

doi:10.3799/dqkx.2017.534

四川广元上寺剖面上二叠统大隆组有机质分布特征与富集因素

张毅^{1,2}, 郑书桀¹, 高波³, 冯庆来^{1,2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要:四川盆地上二叠统大隆组富有机质硅质泥岩是页岩气勘探的一套重要目的层系。利用扫描电子显微镜和元素地球化学等方法探究大隆组有机质类型、分布特征及富集因素, 对该地区非常规油气勘探具有指导意义。根据扫描电镜图片, 上寺剖面大隆组有机质按形态可分为形态有机质、弥散有机质和沥青。三者成因不同, 形态有机质是选择性保存的结果, 以离散状分布在所有岩性样品中; 弥散有机质是大隆组有机碳总量(total organic carbon, TOC)的主体, 主要分布在硅质泥岩样品中, 硅质灰岩样品中极少, 体现了粘土矿物的吸附作用; 沥青是可溶有机质运移进入孔、缝系统, 经高热演化后形成的块状有机质, 主要分布于硅质灰岩和灰岩样品中。该剖面地球化学数据显示缺氧沉积环境有利于有机质保存, 但海洋表层生产力才是控制 TOC 含量变化的主要因素。研究表明, 晚二叠世海平面上升导致上寺剖面大隆组表层生产力增加及底层海水缺氧, 该组富有机质黑色硅质泥岩段高 TOC 是沉积环境与矿物吸附共同作用的结果, 同时也反映了原生有机质保存情况。更好的理解泥质烃源岩中有机质赋存类型有助于烃源岩评价及非常规油气勘探开发工作。

关键词:大隆组; 页岩气; 有机质类型; 氧化还原; 粘土矿物; 石油地质。

中图分类号: P539

文章编号: 1000-2383(2017)06-01008-18

收稿日期: 2016-11-30

Distribution Characteristics and Enrichment Factors of Organic Matter in Upper Permian Dalong Formation of Shangsi Section, Guangyuan, Sichuan Basin

Zhang Yi^{1,2}, Zheng Shujan¹, Gao Bo³, Feng Qinglai^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China

Abstract: The black siliceous mudstones of the Upper Permian Dalong Formation in Sichuan basin are important target zones for shale gas exploration. To facilitate the unconventional hydrocarbon resources exploration in this area, scanning electron microscope (SEM) and elemental geochemistry were used to investigate organic matter types, distribution characteristics and enrichment factors in Dalong Formation. According to SEM pictures, organic matter in the Dalong Formation can be divided into morphological organic matter, amorphous organic matter and bitumen. Morphological organic matter is the result of selected preservation, discretely distributed in all lithology samples; disperse organic matter, which can be seen in siliceous mudstones but rarely in siliceous limestone samples, is the principle part of TOC (total organic carbon) of the Dalong Formation, reflecting the adsorption of clay minerals; bitumen formed from dissolved organic matter migration and subsequent high thermal evolution, is distributed in siliceous limestone and limestone samples, rarely in siliceous mudstone samples. Geochemical data indicate that anoxic environment is beneficial to the preservation of organic mat-

基金项目: 中国地质调查局项目(No.1212011220796); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费。

作者简介: 张毅(1988—), 男, 博士研究生, 从事地层学、古生物学及页岩气地质学研究。ORCID: 0000-0002-2714-1407。

E-mail: zhangyi13667257871@163.com

* **通讯作者:** 冯庆来, E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

引用格式: 张毅, 郑书桀, 高波, 等, 2017. 四川广元上寺剖面上二叠统大隆组有机质分布特征与富集因素. 地球科学, 42(6): 1008-1025.

ter, but the productivity is the main factor to control the change of content of total organic carbon (TOC). Comprehensive correlation research shows that the sea-level rise of the Late Permian led to the increased productivity and anoxic water column in the adjacent oceanic basin. The high content of TOC in organic-matter-rich black siliceous mudstone is the result of sedimentary environment and mineral absorption, and also reflects preservation state of primary organic matter. Migration bitumen should be excluded for hydrocarbon source rock evaluation.

Key words: Dalong Formation; shale gas; organic matter; distribution characteristics; enrichment factor; petroleum geology.

0 引言

近年来,中国页岩气勘探取得重大突破,四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组(及相当层位)黑色页岩均获得工业气流,成为世界第3个将页岩气工业化生产的国家(董大忠等, 2010, 2016; 邹才能等, 2010)。然而,我国页岩气勘探开发整体仍处于发展初期,中国南方还发育有数套海相富有机质黑色页岩,而页岩气成效却不显著。上二叠统大隆组是页岩气资源勘探潜力很好的层位(腾格尔等, 2008; 付小东等, 2010; 李牛等, 2011),加强大隆组页岩气地质特征研究,分析大隆组有机质类型、分布状态和富集因素,不仅具有经济效益,更是完善页岩气勘探开发理论基础的当务之急。

有机质保存控制因素一直以来都是学者们研究的重点。现代海洋研究表明,海水表层中的有机质只有0.5%能被传送到沉积物表面并被埋藏(Hedges and Keil, 1995; Burdige, 2007; Zonneveld *et al.*, 2010)。初级生产力、水体氧化还原环境、沉积速率以及有机质埋藏效率均会影响有机质保存(Pedersen and Calvert, 1990; Canfield, 1994; van Helmond *et al.*, 2015; 丁修建等, 2016)。随着研究深入,现代海洋学家提出有机质在富氧环境中的暴露时间才是有机质保存主要控制因素,其他条件直接或间接影响有机质暴露在富氧环境中的时间,从而影响有机质的降解速率(Hartnett *et al.*, 1998; Hulthe *et al.*, 1998; Arnarson and Keil, 2007)。近20年来,对现代海洋大陆边缘沉积物和地质历史时期黑色页岩的研究发现,矿物表面积(mineral surface area, MSA)与有机碳总量(total organic carbon, TOC)具有显著正相关性(Mayer, 1994a, 1994b; Kennedy, 2002; Kennedy *et al.*, 2014),说明有机质与矿物结合可以有效促进有机质保存。进一步研究表明大陆边缘沉积物中碎屑粘土矿物可达60%,而且沉积物的矿物表面积(MSA)普遍受高表面积矿物含量控制(Chamley, 1989; Hedges and Keil, 1995),如蒙脱石与石英、碳酸盐矿物相比,其表面积高出两个数量

级,这一现象使粘土矿物研究备受关注。此外,有机质本身化学组成对其保存也有重要影响,在有利的沉积环境下部分脂质和芳香质细胞壁聚合物可以顺利埋藏进入沉积物(Zonneveld *et al.*, 2010)。

现代海洋沉积物中有机质研究有大量数据支持,控制条件已经基本清楚。相比之下,地质历史时期的黑色页岩中有机质保存状况及控制条件还不清楚。大量学者(Pedersen and Calvert, 1990; Kennedy, 2002; 蔡进功等, 2007; 李红敬等, 2009, 2012; Kennedy *et al.*, 2014; Shen *et al.*, 2014)重点讨论了古海洋生产力、水体氧化还原环境和粘土矿物吸附作用对黑色页岩中有机质保存的控制因素,但这些研究忽略了保存在黑色页岩中有机质本身赋存形态。而传统烃源岩有机质研究方法以孢粉学为基础,将有机质提取后用光学显微镜观察(李贤庆等, 1996),这不仅破坏了有机质原始赋存状态,不能识别有机质依附物质,而且受光学显微镜精度限制,微米—纳米级结构有机质难以观察,对无定形物质难以识别。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)可以很好地识别页岩中的微观结构(Curtis *et al.*, 2012),而且将能谱仪配备在扫描电镜上进行微区化学成分分析,可以有效识别出岩石中的有机质(Slatt and O'Brien, 2011; Loucks *et al.*, 2012)。用扫描电子显微镜研究不同岩性中有机质的分布状态以及不同类型有机质与矿物的关系,可以弥补前人研究的不足,深入了解埋藏有机质的微观特征。

