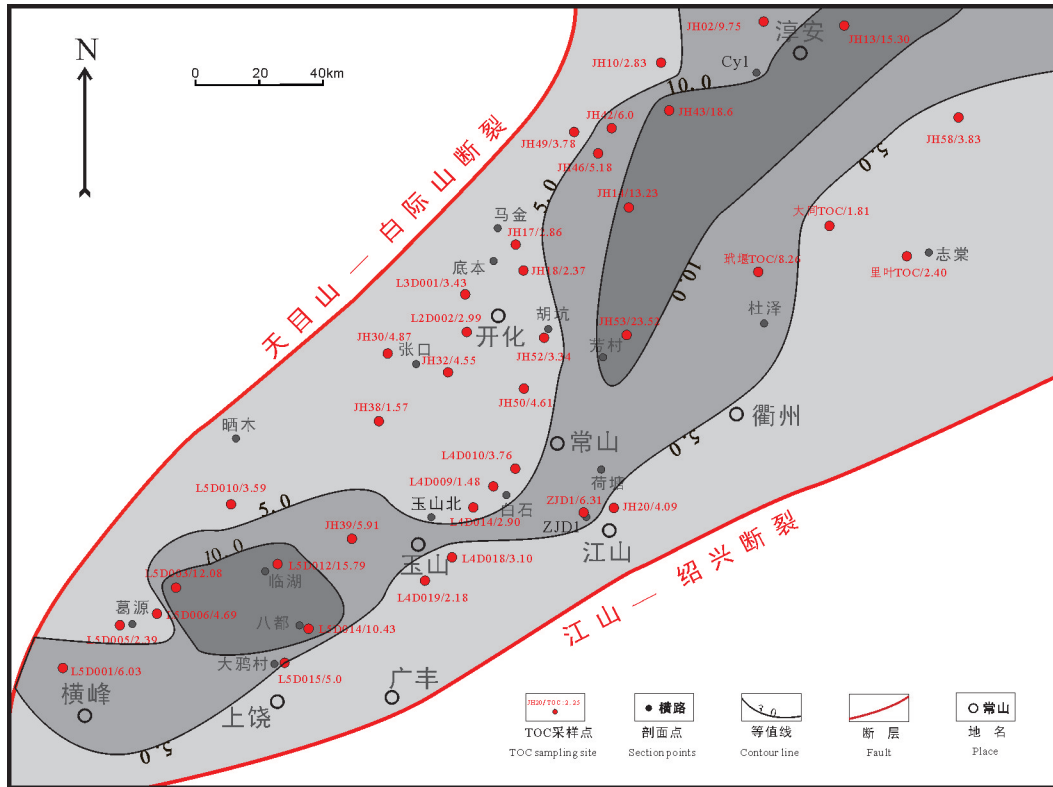


图4 浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组 TOC 平面分布图

Fig.4 TOC distribution of Lower Cambrian Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

根据美国 Barnett 页岩等已经成功开发的页岩层段的矿物组成情况,页岩中含有较多的脆性矿物更有利于页岩气的开发(Soeder, 2018)。较多的脆性矿物可使压裂效果更好,改善页岩储层的物性特征,为页岩气提供更好的渗流条件。当页岩的黏土矿物含量较少,脆性矿物含量较多时,页岩脆性与造缝能力强,易形成网络裂缝(Soeder, 2018)。研究区脆性矿物含量平均为 81.95%(图 6),其中大部分为石英,整体上具有良好的脆性和可压性。

5.2 页岩储集特征

页岩的物性特征一般呈现为低孔,特低渗,总孔隙度不大于 10%。页岩的孔隙包括宏观的微孔隙、微裂缝和微观上的纳米级孔隙。微孔隙和微裂缝不仅为页岩气提供聚集空间,也为页岩气提供运移通道,它们的存在,大大改善了页岩的渗流能力,直接影响着页岩气的产量(龙鹏宇等, 2012; Loucks et al., 2012; 陈洋等, 2022)。另外,处于断裂带和裂缝发育带的页岩,其物性会有一定程度的改善,增加页岩的孔隙度和渗透率(徐祖新, 2011)。

