

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.012

安徽中南部大隆组沉积环境及油气潜力特征

阚天翔¹, 李龙明¹, 陈默¹, 蒋仁², 沈越峰¹, 韩旭¹

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要:晚二叠世下扬子地区沉积了一套以硅质岩、硅质页岩、碳质页岩为主的“黑色岩系”,其分布广泛,被认为具有良好的油气勘探开发前景。文章基于实测剖面 and 有机地化测试资料探究安徽中南部大隆组的沉积环境及油气潜力。结果表明:大隆组在巢南、安庆—铜陵、泾县、宁国等沉积凹陷周缘厚度可达40~70 m,并向南北两侧逐步减薄;大隆组表现为一套较为完整的海侵—海退沉积序列,早期形成深水盆地相沉积,晚期则转变为潜水陆棚相沉积,区域上自西北部至东南部依次为深水盆地相、浅水陆棚相和开阔碳酸盐岩台地相沉积组合。大隆组的总有机碳(total organic carbon, TOC)质量分数为1.46%~15.80%, R_o 值高于2.00%,属于优质烃源岩,热演化处于过成熟早期阶段,沉积凹陷边缘区是页岩气勘探重点调查对象。

关键词:下扬子地区;晚二叠世;大隆组;沉积环境;页岩气

中图分类号:P534.46;P586

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)07-0941-07

Sedimentary environment and hydrocarbon potential of Dalong Formation in central and southern Anhui Province

KAN Tianxiang¹, LI Longming¹, CHEN Mo¹, JIANG Ren², SHEN Yuefeng¹, HAN Xu¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

Abstract: A set of “black rock series” mainly composed of siliceous rocks, siliceous shales and carbonaceous shales was deposited in the Lower Yangtze region of the Late Permian, which is widely distributed and is considered to have a good prospect of hydrocarbon exploration and development. Based on measured profiles and organic geochemical data, this paper explores the sedimentary environment and hydrocarbon potential of Dalong Formation in central and southern Anhui Province. The results show that the thickness of the Dalong Formation can reach 40-70 m at the periphery of the Chaonan, Anqing-Tongling, Jingxian and Ningguo sedimentary depressions, and it gradually decreases to the north and south. The Dalong Formation is a relatively complete transgressive-regressive sedimentary sequence, which formed deep basin facies in the early period, and then transformed into submersible shelf facies in the late period. The region is successively composed of deep basin facies, shallow shelf facies and open carbonate platform facies sedimentary assemblages from northwest to southeast. The mass fraction of total organic carbon (TOC) of Dalong Formation is 1.46%-15.80%, and the R_o value is higher than 2.00%, which belongs to high-quality source rocks, and the thermal evolution is in the early stage of over-maturity. The marginal area of sedimentary depression is the key investigation object for shale gas exploration.

Key words: Lower Yangtze region; Late Permian; Dalong Formation; sedimentary environment; shale gas

收稿日期:2021-06-03;修回日期:2021-06-28

基金项目:中国地质调查局资助项目(DD20190043)

作者简介:阚天翔(1993—),男,安徽合肥人,合肥工业大学博士生;

李龙明(1979—),男,安徽天长人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: Longming-li@hfut.edu.cn.

0 引 言

页岩气是美国学者 Curtis 最早提出的一种赋存与页岩、泥岩及层状砂质和粉砂质地层中的非常规天然气^[1]。作为一种新型非常规油气资源,页岩气巨大的发展潜力已成为能源领域内一个重要组成部分。自 20 世纪美国页岩气的商业开发取得巨大成功以来,我国加大对页岩气的勘察和研究,在上扬子地区取得重大突破^[2-4],实现了商业化开发。相比之下,下扬子地区 and 上扬子地区虽属具有相似的发展演化历史和沉积层序,但因构造活动和改造作用较强,因此近十年来才逐渐开展对下扬子地区页岩气形成地质条件的相关研究^[5-9]。下扬子地区存在 3 套具有生烃潜力的有利勘探层位,为寒武系第一统荷塘组、下志留统高家边组和中上二叠统龙潭组及大隆组^[10-11]。通过对晚二叠世“黑色岩系”进行相关研究分析,结果表明,上二叠统大隆组层位稳定、沉积模式较为单一,此外组内“黑色岩系”段具有极高的有机

