

doi: 10.12029/gc20200112

方朝刚, 黄正清, 滕龙, 徐菲菲, 周道容, 殷启春, 邵威, 石刚. 2020. 下扬子地区晚奥陶世凯迪期—早志留世鲁丹期岩相古地理及其油气地质意义[J]. 中国地质, 47(1): 144–160.

Fang Chaogang, Huang Zhengqing, Teng Long, Xu Feifei, Zhou Daorong, Yin Qichun, Shao Wei, Shi Gang. 2020. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Kaitian Stage—the early Silurian Rhuddanian Stage in Lower Yangtze region and its petroleum geological significance[J]. Geology in China, 47(1):144–160(in Chinese with English abstract).

## 下扬子地区晚奥陶世凯迪期—早志留世鲁丹期岩相古地理及其油气地质意义

方朝刚<sup>1</sup>, 黄正清<sup>1</sup>, 滕龙<sup>1</sup>, 徐菲菲<sup>2</sup>, 周道容<sup>1</sup>, 殷启春<sup>1</sup>, 邵威<sup>1</sup>, 石刚<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590)

**摘要:**下扬子地区奥陶—志留纪之交岩相分异明显,发育了多种类型的岩石地层单位,其沉积岩的颜色、岩性、厚度、赋存化石组合等方面存在显著的差别。笔者通过对研究区内野外露头及钻井剖面的考察,总结前人研究成果,利用岩石学、古生物学、生态学及室内分析方法将其划分为滨岸相、孤立台地相、浅海陆棚相、陆棚坡折相、欠补偿盆地相和盆地浊积岩相6种沉积相类型。岩相古地理研究表明,晚奥陶世凯迪晚期,受加里东构造运动影响,华南板内碰撞挤压作用显著,“江南古陆”不断抬升和扩张,直接导致了旧的“台—坡—盆”格局的消失和新的古地理格局的形成,之前发育的自西北向东南方向水体变深的古地理格局彻底转变为北西、南西、南东三面被古陆包围,向东北方向水体加深的古地理格局。晚奥陶世赫南特期,由于南极冰盖凝聚导致的全球海平面下降和气候变冷,扬子地台海域变浅,致使海底盆地上升到最低含氧深度面之上处于充氧水层中,富氧环境代替了缺氧环境,岩相由五峰组黑色页岩转变为更浅水的观音桥层泥灰岩或新开岭层泥岩;江南沉积区长坞组—于潜组的复理石沉积组合转变为更浅水的文昌组—堰口组近磨拉石沉积组合。早志留世鲁丹期,随着全球海平面重新上升,隆起面积继续扩大,构造围限作用加剧,黑色页岩重新出现。尤其是安徽南部的安庆—铜陵—巢湖一线,江苏中部的南京—句容—五峰组—高家边组底部的黑色硅质页岩和炭质页岩,笔石带与中上扬子的五峰—龙马溪组具有很好的一致性,厚度均在40~60 m,TOC含量1.2%~4%,具很好的生烃潜力,应视为为下一步烃源岩及页岩气勘探开发的重点研究区域。

**关键词:**油气地质;晚奥陶世凯迪期;早志留世鲁丹期;岩相古地理;油气勘查工程;下扬子地区

中图分类号:P531 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)01-0144-17

### Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Kaitian Stage—the early Silurian Rhuddanian Stage in Lower Yangtze region and its petroleum geological significance

FANG Chaogang<sup>1</sup>, HUANG Zhengqing<sup>1</sup>, TENG Long<sup>1</sup>, XU Feifei<sup>2</sup>,  
ZHOU Daorong<sup>1</sup>, YIN Qichun<sup>1</sup>, SHAO Wei<sup>1</sup>, SHI Gang<sup>1</sup>

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Shandong University of Science and Technology,

收稿日期:2018-06-19;改回日期:2019-12-10

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160180,DD20190083)和国家科技攻关项目(2016ZX05034-001-003)联合资助。

作者简介:方朝刚,男,1987年生,硕士,工程师,主要从事沉积学与岩相古地理科研工作;E-mail:fangchaogang206@163.com。

通讯作者:黄正清,男,1965年生,硕士,高级工程师,主要从事页岩气基础地质调查与研究;E-mail:rssfj@126.com。

*Qingdao 266590, Shandong, China)*

**Abstract:** The lithofacies differentiation of the Ordovician–Silurian deposits in the Lower Yangtze region is obvious, with the development of many types of lithostratigraphic units. There are significant differences in color, lithology, thickness and occurrence of fossil assemblages of the sedimentary rocks. Based on the investigation of outcrops and drilling profiles in the study area, the authors summarized the achievements of previous researches and used the methods of petrology, paleontology, ecology and indoor analysis to divide the lithofacies into six sedimentary facies, i.e., coastal facies, isolated platform facies, shallow continental shelf facies, shelf break facies, under-compensated basin facies and turbidite basin facies. The lithofacies palaeogeography research shows that, in the Late Ordovician Kaidi period, due to the Caledonian tectonic movement, the collision and extrusion of the South China Plate were significant. The "Southern Yangtze Plateau" continued to rise and expand, which led directly to the disappearance of the old "platform–slope–basin" pattern and the formation of a new paleogeographic pattern, i.e., the paleogeographical pattern in which the water body which had been developed from the northwest to the southeast was completely transformed into the pattern that the all three sides of northwest, southwest and southeast directions were surrounded by the ancient land and got deepened toward the northeast in paleogeography. During the Late Ordovician Hernannian period, due to the declining of the global sea level and the climatic cooling caused by the Antarctic ice sheet condensation, the sea surface of the Yangtze platform got shallower so that the submarine basin rose above the lowest oxygen-containing depth in the oxygenated water layer, and the oxygen-rich environment replaced the anoxic environment. The Changwu–Yuqian Formation dolomitic sedimentary assemblage in the Jiangnan sedimentary area was transformed into shallower Wenchang Formation – Yankou Formation close to molasse combination. In the early Silurian period, with the rising of global sea level, the uplifted area continued to expand, the tectonic confinement effect was intensified and the black shale reappeared. Especially along the Anqing–Tongling–Chaohu line in the south of Anhui Province, the Wufeng Formation of Nanjing–Jurongin area in the middle part of Jiangsu and the black siliceous shale and carbonaceous shale at the bottom of Gaojiabian Formation, the Longmaxi Formation has good consistency with thickness of 40–60 m and TOC content of 1.2%–4%. These areas have good potential for hydrocarbon generation and should be regarded as the key research areas for the exploration of source rock and shale gas in further exploration.

**Key words:** petroleum geology; Late Ordovician Kaitian Stage; Early Silurian Rhuddanian Stage; lithofacies palaeogeography; oil–gas exploration engineering; Lower Yangtze region

**About the first author:** FANG Chaogang, male, born in 1987, engineer, mainly engages in sedimentology and paleogeography research work; E-mail: fangchaogang206@163.com.

**About the corresponding author:** HUANG Zhengqing, male, senior engineer, born in 1965, mainly engages in shale gas basic geological survey and research; E-mail: rssfj@126.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160180, DD20190083) and National science and technology Project (No. 2016zx05034–001–003).

## 1 引 言

奥陶—志留纪之交是地质历史时期上一个重要转换阶段,伴随着奥陶纪末生物大灭绝(end-Ordovician Mass Extinction)和冈瓦纳大陆冰川凝聚造成的全球海平面变化等一系列生物事件和地质事件(Sheehan, 2001)。华南地区在这一关键历史时期有着丰富的物质记载,整个地区构造格局的转变与早古生代构造运动的发生具有很好的耦合性(牟传龙等, 2014)。该时期又是主力烃源岩发育的重要

时期(陈洪德等, 2007;李双建等, 2008),奥陶—志留纪之交发育的五峰组—龙马溪组黑色页岩已经成为中国高产页岩工业气流的主力层位(郭彤楼等, 2014;王志刚, 2015)。因此华南地区在这一重要构造和沉积转换时段的古地理格局是黑色页岩赋存的重要环境背景和控制因素。前人对于中国南方凯迪晚期—鲁丹期沉积相及古地理研究多集中在中上扬子区(王鸿祯, 1985;周名魁等, 1993;刘宝珺等, 1993, 1994;许效松等, 1996;冯增昭等, 2001, 2004;陈洪德等, 2007; Fan and Chen, 2007;刘

运黎等,2009;周小进等,2009),对于下扬子地区该时期构造沉积格局的研究则显得相对薄弱(黄志诚等,1991;周名魁等,1993;赖才根等,1993;吴浩若,2005;戎嘉余等,2010;陈清,2014)。随着下扬子地区页岩气勘探的不断深入,皖含地1井、苏页1井和汤地1井等一批志留系页岩气钻孔的部署和实施,揭示的黑色富有机质页岩为下扬子地区开展凯迪晚期—鲁丹期古地理研究提供了丰富的素材。笔者在前人资料的基础上,以“构造控盆、盆地控相、相控油气基本地质条件”理论为指导,综合沉积学、构造学、岩石学和古生物学等古地理学资料,在研究下扬子地区凯迪晚期—鲁丹期沉积相及古地理的同时,尝试从沉积相及古地理的角度,探讨该区的油气基本地质条件。

## 2 区域地质背景

本文所涉及的下扬子地区是一个宽泛的概念,

包括江苏、安徽、浙江、江西、上海四省一市及南黄海海域的部分区域。其NW以郯庐断裂与苏鲁造山带及华北板块为界,SW以团风—麻城断裂与中扬子地块为界,SE以江绍断裂与华夏古陆为界(郭念发,1996),向东直抵江苏、浙江和上海的东部沿海(图1)。

下扬子地区基底具有双层构造,基底时代处于前震旦纪。晋宁运动后,下扬子区进入稳定的地台型海相沉积阶段,接受了厚达10000余米的海相沉积。上震旦统属于晋宁事件之后下扬子区发育的第一世代盆地,具有两台两盆的沉积格局,发育了局限台地—台地边缘浅滩—台地前缘斜坡—盆地相较为完整的沉积相带(王改卫,2009);下寒武统—上志留统属于第二世代盆地,早寒武世处于最大海侵期,沉积相主要以台地前缘斜坡—盆地相为主;中寒武世出现明显海退,局部可见蒸发台地相膏质白云岩;晚寒武世再次海侵,陆棚和斜坡相范围再