从研究区野外露头及 ZJD-1 井岩心样品扫描电镜图像可见(图 7),本区下寒武统荷塘组页岩的微孔隙较多,普通扫描电镜下观察到其微孔隙主要包括溶蚀孔(图 7a、b)、颗粒间孔与粒内孔(图 7e、f)、微裂缝(图 7c、f)和有机质孔(图 7c、d)。野外露头样品中溶蚀孔大量发育,多为无机粒间孔(图 6a、b)。ZJD-1 井岩心样品中粒间孔隙发育集中,数量较多,吸附性较强;粒内孔主要为片状黏土矿物粒内孔、矿物表面孔、球粒状黄铁矿内部孔隙(图 6c),裂隙中充填大量黄铁矿、石英、有机质与片状伊利石,并可见较多溶蚀微孔(图 6f),微孔隙以纳米—微米级孔隙为主。其中微裂缝连通性较好,部分被有机质或矿物质充填,有利于游离气的储存并可提高储层渗透性(图 6c)。

5.3 吸附性特征

页岩气在暗色泥页岩储层中的赋存形式包括吸附态、游离态以及溶解态等(陈洁等, 2012)。其中,吸附态是最主要的存在形式,其吸附能力受暗色泥页岩的有机碳含量、地层压力、有机质热演化

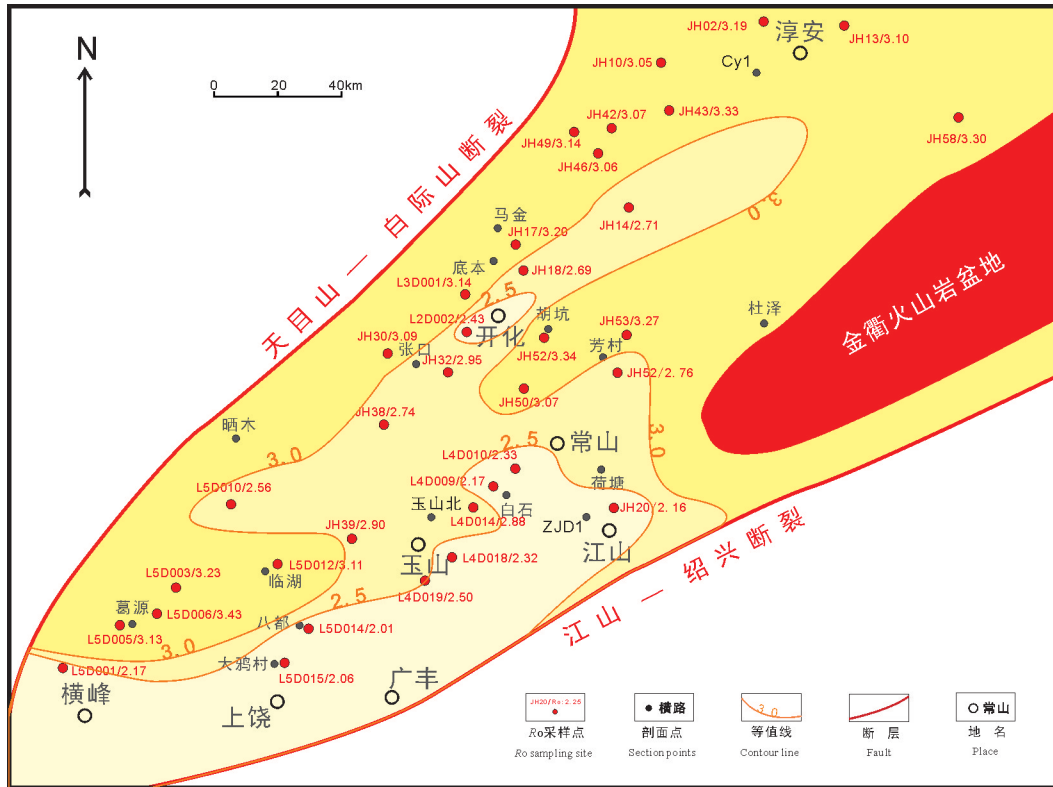


图5 浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组页岩 Ro 平面分布图

Fig.5 Ro distribution of Lower Cambrian Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