质含量,被认为是最具有油气潜力的目标层位^[5-9,11-12]。

本文通过对巢湖地区新发现的大隆组剖面进行研究,分析其岩性特征和沉积环境,对部分样品进行有机地球化学分析测试,结合安徽周边相关数据分析其展布特征,探讨大隆组的油气资源潜力。

1 区域地质概况

安徽中南部处于扬子板块东部,属于下扬子地区,区域位置如图 1 所示。其构造上位于大别—苏鲁造山带和江南造山带之间,是连接太平洋构造域和特提斯构造域的重要部分;西及西北侧以郯庐断裂为界与华北板块相邻,南及东南以江绍断裂为界与华夏板块相邻^[13-15]。其基底结构在北部为董岭式结晶片麻杂岩基底,南部为新元古代沉积地层形成的中、低变质基底^[15]。盖层发育良好、分布广泛,可分为震旦纪—晚三叠世的海相沉积盖层和侏罗纪以来的陆相沉积盖层。

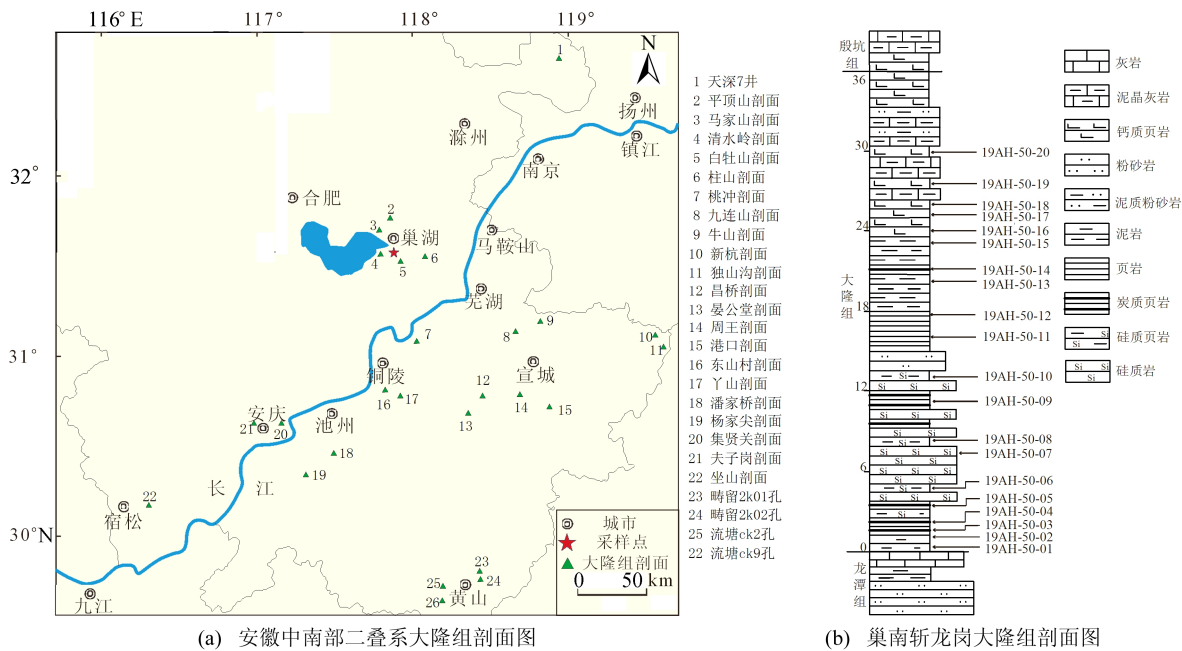


图 1 安徽中南部区域位置图与斩龙岗大隆组剖面图

二叠纪研究区属于下扬子拗陷盆地的一部分,构造活动频繁,海平面变化明显,但基本的大地构造轮廓并未改变,整体表现出 2 次大规模海侵和多次小规模海侵事件^[15-17]。中二叠世海侵开始,形成以栖霞组灰岩为主的碳酸盐岩台地相沉积,其中存在 2 次小规模海水加深,表现为栖霞组内存在的两层硅质层;之后孤峰期海侵扩大,在