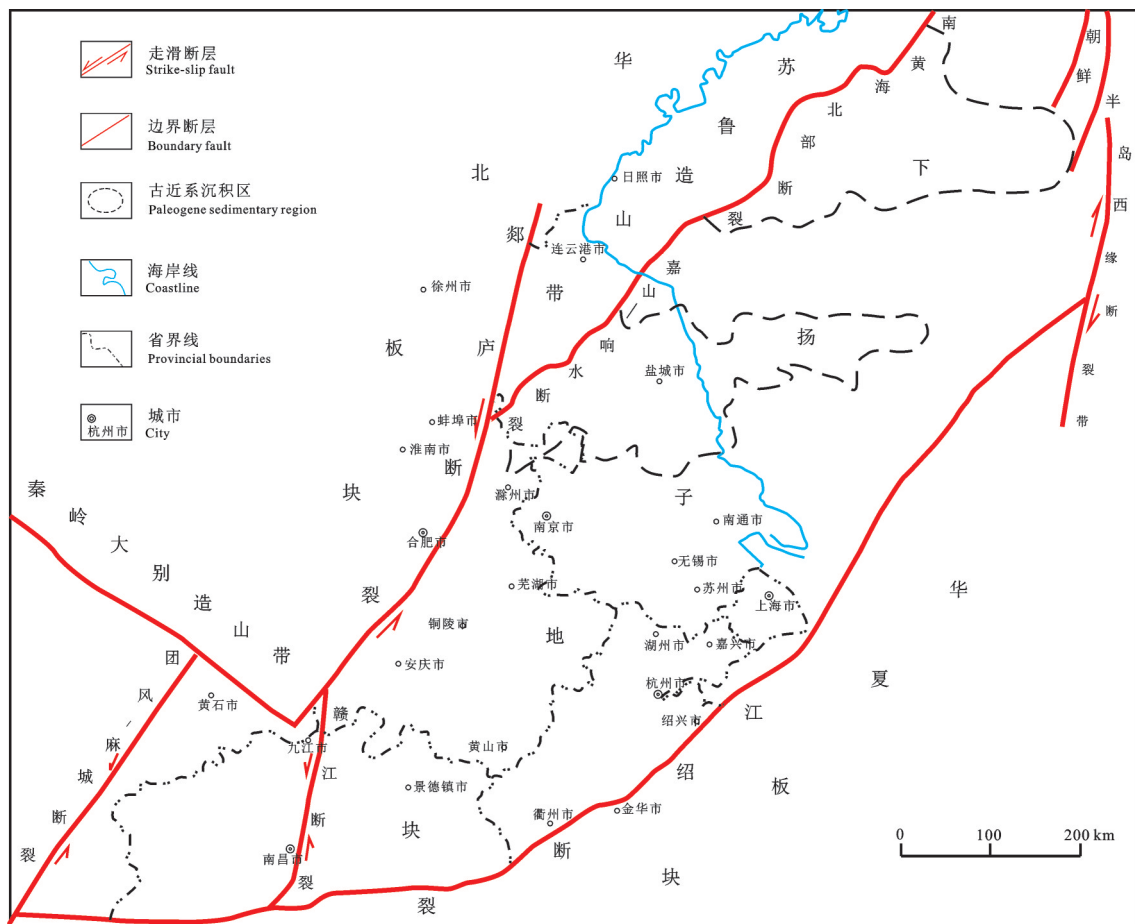


图1 下扬子及邻区构造单元分区图(据梁兵等,2013 略有修改)

Fig.1 Division of structural units of lower Yangtze and adjacent areas (modified from Liang Bing et al., 2013)

次扩大(夏军,1995;吴跃东,2001,2003;路琳琳等,2013;张汉金等,2014);早奥陶世,沉积水体略有加深,发育台地-陆棚相沉积,中晚奥陶世末期伴随着加里东运动的发生,扬子板块和华夏板块挤压碰撞作用加剧,华夏古陆呈现继续隆升、强力的西张态势。它的隆升导致扬子板块边缘出现挠曲,使得研究区在晚奥陶世—早志留世成为前陆盆地(岳文浙等,1990;赖才根等,1993;吴跃东,2002;吴浩若,2005;李海滨,2013),沉积类型受前陆盆地控制,出现明显分异,大致以江南断裂为界,江南沉积区由斜坡碳酸盐岩转变为浅水-深水浊积岩,而扬子沉积区发育大面积黑色笔石页岩。

### 3 地层划分对比

下扬子区奥陶—志留纪之交地层发育良好,类型丰富,分布广泛,根据其地层分布情况和沉积岩性特点,结合大地构造位置,划分为下扬子地层区和江南地层区。笔者根据全球最新的奥陶系三统七阶和志留系四统七阶的划分方案,以标志性的生物带为划分依据,结合研究区地层的沉积特征演化序列,建立了下扬子地区上奥陶统一志留统的划分对比格架(图2)。

下扬子地层区凯迪晚期—鲁丹期发育五峰组、观音桥层、新开岭层、龙马溪组、高家边组和梨树窝

组。五峰组以黑色硅质页岩为主,夹粉砂质页岩或泥岩,厚度多小于10 m,富含笔石,多样性高、丰度大、分布范围广,基本覆盖整个下扬子地层区,底界基本等时,但顶界呈现明显的穿时性;观音桥层或新开岭层,以炭质泥岩或钙质泥岩为主,主要出现在湖北崇阳、通山以及东部的安徽泾县、繁昌地区和江苏宁镇地区,产三叶虫、腕足类、笔石及腹足类等壳相层,底界和顶界都具有明显的穿时性;龙马溪组或高家边组底部(大致相当于鲁丹阶)发育一套黑色炭质页岩、硅质页岩和粉砂质页岩,基本覆盖整个下扬子地层区,生物种类以笔石类为主,腕足类和三叶虫等壳相化石混生;梨树窝组分布较为局限,主要出现在江西九江、德安地区,以及湖北的黄石、瑞昌地区,底部(大致相当于鲁丹阶)岩性以灰绿色页岩、粉砂质页岩为主,生物种类以笔石为主,较为单一,与高家边组时代大致相当。

江南地层区凯迪阶中晚期皖南—浙西北地区发育一套巨厚的复理石沉积或浊流沉积,包括长坞组、于潜组和新岭组,厚度远超五峰组;浙江东南部三山地区发育三衢山组,岩性为一套巨厚的浅海碳酸盐岩组合;二者之间发育下镇组,岩石类型为碳酸盐岩与碎屑岩交互,处于过渡带,分布较为局限。赫南特阶中晚期该区发育一套巨厚的、近陆源碎屑岩为主的地层组合,包括红家坞组、文昌组和

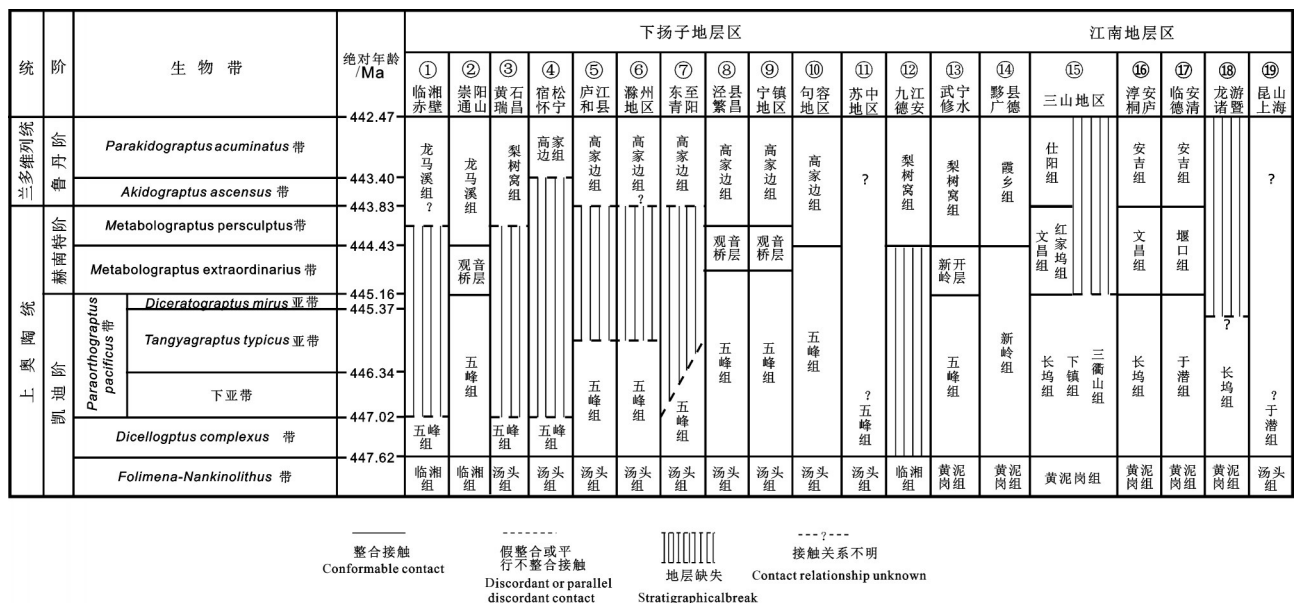


图2 下扬子地区奥陶—志留纪之交划分及其对比(据陈旭等,2007,有改动)  
Fig.2 Division and correlation of Lower Ordovician-Silurian strata (after Chen Xu et al., 2007)



堰口组。赫南特阶末期—鲁丹阶,浙西北—皖南地区仍发育一套数百米厚的复理石沉积,包括安吉组、霞乡组,岩性以青灰色粉砂岩、灰绿色细砂岩夹黑色页岩为主,生物多以笔石为主;浙东南地区发育仕阳组,一套近陆源碎屑为主的地层组合,生物组合为腕足与壳相生物混生。

## 4 沉积相类型及特征

本文依据近两年来实施的志留系页岩气钻孔(如皖舍地1井、苏页1井等)和安徽省地层志奥陶系分册和志留系分册、浙江省岩石地层、江西省岩石地层等资料的近80个剖面 and 钻孔的资料和数据,在对岩石特征、古生物小层对比、古生态环境、沉积构造和层序地层等系统分析的基础上,开展下扬子地区晚奥陶世凯迪晚期—早志留世鲁丹期沉积相研究,该区发育碎屑岩和碳酸盐岩2种海洋沉积体系类型,前者包括滨岸相、浅海陆棚相、陆棚坡折相、欠补偿盆地相和盆地浊积岩相,后者发育孤立台地相,各沉积相特征见表1。

### 4.1 碎屑岩海洋沉积体系

#### 4.1.1 滨岸相

根据岩性的差异,可进一步划分为后滨、前滨和近滨3种亚相类型。

(1) 后滨:岩性主要为粉砂质泥岩,尤以紫红色最为醒目(图3a),反映炎热强氧化环境,岩层层理基本不发育,沉积物来源充足,较低能环境下的悬浮沉积,沉积于红家坞组的下部和中部。

(2) 前滨:岩性为浅灰色细砂岩,沉积构造除了发育水平层理、板状交错层理和波痕外,还发育羽状交错层理,有时在岩层底部可见泥砾,为前滨较高能冲浪侵蚀和加积作用沉积,主要发育于红家坞组(图3a)、文昌组和仕阳组的中上部。

(3) 近滨:岩性以浅灰—青灰色细砂岩夹粉砂岩、泥质粉砂岩,分选好,发育低角度斜层理、砂纹层理和浪成波痕,产大量的苔藓、腹足、腕足和三叶虫等化石(罗璋等,1982;刘晓等,2012),沉积于红家坞组顶部(图3a)、文昌组下部和仕阳组的下部。

#### 4.1.2 浅海陆棚相

表1 下扬子地区奥陶—志留纪之交沉积相类型与特征

Table 1 Sedimentary facies types and characteristics of the Ordovician–Silurian strata in the Lower Yangtze region