四川广元上寺剖面位于四川盆地西北部,曾作为P/T界线点国际层型候选剖面,国内外许多学者对该剖面进行了生物地层学、岩石地层学和沉积环境研究(李子舜等, 1986; 李华梅等, 1988; 黄思静, 1992; Lai *et al.*, 1996; Jiang *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2012),还有学者对该剖面疑源类做了详细研究(Lei *et al.*, 2012, 2013; Shen *et al.*, 2013),但并未对大隆组有机质进行系统研究。笔者通过扫描电镜细致观察并分析大隆组有机质类型,总结有机质的分布状态,结合地球化学方法讨论了大隆组有机质富集因素,为深入了解川北地区大隆组烃源岩

特征及页岩气富集条件打下了坚实的基础。

1 地质背景

中上扬子地区中二叠统以浅海碳酸盐沉积为特征(朱同兴等,1999).中二叠世末期扬子西缘地幔柱上拱诱发了著名的峨眉地裂运动(罗志立,1981;张恺等,1983),由此引起的一系列差异运动延续至晚二叠世,导致晚二叠世岩性、岩相剧烈分异.大隆组作为长兴组同时异相沉积,主要分布于扬子地台南、北缘地区,是一套深灰至灰黑色的薄层硅岩、硅质页岩和碳质泥质岩,代表了深水大陆边缘盆地相沉积.长兴组则以深灰色中一厚层灰岩为特征,代表了碳酸盐台地相沉积(蔡雄飞等,2007;付小东等,2010;何幼斌和罗进雄,2010).

上寺剖面位于扬子板块西北边缘(图 1),该剖面连续沉积晚二叠世大隆组以及早三叠世飞仙关组.大隆组从下到上岩性依次为灰黑色中层硅质灰岩夹黑色薄层泥岩(15 层)、富有机质黑色薄一中层硅质泥岩夹泥质硅质灰岩(16~18 层)以及黄色中一厚层灰岩夹硅质灰岩、泥岩及火山凝灰岩(19~27 层).沉积学和古生态学研究表明大隆组形成于深水外陆架环境,飞仙关组属于近岸潮坪环境(Yan *et al.*,2008;蔡雄飞等,2011;聂小妹等,2012).从层序地层来看,上寺剖面大隆组主要由多个三级层序组成,其下部(15 层)为高位体系域,中部(16~21 层)为两个完整的海侵体系域和高位体系域,上部

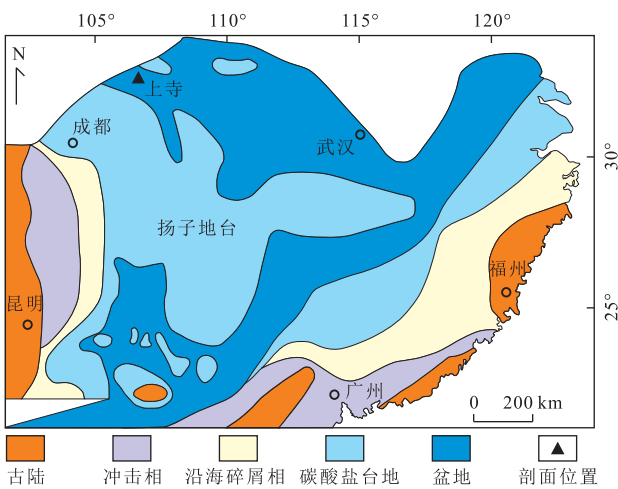


图 1 华南长兴期古地理图及上寺剖面位置
Fig. 1 Changhsingian palaeogeography map of South China and Shangsì section location
据 Feng and Algeo(2014)

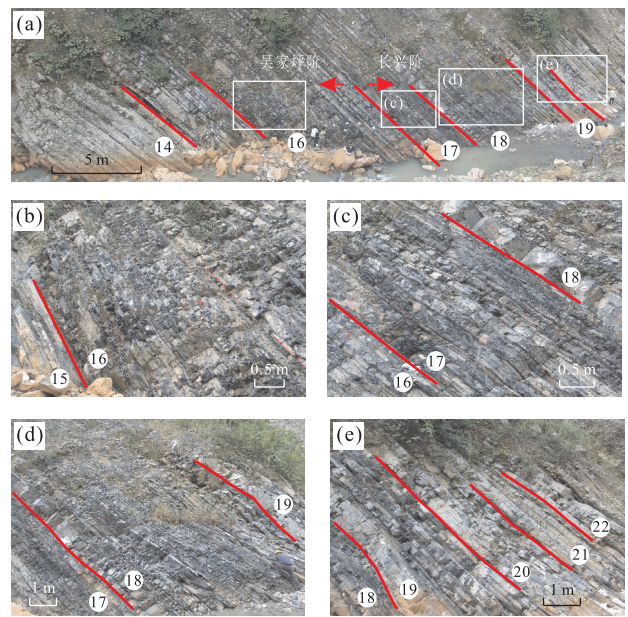


图 2 上寺剖面野外照片
Fig.2 Field photo of Shangsì section
a.大隆组整体照片,16 层以下为吴家坪阶,17 层开始为长兴阶;b. 16 层下部黑色硅质泥岩;c.17 层黑色硅质泥岩,厚层灰岩为 18 层底部;d.18 层黑色硅质泥岩照片;e.19~22 层硅质灰岩

(22~25 层)是另一个海侵、高位域,最顶部(26~27 层)1 m 可以划归另外一个个体系域.笔者重点研究该剖面中、下部富有机质层段(15~21 层).

2 实验方法

本次研究对上寺剖面 85 个样品进行地球化学分析,并根据层位、岩性及 TOC 含量变化选择 14 个样品,利用扫描电镜探究有机质类型及分布规律.野外尽可能选取新鲜样品,在室内用碳化钨钵研磨成 200 目,然后用不同的方法分析测试不同的化学成分.

TOC 在美国辛辛那提大学完成测试,仪器为 C-S2000 analyzer.实验称取 100 mg 样品,在 40 ℃ 下用 7% HCl 处理样品 24 h 以去掉无机碳(total inorganic carbon, TIC),烘干后测试样品 TOC.结果用标样 DBS-1 和 Sold 校正,保证误差小于结果的 5%.

微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测定,测试仪器为 Agilent 7700x ICP-MS.实验准确称取 50 mg 样品粉末于高压密闭 Teflon 溶样器中,缓慢加入 1.5 mL 的高纯硝酸和 1.5 mL 的高纯氢氟酸,加盖并旋紧溶样器钢

套.将溶样器放入烘箱中,在 190 ℃ 下加热 48 h,冷却后打开溶样器,在 140 ℃ 电热板上将溶液蒸至湿盐状,然后缓慢加入 2 mL 浓度为 30% 的高纯硝酸,再次置于烘箱中 140 ℃ 过夜.待溶样器冷却,将提取液用 2% 的硝酸稀释于清洗干净的 PET(聚酯, polyethylene terephthalate)瓶中(稀释因子为 1 : 1 500)密闭保存,待上机测定.数据分析处理及准确度详见 Liu *et al.*(2008).

主量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用化学滴定法测定,使用仪器为紫外分光光度计和原子吸收分光光度计.将样品放进烘箱,分别在 105 ℃ 和 1 000 ℃ 下烧 2 h,记下损失的质量,即可得到吸附水的质量和烧失量,主量元素钛(Ti)用磺基水杨酸光度法测定,具体执行标准见 GB/T 14506—2010.

