

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.01.009

引用格式:殷启春,方朝刚,郑红军,等.下扬子地区奥陶纪页岩气地质条件及远景区优选[J].华东地质,2020,41(1):70-78.

# 下扬子地区奥陶纪页岩气地质条件及远景区优选

殷启春<sup>1</sup>,方朝刚<sup>1</sup>,郑红军<sup>1</sup>,王敬东<sup>1</sup>,王 丰<sup>2</sup>

- (1. 中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016;
2. 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100)

**摘要:** 由于下扬子地区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组是具有页岩气勘探潜力的新层系,进而开展了该区页岩气地质条件分析和远景区优选工作。从胡乐组和宁国组黑色页岩构造及沉积背景入手,利用区域地质调查和钻井资料,分析奥陶纪页岩的地球化学、储层及展布特征。下扬子地区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组泥页岩有效厚度大,单层厚普遍>30 m,有机质含量高且热演化程度存在适中区,脆性矿物含量高。下扬子地区奥陶纪页岩具备页岩气形成、富集的地质条件,具有较好的资源潜力,划分出安徽宁国奥陶纪页岩气远景区和浙江淳安—桐庐奥陶纪页岩气远景区。

**关键词:** 下扬子地区;页岩气;胡乐组;宁国组;页岩气远景区

**中图分类号:** P618.13

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2096-1871(2020)01-070-09

近年来,上扬子地区已实现了对奥陶纪五峰组—志留纪龙马溪组页岩气的商业开发<sup>[1-2]</sup>,公益性页岩气地质调查在中扬子地区志留系、震旦系取得了重大进展<sup>[3]</sup>。下扬子地区古生界富有机质泥页岩层段主要分布于二叠纪大隆组—龙潭组—孤峰组、早志留世—晚奥陶世高家边组—五峰组、早寒武世荷塘组/幕府山组<sup>[4-7]</sup>,目前仅在二叠系取得页岩气重要发现<sup>[8]</sup>。浙皖两省交界区奥陶纪宁国组和胡乐组主要为灰黑色硅质、碳质泥页岩,是受上升流影响的烃源岩<sup>[9]</sup>,是值得关注的富有机质泥页岩层段,目前对下扬子区早中奥陶世泥页岩的页岩气地质条件和远景区优选工作尚未开展。

本文利用露头、钻井和测试数据<sup>[10-13]</sup>,获取下扬子地区页岩气评价参数,以中奥陶世胡乐组、早奥陶世宁国组页岩为研究对象,分析了该区页岩气地质特征,寻找优质页岩分布区和构造相对稳定区。研究页岩规模、埋深、品质、生烃条件和储集条件,优选页岩气远景区,为后期该区进一步开展页岩气资源调查与勘探提供参考。

## 1 区域地质概况

### 1.1 区域构造概况

下扬子地区主要包括郯庐断裂带东南侧和江绍断裂带西北侧地区(图1),可进一步划分为长江中下游弧后裂陷盆地、下扬子被动陆缘、江南古岛弧、伏川—樟树墩蛇绿混杂岩和怀玉山—天目山被动陆缘盆地<sup>[14]</sup>。南华纪—三叠纪,下扬子地区总体为海相盖层发展期,发育多套富有机质的泥页岩,主要位于高坦断裂、怀玉—天目山断裂和江南隆起东部边界外侧<sup>[15-16]</sup>。古生代,研究区发生大规模油气生成、运移和成藏事件,经中—新生代多期构造改造,油气成藏条件复杂<sup>[17-20]</sup>。晚印支期以来,构造-岩浆活动对该区油气藏破坏、改造,因此,页岩气勘探需寻找地层平缓、利于页岩气保存的构造稳定区<sup>[21-24]</sup>。

\* 收稿日期:2019-03-14 修订日期:2019-07-30 责任编辑:叶海敏

基金项目:中国地质调查局“下扬子地区古生界页岩气基础地质调查(编号:121201008000150010)”和中央财政“苏皖地区页岩气地质调查(编号:DD20190083)”项目联合资助。