沉积体系	沉积相	亚相(微相)	基本特征与定相标准	主要层位	
碎屑岩海洋沉积体系	滨岸相	后滨	紫红色和灰绿色粉砂质泥岩互层,岩层层理不发育	红家坞组	
		前滨	浅灰色细砂岩,发育水平层理、板状交错层理、羽状交错层理、波痕,岩层底部可见泥砾	红家坞组,仕阳组,文昌组	
		临滨	浅灰—青灰色细砂岩夹粉砂岩、泥质粉砂岩,发育低角度斜层理、砂纹层理	红家坞组,仕阳组,堰口组	
	浅海陆棚	浅水	灰质条带,粉砂质组分;风暴沉积物;TOC值相对较低	长坞组,下镇组,安吉组,文昌组,堰口组,新开岭层	
		深水	水平层理、黄铁矿纹层;TOC值高,轻微污手,页岩中夹粉砂质条带,笔石丰度高	龙马溪组,高家边组,梨树窝组	
	陆棚坡折相		灰色砂质岩与泥质岩韵律互层,具鲍马序列、印模和滑塌构造	长坞组,于潜组,霞乡组,新岭组,安吉组	
	欠补偿盆地相		水平层理、黄铁矿纹层;TOC值高;硅质含量较高,生物以漂浮的笔石动物群和浮游放射虫为主,丰度高,沉积物岩石呈灰黑—黑色	五峰组	
	盆地浊积岩相		鲍马序列,韵律层特别发育,见沟模、槽模、重荷模、火焰状构造和包卷层理等沉积构造	于潜组	
	碳酸盐岩海洋沉积体系	开阔台地	生物礁	生屑、藻屑及其他粒屑亮晶灰岩	
			生物丘	障积结构/骨架结构	
孤立台地相		生物丘	块状、地形上具隆起特点、生物屑以底栖生物为主	三衢山组	
		台缘斜坡相	低能环境,灰泥为主,不规则条带状,见斜层理及大型滑动褶皱,夹数层砾屑灰岩		

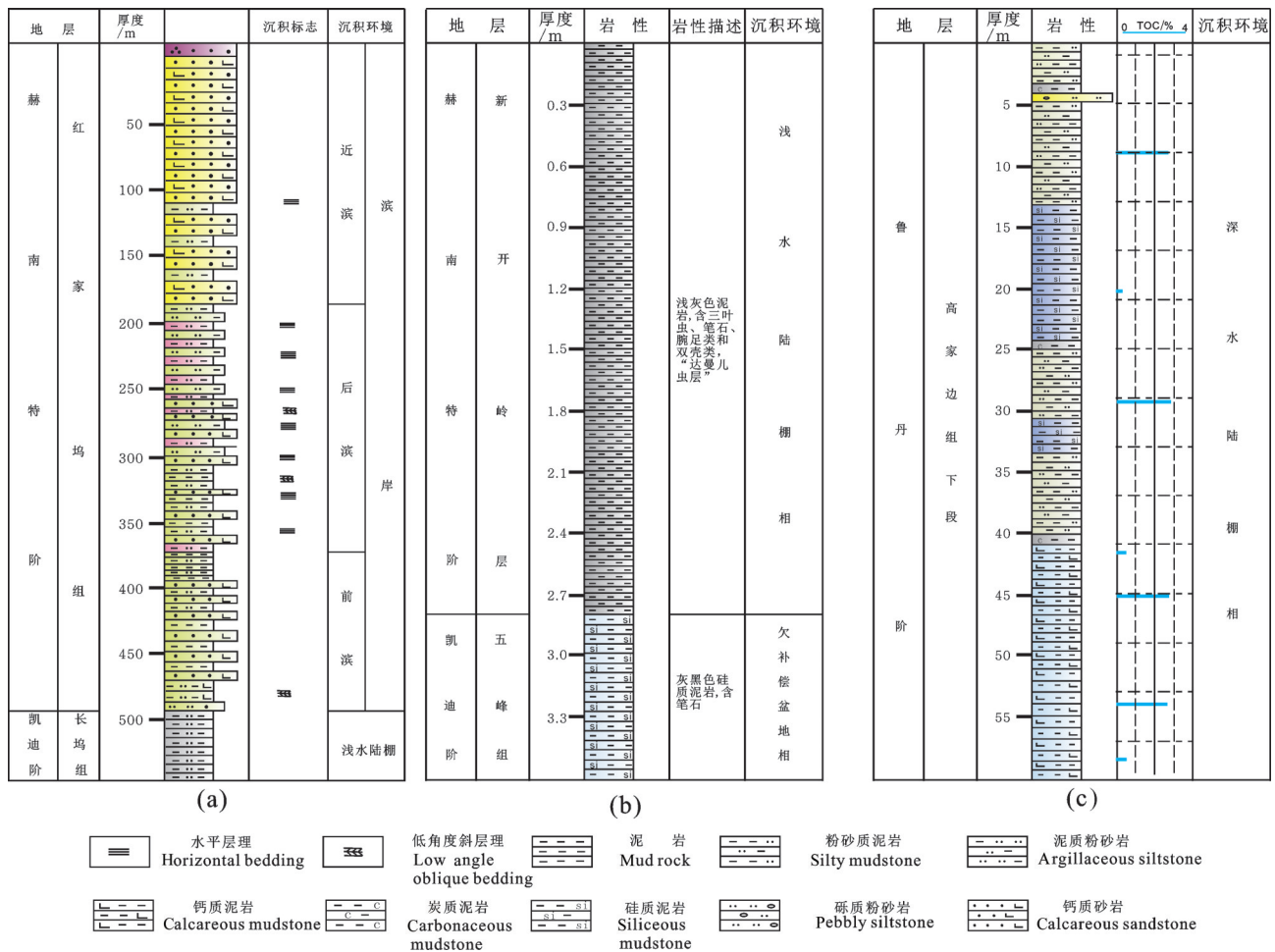


图3 下扬子地区滨岸相—浅海陆棚相典型剖面沉积序列  
 a—浙江省江山市红家坞组滨岸相沉积序列(鲁丹阶); b—安徽省泾县云岭脚水库剖面新开岭层浅水陆棚沉积序列(赫南特阶);  
 c—江苏省南京市汤3井高家边组下段深水陆棚沉积序列(鲁丹阶)

Fig. 3 Sedimentary sequence of littoral facies shallow sea shelf facies typical section in lower Yangtze area  
 a—Shore-shore sedimentary sequence of Hongjiawu Formation, Jiangshan City, Zhejiang Province (Rudan Stage); b—Shallow-water shelf  
 sedimentary sequence of Xinkailing strata in Yunlingjiao reservoir section, Yingxian County, Anhui Province (Hirnantian Stage);  
 c—The lower segment of Gaojiabian Formation in well Tang 3, Nanjing City, Jiangsu Province (Rudan Stage)

依据沉积物的沉积构造、有机质含量和生物分布以及赋存形态,可进一步划分为浅水陆棚和深水陆棚2种亚相类型。

(1) 浅水陆棚:以灰绿色泥岩、含粉砂泥岩、泥质粉砂岩或砂岩与泥岩频繁互层为主,具类复理石特征,沉积厚度大,其中安吉组发育风暴组构(蔡进功等,1990;梁鼎新等,1992;赖才根等,1993;詹仁斌等,1994;何幼斌等,1999;范代读等,2003;戎嘉余等,2010;刘晓等,2012;汪隆武等,2016)。主要发育在凯迪晚期—赫南特期—鲁丹期的下镇组、文昌组、堰口组、长坞组、新开岭层(图3b)和安吉组,构造位置位于临安—马金同生断裂以东。

(2) 深水陆棚:位于陆棚外缘比较低洼的海域,海水深度一般在100~200 m,位于风暴浪基面之下,常处于半停滞的弱还原环境。沉积物主要为灰黑色薄—中层状粉砂质页岩、页岩组成,局部富有机质(或为炭质页岩)(图4a、b)和薄层状粉砂质条带(图4c、d),沉积物厚度几米至几十米。层理以微波状层理、微水平层理发育为特征,局部可见透镜状层理或小型韵律层,生物群以半浮游和漂浮习性的笔石动物为主,伴随有三叶虫和腕足类壳相动物混生的特征,见于湖北临湘—赤壁的龙马溪组、江西武宁—修水的新开岭层,皖南石台—泾县同生断裂以北到宁镇地区的高家边组底部(图3c)(齐敦伦

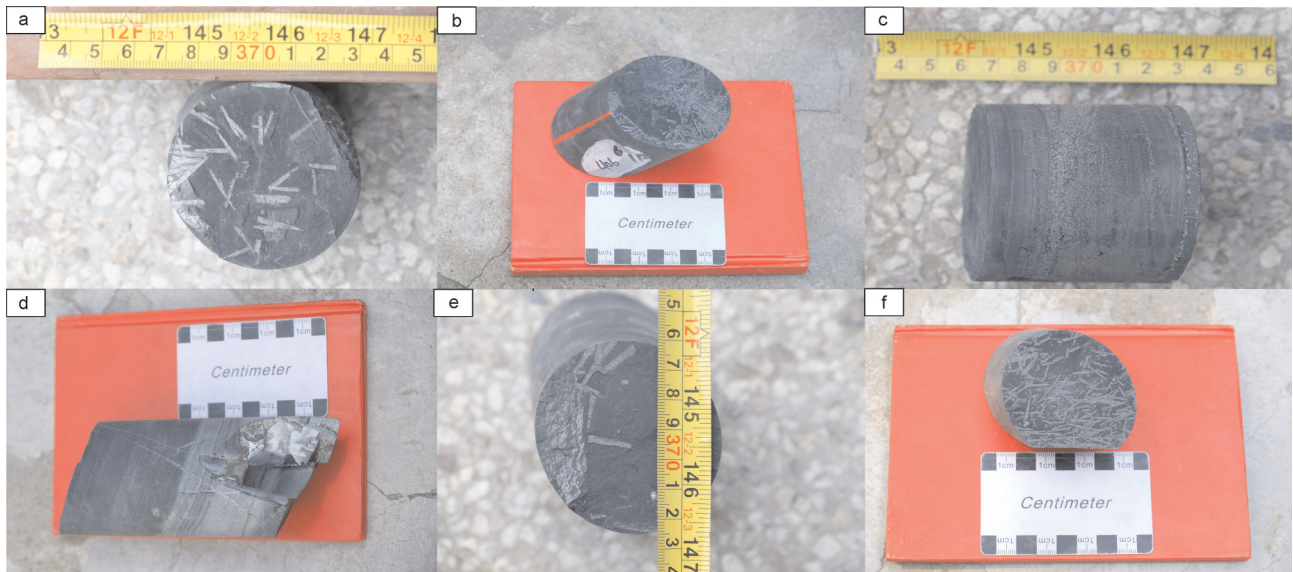


图4 五峰组—高家边组下段典型岩心照片特征

a—安徽含山县皖舍地1井高家边组下段黑色碳质笔石页岩; b—江苏省句容市苏页1井高家边组下段黑色碳质笔石页岩; c—安徽含山县皖舍地1井高家边组下段黑色碳质页岩夹粉—细砂岩纹层; d—江苏省句容市苏页1井高家边组下段粉砂岩薄层,发育水平层理; e—安徽含山县皖舍地1井五峰组黑色硅质笔石页岩; f—江苏省句容市苏页1井高家边组下段粉砂岩薄层,发育水平层理

Fig. 4 Photographs of typical cores in the lower part of the Wufeng Formation and the Gaojiabian Formation

a—Black carbon graptolite shale in the lower member of Gaojiabian Formation in well Wanhandi 1, Hanshan County, Anhui Province; b—Black carbon graptolite shale in the lower member of Gaojiabian Formation in well Suye 1, Jurong City, Jiangsu Province; c—Siltstone intercalation in black carbonaceous shale in the lower member of Gaojiabian Formation in well Wanhandi 1, Hanshan County, Anhui Province; d—The lower member of Gaojiabian formation having a thin siltstone with horizontal bedding in well Suye 1, Jurong City, Jiangsu Province; e—Black siliceous graptolite shale of Wufeng Formation in well Wanhandi 1, Hanshan County, Anhui Province; f—Siliceous graptolite shale, Wufeng Formation in well Suye 1, Jurong City, Jiangsu Province