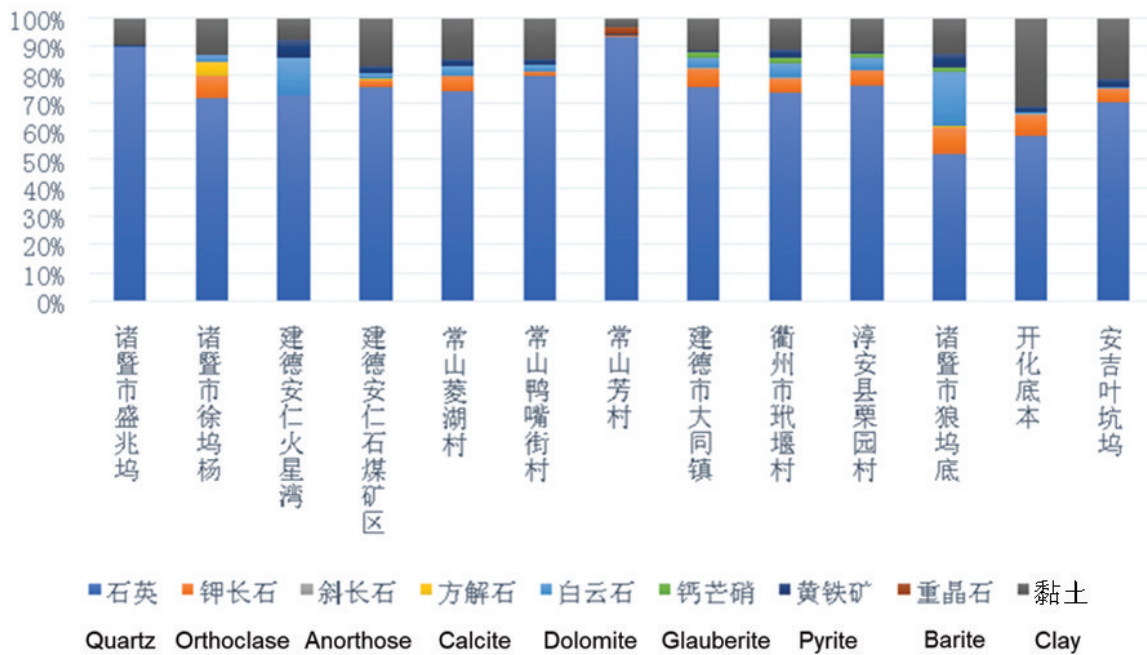


图6 浙西南—赣东北地区主要剖面荷塘组页岩全岩 X 衍射矿物成分(据章伟,2014)

Fig.6 Shale whole rock X-diffraction mineral composition of Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province (after Zhang Wei, 2014)

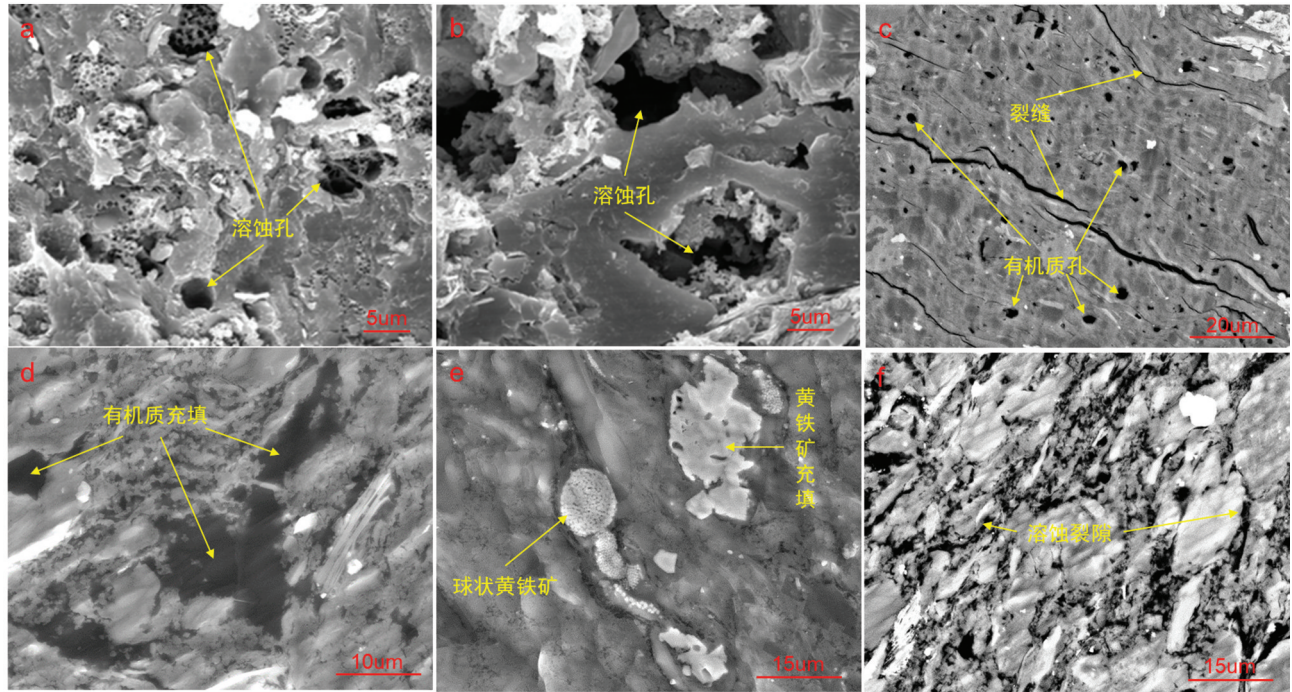


图7 浙西南—赣东北地区荷塘组泥页岩孔隙结构特征

a,b—溶蚀孔发育,野外露头样品;c—有机质孔和微裂隙发育,ZJD-1井样品;d—孔洞缝间有机质充填,ZJD-1井样品;e—裂缝和孔隙中充填黄铁矿,ZJD-1井样品;f—溶蚀裂隙发育,ZJD1井样品