扫描电镜观察在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 QANTA200 扫描电子显微镜、GENESIS 能谱仪和 CEA035 真空镀膜仪完成.笔者进行扫描电镜观察的 14 个样品中,硅质泥岩 6 个(SS16-23、SS16-37、SS277-5、SS279-2、SS279-15-2和 SS287-26)、泥质硅质灰岩 2 个(SS15-3 和 SS290-7)、硅质灰岩 6 个(SS15-3、SS15-8、SS284-3、SS287-32、SS288-39 和 SS291-6),为了保证样品新鲜并未选取薄层泥岩样品,TOC 分布在 0.39%~11.18%.制样过程如下:将页岩样品破碎成 2~3 cm

小块,选取上下平整的新鲜表面进行镀碳膜处理,然后放入样品室用背散射模式(back scattered electron, BSE)及二次电子模式(secondary electron, SE)观察有机质,结合能谱仪进行元素分析.测试条件:能谱仪的时间常数为 51.2,计数率 3 000 左右、死时间为 30% 左右、每一个能谱点收集时间为 100 s;扫描电镜的工作距离为 11.5 mm,加速电压为 20 kV,工作电流的选择是在保证能谱仪计数率在 3 000 左右,一般 Spot 选在 5 左右(张素新等,2014).

3 结果

3.1 大隆组有机质赋存类型

由于不同沉积环境下保存的有机质不同(Zhu *et al.*, 2014; Tessin *et al.*, 2015),研究有机质微观分布状态有助于理解富有机质泥岩中有机质富集过程及机理.

传统烃源岩有机质研究以孢粉学为基础,将有机质分为孢型类、结构有机质、无结构有机质以及再沉积有机质(李建国和 Batten, 2005).近年来,国内外学者(樊馥等, 2011; Kennedy *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2014)根据有机质形态特征及其与矿物的关系,将黑色页岩中有机质分为:生物形态有机质和有机-粘土复合结构的无定形有机质.笔者参考前人分类方案,根据上寺剖面大隆组有机质 SEM 下形

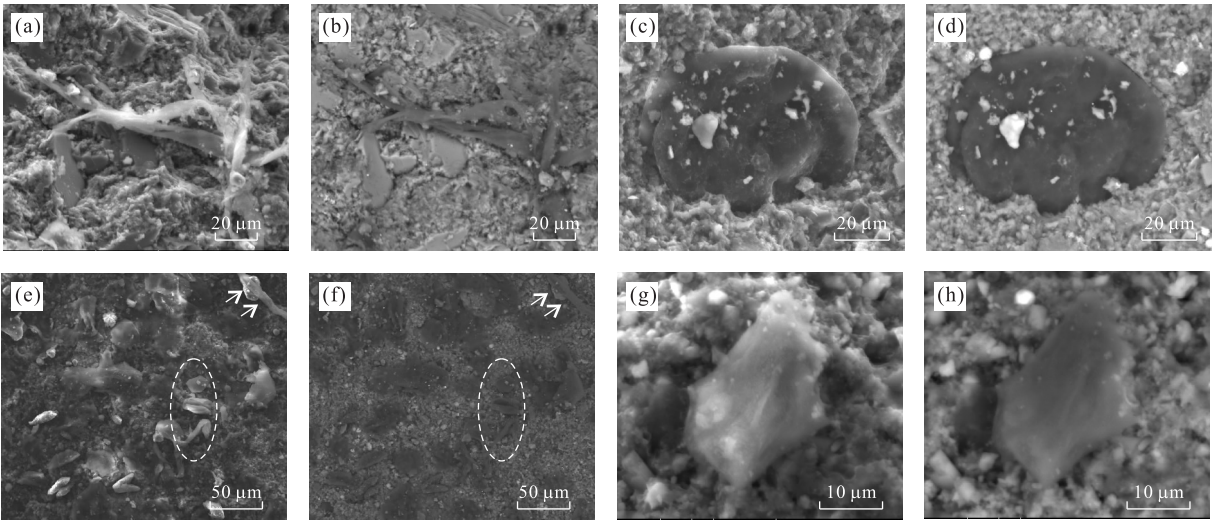


图 3 形态有机质扫描电镜特征

Fig.3 Characteristics of morphological organic matter in scanning electron microscope

所有照片两张为一组,显示同一区域,每组第一张为 SE 照片,第二张为 BSE 照片.a、b.丝状胞外聚合物,样品 SS15-3;c、d.疑源类(*Dictyotid-ium*),样品 SS21-13;e、f.形态有机质,右上角箭头指示丝状有机质,虚线椭圆内为疑源类化石,样品 SS16-23 TOC = 11.18;g、h.具刺疑源类化石残片,样品 SS16-1

表 1 上寺剖面大隆组地球化学数据

注: TOC, TiO_2 单位为%; Ni, Zn, V, Mo, U 单位为 10^{-6} ; 后太古宙平均页岩数据引自 Taylor and McLennan (1985).

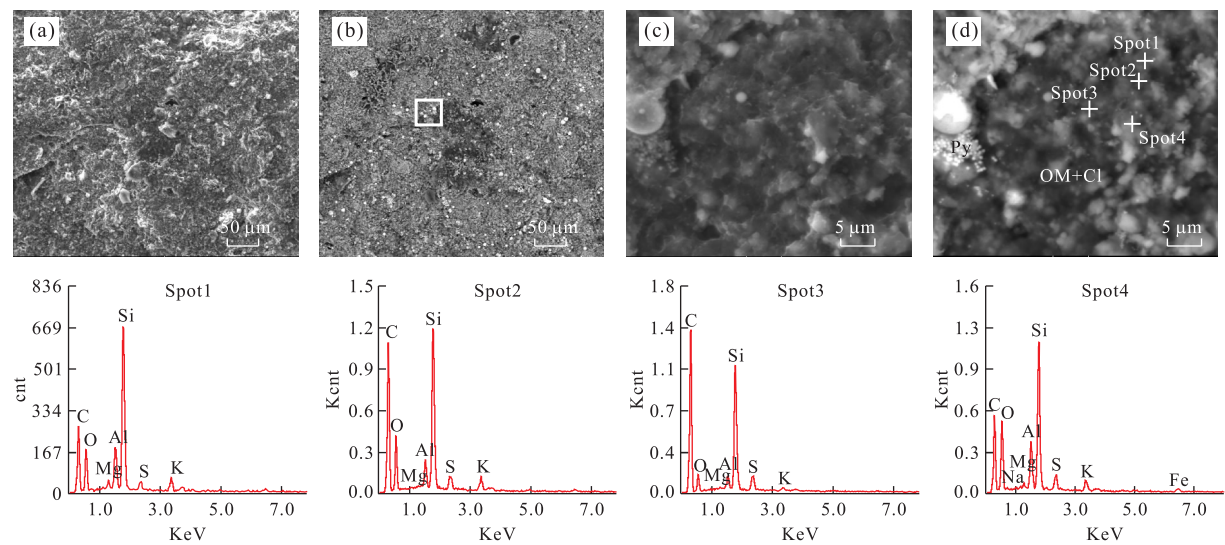


图 4 扫描电镜下弥散有机质分布特征及能谱图

Fig.4 Disperse organic matter distribution characteristics in SEM and the graph of energy disperse spectrum
样品 279-2 TOC=10.53.所有照片两张为一组,显示同一区域,每组第一张为 SE 照片,第二张为 BSE 照片.a、b.斑状分布弥散有机质;c、d.图 b 白色方框区域放大图像.Spot1~Spot4 显示图 d 中弥散有机质成分特征.OM.有机质;Cl.粘土矿物;Sp.能谱点