等, 1984; 姜在兴等, 1989; 赖才根等, 1993; 周名魁等, 1993; 贾东等, 2016; 陈志强等, 2016)。

#### 4.1.3 陆棚坡折相

是指浅海陆棚内部在强烈构造挤压的驱动下, 地形坡度变大发生挠曲沉积的一组复理石沉积(葛祥英等, 2013; 周恩恩等, 2017)。浙皖海盆的西北侧和东南侧分别发育了一个斜坡带, 西北坡较宽缓, 沉积了新岭组—霞乡组的细碎屑岩(图5a), 戎嘉余和陈旭(1987)称之为皖南斜坡, 但其性质不是大陆斜坡。皖南斜坡的沉积速率也远较扬子地台上的五峰组页岩、硅质页岩快, 厚度也远超五峰组。浙皖海盆的东南坡窄而陡, 沉积了长坞组—文昌组—安吉组的细碎屑岩(图5c)。在浙江安吉奥陶纪—志留纪过渡期地层文昌组中, 发现极其丰富的特异埋藏海绵动物群(>100个种), 部分软躯体保存, 与笔石等门类共存。浙皖海盆两侧的斜坡, 提供了浙皖海盆中心部位浊流的触发机制。浙皖海盆的构造背景是一种断陷盆地, 这种断陷盆地在晚

奥陶世—早志留世初期明显地不断沉降, 造成海底地形高差悬殊而导致沉积物的重力位移, 出现了具不完整鲍马序列的浊积岩。

#### 4.1.4 欠补偿盆地相

岩性以硅质页岩为主(图4e、f), 沉积厚度一般较薄, 几米至十几米, 沉积物颜色以灰黑至黑色为主, 页理发育, 层理类型以水平层理和微波状层理为主, 反映静水还原沉积环境。主要成分以黏土矿物、硅质为主, 偏光镜下和扫描电镜可见有机质和草莓状黄铁矿颗粒。生物类别以笔石动物群和放射虫生物为主, 且笔石呈无序状分布。该类盆地相物源供应十分匮乏、沉积速率十分缓慢, 常处于弱还原至强还原的欠补偿半深海环境(赖才根等, 1993; 周名魁等, 1993)。主要发育在凯迪晚期的五峰组(图5b), 分布遍及整个下扬子地层区。

#### 4.1.5 盆地浊积岩相

该组岩性变化频繁, 细砂岩、粉砂岩、泥岩三者韵律互层, 频繁交互, 构成典型复理石建造。该区



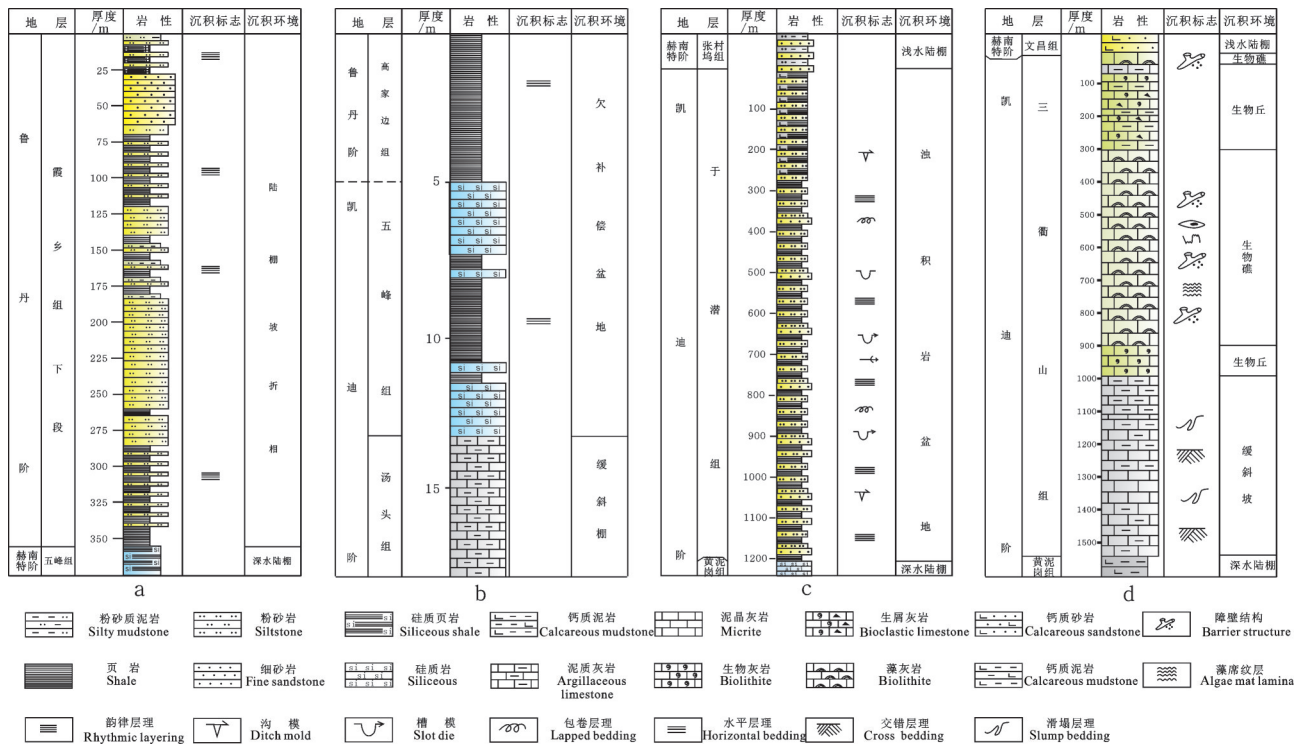


图5 下扬子地区陆棚坡折相—盆地相—孤立台地相典型剖面沉积序列

a—安徽省泾县外马村霞乡组下段陆棚坡折沉积序列(鲁丹阶); b—安徽省含山三凹丁五峰组深水陆棚沉积序列(凯迪阶); c—浙江省临安骆家于潜组盆地浊积岩相沉积序列(凯迪阶); d—浙江省常山县灰山三衢山组孤立台地沉积序列(凯迪阶)

Fig. 5 Sedimentary facies sequence of the continental shelf slope breakup facies–basin facies– isolated platform facies in the lower Yangtze region

a–Continental shelf slope breakup sedimentary sequence of lower member of Xiaxiang Formation, Waima Village, Jingxian County, Anhui Province (Rudan Stage); b–Deep water shelf sedimentary sequence of Wufeng Formation, Sanaoding Village, Hanshan County, Anhui Province (Kaidi Stage); c–Sedimentary sequence of turbidite facies of Yuqian Formation, Luojia Village, Linan County, Zhejiang Province (Caddy Stage); d–Sedimentary sequence of isolated platform of Sanqushan Formation, Huishan Village, Changshan County, Zhejiang Province (Caddy Stage)

域偶见完整的韵律层,一般韵律层以A、B、C、D、E或A、C、E及B、C、D、E序列较为常见。鲍马序列的A段沉积构造丰富,底部常发育有沟模、槽模、锥模、重荷模,可见枕状、火焰状构造及包卷层理,反映由于重力滑塌造成的快速堆积的密度流特征,厚度巨厚(厚度1000余米),与华夏古陆充足的物源补给和受同沉积断裂控制下不断沉降的古地形有关(罗璋等,1982)。于潜组浊积岩鲍马序列的上部页岩中产有较丰富的浮游生物笔石动物群,主要种属有*Dicellograptus*, *Climacograptus*, *Parathograptus*等(赖才根等,1993),与扬子地台上的同期笔石动物群性质相差很大,代表不同的生物相。浊积岩盆地的水深超过扬子地台的水深,笔石层的出现可能由于上升流带来的短暂缺氧环境下的产物(陈旭等,1987)。浊积岩相主要产出层位是于潜组(图5c),该相区主要分布于浙江昌化—安吉一线。

#### 4.2 碳酸盐岩海洋沉积体系

该区的碳酸盐岩海洋沉积体系主要发育浅水孤立台地相,分布于浙赣交界处的玉山、江山和常山地区,在晚奥陶世的三衢山组中发育有巨厚的生物丘和生物礁沉积(罗璋等,1982;戎嘉余等,1987;周名魁等,1993;赖才根等,1993)。通过对江西玉山鸡头山、江山大桥水泥厂和常山灰埠三衢山组的剖面观察和研究,发现三衢山组从底到顶依次发育台缘斜坡亚相、生物丘和生物礁亚相和开阔台地亚相。台缘斜坡亚相主要发育于三衢山组的底部(图5d),岩性为一套具揉皱构造和角砾状构造的薄层灰岩,它发育于台地与浅海陆棚之间的过渡地带,低能环境,灰泥为主;生物丘沉积主要由块状含生物屑泥晶灰岩组成,生物屑大部分由底栖生物组成,呈明显的隆起的状态;生物礁则是在生物屑滩之上以块状珊瑚为抗浪岩体的基础上发展起来的,



位于三衢山组的中部;生物礁之上发育生屑、藻屑及其他粒屑亮晶灰岩组成的开阔台地亚相,至文昌组沉积期,由于周缘陆地隆起,碎屑物质大量输入,破坏了原来的碳酸盐形成环境,孤立台地也随之消失。

### 5 岩相古地理

凯迪晚期开始,下扬子地区从扬子地台到江南斜坡的古地理格局被彻底破坏,位于斜坡带西部的江西武宁—修水地区,开始由碳酸盐斜坡相的沉积环境(桑比期至凯迪阶下部的硯瓦山组—黄泥岗组)转变为欠补偿海盆沉积环境(即凯迪阶上部的五峰组笔石页岩)(陈旭等,2012,2014;陈清,2014),至志留纪初期,这一地区五峰组之上发育了新开岭层至梨树窝组的连续沉积序列(俞建华等,1984),这与上扬子台地区的观音桥层至龙马溪组的沉积序列基本相似,与之相对的斜坡带东部浙皖海盆地区,由之前广泛分布的斜坡相沉积转变为巨厚的、以陆源碎屑为主的多种岩相组合(即凯迪阶上部的长坞组、新岭组、于潜组、下镇组、三衢山组),这一沉积序列不再是典型的斜坡相沉积,转化为前陆盆地沉积(罗璋,1990;吴浩如,2009;陈清,2014)。随着华夏古陆的持续推进,“江南古陆”的抬升和扩张,华南洋彻底消失,彻底颠覆下扬子地

区东部的古地理格局,之前发育的自西北向东南方向水体变深的古地理格局彻底转变为北西、南西、南东三面被台地包围,向东北方向水体加深的古地理格局(吴浩如,2005;戎嘉余等,2010;陈清,2014)。为了更清楚下扬子地区奥陶—志留纪之交的沉积相与古地理特征,采用优势相等分析方法,选取了凯迪晚期、赫南特期和鲁丹期3个时期为编图单位来编制相应的岩相古地理图。

#### 5.1 凯迪晚期(五峰期)

晚奥陶世凯迪晚期,伴随着加里东运动主幕的到来,下扬子地区的古地理格局发生重大变化,沉积相的展布明显的受到构造控制。由南往北依次发育古陆—碳酸盐孤立台地—浅水陆棚—陆棚坡折—盆地浊积岩—陆棚坡折—欠补偿盆地(图6)。