Fig.7 Pore structure in shale of Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

a,b—Dissolution pores develop,Field outcrop sample; c—Organic matter pores and microfissures develop,ZJD-1 sample; d—Organic matter filling between holes and cracks,ZJD-1sample; e—The fractures and pores are filled with pyrite,ZJD-1 sample;f—Dissolution fissures develop,ZJD-1 sample

程度等因素影响,其中有机碳含量与地层压力为主控因素,暗色泥页岩的吸附气含量同有机碳含量和地层压力呈正比(徐波等,2011)。

在温度为 30℃、湿度为 1.09%~1.67%、甲烷浓

度为 99.99%的试验条件下,通过等温吸附实验(重量法)对江山—常山地区 7 块暗色泥页岩样品进行测试,实验结果表明页岩的吸附气量为 0.35~13.46 kg/t,平均为 5.93 kg/t,最大吸附气含量对应的测试

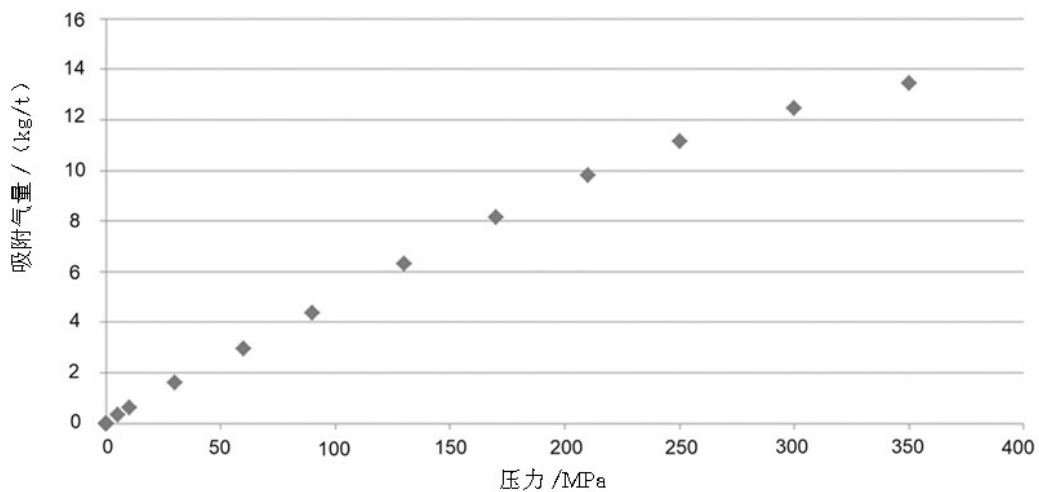


图8 ZJD-1 井荷塘组炭质页岩样品等温吸附气含量曲线

Fig.8 Isothermal adsorption gas content of ZJD-1 carbonaceous shale of Hetang Formation

表4 ZJD-1井荷塘组炭质页岩样品等温吸附实验数据

Table 4 Isothermal adsorption test data of ZJD-1 carbonaceous shale of Hetang Formation

压力点	压力/MPa	吸附气量/(kg/t)	压力点	压力/MPa	吸附气量/(kg/t)
1	0	0	10	250.0294	11.15089497
2	5.0783	0.348047305	11	300.0616	12.44129804
3	10.0887	0.644916389	12	349.9203	13.45976259
4	30.0799	1.618996243	13	-	-
5	60.0673	2.944772228	14	-	-
6	90.0156	4.361519161	15	-	-
7	129.9918	6.299730042	16	-	-
8	169.9362	8.149264561	17	-	-
9	209.9543	9.791357124	18	-	-

压力为5.08~34.99 MPa。图8为ZJD-1井荷塘组样品的等温吸附曲线,在30℃等温条件下,炭质页岩的吸附能力随着压力的增高逐渐增大,在压力达到34.99 MPa时,暗色泥页岩的吸附气量达13.46 kg/t。表明江山—常山地区荷塘组炭质页岩吸附能力较好,具有一定吸附性(表4)。