第一作者简介:殷启春,1977年生,男,工程师,主要从事非常规油气勘探、评价及地球物理研究工作。

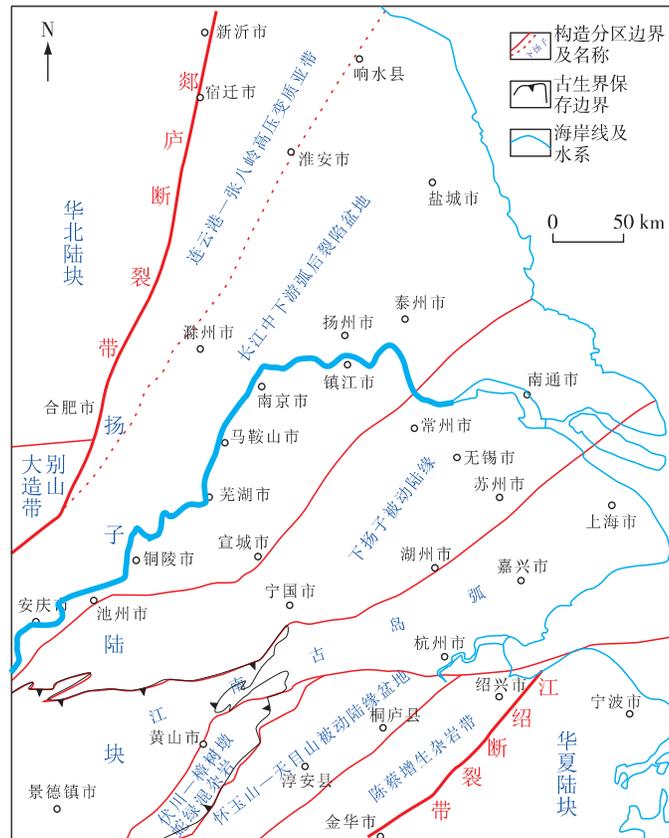


图 1 下扬子地区大地构造位置图<sup>[14-16]</sup>

Fig. 1 Map showing tectonic location of the Lower Yangtze region

### 1.2 沉积地质概况

区内震旦系—三叠系海相地层发育齐全,沉积类型多样,生物化石丰富<sup>[25-27]</sup>。奥陶纪是中国南方早古生代加里东构造旋回的重要转折期,大地构造由热沉降阶段的被动大陆边缘盆地逐渐转化为前陆盆地<sup>[28]</sup>。

(1)晚震旦世—中奥陶世。晚震旦世以来,随着前古特提斯洋的扩张<sup>[29]</sup>,下扬子地区在板块离散背景下演化为典型的被动大陆边缘,以江南断裂为代表的同生断裂控制了斜坡带沉积相展布,盆地沉积为海相碳酸盐岩和碎屑岩,各地层均为整合接触关系。早奥陶世弗洛阶(宁国组沉积早期)<sup>[30]</sup>,在前期海侵的基础上,海平面进一步抬升,下扬子地区沉积特征南北出现差异:江南断裂以北主要为继承性碳酸盐岩建造,江南断裂以南浙西皖南地区以细粒沉积物为主<sup>[31]</sup>。胡乐期,研究区水深最大,胡乐组底部沉积期为最大海泛期<sup>[32]</sup>,与全球一级海平面最大海泛面相对应<sup>[33-34]</sup>。这一时期浙西—皖南地

区主体为深海陆棚相—盆地相,沉积了黑色硅质页岩和碳质页岩,是页岩气勘探主要富有机质泥页岩层段。随后,海水整体变浅,形成以开阔海台地为主的环境,相继形成了砚瓦山组、黄泥岗组灰色、棕红色瘤状灰岩、钙质泥岩、页岩沉积建造。

(2)晚奥陶世—志留纪。晚奥陶世五峰期,浙西—皖南地区长坞组、文昌组为灰绿色、青灰色泥页岩、粉砂质页岩与粉砂岩互层,夹细砂岩,小、中型韵律层,可见鲍马序列及槽模、斜层理、包卷层理,为一套类复理石或复理石建造。志留纪中—晚期,研究区主要为浅海环境沉积。

## 2 奥陶纪页岩气成藏条件

### 2.1 泥页岩岩性特征

中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组黑色泥页岩分布于浙西—皖南地区。区域内黑色泥页岩平均厚度>30 m(图 2),是页岩气形成和成藏的基础。

宁国胡乐镇将军岭胡乐组—宁国组实测剖面

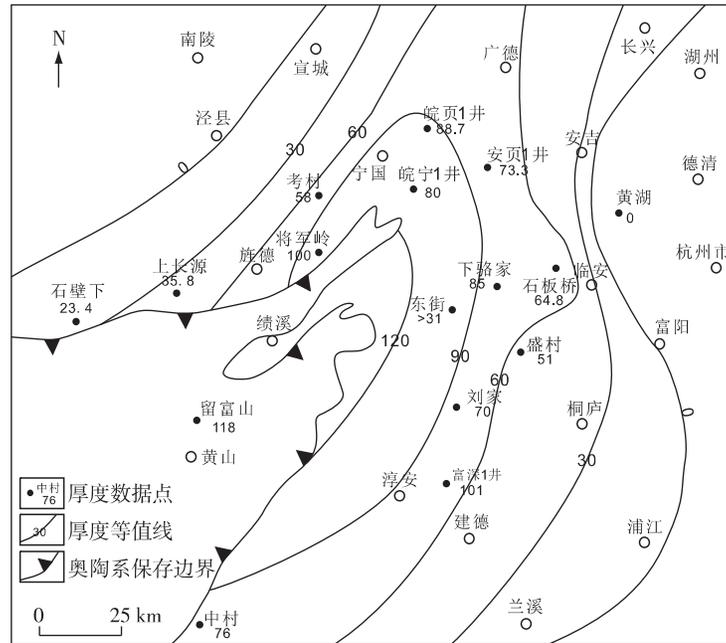


图2 下扬子区胡乐组和宁国组泥页岩厚度分布图

Fig. 1 Map showing distribution of shale thickness of the Hule and Ningguo Formations in the Lower Yangtze region