下扬子地区形成广泛的硅质岩沉积;冷坞期—吴家坪期海平面有所下降形成了龙潭组含煤碎屑岩为主的浅海—三角洲相沉积,而因铜陵地区的相对隆起,形成了与龙潭组下部相当的武穴组碳酸盐岩台地沉积相;长长期下扬子地区又经历一次大规模海侵事件,形成以大隆组硅质岩、硅质泥岩为代表的深水沉积。而安徽东南地区因江南造山

带的出露并向北东方的延伸,狭条状的苏南海堤隆出水面,阻碍了海水在下扬子沿江浅海区与浙赣浅海区的循环,广德地区具有不同的岩石序列形成了以微、泥晶灰岩,条带状灰岩夹页岩为主的

长兴组碳酸盐岩沉积^[18]。

2 剖面特征和微观分析

龙岗剖面及样品微观照片如图 2 所示。

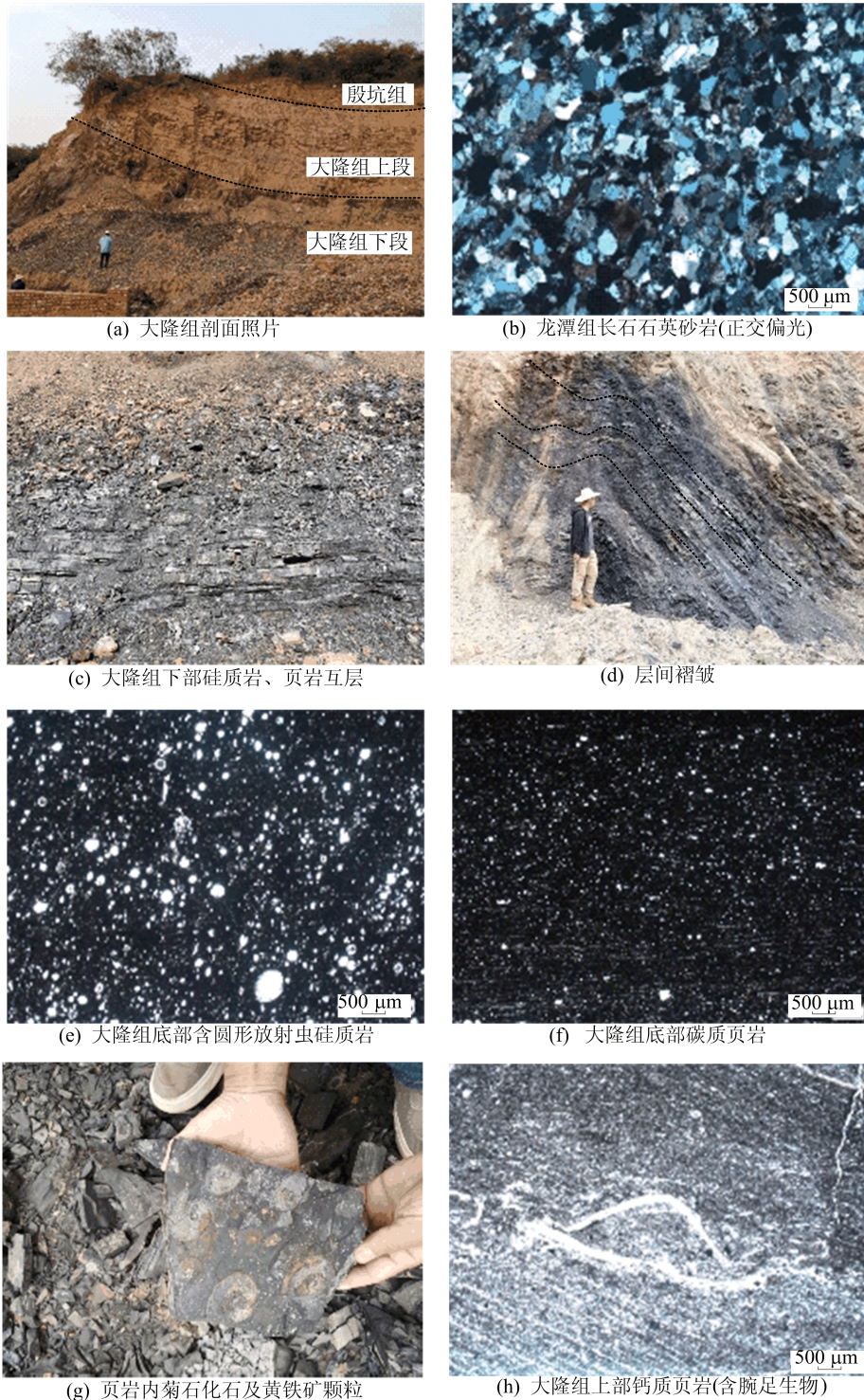


图 2 斩龙岗剖面及样品镜下照片

巢南斩龙岗大隆组剖面为人工开挖剖面,位于巢湖南部约 20 km 斩龙岗村附近,该剖面全长

约 60 m,厚度约 37 m,倾向 155°左右,倾角 32°~55°,由老至新依次出露为中一上二叠统龙潭组、

安徽中南部大隆组表现为一套较完整的海侵—海退的沉积旋回。长兴初期下扬子地区发生大规模的海侵,因地势起伏自西北部至东南部依次形成深水盆地相、浅水陆棚相和开阔碳酸盐岩台地相沉积组合,局部存在台地边缘斜坡相的过渡相区。

深水盆地相主要分布在江北巢湖—无为—安庆等地区,形成以硅质岩、硅质页岩和碳质页岩为主的岩石组合,但在不同地区形成的岩石组合有所差异。