6 有利区预测

页岩气的赋存受控于暗色泥页岩的有机质类型和丰度、热演化程度、有效厚度、储层特征、吸附能力、埋藏深度以及构造保存条件等因素。下扬子地区下寒武统海相页岩有机质类型、丰度、厚度及储层特征都很优越,但是经过多期构造运动的破坏,表现出构造保存条件复杂、热演化程度过高的

特征。所以有利区优选时要遵循两个原则:一是在大范围高热演化程度环境中寻找热演化程度较低的区域;二是在复杂的构造背景中寻找相对稳定的区域,如对冲带中部区域,古老基底上部相对稳定的地层。

浙西南—赣东北地区由开化—淳安断裂和江山—绍兴拼合带夹持,位于对冲带中部,内部比较稳定(图1a),本区域内开化—常山—玉山地区古生界较全,剥蚀相对较少;有利区内断裂相对较少,且地层倾角相对较小(图9a、c),埋深适中,总体而言具较好的构造保存条件。

开化—常山—玉山地区寒武系荷塘组为一套海相沉积地层,对其赋存的页岩气有利区优选参考页岩气成藏的主控因素及前人研究成果(张大伟等,

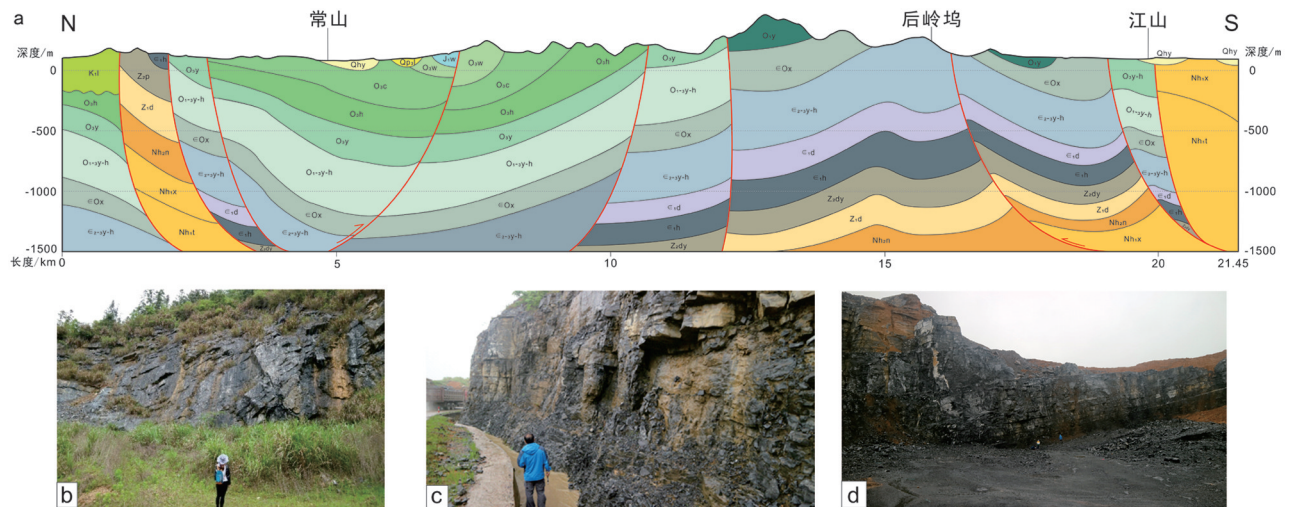


图9 开化—常山—玉山地区下寒武统荷塘组地质剖面与野外地层

a—开化—常山—玉山地质剖面; b—开化野外露头; c—常山野外露头; d—玉山野外露头

Fig.9 Geological profile and outcrops of Hetang Formation in Kaihua-Changshan-Yushan area

a—Geological profile of Kaihua-Changshan-Yushan; b—Outcrops of Kaihua; c—Outcrops of Changshan; d—Outcrops of Yushan