特征表明,胡乐组厚 80 m,划分为上、下两段:上段为黑色硅质层夹硅质、碳质页岩及石煤,富含笔石;下段为黑色薄层硅质岩夹碳质页岩及粉砂岩层组合的 c、d 鲍马序列,富含笔石。宁国组厚 100 m,岩性为碳质泥岩、泥岩、泥质条带砂岩、粉砂岩、细砂岩韵律组合,中上段为完整的鲍马序列,下段为进积型韵律,富含笔石。浙江桐庐县合村乡刘家胡乐组和宁国组实测剖面(图 3)发现,胡乐组和宁国组见顶底,化石丰富。其中胡乐组发育厚 41 m 的硅质岩、碳质硅质泥岩;宁国组发育厚 115 m 的泥岩、硅质岩和粉砂质泥岩,其中单层含碳质泥岩连续厚度 > 30 m,富含笔石、叶虾类、腕足类、牙形刺和海绵生物,海绵化石形态完整,表明处于浪基面以下,显示了页岩富含有机物,具有有利的沉积环境。

在安徽太平县石壁下剖面,胡乐组粉砂质页岩和硅质页岩厚 23.4 m;石台县大坞圩剖面,中奥陶世—早奥陶世地层相变为大田坝组、宝塔组、大湾组和红花园组灰岩<sup>[31]</sup>。浙江省胡乐组露头分布于安吉县孝丰,临安县于潜、昌化,桐庐县百江、合村,淳安县临歧、串坞,厚 5.5 ~ 70.1 m<sup>[35]</sup>,自临安高垟头向东至余杭荆山岭,笔石相页岩消失。过渡型沉积以临安板桥剖面为代表<sup>[36]</sup>,胡乐组薄层泥岩与硅质岩互层仅 7.21 m,下部为荆山组灰岩<sup>[37]</sup>。江

苏无锡东部东深 1 井揭示研究区与胡乐组、宁国组对应的奥陶纪牯牛潭组、大湾组和红花园组以灰岩和云质灰岩为主,为台地相。

## 2.2 奥陶系地球化学特征

采集研究区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组 139 个样品,收集东辉井、安页 1 井<sup>[38]</sup>、皖宁 1 井<sup>[39]</sup>资料和皖页 1 井测井资料。本次样品送至科尔加里国际油气技术有限公司实验中心完成测试,样品主要为硅质泥岩、硅质页岩、硅质岩、碳质页岩、泥岩和碳质泥岩。早奥陶世胡乐组—宁国组泥页岩有机质丰度 TOC 值统计见表 1。从平面看,有机质丰度 TOC 高值区位于宁国东南部—临安西部—淳安环状区,往黄山方向有机质丰度 TOC 值增大,平均值 > 1%,属于有机质含量较高地区。宁国西部—广德南部—安吉—桐庐—建德地区有机质丰度 TOC 值为 1%~0.5%,相对较低。从层位看,胡乐组泥页岩有机质丰度 TOC 值明显高于宁国组。从岩性看,碳质页岩有机质丰度 TOC 值相对较高。

研究表明<sup>[38]</sup>,宁国组页岩有机质类型以 I 型干酪根为主,主要生烃组分为腐泥无定形;胡乐组页岩有机质类型以 II<sub>1</sub> 型为主,主要生烃组分为腐殖无定形,均属于生气能力较强的有机质类型。在梅