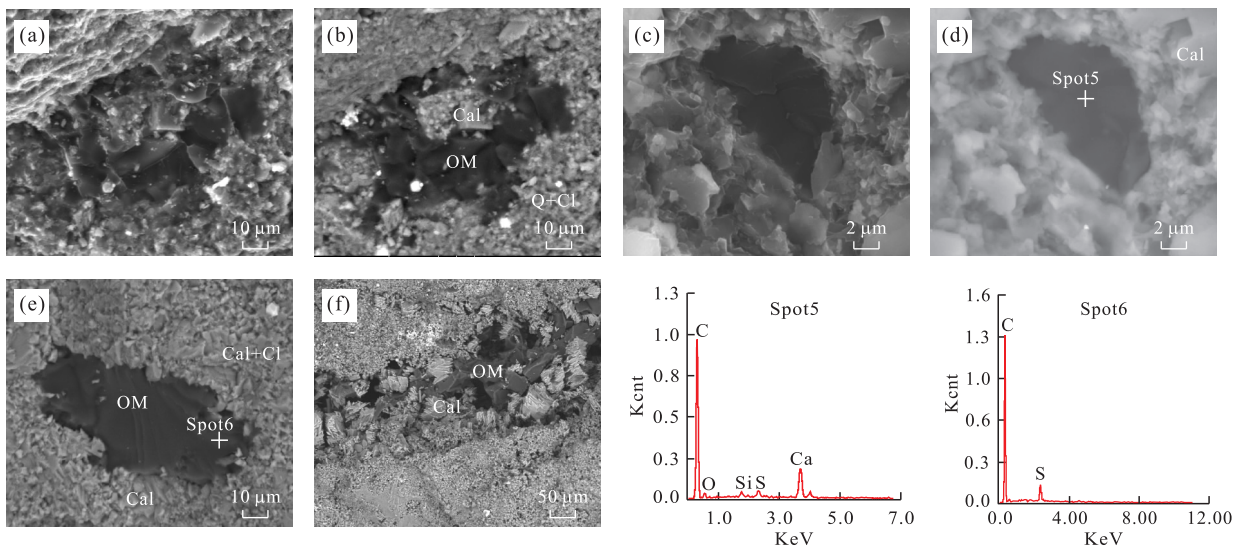


图 5 扫描电镜下沥青分布特征及能谱图

Fig.5 Bitumen distribution characteristics in SEM and the graph of energy disperse spectrum
照片 a~d 两张为一组,显示同一区域,每组第一张为 SE 照片,第二张为 BSE 照片.a、b.块状沥青,样品 284-14 TOC=2.61;c、d.储存在孔洞中的沥青,样品 287-32 TOC=0.39;e.孔洞中沥青,贝壳状断口,样品 288-39 TOC=0.48;f.储存在裂隙中的沥青,样品 SS277-5.Spot5、Spot6.展示沥青成分特征.Sp.能谱点;OM.有机质;Cl.粘土矿物;Cal.方解石;Q.石英

态特征和能谱数据,将有机质划分为以下 3 种类型:

(1)形态有机质,是靠其自身高稳定性保存下来的具有原生生物形态的颗粒状有机质,离散分布于各类岩性样品中,包括丝状有机质(图 3a、3b、3e 和 3f),球形、椭圆形疑源类化石(图 3c、3d、3g 和 3h).形态有机质与围岩接触关系明显,在 SEM 下很容易识别,在 SE 模式下发亮,在 BSE 模式下呈黑色,

当形态有机质较厚且与围岩紧密接触时,在 SE 模式下也为暗色(图 3c).

(2)弥散有机质,是沉积过程中有机质与粘土矿物相互作用的产物,主要分布在硅质泥岩样品中,泥质硅质灰岩中含量较低,硅质灰岩中极少分布.SE 模式下弥散有机质是片状矿物聚合物(图 4c),因此放大倍数过低时仅靠形貌特征难以区分弥散有机质

表 2 上寺剖面大隆组弥散有机质和沥青能谱元素分析结果
Table 2 EDS results of AOM in Dalong Formation, Shangsi section

样品	点号	元素含量(%)										描述	
		C	O	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Na	Mg		Ti
SS279-2	Spot1	38.51	31.76	5.24	19.78	1.31	2.20				1.20		弥散有机质
SS279-2	Spot2	50.84	29.41	2.42	13.73	1.73	1.48				0.40		弥散有机质
SS279-2	Spot3	67.76	14.45	1.56	13.19	1.99	0.61				0.44		弥散有机质
SS279-2	Spot4	36.13	36.93	4.62	15.72	1.96	1.67		1.29	0.73	0.96		弥散有机质
SS287-32	Spot5	75.64	12.26			2.51		9.59					块状有机质
SS-288-39	Spot6	94.66				5.34							块状有机质