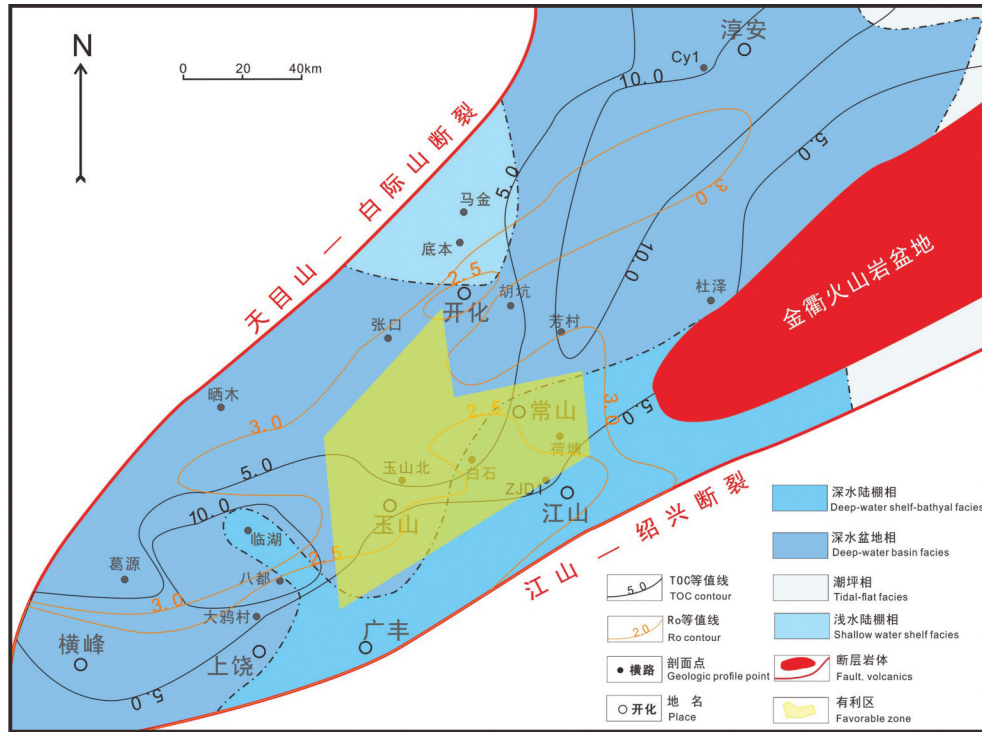


图10 浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组页岩气勘探有利区综合评价图

Fig.10 Potential district for shale gas exploration of Hetang Formation in southwestern Zhejiang Province and northeastern Jiangxi Province

2012),通过优选参数的叠合,以研究区荷塘组暗色泥页岩连续厚度 ≥ 30 m,有机碳含量 $> 2.0\%$, $Ro < 3\%$,目的层埋深300~4500 m,地表平坦,构造相对稳定等为主要评价依据(章伟,2014;何钰,2015;Rezaee,2015;张奥博等,2019)。开化—常山—玉山地区的寒武系荷塘组暗色页岩平均厚度超过50 m;有机质丰度较高,最小值为5.18%,最大值为23.52%,平均值 $> 8.0\%$;有机质热演化程度适中,其值为2.01%~3.43%,平均为2.83%;目的层孔洞缝发育,等温吸附实验测得暗色泥页岩吸附气含量平均高达5.93 kg/t;暗色页岩分布面积达2400多平方千米,埋深500~3500 m,地表为低矮丘陵,地层倾角相对较小。基于以上参数比较,优选出开化—常山—玉山地区为浙西南—赣东北地区下寒武统荷塘组页岩气勘探的有利区(图10)。

7 结论

(1)浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组炭质硅质页岩分布面积大,其中开化—常山—玉山地区沉积厚度大,构造部位位于对冲带中部,内部相对稳

定,地层倾角较小,其中在开化—常山—玉山地区的平均厚度超过50 m,埋深适中,有机质丰度较高,有机质热演化程度适中。

(2)浙西南—赣东北地区寒武系荷塘组炭质硅质页岩储集空间类型包括微孔隙、微裂缝,具有良好的储集性能,且暗色泥页岩中石英含量较高,储集层脆性较高,利于未来开采。等温吸附实验测得泥页岩的吸附气量平均为5.93 kg/t,表明研究区荷塘组暗色泥页岩吸附能力较好。

(3)基于研究区炭质硅质页岩分布、有机地球化学特征及含气量分析等,采用数据叠合法优选出开化—常山—玉山地区为浙西寒武系荷塘组页岩气发育的有利地区,分布面积达2400多平方千米,具有良好的开发潜力。

References

- Chen Jie, Zhu Yanming, Li Wu, Chen Shangbin. 2012. Shale gas accumulation conditions and favorable area prediction of Hetang Formation in South Anhui Province of China[J].Xinjiang Petroleum Geology, 33(4): 420– 423(in Chinese with English abstract).