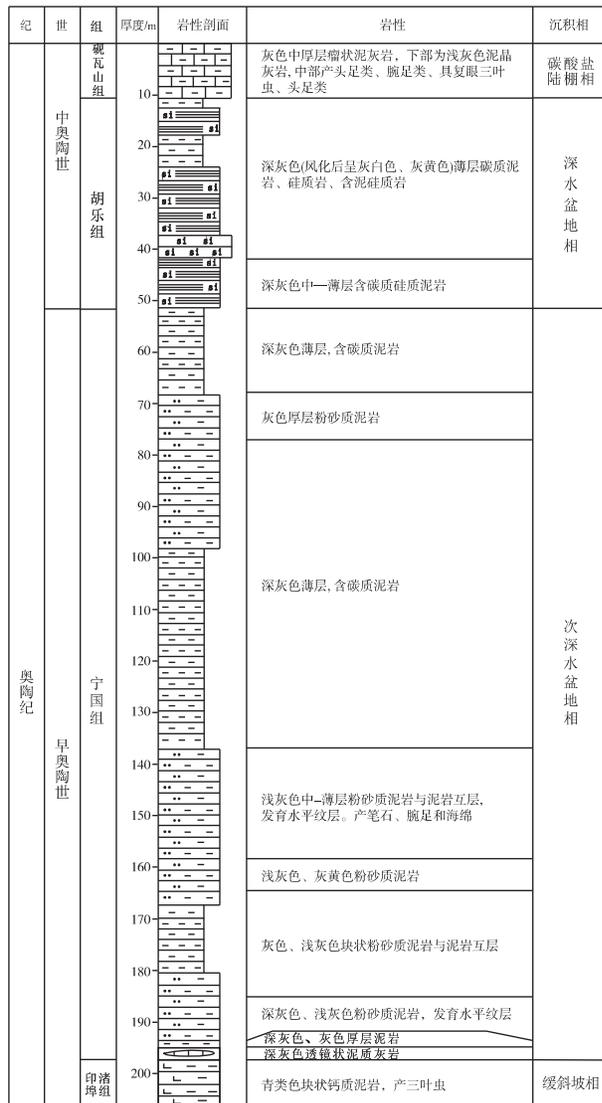


图 3 浙江桐庐刘家胡乐组—宁国组实测剖面柱状图

Fig. 3 Columnar section of the Hule and Ningguo Formations in the Liujia field section, Tonglu County, Zhejiang Province

林向斜南缘采集的 10 个胡乐组和宁国组泥页岩样品中,4 个样品未提取出干酪根,有机质成熟度  $R_o$  平均值为 1.85%。浙西地区胡乐组  $R_o$  平均值为 2.4%,宁国组  $R_o$  平均值为 2.67%, $R_o$  值均 < 3.5%的低值区主要分布在皖东南和浙西岩浆活动较少的地区。

### 2.3 储层特征

全岩 X 射线定量分析结果显示,泥页岩石英含量为 45.7%~72.3%,平均值为 59.05%;黏土矿物含量为 14.4%~45.4%,平均值为 31.8%,以伊

蒙混层含量最高,其次为伊利石;含少量黄铁矿、白云石、锐钛矿和普通辉石,不含碳酸盐岩矿物。与龙马溪组相比<sup>[40]</sup>,黏土矿物含量相近,石英含量偏高。石英和伊利石含量对页岩微米级空隙发育具有促进作用,石英含量高有利于后期开发压裂,有利于页岩气形成和开发的黏土矿物含量为 20%~40%<sup>[41]</sup>。碳酸盐岩对微米级空隙发育具有抑制作用,泥页岩不含碳酸盐岩矿物,对储层孔隙发育更有利<sup>[42]</sup>。

表 1 早奥陶世胡乐组—宁国组泥页岩 TOC 值统计

Table 1 TOC values of mudstones of the Lower Ordovician Hule and Ningguo Formations

| 剖面或井      | 最大值/<br>% | 最小值/<br>% | 平均值/<br>% | 样品数/<br>个 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 桐庐县合村乡刘家  | 2.21      | 0.49      | 1.05      | 11        |
| 宁国市胡乐镇将军岭 | 4.24      | 0.20      | 2.88      | 8         |
| 安吉县杭城镇潘溪  | 2.15      | 0.30      | 0.74      | 20        |
| 临安市於潜镇下骆家 | 1.14      | 0.12      | 0.65      | 22        |
| 桐庐县分水镇富源  | 2.02      | 0.19      | 1.48      | 12        |
| 淳安县安阳乡桐川  | 1.30      | 0.36      | 0.86      | 4         |
| 开化县马金镇中村  | 1.76      | 0.16      | 0.94      | 10        |
| 开化县马金镇洪家  | 1.51      | 0.12      | 0.84      | 3         |
| 东辉井       | 1.91      | 0.21      | 1.54      | 5         |
| 安页 1 井    | 2.18      | 0.13      | 1.07      | 37        |
| 皖宁 1 井    | 1.70      | 1.00      | 1.50      | 7         |
| 皖页 1 井    | 4.16      | 1.00      | 2.80      | 649       |

微观孔隙电子成像结果(图 4)显示,页岩层段有机质孔隙发育程度一般,主要为矿物溶蚀孔隙,见少量铸模孔隙。矿物溶蚀孔多为黏土矿物、碎屑颗粒和硅质粒间、粒内容蚀孔,呈不规则状,孔隙直径为 0.057~8.231  $\mu\text{m}$ ,总体连通性较差。

采用重量法<sup>[43]</sup>开展胡乐组页岩等温吸附试验(图 5),3 个样品的吸附量为 2.70~3.63 mg/g,说明其吸附能力较好。

### 2.4 含气性

浙江安吉县安页 1 井北西侧出露大规模燕山期花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩,泥页岩  $R_o$  平均值为 4.05%<sup>[38]</sup>,气测显示弱,解吸含气量极低。安徽宁国梅林向斜皖宁 1 井 175~287 m 处钻遇的胡乐组气测峰值为 0.350 3%<sup>[39]</sup>。在页岩气选区基本指标相差不大的情况下,含气性受构造和岩浆活动影响,今后应探索该区富有机质泥页岩层段含气性主控因素研究。