凯迪晚期位于江南沉积区的浙皖海盆,与其两侧的下扬子地台和华夏古陆的沉积分异和生物差异十分明显(图7),它的西北侧是一个宽阔而缓和的斜坡,沉积了新岭组,厚度近700 m,包括皖南至修水流域,以北部太平小区的新开岭组为代表,为砂质页岩与页岩互层,具浊积岩特征;浙皖海盆的中心部位在安吉—昌化—淳安一线,发育一套由粉细砂岩、粉砂岩、泥岩韵律互层的典型复理石建造,对于其沉积环境的讨论,现在存在较大的分歧,简

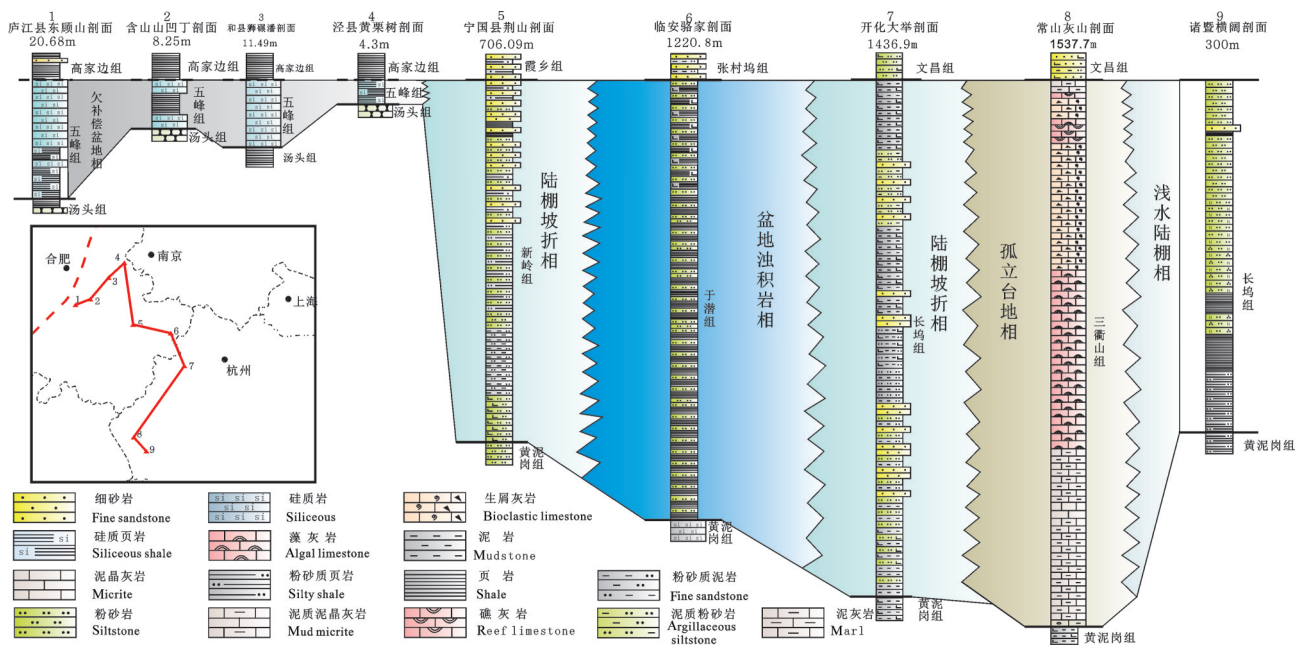


图6 下扬子地区凯迪晚期沉积相对比图

Fig.6 Sedimentary facies diagram of late Kaitian stage in the Yangtze area

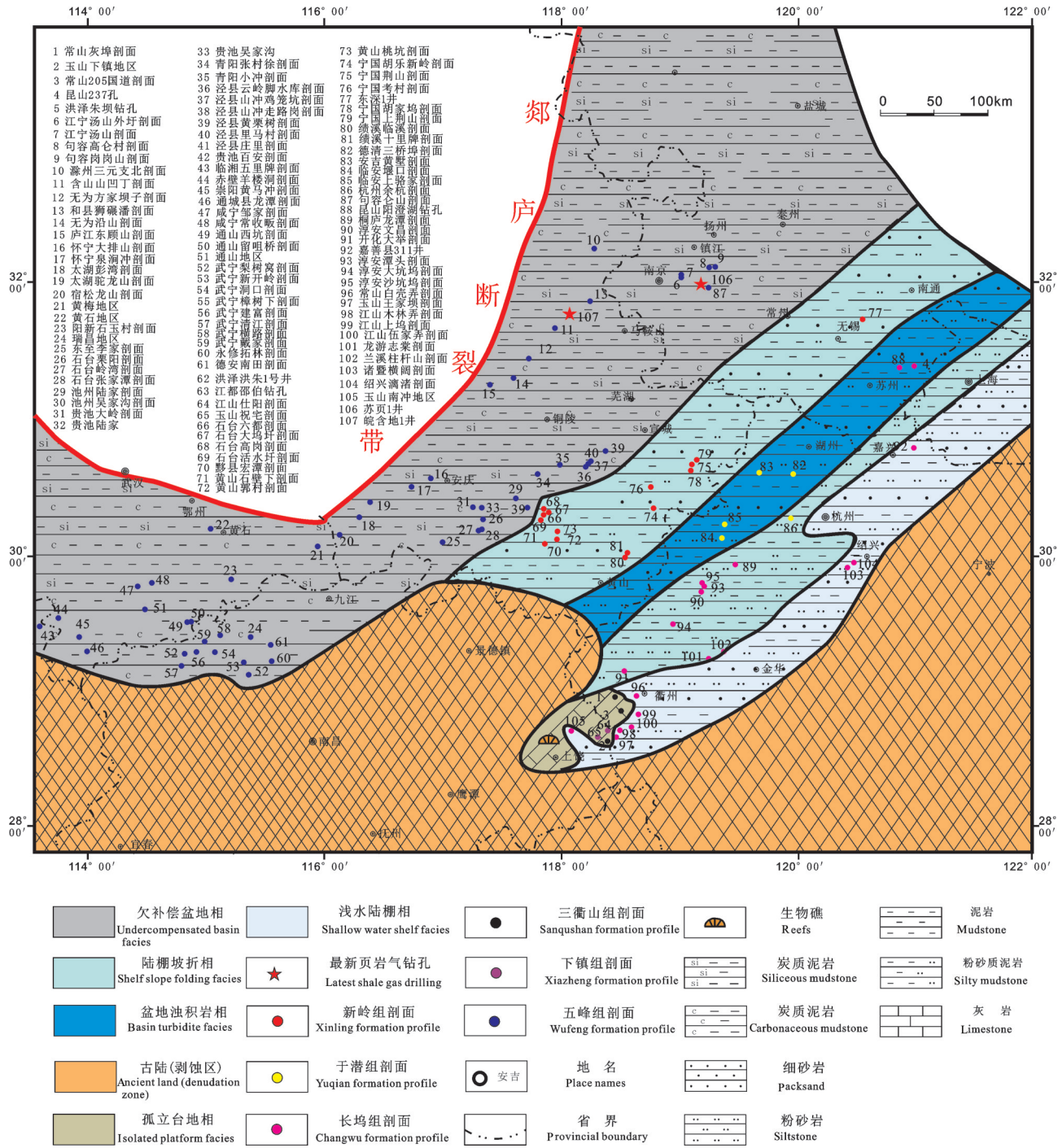


图7 下扬子地区凯迪晚期岩相古地理图

Fig.7 Lithofacies paleogeographic map of the late Kaitian stage in the Lower Yangtze region

单的说就两种观点。浅海说以陈旭为代表,认为该区相带处于浅海较深水区域的浊积岩盆地,于潜组上部产介壳类化石,且发现浅水波痕(戎嘉余等,1987;赖才根等,1993;周名魁等,1993)。深海说以罗璋为代表,他通过对临安于潜上骆家剖面的岩石

特征、沉积构造特征、古生物特征和沉积速率研究认为其沉积环境应该属于次深海盆地浊积岩相(罗璋等,1982;罗璋,1990)。本文通过对该区域构造位置以及两侧同生断裂活动时间的分析,结合该区域典型剖面的观察研究,认为其具备次深海浊积扇



特征。浙皖海盆的东南侧在绍兴横岗—诸暨应店街—江山长坞一带,沉积一套陆源细碎屑岩,岩性为黄绿色、灰绿色中薄层状粉砂质泥岩与泥岩组成的韵律层,局部含灰岩透镜体或灰岩夹层,构成这种韵律结构的微层发育斜层理,层面上有浅水波浪痕,所含化石以腕足类为主,笔石少见,表现为浅水陆棚的沉积特征(赖才根等,1993;周名魁等,1993)。在江山—常山地区,发育一块面积不大的碳酸盐沉积,尽管部分已经受到印支期和燕山期的火山活动破坏,仍然保存了生物点礁和生物层及其他典型的台地碳酸盐的沉积构造,如水下收缩裂纹,层纹构造及含单分异度的 *Tcherskidium* 群落和 *Zygopira* 群落,占 BA2-3 生态位置。在玉山鸡头山发育一套浅海碳酸盐生物丘、床板珊瑚和日射珊瑚组成为骨架的生物礁,指示台地边缘环境(戎嘉余等,1987;赖才根等,1993;周名魁等,1993;戎嘉余等,2010)。

扬子沉积区五峰组厚度仅几米,仅在泾县云岭、和县狮碾潘和庐江东顾山厚度达到 10~20 m (图 7),沉积厚度的差异可能与海盆凹凸不平的沉积地形相关。岩性均为灰黑色硅质页岩夹炭质页岩、粉砂质页岩,炭质含量在 3.42%~6.3%(周名魁等,1993),生物以笔石占绝对优势,均无壳相化石,属于欠补偿盆地相。

## 5.2 赫南特期(文昌期)

晚奥陶世赫南特期,由于南极冰盖凝聚导致的全球海平面下降,在这一时期达到了最高潮(陈旭,1987;Sheehan,2001;刘晓等,2012)。扬子地台海域变浅,致使海底盆地上升到最低含氧深度面之上处于充氧水层中,富氧环境代替了缺氧环境,表现为扬子盆地壳相生物群占领了海域底部(陈旭,1987)。该时期整个下扬子地区由南往北依次发育古陆—滨岸—浅水陆棚—陆棚坡折—浅水陆棚(图 8)。

扬子沉积区有可靠观音桥期生物证据仅分布在江西武宁修水、皖南泾县云脚岭、南京汤山和句容仑山。前三处的生物属 *Paromalomena*-*Aegromena* 群落,推测水深超过 BA3 或浪基面的下限,属于 BA4-5 的生态位。从南京汤山向西至句容仑山,仅产笔石,缺失壳相化石,推测水深>100m(陈旭,1987;赖才根等,1993),沉积环境属于浅水陆棚相,但受海底古地形影响,下扬子地台内部水深可