- Chen Ke, Zhai Gangyi, Bao Shujing, Song Teng, Lin Tuo, Li Haohan, Jin Chunshuang, Meng Fanyang, Tang Xianchun And Zhang Yanlin. 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 Xiuqi, Zhou Taofa, Li Longming. 2018. Characteristics of capping fold structure in the Southern Anhui and Western Zhejiang Regions[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(2): 193–210(in Chinese with English abstract).
- Chen Yang, Tang Hongming, Liao Jijia, Luo Chao, Zhao Shengxian, Zheng Majia, Zhong Quan. 2022. Analysis of shale pore characteristics and controlling factors based on variation of buried depth in the Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 49(2): 472–484(in Chinese with English abstract).
- Cheng Haiyan. 2009. Evaluation of Source Rocks in the North Yellow Sea and Its Surrounding Basins[D]. Qingdao: Ocean University of China(in Chinese with English abstract).
- Curtis J B. 2002. Fractured shale–gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921–1938.
- Feng Guoxiu, Chen Shengji. 1988. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock[J]. *Natural Gas Industry*, 8(3): 20–25(in Chinese with English abstract).
- Han Yao. 2013. Tectonic Paleogeographic Pattern and Evolution of the Eastern Section of the Jiangnan Orogen[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract).
- He Jinxian, Duan Yi, Zhang Xiaoli, Wu Baoxiang, Xu Li. 2011. Evaluation of hydrocarbon generation potentials of Chang–8 source rocks in Huaqing area, Ordos basin[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, (6): 18–22, 32 (in Chinese with English abstract).
- He Yu. 2015. Preliminary Study on Shale Gas Resource Potential of the Lower Cambrian Hetang Formation in Zhejiang region[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 23–40(in Chinese with English abstract).
- Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. 2009. Development characteristics of organic–rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China[J]. *Natural Gas Industry*, 9(12): 115–118(in Chinese with English abstract).
- Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Jiang Wenli, Nie Haikuan, Tang Xuan, Han Shuangbiao, Xing Yawen. 2012. Analysis on pores forming features and its influence factors of reservoir well Yuye–1[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, (10): 3954–3963(in Chinese with English abstract).
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Hammes U. 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix–related mudrock pores[J]. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1071–1098.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. 2012. 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*, (2): 349–361(in Chinese with English abstract).
- Regional Geological Survey Team of Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. The Anhui Cambrian System is Stratified[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Publishing House, 5–9(in Chinese with English abstract).
- Rezaee R. 2015. Fundamentals of gas shale reservoirs[M]. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Shen Zhongmin, Wei Jinhua, Zhu Hongquan, Liu Sibing, Dang Hongyan. 2009. Comparative research on maturity feature and maturity indicator of coal source rock from west Sichuan Basin depression[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (4): 83–88(in Chinese with English abstract).
- Soeder D J. 2018. The successful development of gas and oil resources from shales in North America[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 163: 399–420.
- Shuai Qin, Huang Ruicheng, Gao Qiang, Xu Shengrui, Qiu Haiou, Tang Zhiyong. 2012. Research development of analytical techniques for shale gas[J]. *Rock and Mineral Analysis*, (6): 931–938(in Chinese with English abstract).
- Wang Ye, Qiu Nansheng, Yang Yunfeng. 2019. Thermal maturity of Wufeng–Longmaxi shale in Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 44(3): 953–971(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, Hu Suyun, Liu Hongjun. 2010. Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 21(2): 350–356(in Chinese with English abstract).
- Xu Bo, Li Jinghan, Li Xiaoge, Wang Chuanfeng, Liu Kaibo, Xu Meixiang, Jing Jiajun, Nie Ling. 2011. Evaluation of hydrocarbon accumulation conditions for shale gas from the Eastern Sag of the Liaohe Oilfield and its gas–bearing properties[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(3): 450–458(in Chinese with English abstract).
- Xu Zuxin, Guo Shaobin. 2011. Research on accumulation mechanism of shale gas[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, (6): 122–124(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhaobin. 2018. Study on Sedimentary Characteristics and Geological Significance of Early Cambrian Seismic Events in western Zhejiang Province[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing)(in Chinese with English abstract).
- Yuan Yusong, Guo Tonglou, Fu Xiaoyue, Lu Qingzhi, Hu Shengbiao. 2006. Thermal history and secondary hydrocarbon generation intensity of marine source rocks in Lower Yangtze Area[J]. *Geoscience*, 2: 283–290(in Chinese with English abstract).
- Zhang Aobo, Tang Dazhen, Tao Shu. 2019. Analysis of geological background and development situation of typical oil/gas-bearing shales in China and America[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 26(1): 37–45(in Chinese with English abstract).
- Zhang Dawei, Li Yuxi, Zhang Jinchuan. 2012. National Survey and Evaluation of Shale Gas Resource Potential[M]. Beijing: Geological