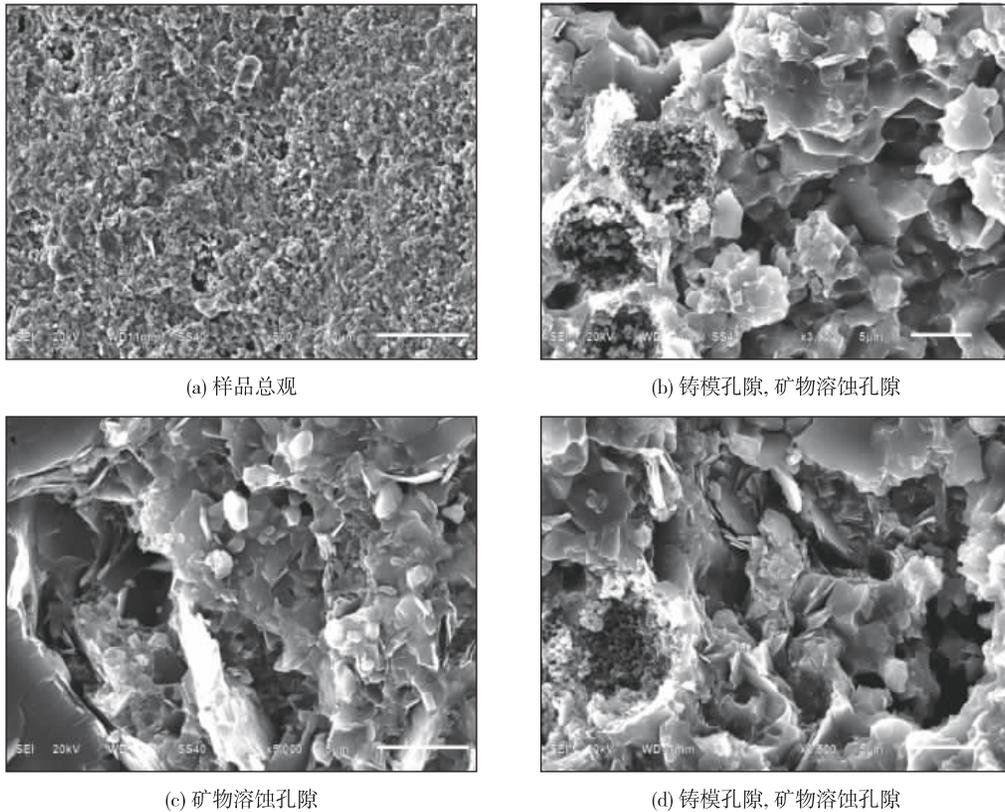


图4 胡乐组泥页岩微观孔隙电子成像

Fig. 4 Electronimages of micropores in the Hule Formation shale

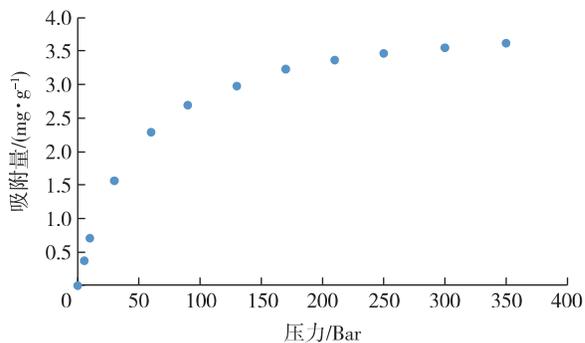


图5 胡乐组泥页岩等温吸附图

Fig. 5 Isothermal adsorption plot of the Hule Formation shale

## 2.5 页岩气富集条件

页岩气富集条件受有机质丰度、有机质成熟度、储集物性和保存条件控制<sup>[44-45]</sup>。研究区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组泥页岩具有有利的沉积相带,富有机质泥页岩厚度大、分布广、有机质含量高、矿物组成适宜、储集物性较好,局部热演化分

布适宜,是奥陶纪泥页岩层系页岩气富集的有利条件。但下扬子地区古生界多期构造运动,特别是晚燕山期以来强烈的板内变形运动对研究区古生界改造强烈,古生代海相地层在下扬子西南部无大面积保存,推覆构造发育,伴随泥页岩层间滑脱和岩浆活动,对页岩气富集成藏有明显的影 响和破坏。相对而言,茅东断裂以东古生界,即浙西—皖南地区存在一系列复式褶皱,背斜紧密,常见地层倒转,下古生界多被剥蚀;向斜宽缓,地层保存相对完整,页岩气宏观保存条件较好<sup>[46]</sup>。目前页岩气多以向斜为页岩气远景区开展以二维页岩气地震勘探<sup>[47]</sup>和地质调查井为主的地质调查工作。

## 3 奥陶纪页岩气远景区优选

### 3.1 页岩气远景区优选参数

参考《页岩气基础地质调查工作指南(试行)》<sup>[48]</sup>页岩气选区评价标准,针对研究区页岩气地质特征,因该区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组页岩气勘探程度较低,采用多因素叠加、综合地质

评价等方法综合评价(表 2)。研究区富有机质泥页岩有机质含量高,热演化程度高,构造和岩浆活动强烈,相对《页岩气基础地质调查工作指南(试行)》<sup>[48]</sup>参考标准,增加了页岩面积下限和基本保存条件要求,富有机质泥页岩厚度从 15 m 提高到 30 m,TOC 含量从 0.5% 提高到 1%,Ro 下限从 0.5% 提高到 1.1%。