例如,巢湖斩龙岗与清水岭剖面大隆组底部为2~8 m的灰黑色薄层碳质泥岩,主体由互层的薄层硅质岩和硅质泥岩组成,含有大量的球状、椭球状放射虫;而沿江地区的铜陵杨桃山、安庆大青山剖面大隆组基本为中-薄层硅质岩夹薄层碳质页岩或硅质岩与碳质页岩互层,表明沿江地区存在明显的盆内凹陷区^[16]。浅海陆棚沉积主要分布在江南地区,牛山和昌桥地区大隆组底部都表现为以深黑色硅质、碳质泥岩为主,化石含量较低;中部转变为以薄层泥岩、硅质泥岩和钙质泥岩为主且夹少量薄层硅质的泥钙质沉积,其硅质岩占比明显下降^[6];宁国地区大隆组因受到明显的陆缘碎屑加入,形成以灰黑色粉砂质页岩为代表的泥砂质沉积。浅海碳酸盐岩台地相沉积主要分布在广德—浙西地区,主要形成微晶、泥晶灰岩,含燧石结核灰岩,燧石条带状灰岩等,反映出温暖开放的浅水沉积环境。

长兴晚期全区海平面下降,原先以硅质岩、硅质泥岩、页岩为主的岩石组合转变为以钙质泥岩、碳质页岩和碳酸盐岩的岩石组合,反映出水体变浅的过程。原先的北部巢湖和沿江大地区广泛发育的深水盆地相明显缩小,仅发育在盆地凹陷区域。皖南泾县—宁国地区所发育的浅水陆棚相也有所减小,靠近江南隆起的地区转变为台地前缘斜坡相。而安徽东南广德—黄山地区基本没有明显转变,仍为开阔碳酸盐岩台地相。

4 有机质质量分数及成熟度

有机质丰度是评价烃源岩质量分数的重要指标,一般用总有机碳(total organic carbon, TOC)质量分数作为评价烃源岩有机质质量分数。斩龙岗剖面大隆组地层 TOC 质量分数具有较宽的变化范围,结果见表1所列,20个样品数据分布在1.46%~15.80%之间,均值为8.56%;根据泥质岩类 TOC 质量分数评价标准(>2.00%),斩龙岗地区大隆组属于优质烃源岩类^[19]。