- Publishing House, 66–69(in Chinese with English abstract).
- Zhang Feiyan. 2018. Lower Yangtze Region Lower Cambrian series source rock geochemical features analysis[J]. Coal Geology of China, 30(8): 40–41(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. 2004. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 24(7): 15–18(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Deming. 2003. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. Geoscience, 17(4): 466(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei. 2014. Research on Geological Condition and Gas-bearing of Shale Gas in Hetang Formation, Lower Cambrian in the West Region of Zhejiang Province[D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 25–45(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao. 2010. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(6): 641–653(in Chinese with English abstract).
- 州:浙江大学, 23–40.
- 李玉喜, 聂海宽, 龙鹏宇. 2009. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业, 9(12):115–118.
- 龙鹏宇, 张金川, 姜文利, 聂海宽, 唐玄, 韩双彪, 邢雅文. 2012. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), (10): 3954–3963.
- 聂海宽, 张金川. 2012. 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, (2): 349–361.
- 安徽省地质矿产局区域地质调查队. 1988. 安徽省地层志寒武系分层[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 5–9.
- 沈忠民, 魏金花, 朱宏权, 刘四兵, 党洪艳. 2009. 川西坳陷煤系烃源岩成熟度特征及成熟度指标对比研究[J]. 矿物岩石, (4): 83–88.
- 帅琴, 黄瑞成, 高强, 徐生瑞, 邱海鸣, 汤志勇. 2012. 页岩气实验测试技术现状与研究进展[J]. 岩矿测试, (6): 931–938.
- 王晔, 邱楠生, 仰云峰. 2019. 四川盆地五峰—龙马溪组页岩成熟度研究[J]. 地球科学, 44(3): 953–971.
- 王祥, 刘玉华, 张敏, 胡素云, 刘红俊. 2010. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 21(2): 350–356.
- 严兆彬. 2018. 浙西早寒武世地震事件沉积特征与地质意义研究[D]. 中国矿业大学(北京).
- 徐波, 李敬含, 李晓革. 2011. 辽河油田东部凹陷页岩气成藏条件及含气性评价[J]. 石油学报, 32(3): 450–458.
- 徐祖新, 郭少斌. 2011. 页岩气成藏机理研究[J]. 内蒙古石油化工, (6):122–124.
- 袁玉松, 郭彤楼, 付孝悦, 卢庆治, 胡圣标. 2006. 下扬子地区热历史与海相烃源岩二次生烃潜力[J]. 现代地质, (2): 283–290.
- 张奥博, 汤达祯, 陶树. 2019. 中美典型含油气页岩地质特征及开发现状[J]. 油气地质与采收率, 26(1):37–45.
- 张大伟, 李玉喜, 张金川. 2012. 全国页岩气资源潜力调查评价[M]. 北京:地质出版社, 66–69.
- 张飞燕. 2018. 下扬子地区下寒武统烃源岩地球化学特征分析[J]. 中国煤炭地质, 8, 30(8): 40–41.
- 张金川, 薛会, 张德明. 2003. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 17(4):466.
- 张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 24(7):15–18.
- 章伟. 2014. 浙西地区下寒武统荷塘组页岩气地质条件及含气性研究[D]. 中国地质大学(北京), 25–45.
- 邹才能, 董大忠, 王社教. 2010. 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, 37(6): 641–653.

附中文参考文献

- 陈洁, 朱炎铭, 李伍, 陈尚斌. 2012. 皖南地区荷塘组页岩气成藏条件及有利区预测[J]. 新疆石油地质, 33(4): 420–423.
- 陈科, 翟刚毅, 包书景, 宋腾, 林拓, 李浩涵, 金春爽, 孟凡洋, 唐显春, 张焱林. 2020. 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.
- 陈秀其, 周涛发, 李龙明. 2018. 皖南—浙西地区盖层褶皱构造形迹特征[J]. 大地构造与成矿学, 42(2): 193–210.
- 陈洋, 唐洪明, 廖纪佳, 罗超, 赵圣贤, 郑马嘉, 钟权. 2022. 基于埋深变化的川南龙马溪组页岩孔隙特征及控制因素分析[J]. 中国地质, 49(2): 472–484.
- 成海燕. 2009. 北黄海及其周边盆地烃源岩评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学.
- 韩瑶. 2013. 江南造山带东段构造古地理格局及演化[D]. 中国地质大学(北京).
- 丰国秀, 陈盛吉. 1988. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. 天然气工业, 8(3): 20–25.
- 何金先, 段毅, 张晓丽, 吴保祥, 徐丽. 2011. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长8烃源岩生烃潜力评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), (6): 18–22, 32.
- 何钰. 2015. 浙江地区下寒武统荷塘组页岩气资源前景初探[D]. 杭