能是逐渐变化的。扬子地层区的其他地点,安徽省地层志奥陶系分册(1989)推测可能为缺失区,但从区域地质情况来看,其结论值得商榷。

江南沉积区中马金—乌镇断裂以北至江南断裂以南地区,发育陆棚坡折相沉积(图 8),岩性主要是灰色(青灰、蓝灰和灰绿色)中细粒长石石英砂岩或岩屑砂岩夹泥岩或粉砂岩,为一套边沉降边堆积的复理石建造,沉积速率较观音桥层泥岩明显加剧,在浙江临安堰口剖面可见笔石斜交层理,代表了一种迅速裹埋的保存环境;在浙江安吉奥陶纪—志留纪过渡期地层文昌组中,发现极其丰富的特异埋藏海绵动物群,与笔石门类共存,代表着深水环境。而此时,马金—乌镇断裂以南至开化—桐乡一线地区,由于受到“华夏古陆”持续的从东南进入影响,本区变成了浅水海湾,沉积物为大套细砂岩、粉砂岩,且砂质含量远远超过凯迪晚期的长坞组,化石类别以腕足类为主,低丰度,低分异度且保存较差,不易捕获,沉积环境大致相当于浅水陆棚环境。更靠华夏古陆的浙赣台地沉积更浅水的红家坞组海相红层,指示了近岸、浅水、强氧化的环境(汪隆武等,2004),这与皖南新岭组自下而上逐渐变浅的序列是一致的,反映了下扬子地区古水深整体变浅的特征。它与南极冰盖凝聚导致的全球海平面下降和华南加里东运动的持续推进作用相关。沉积物的陆源特征暗示着“扬子”与“华夏”两个地块之间华南洋的逐渐消失和板块拼合逐步完成,并造成了“华夏古陆”随后向西北扩展的强大态势(戎嘉余等,2010)。

## 5.3 鲁丹期

鲁丹期是挤压阶段最强烈的时期,华南洋成为褶皱并产生强烈的向北西方向推挤,华夏古陆急剧扩大,使中国南方海陆分布格局发生重大变化。下扬子地区从南往北依次发育古陆—滨岸—浅水陆棚—陆棚坡折—深水陆棚(图 9)。

扬子沉积区明显继承凯迪晚期欠补偿盆地的特征,只是水体变浅,陆源碎屑补给更加充足,沉积环境转变为深水陆棚环境。中上扬子地块在该时期的沉积物以炭质页岩为主,基本不含粉砂质,安静还原的环境,页岩品质普遍较好,生烃潜力大,沉积大地构造位置处于隆后盆地,华夏地块的大量沉积物被隔档在雪峰隆起的南缘;而下扬子地块南缘

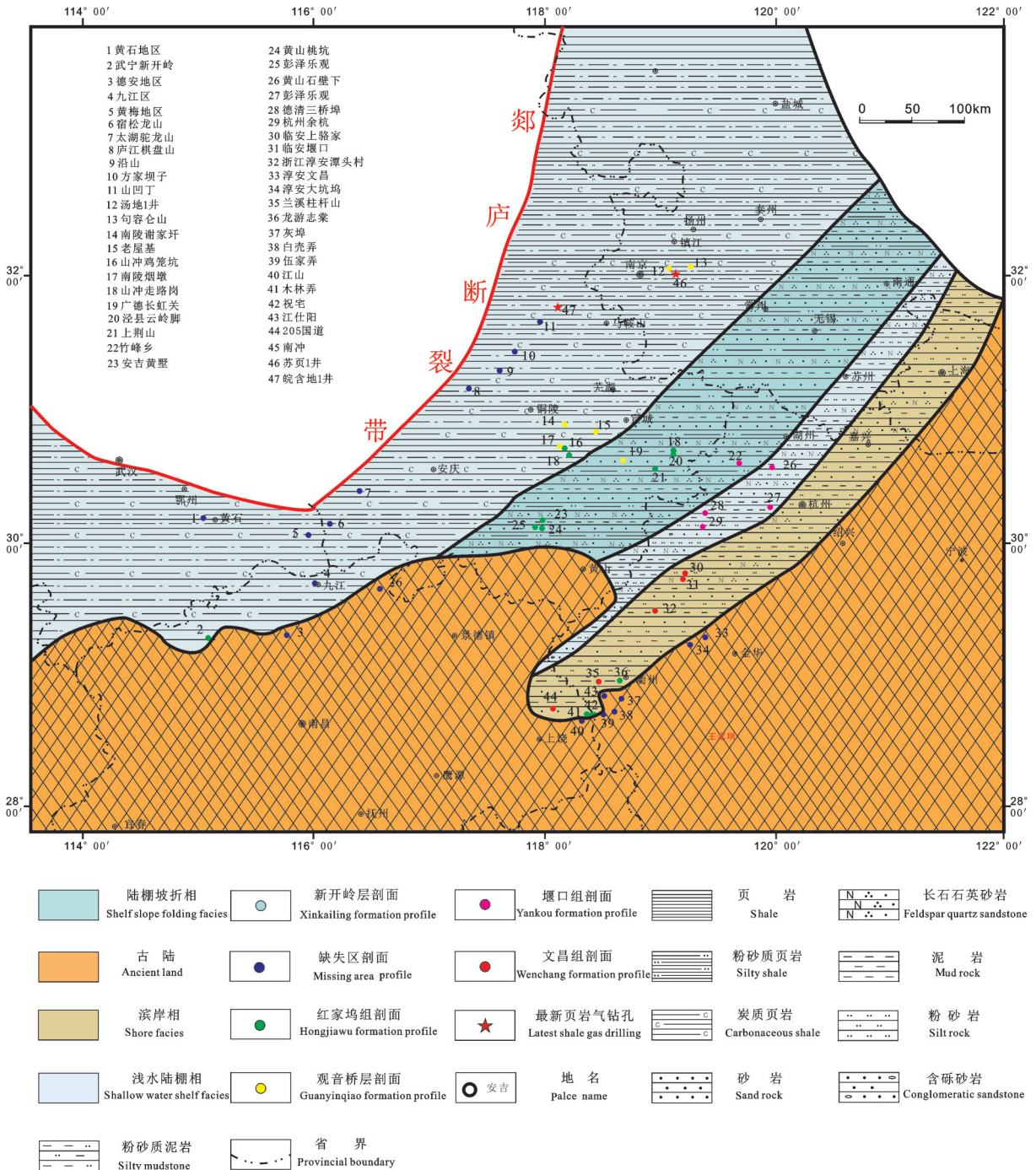


图8 下扬子地区赫南特时期岩相古地理图

Fig.8 Lithofacies paleogeographic map of Hernær Teteian Stage in the Lower Yangtze region

未形成隆起带,造成沉积物普遍含有粉砂质条带,这与华夏古陆的持续北推,部分细粉砂质沉积物越过前渊带,沉降在下扬子地台有关,沉积物厚度十米至几十米。层理以微波状层理、微水平层理发育为特征,局部可见透镜状层理或小型韵律层,生物群发生变化,以笔石动物、三叶虫和腕足类混生为

特征,与五峰期相比水体变浅。

江南沉积区以鄱阳湖为界,分为东西两段。东段自南往北分为三个亚带,南带位于开化、建德一线以东,江山、绍兴一线以西,以仕阳组为代表,发育志留系底砾岩,前人将其定为滨线砾岩,上部发育中细粒砂岩与粉砂质泥岩,生物类型为腕足类壳



相生物,属于滨岸沉积环境;中带位于临安—马金与开化—建德一线之间,以安吉组为代表,发育一组中—薄层状粉砂岩和泥质粉砂岩,夹泥岩薄层岩性组合,水平层理发育,生物丰富,产笔石、腕足、三叶虫、和少量双壳、腹足等生物;位于桐庐的桐君山剖面,安吉组内发现一套浅海风暴沉积,发育丘状层理、反递变层理等沉积构造现象(范代读等, 2003),沉积环境大致位于浅水陆棚;位于江南断裂以南,中带以北的皖南地区和浙西北地区,以霞乡

组为代表,为一套灰绿、灰紫到黄绿色中—薄层状细砂岩、粉砂岩与页岩互层,下部以笔石页岩为主,上部递变为砂岩—粉砂岩时,化石稀少或几乎不存在,为浊流沉积(周名魁, 1993),处于陆棚坡折环境。中段赣北地区,以武宁、修水地区为代表的狭长海域内,发育一套厚度巨大的砂页岩,仅在下部页岩内发现少量笔石,不发育壳相生物,沉积环境划为深水陆棚(图9),只是物源补给较凯迪晚期—赫南特期充足,沉积物中粉砂质条带明显增多,这

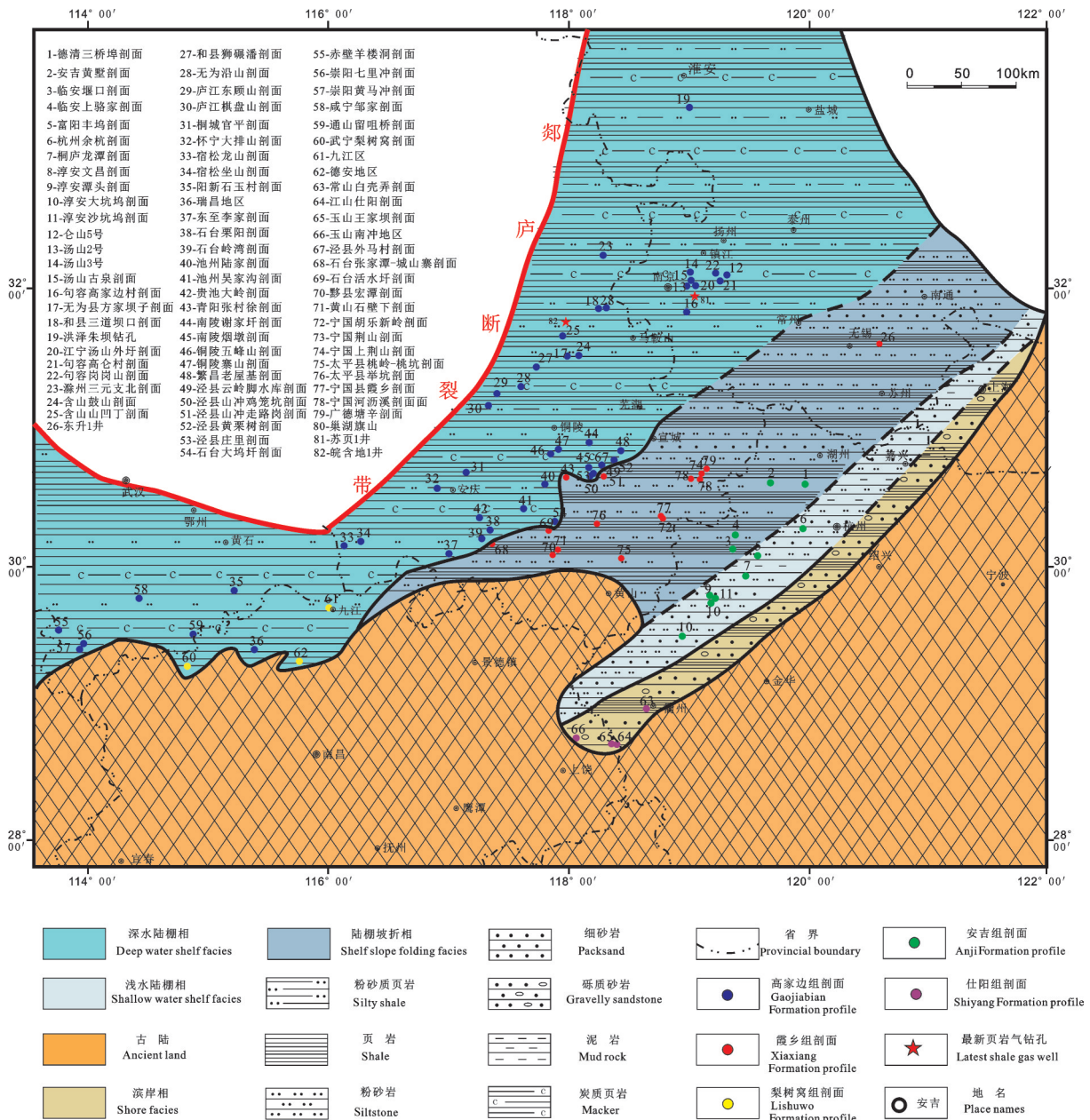


图9 下扬子地区鲁丹期岩相古地理图

Fig.9 Paleogeographic map of the lithofacies of the Ludan Period in the Lower Yangtze region