表1 斩龙岗大隆组 TOC 质量分数测试结果

序号	样品号	岩性	TOC 质量分数/%
1	19AH-50-20	钙质页岩	1.46
2	19AH-50-19	钙质页岩	2.65
3	19AH-50-18	钙质页岩	3.40
4	19AH-50-17	钙质页岩	4.43
5	19AH-50-16	钙质页岩	5.48
6	19AH-50-15	泥岩	3.53
7	19AH-50-14	炭质泥岩	15.46
8	19AH-50-13	泥岩	6.88
9	19AH-50-12	页岩	12.52
10	19AH-50-11	页岩	11.11
11	19AH-50-10	硅质泥岩	5.41
12	19AH-50-09	炭质泥岩	5.91
13	19AH-50-08	硅质泥岩	9.20
14	19AH-50-07	硅质岩	8.66
15	19AH-50-06	硅质泥岩	12.24
16	19AH-50-05	炭质泥岩	8.96
17	19AH-50-04	炭质泥岩	11.96
18	19AH-50-03	炭质泥岩	13.94
19	19AH-50-02	泥岩	12.37
20	19AH-50-01	泥岩	15.80

研究学者对安徽中南部大隆组进行的相关测试分析结果见表2所列,其结果表明大隆组平均 TOC 质量分数值变化很大,在0.20%~15.00%范围内,这可能是由于样品风化程度差异和采样层位差异引起的。

巢湖地区马家山大隆组的研究表明其 TOC 质量分数在5.51%~13.90%,均值9.54%^[7],巢湖地区平顶山大隆组在纵向上 TOC 质量分数变化极大,仅中下部硅质岩和硅质、碳质泥岩互层段具有较高的 TOC 质量分数,可达8.00%以上,而钙质泥岩、泥灰岩段 TOC 质量分数明显下降^[20-21];沿江无为地区大隆组 TOC 质量分数较高,如徽页1井和芜湖地区大隆组 TOC 质量分数在分别为2.10%~8.60%(均值为5.47%)和3.78%~7.76%之间^[23-24];皖南泾县地区(昌桥和蔡村剖面)大隆组的有机质含相对于巢湖地区较低,TOC 质量分数为0.03%~11.12%平均值在3.20%左右^[5],与之相似的宁国地区港地1井大隆组 TOC 平均质量分数为2.25%~2.50%^[7]。

虽然泾县—宁国地区沉积了较厚的“黑色岩系”沉积,但其 TOC 质量分数较沿江和巢湖地区较低^[6-9,20-25]。这种差异可能是由于沉积环境或碎屑物质输入的不同而导致的。

V 与(V+Ni)质量分数比值可以作为判断古环境氧化还原的指标,文献^[26]表明巢湖地区(0.67~0.91,平均0.79)与泾县地区(0.61~0.95,平均0.76)具有相似的比值,显示出安徽中南部在

长长期都处于水体分层不强的还原环境。因此 TOC 质量分数的差异可能是由于泾县—宁国地区

更靠近江南隆起,较多的陆缘碎屑物质输入稀释了有机质质量分数。

表 2 安徽中南部大隆组油气特征

地区	地点	TOC 质量分数/%		R_o /%	数据来源	
		范围	均值			
巢湖地区	斩龙岗	1.46~15.80	8.56	2.66~3.08	本文	
	平顶山	0.26~5.49	1.92		文献[20]	
	马家山	5.51~13.90	9.54		1.47~1.48	文献[7]
沿江地区	徽页 1 井	2.10~8.60	5.47	1.68~1.98	文献[23]	
	昌参 1 井	0.44~8.19	3.93		文献[22]	
	芜湖	1.19~12.80	7.76		2.32~2.36	文献[24]
	牛山	0.04~10.90	2.06		3.17	文献[6]
皖南地区	皖南地区	0.70~9.83	3.11	1.22~3.00	文献[9]	
	昌桥	2.05~11.20	5.70		>2.00	文献[7]
	昌桥	0.03~9.17	1.67		2.30~2.77	文献[6]
	蔡村	0.18~11.12	3.00		1.48~1.65	文献[6]
	港地	0.98~5.48	2.27		0.97~1.06	文献[8]
	泾页 1 井	0.20~0.22	0.21		1.22~1.67	文献[25]