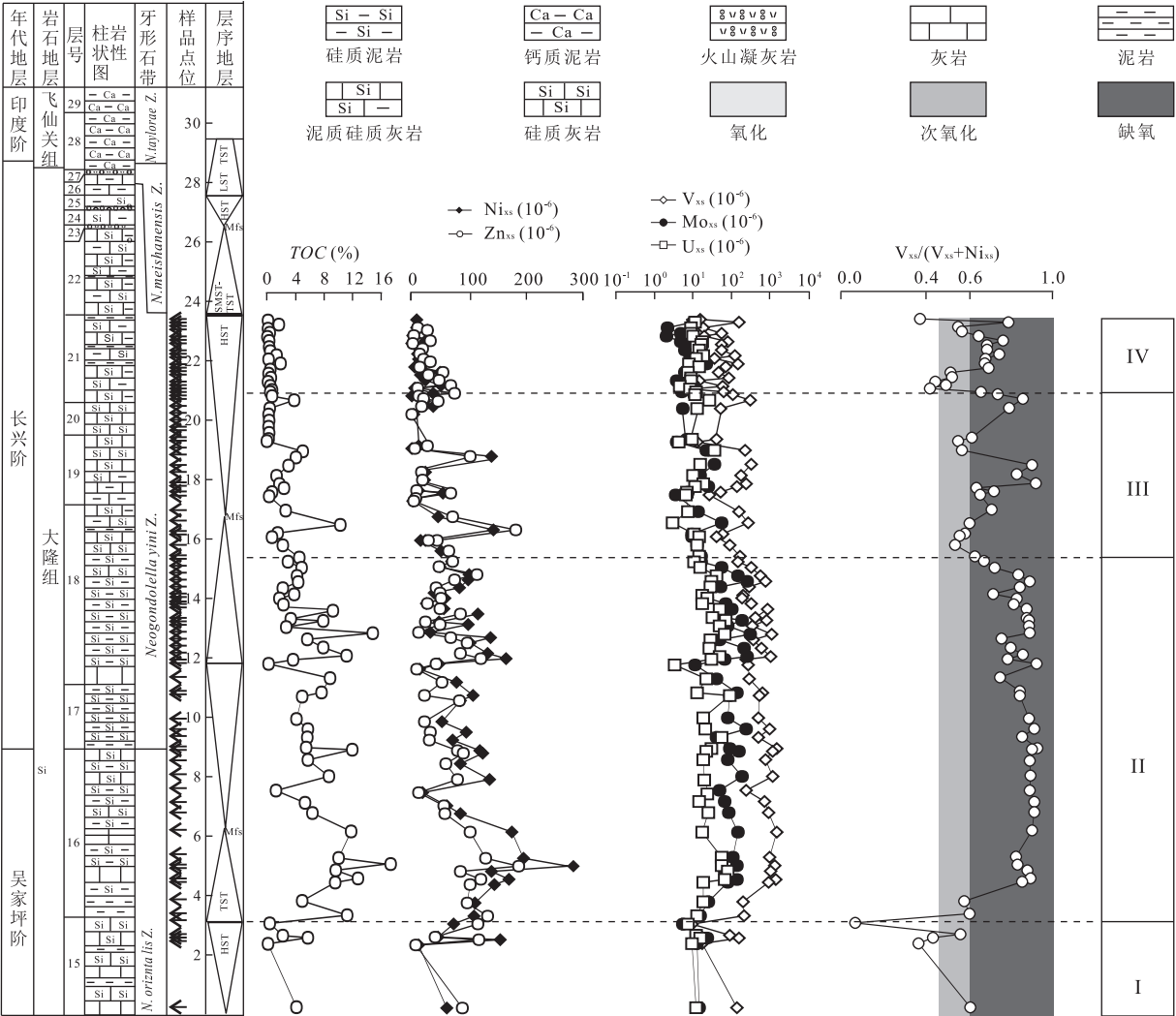


图 6 大隆组 TOC 及古海洋沉积环境指标曲线

Fig.6 TOC and paleo-oceanic sedimentary environment profile of the Dalong Formation

Ni_{xs}、Zn_{xs}指示古海洋生产力,U_{xs}、Mo_{xs}、V_{xs}、V_{xs}/(V_{xs}+Ni_{xs})为氧化还原指标;牙形石带带 Jiang *et al.* (2011)

与周围矿物.但是弥散有机质在 BSE 模式下呈黑色斑状及团块状分布,与围岩有明显的差别,单个斑/团块直径大小约不一(图 4b、4d),容易分辨.能谱数据 displays 弥散有机质 C 质量百分含量最高,在 50%~80%之间;Si、Ca、O 次之,变化范围 5%~15%;Al、

K、S 等元素含量最少,不到 3%。
(3)沥青,是一种经过高热演化的块状固体有机质,主要分布于硅质灰岩和灰岩样品中,硅质泥岩中稀少.沥青往往储集在孔隙、裂隙中,与围岩紧密接触,SE、BSE 图像下均为黑色块状.沥青最大的特征是

具棱角(图 5b 和 5f)以及贝壳状断口(图 5e)。能谱数据显示,沥青 C 质量百分含量可达 90% 以上,仅含少量 O 和 S,几乎不含 Si、Ca 及其他金属元素(表 2)。

3.2 大隆组 TOC 丰度及无机地球化学特征

总有机碳(TOC)含量是烃源岩评价的重点,也是有机质保存的重要体现。古海洋水体氧化还原环境和生产力对有机质保存具有重要影响(Pedersen and Calvert, 1990; 沈俊和冯庆来, 2010; Schoepfer *et al.*, 2015; Silva and Duarte, 2015; Tessin *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2015)。黑色页岩研究中通常用一些微量元素或其比值作为古海洋环境的替代指标,例如 U、Mo、V 等微量金属元素在还原环境下会形成沉淀并埋藏进入沉积物从而富集的含量以及 V/(V+Ni)的比值在不同水体环境中变化较大,因此常用来指示水体氧化还原环境(Jones and Manning, 1994; Tribovillard *et al.*, 2006; 沈俊等, 2011),当 V/(V+Ni)比值小于 0.46 时水体处于氧化环境,大于 0.6 时水体处于缺氧环境,在 0.46~0.60 时为次氧化环境。Ni 和 Zn 可以随有机质沉降入海底,随后由于有机质分解被释放进入孔隙水中,最后在缺氧条件下形成各自的硫化物而沉积下来,所以 Ni 和 Zn 的含量与有机质沉降量有着密切关系,因此它们常用来表征还原条件下生物生产力(Piper and Perkins, 2004; Tribovillard *et al.*, 2006; 沈俊等, 2011)。岩石样品中的微量元素或多或少会受到陆源的影响,由于 Ti 通常来自于陆地而且极难溶于水(Murray and Leinen, 1996),前人在研究华南地区沉积环境时往往会用微量元素 Ti 做标准化元素来消除各元素陆源影响(Ma *et al.*, 2008; 雷勇等, 2010; Chen *et al.*, 2012),公式如下:

$$Element_{xs} = Element_{total} - Ti_{total} \times (Element/Ti)_{PAAS}, \quad (1)$$

式(1)中, $Element_{xs}$ 是某元素非陆源成分的含量, $Element_{total}$ 是实验测得该元素的总含量, Ti_{total} 是实验测得 Ti 元素的含量, $(Element/Ti)_{PAAS}$ 是后太古代澳大利亚页岩中该元素与 Ti 含量的比值(Taylor and McLennan, 1985)。

综合各个指标的分布规律,将上寺剖面大隆组古海洋地球化学特征分为 4 段(图 2)。I 段为剖面 15 层, II 段为剖面 16 层至 18 层中部, III 段为 18 层上部至 21 层下部, IV 段地层为 21 层上部。

第 I 阶段各个指标数值普遍偏低,并且波动较大, TOC 分布在 0.33%~5.54%, 平均值为 2.53%。扣除陆源影响后, Ni_{xs} 为 $(17.72 \sim 158.04) \times 10^{-6}$,

平均值为 74.27×10^{-6} ; Zn_{xs} 平均值为 78.96×10^{-6} , 最大值为 121.37×10^{-6} , 最小值为 13.34×10^{-6} 。 U_{xs} 、 Mo_{xs} 和 V_{xs} 浓度相对较低, $V_{xs}/(V_{xs} + Ni_{xs})$ 比值均小于 0.6。总体来说 I 段生产力较低, 水体环境偏氧化—次氧化。

第 II 阶段所有指标处于高值状态。TOC 含量迅速上升, 最高可达 15.74%, 平均值为 6.56%。生产力水平高, Ni_{xs} 和 Zn_{xs} 均在此段达到最高点, 分别为 272.94×10^{-6} 和 188.29×10^{-6} , 两者的平均值分别为 101.91×10^{-6} 和 73.72×10^{-6} 。氧化还原条件为缺氧甚至硫化, 表现为 U、Mo 和 V 极度富集。 U_{xs} 、 Mo_{xs} 和 V_{xs} 平均值分别为 21.27×10^{-6} 、 76.12×10^{-6} 和 611.53×10^{-6} 。 $V_{xs}/(V_{xs} + Ni_{xs})$ 比值大部分大于 0.6, 此段也是有机质富集埋藏的重要层段。

第 III 阶段各指标数值仍然较高, 但已经有明显下降趋势。TOC 大部分处于 0.13%~3.00%, 平均值为 1.89%。 Ni_{xs} 和 Zn_{xs} 的值从第 II 阶段的最高峰逐渐下降到平均值只有 40.79×10^{-6} 和 46.21×10^{-6} 。 U_{xs} 、 Mo_{xs} 和 V_{xs} 浓度也有所降低, 平均值分别为 7.45×10^{-6} 、 8.90×10^{-6} 、 102.88×10^{-6} 。 $V_{xs}/(V_{xs} + Ni_{xs})$ 的值大部分大于 0.6, 指示此段整体处于次氧化—缺氧环境。

第 IV 阶段所有指标含量均达到本剖面的最低值。生产力低, TOC 平均值为 0.69%, Ni_{xs} 和 Zn_{xs} 平均值分别为 24.36×10^{-6} 和 33.65×10^{-6} 。 $V_{xs}/(V_{xs} + Ni_{xs})$ 指标在该段地层从 0.41 升至 0.76 又下降到 0.37, 指示此段地层沉积环境在氧化与还原状态之间波动。