是加里东造山运动最直接的沉积响应。

## 6 生烃潜力讨论

五峰组—高家边组底部黑色笔石页岩广泛分布于下扬子地台,厚度稳定,十米至几十米厚不等,普遍含有粉砂质条带,是下扬子地区重要的页岩气勘探层位(胡书毅等,2001;刘伟等,2010)。随着上扬子地区五峰组—龙马溪组的勘探突破和建产开发,国内页岩气专家意见将五峰组—龙马溪组黑色页岩作为中国南方页岩气勘探的重中之重(邹才能,2015;董大忠,2016;陈孝红等,2017;陈孝红等,2018;陈孝红等,2018;葛明娜,2018)。下扬子地区页岩气勘探工作起步相对较晚,未取得实质性的勘探大发现,就目前取得的地化指标显示:(1)有机质丰度较高,生烃潜力大,江苏海安地区获3井高家边组底部有机碳高达1.97%,平均1.35%;黄桥地区N4井高家边组底部有机碳平均1.29%;江都隆起带上的都4井该段有机质平均为1.23%;句容地区的ZK10井高家边组底部有机碳含量亦高达2.08%,平均为1.33%(梁兵等,2013);仑山—汤山浅钻,五峰—高家边组底部多数TOC含量1.2%~4%(贾东等,2016);巢湖—含山地区皖含地1井高家边组下段TOC含量0.5%~3.5%,五峰组TOC含1.8%~3.6%;(2)有机质热演化普遍达到高成熟阶段,进入干气阶段,仑山—汤山浅钻五峰组—高家边组底部质体反射率主要在1.5%~2.6%;巢湖—含山地区皖含地1井高家边组下段镜质体反射率值分布在1.8%~3.0%,平均值2.4%。

宁镇地区高家边组黑色页岩纳米级孔隙发育,以粒间孔为主,次为有机质孔、粒内孔和微裂缝(李晋宁等,2016),具备自生自储的条件;黑色富有机质页岩上覆地层为几百至上千米的粉砂质泥岩夹薄层条带状砂岩沉积,该类岩石孔渗低,物性差,是较好的区域性盖层。

从古地理角度看,下扬子地区在江南断裂北缘发育大范围的五峰组—高家边组黑色笔石页岩系,可与中上扬子对比,尤其在安徽南部的安庆—铜陵—巢湖一线,江苏中部的南京—句容一线为深水陆棚的沉积拗陷区,该区五峰组—高家边组底部黑色笔石页岩厚度相对稳定,均在40~60 m,可作为整个下扬子大区页岩气勘探开发的

重点地区。

## 7 结论

中奥陶世开始受加里东运动影响,华南洋成为褶皱并产生强烈的向北西方向的推力,华夏古陆急剧扩大、“江南古陆”抬升和扩张,直接导致了旧的“台—坡—盆”格局的消失和新的古地理格局的形成。下扬子地区的沉积环境发生了剧变,江南断裂以北,早中奥陶世碳酸盐台地向淹没台地演化,进而演变为沉积五峰组—高家边组底部的局限深水盆地环境;江南断裂以南,之前广泛分布的碳酸盐斜坡相转变为巨厚的、以陆源碎屑为主的前渊带沉积。

依据下扬子地区凯迪晚期—鲁丹期近80个剖面资料和数据,开展岩石特征、古生物小层对比、古生态环境、沉积构造和层序地层的系统分析,采用优势相方法将下扬子地区凯迪晚期—鲁丹期划分为滨岸相、孤立台地相、浅海陆棚相、陆棚坡折相、欠补偿盆地相和盆地浊积岩相6种沉积相类型。

通过对志留—奥陶纪之交沉积相及古地理方面的研究,认为安徽南部的安庆—铜陵—巢湖一线,江苏中部的南京—句容一线为深水陆棚的沉积拗陷区,该区五峰组—高家边组底部页岩厚度相对稳定,均在40~60 m,有机质含量高,构造相对稳定,具备很高的生烃潜力,可作为整个下扬子大区页岩气勘探开发的重点地区。

## References

- Cai Jingong, Li Congxian. 1990. Storm deposition of Anji Formation of Silurian Tongle County, Tongjun Hill, Western Zhejiang Province[J]. Journal of Tongji University, 18(3): 363-372 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hongde, Pang Lin, Ni Xinfeng, Hao Yi. 2007. New brief remarks on hydrocarbon prospecting of marine strata in the middle and upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 29(1): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qin. 2014. Quantitative Study on Graptolite Biodiversity and Palaeogeography in South China during the Ordovician and Silurian Transition[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu, Xiao Chengye, Chen Hongyi. 1987. Wufengian(Ashgillian) Graptolite faunal differentiation and anoxic environment in south china[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 26(3): 326-344 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xu, Fan Junxiu, Chen Qin, Hou Xudong. 2014. On the stages of

- guangxi movement[J]. *Science China: Earth Sciences*, 44(5): 842–850 (in Chinese).
- Chen Zhiqiang, Gong Jianming, Wang Jiao, Xu Chengfeng, Li Gang, Chen Zhonghong, Cheng Qingsong, Tian Ruicong, Liu Lei. 2016. The characteristics of lower silurian source in Gaojiabina formation in the lower Yangtze land area[J]. *Marine Geology Frontiers*, 32(1): 73–78 (in Chinese with English abstract).
- Fan Daidu, Li Congxian, Cai Jingong, Deng Bing, Luo Zhang. 2003. Sedimentary Successions and Environments of the Late Ordovician Wenchang Formation in Tonglu, Zhejiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 247–254 (in Chinese with English abstract).
- Fan Junxiu, Chen Xu. 2007. Preliminary report on the Late Ordovician graptolite extinction in the Yangtze region[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 245: 82–94.
- Feng Zengzhao, Peng Yongming, Jin Zhenkui, Jiang Panliang, Luo Zhang, Pao Zhidong, Luo Zhang, Ju Tianyin, Tian Haiqing, Wang Hong. 2001. Lithofacies Palaeogeography of the middle and late ordovician in south china[J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(4): 10–24 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zengzhao, Peng Yongming, Jin Zhenkui, Pao Zhidong. 2004. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(2): 127–139 (in Chinese with English abstract).
- Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei. 2013. Sedimentary characteristics and depositional model in the Sandbian–Early Katian Ages of Late Ordovician in Hunan area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 15(1): 59–68 (in Chinese with English abstract).
- Guo Nianfa. 1996. Evolutionary ground of basin and regional structure in lower Yangtze area[J]. *Geology of Zhejiang*, 12(2): 19–27 (in Chinese with English abstract).
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. 2014. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28–36 (in Chinese with English abstract).
- He Youbing, Gao Zhenzhong, Li Jianming. 1999. Petrological characteristics and sedimentary environment of the Yankou Formation in the Upper Ordovician at Tonglu area in Zhejiang Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1(3): 65–72 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhicheng, Huang Zhongjin. 1991. Volcanic rock and radiolarian silicilith of Wufeng Formation in lower Yangtze Region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(2): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Jia Dong, Hu Wenxuan, Yao Suping, Yin Hongwei, Li Yiquan, Wang Wenhui, Zhou Qiyu, Wu Xiaojun. 2016. Shallow borehole Drilling of the Lower Silurian black shale in Jiangsu Province and the shale gas potential analysis[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(1): 127–137 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zhaixing, Zhao Chenglin, Xiong Jihui. 1989. Isoproterozoic rocks of the middle and lower silurian in anhui and their geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 34(20): 1575–1576 (in Chinese).
- Lai Caigen, Jin Ruogu, Lin Baoyu. 1993. Paleogeographic Features of Biofacies and Sedimentary Facies in the Ordovician of the Lower Yangtze Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–101 (in Chinese).
- Li Haibing. 2013. Analyses of the Early Paleozoic Foreland Basin and Hydrocarbon Prospect in the Lower Yangtze Region [D]. Nanjing University (in Chinese).
- Li Jinning, Yao Suping, Sun Chao, Ding Hai. 2016. Pore structure of organic-rich shales in the Lower Silurian Gaojiabian Formation from Ningzhen Area, Jiangsu Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(1): 159–170.
- Li Shuangjian, Xiao Kaihua, Wo Yujin, Long Shengxiang, Cai Ligu. 2008. Developmental controlling Factors of Upper Ordovician–Lower Silurian high quality source rocks in marine sequence, South China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5): 872–880 (in Chinese with English abstract).
- Liang Dingxin, Guo Fusheng. 1992. Characteristics of the late ordovician turbidite series in Jiangshan, Zhejiang with discussion on the west Zhejiang turbidite fan model[J]. *Journal of Palaeogeography*, (2):21–27 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, Huang Huiqiong, Xu Qiang. 1993. Evolution and Mineralization of Paleocontinental Sedimentary Crust in Southern China [M]. Beijing: Science Press, 30–35 (in Chinese).
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. 1994. Lithofacies Palaeogeography in South China Atlas[M]. Beijing: Science Press, 1–188 (in Chinese).
- Liu Xiao, Zhang Yuandong, Zhou Chuanming. 2012. Sedimentary characteristics of the Upper Ordovician Wenchang and Yankou Formations in northwestern Zhejiang Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(1): 101–116 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yunli, Zhou Xiaojing, Liao Zongting, Yang Fan. 2009. Relative Block and convergence process during the caledonian movement in south china[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(1): 19–25(in Chinese with English abstract).
- Lu Lingling, Ji Youliang. 2013. Sequence stratigraphic framework and palaeogeography evolution of the Cambrian in Lower Yangtze area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(3): 55–62(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhang. 1990. The late ordovician turbidites in Shangluojia, Yuqian, Zhejiang Province[J]. *Geology of Zhejiang*, 6(1) : 20–29 (in Chinese).
- Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Xu Xiaosong, Zhou Kenken, Liang Wei, Wang Xiuping. 2014. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle–Upper Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16