有机质成熟度是有机质向油气转化的热演化程度的重要指标,一般用镜质体反射率 R_o 反映热演化程度。一般认为 R_o 低于 0.50% 的烃源岩处于未成熟阶段,当 R_o 在 0.50%~1.30% 时,烃源岩被认为处于成熟阶段,开始生成石油和湿气、凝析油,而 R_o 高于 2.00% 时处于过成熟阶段^[19]。本文研究测试结果表明,巢南地区大隆组有机质热演化成熟度明显地表现出高值,处于 2.66%~3.08% 之间,均值为 2.87%,与已报道的安徽中南部大隆组有机质热演化成熟度^[6,7,19,24-25] (2.20%~3.17%) 基本一致。然而中生代以来沿江地区产生了大量的岩浆事件,并形成庐枞、繁昌、宁芜等火山岩盆地,明显控制了古生代地层中有机质热演化程度。文献[5-9]所测 R_o 数据表现出以庐枞盆地和繁昌盆地为中心形成 2 个过成熟区并向两侧递减。

综合来看,安徽中南部大隆组有机碳质量分数纵向变化较大,中下部硅质岩、炭质页岩、硅质页岩段 TOC 质量分数明显高于上部钙质泥岩、页岩段。其次,巢湖至沿江地区大隆组有机碳质量分数较泾县—宁国地区相对较偏高,宁国、泾县等地受陆缘碎屑物质的输入降低了整体 TOC 质量分数。另外,虽然沿江地区火山岩盆地周边具有极高的 R_o 值,不利于油气演化,但江北无为—巢湖地区和江南泾县—宁国地区二叠纪页岩平均 R_o 多介于 1.50%~2.80%,而盆地凹陷中心区域则拥有更低的 R_o 值(0.80%~1.20%),表明

这些地区仍有较好的页岩气潜力。

5 结 论

安徽中南部大隆组分布广泛,沉积稳定,为一套较为完整的海进—海退沉积序列,在巢湖、安庆池州、泾县、宁国等沉积凹陷区沉积较厚。早期为深水盆地相的硅质岩、炭质、硅质页岩沉积,晚期则转变为浅水陆棚相钙质、硅质页岩夹泥晶灰岩沉积。有机地化测试表明:大隆组中下部有机碳质量分数较高为优质的烃源岩层,处于过成熟早期阶段;泾县—宁国地区大隆组有机碳质量分数较沿江和巢湖地区低,可能受控于陆缘碎屑物质输入。

[参 考 文 献]

- [1] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] LI P, JIANG Z, ZHENG M, et al. Estimation of shale gas adsorption capacity of the Longmaxi Formation in the Upper Yangtze Platform, China [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 34: 1034-1043.
- [3] YAN J F, MEN Y P, SUN Y Y, et al. Geochemical and geological characteristics of the Lower Cambrian shales in the middle-upper Yangtze area of South China and their implication for the shale gas exploration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70: 1-13.
- [4] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.