4 讨论

4.1 大隆组有机质来源与成因

二叠纪—三叠纪之交发生了显生宙规模最大的生物集群灭绝事件(Feng and Algeo, 2014; Yin *et al.*, 2014; 宋海军和童金南, 2016), 有学者(Xie *et al.*, 2007; Algeo and Twitchett, 2010; Zhou *et al.*, 2016)认为灭绝原因是当时西伯利亚火山喷发、全球气候变暖导致陆地生态系统遭到破坏风化作用加强, 大量营养物质进入海洋促使海水分层形成硫化海洋, 最终造成海洋生态系统崩塌以及大量生物灭绝。虽然在全球很多中—浅水剖面发现了指示陆地来源的生物标志化合物, 但是上寺剖面 C30M/C30HP 值(一种指示陆源有机质的生物标志

化合物, C30M/C30HP 值越高表示陆源有机质含量越高)直到 22 层顶部才开始上升, 对应长兴晚期海退事件(Zhou *et al.*, 2016); Lei *et al.* (2013) 也在大隆组中一下部发现大量疑源类等海洋浮游藻类化石. 因此, 笔者认为大隆组中下部黑色岩系中有机质以海洋来源有机质为主, 受陆源影响较小(Shen *et al.*, 2013). SEM 显微图片是揭示有机质赋存类型的强力依据, 本次研究发现其有机质可分为: 形态有机质、弥散有机质和沥青; 各类型有机质成因不同.

大隆组发育的形态有机质包括丝状有机质以及球形、椭球形疑源类化石. 丝状有机质形态不规则(图 3a 和 3b), 为生物降解过程中形成的胞外聚合物, 耐酸碱、易保存; 球形和椭球形有机质形态规则, 为疑源类化石 *Dictyotidium* (图 3c 和 3d) 以及其他疑源化石残片(图 3e~3h)(de Leeuw *et al.*, 2006; Lei *et al.*, 2013; Shen *et al.*, 2013; Makeen *et al.*, 2015; 秦建中等, 2015). 形态有机质自身稳定性较高且颗粒较大, 在水体中可以快速沉降, 减少在富氧环境中的暴露时间, 因此易于埋藏进入沉积物, 是选择性保存的结果.

弥散有机质和沥青经过生物体降解和成岩作用改造已经无法看到其原始形态结构, 但是二者指示有机质不同保存过程. SE 与 BSE 图件的亮度、形貌以及能谱分析数据是有机质的重要识别证据. 弥散有机质 C 元素质量分数很高, 因此在 BSE 图像中呈黑色(图 4b 和 4d), 这是大量有机质存在的结果; 同时, Al、Si、O、Ca、Fe 等元素存在指出弥散有机质中含有粘土矿物, 而弥散有机质在 SE 模式下是粘土矿物形态(图 4c), 这说明有机质存在对矿物外观影响不大, 有机质很可能是吸附在矿物层间(Kennedy 2002; Curry *et al.*, 2007). 这一结果体现了无机矿物对有机质的吸附保护作用(Mayer, 1994a, 1994b; Hedges and Keil, 1995; Salmon *et al.*, 2000), 大洋沉积物中超过 90% 的有机质与矿物紧密结合(Keil *et al.*, 1994), 陆相泥质烃源岩中与细粒粘土矿物结合的有机质超过 70%, 且大部分为无定形有机质(弥散有机质)(Zhu *et al.*, 2014, 2015). 密度分组研究指出有机质主要集中在 $1.9 \sim 2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 组分中, 说明有机质主要与细粒粘土矿物结合(Bock and Mayer, 2000; 樊馥等, 2011). 这是因为粘土矿物, 尤其是蒙脱石, 具有庞大的矿物表面积, 其中一些活性点位可以将海水中易被分解的活性有机质分子、金属离子和水分子一起吸附在矿物表面的微孔隙或矿物层间域内, 形成“有机分子—金属阳离子—水”这样的稳定系统, 从而提高有机质稳定

性, 促使有机质快速沉降埋藏(Williams *et al.*, 2005; Curry *et al.*, 2007; 卢龙飞等, 2011, 2013; Kennedy *et al.*, 2014). 要注意的是, 当吸附有机质含量继续增加时, 弥散有机质边缘会变模糊(Bennett *et al.*, 2012; Kennedy *et al.*, 2014).

本次实验发现的沥青主要储存在孔、缝系统中, 这与南盘江盆地以及四川盆地东部碳酸盐储层的洞、缝空间内富集的块状有机质十分类似, 有学者提出这是原油裂解产生的焦沥青(赵孟军等, 2007; 朱扬明等, 2012). 沥青往往具有高 C, 低 O、S 的特征. 沥青的形成是因为碳酸盐矿物不具备层间系统, 因此有机质不能像泥岩中有机质那样与粘土矿物紧密结合(张水昌和童箴言, 1992; 李延钧等, 2000), 在粘土矿物含量较少的硅质灰岩或灰岩样品中, 大部分有机质被降解, 残余有机质运移进入孔隙或裂隙, 最终形成块状有机质.

4.2 古环境因素对有机质分布和保存的影响

有机质保存是一个复杂的物理化学过程, 有机质组分、水体氧化还原环境、生产力以及矿物成分等多个因素均会影响有机质埋藏和保存(Zonneveld *et al.*, 2010; Makeen *et al.*, 2015). 众多学者通过野外观察和沉积地球化学研究, 发现大隆组黑色页岩 TOC 含量与生产力指标和氧化还原环境指标均具有良好的正相关性, 得出有机质保存受生产力和氧化还原共同控制: 高生产力是有机质富集的前提条件, 缺氧环境是基本环境(Ma *et al.*, 2008; 陈慧等, 2010; 李牛等, 2011; Chen *et al.*, 2012).

为进一步探究古环境对有机质保存的影响, 笔者将大隆组划分为 4 段, 选取 Mo_{xs} 和 Ni_{xs} 作为古海洋氧化还原环境和古生产力的替代指标, 分段研究它们与 TOC 的相关性(图 7). Ni 可以直接与有机质络合进入沉积物(Tribovillard *et al.*, 2006), 因此常用来指示古生产力, 生产力越高, 沉积物中 Ni_{xs} 含量也越高; 沉积物中 Mo 主要来源海水化学沉积成因(Piper and Perkins, 2004), 受粘土矿物和有机质颗粒影响不大, 在缺氧和硫化环境下可以大量保存, 这两者是很好的古海洋生产力和水体氧化还原环境的指示指标. 同时, 为了直观体现大隆组各类型有机质分布状态, 笔者根据大量扫描电镜图片中不同类型有机质面积, 对各有机质类型进行估量并作出饼状图(图 8). 在第 I 阶段(硅质灰岩段), $R^2(\text{Ni}_{\text{xs}}) = 0.6$ 、 $R^2(\text{Mo}_{\text{xs}}) = 0.7$, 说明有机质保存受氧化还原环境和生产力双重控制. 此时粘土含量低, 沉积环境偏氧化, 大部分有机质被分解, 成岩早期形成的可溶有机