表 2 页岩气远景区优选指标

| 主要参数      | 参数值及条件              |
|-----------|---------------------|
| 页岩面积下限    | 500 km <sup>2</sup> |
| 富有机质泥页岩厚度 | 30 m, 单层厚 ≥ 5 m     |
| TOC       | 1.0%                |
| Ro        | 1.1% ~ 3.5%         |
| 埋深        | 500 ~ 5 000 m       |
| 地表条件      | 丘陵、平原               |
| 保存条件      | 顶底板、断裂              |

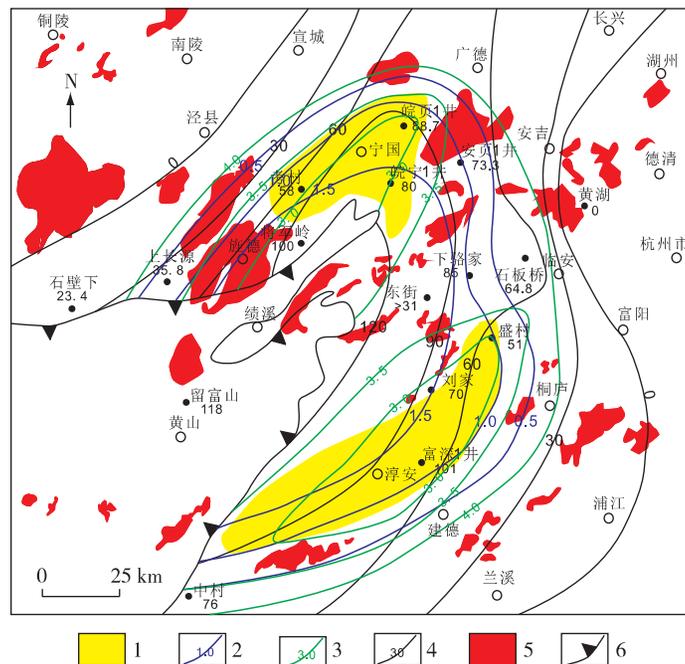
我国南方海相页岩气厚层页岩中 TOC 含量 > 1.0%、厚度 > 30 m 的地区,残余有机碳含量为 1.0% 即可成为有效页岩<sup>[12,31]</sup>。本文将 TOC = 1.0% 作为下限。有机质成熟度是衡量泥页岩生烃能力的重要指标之一。页岩有机质成熟度越高

(Ro > 1.2%), 有机质固体颗粒孔越发育,其吸附性就越强<sup>[49]</sup>。但对成熟度高过的海相页岩,有机质碳化程度增强,富有机质页岩对天然气吸附能力降低<sup>[50-51]</sup>。中国南方 I—II<sub>1</sub> 型海相页岩有机质成熟度 Ro 上限为 3.5%,排除由有机质碳化造成的高风险区<sup>[52]</sup>。据此,本文将 Ro = 3.5% 作为上限,泥页岩面积和厚度是页岩气富集的基本条件。富含有机质泥页岩面积和厚度越大,越能保证页岩气资源量和压裂改造条件<sup>[12]</sup>。厚层页岩可自我封闭成藏,与顶底板一起控制保存条件<sup>[53]</sup>。研究区剥蚀严重,构造改造强烈,将连续分布的页岩面积下限定为 500 km<sup>2</sup>,厚度下限定为 30 m。

一定程度的页岩气储层埋深可保证页岩气较好地保存,但过深的页岩气储层将导致开发成本增高。参考上中扬子地区页岩气储层埋深,将研究区页岩气储层埋深定为 500 ~ 5 000 m。

### 3.2 优选结果

由多因素叠加及综合评价结果(图 6)可知,选区以奥陶系保存和埋深为边界约束条件,结合 TOC、Ro 和厚度等值线,距离主要岩体分布区 3 ~ 5 km 以上,在浙西—皖南地区优选出宁国页岩气成藏远景区和桐庐—淳安复向斜页岩气成藏远景区。



1. 远景区; 2. TOC 等值线; 3. RO 等值线; 4. 厚度等值线; 5. 火成岩; 6. 奥陶系保存边界

图 6 下扬子地区中下奥陶统页岩气远景区优选分布图

Fig. 6 Distribution of prospective areas of Middle-Lower Ordovician shale gas in the Lower Yangtze region

宁国页岩气成藏远景区包括甲路单斜和梅林向斜,以奥陶系保存边界为南部边界,中下奥陶统往北部逐步加深,保存较好,无大型断裂切割,面积约 900 km<sup>2</sup>。该区中奥陶世胡乐组、早奥陶世宁国组泥页岩累计厚度 > 50 m,有机质丰度 TOC > 1.0%,有机质成熟度 Ro < 3.5%,位于梅林向斜边缘的皖宁 1 井在胡乐组有较好的气测显示。该远景区西南部甲路单斜西缘优质相带边界不清,梅林向斜北端两翼岩体发育,对页岩气成藏影响程度不清,有待进一步开展调查工作。