- [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(增刊1):337-343.
- [6] 廖志伟,胡文瑄,曹剑,等. 下扬子皖南大隆组黑色岩系发育特征及油气资源潜力初探[J]. 高校地质学报,2016,22(1):138-151.
- [7] 陈平,张敏强,许永哲,等. 下扬子巢湖泾县地区上二叠统大隆组泥页岩储层特征[J]. 岩石学报,2013,29(8):2925-2935.
- [8] 侯阳红. 下扬子皖南地区上二叠统页岩沉积环境及储层特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2020.
- [9] 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.
- [10] 梁狄刚,陈建平. 中国南方高过成熟区海相烃源岩的油源对比问题[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):8-14.
- [11] 吴浩,姚素平,焦堃,等. 下扬子区上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J]. 煤炭学报,2013,38(5):870-876.
- [12] 刘章平,许卫,王俊涛,等. 下扬子地区早寒武系成气地质条件分析[J]. 安徽地质,2015,25(2):111-118.
- [13] 徐曦,朱晓颖,单希鹏,等. 下扬子区中生代沿江盆地群的盆地结构与沉积特征[J]. 石油实验地质,2018,40(3):5-16.
- [14] 朱光,刘国生,李双应,等. 下扬子地区盆地的“四层楼”结构及其动力学机制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2000,23(1):47-52.
- [15] 周存亭,杜建国,许卫,等. 安徽省大地构造相与成矿地质背景研究[M]. 北京:中国地质大学出版社,2017:23-88.
- [16] 安徽省地质矿产局. 安徽省地质志:二叠纪分册[M]. 合肥:安徽科学技术出版社,1989:4-188.
- [17] 许卫. 安徽下扬子地区二叠纪锰矿的成矿成矿地质地球化学[D]. 合肥:合肥工业大学,2004.
- [18] 朱洪发,秦德余,陈跃,等. 苏浙皖交界二叠系沉积演化及构造背景[J]. 石油实验地质,1993,15(3):252-261.
- [19] 石油勘探开发科学研究院地质研究所. 中国陆相油气生成[M]. 北京:石油工业出版社,1982:175-193.
- [20] 雷勇,冯庆来,桂碧雯. 安徽巢湖平山顶山剖面上二叠统大隆组有机质富集的地球生物学模式[J]. 古地理学报,2010,12(2):202-211.
- [21] 李飞史,海英,笱灵,等. 安徽南陵一无为地区二叠系烃源岩有机地球化学特征[J]. 地质学刊,2013,37(1):31-40.
- [22] 曹涛涛,宋之光,王思波,等. 下扬子地台二叠系页岩储集物性特征及控制因素[J]. 天然气地球科学,2015,26(2):341-351.
- [23] 韩京,陈波,赵幸滨,等. 下扬子地区二叠系页岩有机质孔隙发育特征及其影响因素[J]. 天然气工业,2017,37(10):17-26.
- [24] 潘磊,陈桂华,徐强,等. 下扬子地区二叠系富有机质泥页岩孔隙结构特征[J]. 煤炭学报,2013,38(5):787-793.
- [25] 李琪琪,徐尚,陈科,等. 下扬子地区上二叠统页岩气成藏条件分析[J]. 中国地质,2022,49(2):383-397.
- [26] 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业,2009,29(5):27-32,135-136.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 940 页)

- [17] 宋国学,秦克章,李光明. 长江中下游池州地区矽卡岩-斑岩型 W-Mo 矿床流体包裹体与 H, O, S 同位素研究[J]. 岩石学报,2010,26(9):2768-2782.
- [18] 李德忍. 黄铁矿中金赋存状态的电子探针研究和超微粒金的发现[J]. 矿物学报,1992,12(3):284-288.
- [19] JOHAN Z. Arsenopyrite aurifere: mode de substitution de Au dans la structure de Fe As S[J]. Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences,1989,308:185-191.
- [20] SCS A, LQY A, LIANG Z A, et al. In-situ trace elements on pyrite and arsenopyrite of the Zhengchong gold deposit, Jiangnan Orogen: insights for the mineralization mechanism[J]. Ore Geology Reviews,2020,122:103486.
- [21] CHEN J H, LI Y Q, ZHONG S P, et al. DFT simulation of the occurrences and correlation of gold and arsenic in pyrite[J]. American Mineralogist,2013,98(10):1765-1771.
- [22] 王玉明,季寿元,陈克荣. 次显微金在黄铁矿和毒砂中的赋存状态新探讨[J]. 矿物学报,1994,14(1):83-87.
- [23] RL A, XW A, LY B, et al. The characteristic of micro-structural deformation of gold bearing pyrite in Jiaodong: The links between nanoscale gold enrichment and crystal distortion[J]. Ore Geology Reviews,2020,122:103495.
- [24] KUSEBAUCH C, GLEESON S A, OELZE M. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits[J]. Science Advances,2019,5(5):1-8.
- [25] DEDITIUS A P, UTSUNOMIYA S, RENOCK D, et al. A proposed new type of arsenian pyrite: composition, nano-structure and geological significance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2008,72(12):2919-2933.
- [26] 杨治,邓宇峰,袁峰,等. 西准噶尔地区阔尔真阔腊金矿床金的赋存状态研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(9):1258-1263.
- [27] DEDITIUS A P, REICH M, KESLER S E, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,2014,140:644-670.
- [28] LI W, COOK N J, XIE G Q, et al. Textures and trace element signatures of pyrite and arsenopyrite from the Gutaishan Au-Sb deposit, South China[J]. Mineralium Deposita,2019,54:591-610.
- [29] 高振敏,杨竹森,李红阳,等. 黄铁矿载金的原因和特征[J]. 高校地质学报,2000,6(2):156-162.

(责任编辑 吴亮)