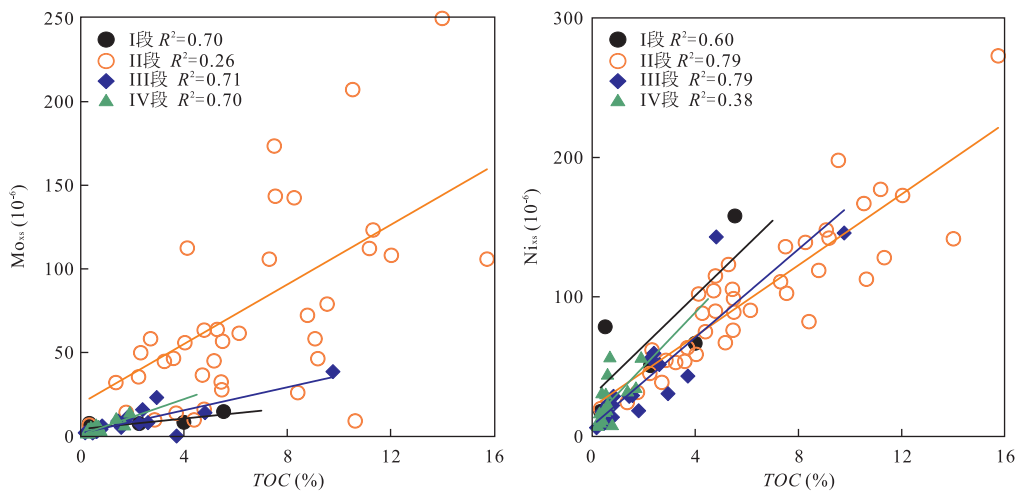


图 7 大隆组 TOC 与 Mo_{xs} 、 Ni_{xs} 含量的关系

Fig.7 Relationship between the TOC and content of Mo_{xs} , Ni_{xs}

Mo_{xs} 含量代表氧化还原程度; Ni_{xs} 代表生产力水平

质运移进入缝隙中并遭受后期的高热演化形成块状沥青,因此该段地层 TOC 含量低,仅可见形态有机质和沥青离散分布(图 8 下 3 个饼状图)。

在第 II 阶段(富有机质泥岩段), $R^2(\text{Ni}_{\text{xs}})=0.79$ 、 $R^2(\text{Mo}_{\text{xs}})=0.26$,说明地层有机质保存受生产力控制更加明显。这是因为除形态有机质(胞外聚合物、疑源类化石)靠自身物理化学特性保存外,大部分有机质均会被微生物分解,缺氧环境下微生物对有机质的利用率比氧化环境下低 1.4~10.4 倍(Simon *et al.*, 1994; Harvey *et al.*, 1995; Bastviken *et al.*, 2004)。II 段地层沉积于缺氧的水体环境,有机质有充分的时间与粘土矿物结合,因此该段地层 TOC 含量高且受生产力影响大,有机质类型主要为弥散有机质。弥散有机质随 TOC 含量增加而增加,以有机质斑块分布(图 8 中间 6 个饼状图)。

在地层上部, $R^2(\text{Ni}_{\text{xs}})=0.79$ 、 $R^2(\text{Mo}_{\text{xs}})=0.71$ (第 III 阶段)和 $R^2(\text{Ni}_{\text{xs}})=0.38$ 、 $R^2(\text{Mo}_{\text{xs}})=0.7$ (第 IV 阶段),指示这两段有机质保存与氧化还原环境、生产力均有一定相关性(图 7)。此段沉积环境波动大,若水体中生产力高且粘土含量较高,部分有机质与粘土矿物相互作用并得以保存,因此 TOC 含量适中,有机质以弥散有机质和块状有机质为主;当生产力和粘土矿物含量均较低时,大部分有机质被分解,因此 TOC 含量低,以形态有机质和块状沥青为主,仅有少量弥散有机质(图 8 上部 4 个饼状图)。

纵观整个剖面,缺氧环境下 TOC 含量高,但是当水体持续处于缺氧状态时,生产力是控制有机质含量变化的主要因素;当水体环境在氧化—缺氧环

境之间波动时,TOC 含量变化较大,水体氧化还原条件和生产力均会影响有机质保存。

4.3 大隆组有机质沉积模式

地质历史时期多次黑色页岩沉积均与海平面变化有关(Erbacher *et al.*, 1996; Algeo *et al.*, 2010; Feng and Algeo, 2014; Tessin *et al.*, 2015),海平面升降会引起古海洋环境及生态系统变更。笔者发现大隆组生产力指标和 TOC 含量与海平面升降变化具有很好的耦合关系,当海侵开始时生产力指标和 TOC 含量迅速上升到峰值然后下降持续一段低谷期,直到最大海泛面时期出现另一个峰值,整个高位域时期生产力指标与 TOC 含量基本都处于低谷期(图 8)。放射虫、有孔虫含量与长兴期海平面变化的耦合关系对这种由海侵引起的生产力增加及随后的缺氧环境具有很好的指示作用,放射虫丰度和分异度较大的层位正好对应于长兴早期海侵事件层位,而有孔虫丰度与放射虫丰度呈现很好的负相关性(Erbacher *et al.*, 1996; 聂小妹等, 2012),吴家坪期海平面整体较低,所以即使在海侵阶段层位中也仅含有孔虫而没有放射虫。

基于以上讨论,笔者总结出大隆组沉积模式(图 9)。大隆组古生产力提高主要由晚二叠世两次海侵事件引起,上扬子地区中二叠世末期开始火山活动频繁(梁新权等, 2013),风化作用导致大量营养元素在陆架低地堆积,部分火山沉积物转化为粘土矿物(蒙脱石)(Löhr and Kennedy, 2014),这一过程为有机质富集提供了物质基础。晚二叠世海平面迅速上升,堆积的营养物质进入海洋系统,导致邻海盆地生

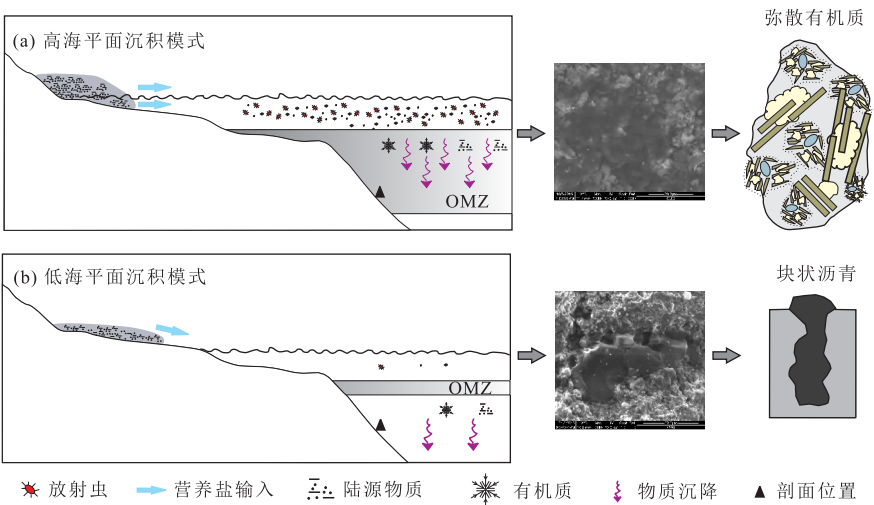


图 9 海平面控制大隆组沉积模式

Fig.9 Sea-level-controlled models explaining black siliceous mudstone sediments in Dalong Formation

a.II 段地层沉积模式,海平面高,生产力高,水体还原,以弥散有机质为主;b.I 段地层沉积模式,低海平面,水体氧化,以块状沥青为主

产力增加(Erbacher *et al.*, 1996),耗氧量也随之增加并形成分层海水,缺氧环境往往由海水中部开始扩散(Sephton *et al.*, 2005; Algeo *et al.*, 2010),此时(II 段下部)底层水体还能保留少量氧气以维持有孔虫等底栖生物活动.随着海水溶氧量进一步减少,氧气最小带扩大至底层水体,形成稳定的缺氧环境(II 段中至上部),维持氧气消耗之外剩余的有机质与海水中的粘土矿物相互作用迅速沉降保存,该段地层海水生产力是控制有机质保存的主要因素,整个 II 段地层有机质以弥散有机质为主(如图 9a).缺氧环境一直持续到第二次海侵末期(II 段顶部),第一次海侵期间大部分营养元素已经被消耗,因此第二次海侵中期开始生产力已经逐渐降低,水体环境在次氧化至缺氧环境之间波动,该段地层(III 段下部,IV 段)TOC 受水体环境和生产力共同控制,有机质类型受生产力和粘土矿物含量控制,弥散有机质含量与粘土矿物含量成正比,形态有机质与沥青也广泛存在.在低海平面时期(I 段、III 段上部),粘土含量减少,大量有机质缺乏粘土矿物吸附作用被分解,剩余稳定的形态有机质和随成岩作用形成的块状沥青(图 9b).