- (4): 427–440(in Chinese with English abstract).
- Sheehan P M. 2001. The late Ordovician mass extinction[J]. *Annu. Rev. Earth PI Sc.*, 29: 331–364.
- Rong Jiayu, Chen Xu. 1987. Faunal differentiation, biofacies and lithofacies pattern of late ordovician(Ashgillian) in south china[J]. *Acta palaeontologica sinica*, 26(5) : 508– 526 (in Chinese with English abstract).
- Rong Jiayu, Zhan Renbin, Xu Honggen, Huang Bin, Yu Guohua. 2010. Extended evidence and mechanism exploration of the ancient land of Cathaysia at the turn of Ordovician and Silurian [J]. *Science China: Earth Sciences*, 40(1): 1–17 (in Chinese).
- Wang Longwu, Xu Honggen, Qi Yanxin, Tang Zengcai, Yu Guohua. 2004. Upper Ordovician Hongjiawu Formation of the Zhejiang–Jiangxi border region[J]. *Journal of stratigraphy*, 28(1): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang Longwu, Zhang Yuandong, Zhu Chaohui, Zhang Jianfang, Liu Fenglong, Chen Jinhuai, Xu Shuanhui, Cai Xiaoliang, Ma Xuan, Hu Kaiming. 2016. Geological characteristics of the Hanggai section in Anji, Zhejiang(the reference section of Upper Ordovician Hirantian Stage for the Lower Yangtze region) and their implications[J]. *Journal of Stratigraphy*, 40(4): 370– 381 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongzhen. 1985. *Atlas of Ancient Geography of China* [M]. Beijing: China Map Press, 1–113(in Chinese).
- Wang Zhigang. 2015. Breakthrough of fulling shale gas exploration and development and its inspiration[J]. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haorui. 2005. Discussion on tectonopalaogeography of Lower Yangtze Area during the Caledonian Period[J]. *Journal of Palaeogeography*, 7(2):243–248 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yudong. 1997. The cambrian sedimentary facies and its temporal–spatial evolution in the Dongzhi area of south Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 7(3): 34–39 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yudong. 2001. Sequence stratigraphy of the cambrian in the Dongzhi region of southern Anhui Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(3): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yudong, Zhong Huaming. 2002. Analysis of the ordovician sequence stratigraphy in southern Anhui[J]. *Geoscience*, 16(1): 45–52(in Chinese with English abstract).
- Xia Jun. 1995. Reseach of the cambrian sequence stratigraphy of the lower Yangtze sea basin in southern Anhui[J]. *Geology of Anhui*, 5 (1): 38–46 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaosong, Xu Qiang, Pan Guitang, Liu Qiaohong, Fan Yingnian, He Yuanxiang. 1996. *Continental Evolution and Global Paleogeography in Southern China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 42–63 (in Chinese).
- Yue Wenzhe, Wei Naiyi, Jiao Shiding. 1990. Sedimentary characteristics and facies models of Cambrian and ordovician shelf– slope facies in lower Yangtze region [C]. *Proceedings of nanjing institute of geology and mineral resources, Chinese academy of geological sciences* (in Chinese).
- Zhang Hanjin, Ye Qin, He Renliang, Deng Qianzhong, Xia Jiangli, Kong Lingyao, Lei Lin. 2015. Research of lithofacies paleogeography and sedimentation in Cambrian of Lower Yangtze in southeast Hubei[J]. *Resources Environment & Engineering*, 29 (4):365–369 (in Chinese with English abstract).
- Zhou KenKen, Mu Chuanlong, Ge Xiangying, Liang Wei, Chen Xiaowei, Wang Qiyu, Wang Xiuping. 2017. Lithofacies paleogeography of the South China in Early Paleozoic and its reflection on key geological problems[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(3): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Mingkui, Wang Ruzhi, Li Zhiming. 1993. *Ordovician and Silurianlithofacies Paleogeography and Mineralization in South China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1– 95 (in Chinese).
- Zhou Xiaojing, Yang Fan. 2007. Tectonic evolution and prototypes analysis from neoproterozoic to early paleozoic in south China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(5): 446– 451 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 蔡进功, 李从先. 1990. 浙西桐庐县桐君山下志留系安吉组风暴沉积[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 18(3): 363–372.
- 陈洪德, 庞林, 倪新峰, 郝毅. 2007. 中上扬子地区海相油气勘探前景[J]. *石油实验地质*, 29(1): 13–18.
- 陈清. 2014. 华南奥陶—志留纪之交笔石多样性演化及古地理的定量研究[D]. 北京: 中国科学院大学.
- 陈旭, 肖承协, 陈洪冶. 1987. 华南五峰期笔石动物群的分异及缺氧环境[J]. *古生物学报*, 26(3): 326–344.
- 陈旭, 张元动, 樊隽轩, 唐兰, 孙海清. 2012. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(11): 1617–1626.
- 陈旭, 樊隽轩, 陈清, 唐兰, 侯旭东. 2014. 论广西运动的阶段性[J]. *中国科学:地球科学*, 44(5): 842–850.
- 陈孝红, 王传尚, 刘安, 罗胜元, 李海, 危凯. 2017. 湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J]. *中国地质*, 44(1): 188–189.
- 陈孝红, 张保民, 张国涛, 陈林, 张森, 李培军. 2018. 湖北宜昌地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组获页岩气高产工业气流[J]. *中国地质*, 45(1):199–200.
- 陈孝红, 危凯, 张保民, 李培军, 李海, 刘安, 罗胜元. 2018. 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*, 45(2): 207–226.
- 陈志强, 龚建明, 王蛟, 徐承芬, 李刚, 陈中红, 程青松, 田瑞聪, 刘蕾. 2016. 下扬子陆域下志留统高家边组烃源岩特征[J]. *海洋地质前沿*, 32(1): 73–78.
- 范代读, 李从先, 蔡进功, 邓兵, 罗璋. 2003. 浙江桐庐晚奥陶世晚期沉积层序和沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 21(2): 247–254.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 蒋盘良, 鲍志东, 罗璋, 鞠天吟, 田海芹, 汪



- 红. 2001. 中国南方中及晚奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 3(4): 10-24.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 鲍志东. 2004. 中国晚奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 6(2): 127-139.
- 葛明娜, 包书景, 何伟, 陈相霖, 林拓, 陈科. 2018. 黔北黄平地区黄地1井下寒武统发现海相页岩气[J]. 中国地质, 45(4): 851-852.
- 葛祥英, 牟传龙, 周恩恩, 梁薇. 2013. 湖南地区晚奥陶世桑比期—凯迪早期沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报, 15(1): 59-68.
- 郭念发. 1996. 下扬子盆地与区域地质构造演化及油气成藏分析[J]. 浙江地质, 12(2): 19-27.
- 郭彤楼, 张汉荣. 2014. 四川盆地焦石坝页岩气田形成于富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 41(1): 28-36.
- 何幼斌, 高振中, 李建明. 1999. 浙江桐庐上奥陶统堰口组岩石特征及沉积环境分析[J]. 古地理学报, 1(3): 65-72.
- 黄志诚, 黄钟瑾. 1991. 下扬子区五峰组火山碎屑岩与放射虫硅质岩[J]. 沉积学报, 9(2): 1-15.
- 贾东, 胡文瑄, 姚素平, 尹宏伟, 李一泉, 王文卉, 周启友, 吴晓俊. 2016. 江苏省下志留统黑色页岩浅井钻探及其页岩气潜力分析[J]. 高校地质学报, 22(1): 127-137.
- 姜在兴, 赵激林, 熊继辉. 1989. 皖中下志留统的等深积岩及其地质意义[J]. 科学通报, 34(20): 1575-1576.
- 赖才根, 金若谷, 林宝玉, 等. 1993. 下扬子地区奥陶纪的生物相、沉积相机古地理特征[M]. 北京: 地质出版社, 1-101.
- 李海滨. 2013. 下扬子地区早古生代前陆盆地与油气前景分析[D]. 南京大学.
- 李晋宁, 姚素平, 孙超, 丁海. 2016. 宁镇地区下志留统高家边组富有机质页岩孔隙结构[J]. 高校地质学报, 22(1): 159-170.
- 李双建, 肖开华, 沃玉进, 龙胜祥, 蔡立国. 2008. 南方海相上奥陶统南下志留统优质烃源岩发育的控制因素[J]. 沉积学报, 26(5): 872-880.
- 梁兵, 段宏亮, 李华东. 2013. 下扬子地区海相层系成藏条件及勘探评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 1-161.
- 梁鼎新, 郭福生. 1992. 浙江江山晚奥陶世浊积岩系特征及浙西浊积扇模式的探讨[J]. 岩相古地理, (2): 21-27.
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 黄慧琼, 徐强. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 30-35.
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社, 1-188.
- 刘晓, 张元动, 周传明. 2012. 浙西北上奥陶统文昌组和堰口组沉积特征及其意义[J]. 古地理学报, 14(1): 101-116.
- 刘运黎, 周小进, 廖宗庭, 杨帆. 2009. 华南加里东期相关地块及其汇聚过程探讨[J]. 石油实验地质, 31(1): 19-25.
- 路琳琳, 纪友亮. 2013. 下扬子地区寒武纪层序格架及古地理演化[J]. 古地理学报, 15(6): 765-776.
- 罗璋, 葛凡凡. 1982. 浙江省上震旦统、下古生界沉积环境及相分析[J]. 浙江石油地质, (1): 12-17.
- 罗璋. 1990. 浙江于潜上骆家上奥陶统浊积岩[J]. 浙江地质, 6(1): 20-29.
- 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 周恩恩, 梁薇, 王秀平. 2014. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 16(4): 427-440.
- 齐敦伦, 杜森官. 1984. 安徽宿松地区的奥陶系[J]. 地层学杂志, 8(2): 66-70.
- 戎嘉余, 陈旭. 1987. 华南晚奥陶世的动物群分异以及生物相、岩相分布模式[J]. 古生物学报, 26(5): 508-526.
- 戎嘉余, 詹仁斌, 许红根, 黄冰, 俞国华. 2010. 华夏古陆于奥陶—志留纪之交的扩展证据和机制探索[J]. 中国科学: 地球科学, 40(1): 1-17.
- 汪隆武, 许红根, 齐岩辛, 唐增才, 俞国华. 2004. 浙赣交界地区上奥陶统红家坞组(O<sub>3h</sub>) [J]. 地层学杂志, 28(1): 52-55.
- 汪隆武, 张元动, 朱朝晖, 张建芳, 刘凤龙, 陈津华, 徐双辉, 蔡晓亮, 马譔, 胡开明. 2016. 上奥陶统赫南特阶下扬子地区标准剖面(浙江省安吉县杭垓剖面)的地质特征及其意义[J]. 地层学杂志, 40(4): 370-381.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1-113.
- 王志刚. 2015. 涪陵页岩气勘探开发重大突破与启示. 石油与天然气地质[J], 36(1): 1-6.
- 吴浩若. 2005. 下扬子区加里东期构造古地理问题[J]. 古地理学报, 7(2): 243-248.
- 吴跃东. 1997. 皖南东至地区寒武纪沉积相及其时空演化[J]. 安徽地质, 7(3): 34-39.
- 吴跃东. 2001. 皖南东至地区寒武系层序地层[J]. 古地理学报, 3(3): 55-62.
- 吴跃东, 钟华明. 2002. 皖南地区奥陶系层序地层学分析[J]. 现代地质, 16(1): 45-52.
- 夏军. 1995. 安徽南部下扬子地区寒武系露头层序地层初步研究[J]. 安徽地质, 5(1): 38-46.
- 许效松, 徐强, 潘桂棠, 刘巧红, 范影年, 何原相. 1996. 中国南方大陆演化与全球古地理对比[M]. 北京: 地质出版社, 42-63.
- 岳文浙, 魏乃颀, 焦世鼎. 1990. 下扬子地区寒武、奥陶纪陆棚—斜坡相沉积特征和相模式[C]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所文集.
- 詹仁斌, 傅力浦. 1994. 浙赣边区晚奥陶世地层之新见[J]. 地层学杂志, 18(4): 267-274.
- 张汉金, 叶琴, 何仁亮, 邓乾忠, 夏奖利, 孔令耀, 雷霆. 2015. 下扬子鄂东南地区寒武纪岩相古地理基本格局与沉积作用研究[J]. 资源环境与工程, 29(4): 365-369.
- 周恩恩, 牟传龙, 葛祥英, 梁薇, 陈小炜, 王启宇, 王秀平. 2017. 新一轮岩相古地理编图对华南重大地质问题的反映—早古生代晚期"华南统一板块"演化[J]. 沉积学报, 35(3): 449-459.
- 周名魁, 王汝植, 李志明. 1993. 中国南方奥陶—志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1-96.
- 周小进, 杨帆. 2007. 中国南方新元古代—早古生代构造演化与盆地原型分析[J]. 石油实验地质, 29(5): 446-451.