桐庐—淳安复向斜页岩气成藏远景区远离奥陶系区域剥蚀线,由多个复式褶皱构成,中下奥陶统保存较好,远离大型火成岩体。该远景区长轴长约 79 km,短轴宽约 28 km,面积约 1 300 km<sup>2</sup>。地层保存相对完整,中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组泥页岩累计厚度 > 40 m,有机质丰度 TOC > 1.0%,有机质成熟度 Ro < 3.5%。该向斜区“凹中隆”常规油气钻井富深 1 井在上部长坞组有油气显示<sup>[54]</sup>,早中奥陶世发育层间滑脱,对页岩气成藏不利。

#### 4 结论

(1)下扬子地区中奥陶世胡乐组和早奥陶世宁国组具备页岩气成藏的地质条件。沉积相带为深海陆棚相—盆地相,以黑色硅质和碳质泥页岩为主。浙西—皖南地区黑色泥页岩上部砚瓦山组、黄泥岗组灰岩、钙质泥岩和下部印渚埠组灰岩构成了有利的顶、底板条件。

(2)下扬子地区优选出宁国页岩气成藏远景区和桐庐—淳安复向斜页岩气成藏远景区。胡乐组具有较好的气测显示,具有一定的页岩气勘探开发前景。

#### 参考文献

- [1] 天工.川南成为四川盆地页岩气开发主战场[J].天然气工业,2014(4):148.
- [2] 金之钧,胡宗全,高波,等.川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J].地学前沿,2016,23(1):1-10.
- [3] 李伟锋,代国标.中国地质学会 2017 年度十大地质科技进展十大地质找矿成果简介[N/OL].中国国土资源报,2018-2-10(003).
- [4] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布[J].海相油气地质,2008,13(2):1-16.
- [5] 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.
- [6] 黄保家,施荣富,赵幸滨,等.下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价[J].煤炭学报,2013,38(5):877-882.
- [7] 黄正清.下扬子盆地构造演化特征与页岩气主要富集层位[J].上海国土资源,2017,38(1):87-92.
- [8] 石刚,黄正清,郑红军,等.下扬子地区二叠系“三气一油”钻探发现[J].中国地质,2018,45(2):416-417.
- [9] 龚建明,王建强,程青松,等.下扬子烃源岩新层位——中下奥陶统[J].海洋地质前沿,2017,33(6):34-39.
- [10] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇.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,2009,29(12):115-118.
- [11] 李建青.中国南方海相页岩气选区评价体系研究[D].西安:西北大学,2012:121.
- [12] 李延钧,刘欢,刘家霞,等.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):28-34.
- [13] 陈新军,包书景,侯读杰,等.页岩气资源评价方法与关键参数探讨[J].石油勘探与开发,2012,39(5):566-571.
- [14] 高天山,邢光福,周效华,等.华东地区成矿地质背景研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2017:325-341.
- [15] 安徽省地质矿产局.安徽省区域地质志[M].北京:地质出版社,1987:496-513.
- [16] 邢光福,杨祝良.华东地质图(1:100万)及说明书[M].北京:地质出版社,2013.
- [17] 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(1):73-79.
- [18] 余晓宇,徐宏节,何治亮.江苏下扬子区中、古生界构造特征及其演化[J].石油与天然气地质,2004,25(2):226-230.
- [19] 梅廉夫,戴少武,沈传波,等.中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J].地质科技情报,2008,27(4):1-7.
- [20] 毛建仁,叶海敏,YUTAKA T,等.中国东南沿海与西南日本白垩纪—古近纪火山-侵入岩带的地球动力学特征[J].资源调查与环境,2014,35(3):157-168.
- [21] 夏在连,花彩霞,刘计勇,等.下扬子区下古生界油气有利勘探区带探讨[J].海洋地质与第四纪地质,2018,38(3):66-74.
- [22] 马永生,郭彤楼,付孝悦,等.中国南方海相石油地质特征及勘探潜力[J].海相油气地质,2002,7(3):19-27.

- [23] 张淮,周荔青,李建青.下扬子地区海相下组合油气勘探潜力分析[J].石油实验地质,2006,28(1):15-20.
- [24] 叶舟,梁兴,马力,等.下扬子独立地块海相残留盆地油气勘探方向探讨[J].地质科学,2006,41(3):523-548.
- [25] 刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集[M].北京:科学出版社,1994.
- [26] 马永生,陈洪德,王国力.中国南方层序地层与古地理[M].北京:科学出版社,2009:379-383.
- [27] 何卫红,唐婷婷,乐明亮,等.华南南华纪—二叠纪沉积大地构造演化[J].地球科学(中国地质大学学报),2014,39(8):929-953.
- [28] 岳文渐,业治铮.扬子陆块东南缘早生长的巨型斜坡带[J].地质学刊,1996,20(1):9-17.
- [29] 马力,陈焕疆,甘克文,等.中国南方大地构造和海相油气地质[M].北京:地质出版社,2004:91-93.
- [30] 张元动,詹仁斌,甄勇毅,等.中国奥陶纪综合地层和时间框架[J].中国科学:地球科学,2019,49(1):70-96.
- [31] 安徽省地质矿产局区域地质调查队.安徽地层志——奥陶系分册[M].合肥:安徽科学技术出版社,1989:92-95.
- [32] 宫维莉,毕治国,姜立富,等.安徽宁国胡乐地区奥陶系层序地层学初探[J].地层学杂志,2010,34(3):321-327.
- [33] 王军,甘华军.应用层序地层学[M].北京:石油工业出版社,2015.
- [34] 张元动,张举,汪建国,等.浙江桐庐县刘家奥陶纪剖面生物地层学初步研究[J].地层学杂志,2012,36(1):1-12.
- [35] 浙江省区域地层表编写组.华东地区区域地层表浙江省分册[M].北京:地质出版社,1979:33-43.
- [36] 陈旭,邹西平,杨达铨.浙北临安、余杭下奥陶统岩相、生物相变化的新观察[J].地震地质,1981,3(2):48-48.
- [37] 唐增才,张元动,甄勇毅,等.浙江临安板桥早奥陶世牙形刺新材料及其意义[J].地层学杂志,2014,38(4):381-389.
- [38] 周立峰,王玲余,周东升,等.浙西地区古生界页岩气资源调查与有利区优选成果报告[R].杭州:中国煤炭地质总局浙江煤炭地质局,2014.
- [39] 华东石油地质局地质物探处.华东地区钻井地层分层数据表册[R].南京:华东石油地质局地质物探处,1992:151.
- [40] 赵佩,李贤庆,孙杰,等.川南地区下古生界页岩气储层矿物组成与脆性特征研究[J].现代地质,2014,28(2):396-403.
- [41] 吉利明,邱军利,夏燕青,等.常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J].石油学报,2012,33(2):249-256.
- [42] 黄磊,申维.页岩气储层孔隙发育特征及主控因素分析:以上扬子地区龙马溪组为例[J].地学前缘,2015,22(1):374-385.
- [43] 周尚文,李奇,薛华庆,等.页岩容量法和重量法等温吸附实验对比研究[J].化工进展,2017,36(5):1690-1697.
- [44] 王社教,杨涛,张国生,等.页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J].中国工程科学,2012,14(6):94-100.
- [45] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.
- [46] 张涛,尹宏伟,贾东,等.下扬子区构造变形特征与页岩气保存条件[J].煤炭学报,2013,38(5):883-889.
- [47] 赵牧华,石刚,张安徽,等.安徽皖江地区页岩气地质调查地震勘探数据采集技术研究[J].华东地质,2017,38(3):203-209.
- [48] 中国地质调查局.页岩气基础地质调查工作指南(试行)[M].北京:中国地质调查局,2015.
- [49] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
- [50] 程鹏,肖贤明.很高成熟度富有机质页岩的含气性问题[J].煤炭学报,2013,38(5):737-741.
- [51] 王玉满,董大忠,程相志,等.海相页岩有机质碳化的电性证据及其地质意义——以四川盆地南部地区下寒武统筇竹寺组页岩为例[J].天然气工业,2014,34(8):1-7.
- [52] 王玉满,李新景,陈波,等.海相页岩有机质碳化的热成熟度下限及勘探风险[J].石油勘探与开发,2018,45(3):29-39.
- [53] 李建青,高玉巧,花彩霞,等.北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J].油气地质与采收率,2014,21(4):23-27.
- [54] 浙江省石化局石油地质大队.浙江省淳安县富文工区地震工作成果报告[R].杭州:浙江省石化局石油地质大队,1979:8-12.

## Geological conditions of Ordovician shale gas and optimization for prospective areas in the Lower Yangtze region

YIN Qi-chun<sup>1</sup>, FANG Chao-gang<sup>1</sup>, ZHENG Hong-jun<sup>1</sup>, WANG Jing-dong<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>2</sup>

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China;*

2. *College of Marine Geosciences, China University of Ocean, Qingdao 266100, China*)

**Abstract:** The Hule Formation of Middle Ordovician and the Ningguo Formation of Lower Ordovician in the Lower Yangtze region are the new interest of exploration for shale-gas intervals, thus it is highly necessary to undertake analysis of geological conditions and optimization work for prospective areas in this area. Starting from analysis of structure and sedimentary setting of black shale, this study investigated geochemistry, reservoirs and distribution of Ordovician black shale using regional geological and drilling data. The results show that the shale beds of the Hule Formation of Middle Ordovician and the Ningguo Formation of Lower Ordovician in the study area are characterized by large effective thickness with single layer thicker than 30 m, high content of organic matter, moderate thermal evolution, and high content of brittle minerals. The Ordovician shale in the Lower Yangtze region is of the favorable conditions for formation and accumulation of shale-gas and of good resource potential. The present study also suggests that the Ningguo area of Anhui Province and Chun'an-Tonglu area of Zhejiang Province are the two prospective areas for shale-gas exploration in the Lower Yangtze region.

**Key words:** Lower Yangtze region; shale gas; Hule Formation; Ningguo Formation; optimization of prospective areas