4.4 有机质赋存类型对生烃能力的启示

TOC 一直是评价烃源岩生烃潜力的主要指标,中国南方古生代地层普遍具有高演化特征(付小东等,2010),仅靠 TOC 一项指标并不能准确反应烃源岩的生烃潜力.四川盆地北缘大隆组沉积于深水外陆架环境,黑色富有机质硅质泥岩段 TOC 含量普遍大于 2%(平均值大于 6.5%),是非常规油气重

点勘探层位之一(秦建中等,2009;付小东等,2011).本次研究发现大隆组有机质(TOC)可分为形态有机质、弥散有机质和沥青等 3 种赋存类型,各有机组分生烃潜力也有所差异.形态有机质自身具有高稳定性,成岩作用对其影响有限,而且形态有机质在富有机层位中所占比例极小,因此笔者认为形态有机质对大隆组 TOC 贡献少且生烃潜力低;弥散有机质是富有机质硅质泥岩段 TOC 的主体,有机质与粘土矿物结合可以使母质排水排烃滞后至 450~500 °C(卢龙飞等,2011,2012;蔡进功等,2012),这让弥散有机质具有作为深层生烃母质的潜力,也说明硅质泥岩中 TOC 可以大致反映原生有机质保存情况.相对于弥散有机质,大隆组及同时期浅海相碳酸盐岩地层中普遍存在的块状沥青,是有机质经过运移的结果(赵孟军等,2007;朱扬明等,2012).碳酸盐岩中裂缝、裂隙常成为油气运移通道或滞留空间,很容易被外来沥青所充填(李延钧等,2000),因此当样品中有沥青存在时该样品 TOC 不能准确反映古海洋的生产力水平,但是这些残留沥青在深埋条件具有裂解生气的能力.总之,更好理解泥质烃源岩中有机质赋存类型和分布状态有助于了解成岩过程中形成的油气资源,有利于烃源岩评价以及非常规油气勘探开发工作.

5 结论

四川盆地大隆组不仅是常规油气藏一套重要的烃源岩,也是页岩气潜在的一套勘探目的层系,研究

赋存其中的有机质对揭示该套页岩的生烃潜力及页岩气形成条件具有重要意义.通过扫描电镜观察和地球化学分析,得出以下结论:

(1)扫描电子显微镜(SEM)SE 和 BSE 图像中有机质亮度、形貌及能谱分析是有机质赋存类型鉴别的重要依据.在 BSE 图像中所有类型有机质均为黑色,形态有机质是具有生物结构的高稳定性颗粒有机质;弥散有机质是有粘土矿物对有机质吸附作用的结果,在 SE 图像中为片状矿物聚合体,具有高 C 和低 Si、Al 的特征;块状沥青经运移储集在孔缝系统中,SE 图像下可见棱角及断口,C 质量分数高,Si 和 Al 极少.

(2)地球化学结果分析表明:缺氧水体环境有利于有机质保存,但当水体持续处于缺氧状态时,有机质与粘土矿物结合形成弥散有机质,此时生产力才是控制大隆组 TOC 含量变化的主要因素.

(3)大隆组 TOC、生产力指标与海平面变换具有很好的耦合关系,海平面上升导致营养成分进入临海盆地是引起大隆组中下部高生产力及缺氧环境的主要原因.

(4)研究大隆组有机质类型对非常规油气勘探具有指导意义.形态有机质稳定性高,生烃潜力差,对大隆组 TOC 贡献少;弥散有机质是大隆组 TOC 的主体,可以准确反映古生产力,同时也具有作为深层生烃母质的潜力;沥青是有机质经过运移的结果,不能准确代表古生产力,但是在深埋条件下具有生气能力.进行烃原岩评价时,应当对有机质类型有所区分.

致谢:感谢中国地质大学(武汉)沈俊副教授和雷勇博士在样品测试分析和化石鉴定过程中给予的帮助.

References

Algeo, T. J., Hinnov, L., Moser, J., et al., 2010. Changes in Productivity and Redox Conditions in the Panthalassic Ocean during the Latest Permian. *Geology*, 38 (2): 187—190. doi:10.1130/ G30483.1

Arnarson, T. S., Keil, R. G., 2007. Changes in Organic Matter-Mineral Interactions for Marine Sediments with Varying Oxygen Exposure Times. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(14):3545—3556. doi:10.1016/ j.gca.2007.04.027

Bastviken, D., Persson, L., Odham, G., et al., 2004. Degradation of Dissolved Organic Matter in Oxidic and Anoxic Lake Water. *Limnology and Oceanography*, 49 (1): 109—116. doi:10.4319/ lo.2004.49.1.0109

Bennett, R. H., Hulbert, M. H., Curry, K. J., et al., 2012. Organic Matter Sequestered in Potential Energy Fields

Predicted by 3-D Clay Microstructure Model: Direct Observations of Organo-Clay Micro- and Nanofabric. *Marine Geology*, 315—318; 108—114. doi:10.1016/j. margeo.2012.04.009

Bock, M. J., Mayer, L. M., 2000. Mesodensity Organo-Clay Associations in a Near-Shore Sediment. *Marine Geology*, 163 (1—4):65—75. doi:10.1016/ S0025—3227(99)00105—X

Burdige, D. J., 2007. Preservation of Organic Matter in Marine Sediments: Controls, Mechanisms, and an Imbalance in Sediment Organic Carbon Budgets? *Chemical Reviews*, 107(2):467—485. doi:10.1021/ cr050347q

Cai, J. G., Bao, Y. J., Yang, S. Y., et al., 2007. The Forms and Enrichment Mechanism of Organic Matter in the Mud-dy Sediments and Mudstone. *Science China: Earth Science*, 37(2):244—253 (in Chinese).

Cai, J., Lu, L., Bao, Y., et al., 2012. The Significance and Variation Characteristics of Interlay Water in Smectite of Hydrocarbon Source Rocks. *Science China: Earth Science*, 42 (4):483—491 (in Chinese).

Cai, X. F., Feng, Q. L., Gu, S. Z., et al., 2011. Regressive Continental Shelf as an Important Location for the Development of Source Rocks—An Example from the Upper Permian Dalong Formation in the Northern Margin of the Upper-Middle Yangtze Region. *Oil & Gas Geology*, 32(1):29—37 (in Chinese with English abstract).

Cai, X. F., Zhang, Z. F., Peng, X. F., et al., 2007. Depositional Characteristics of the Dalong Formation and the Related Potential Hydrocarbon Source Rocks of Hubei, Hunan, Guizhou and Guangxi Regions. *Earth Science*, 32 (6): 774—780 (in Chinese with English abstract).

Canfield, D. E., 1994. Factors Influencing Organic Carbon Preservation in Marine Sediments. *Chemical Geology*, 114:315—329. doi:10.1016/0009—2541(94)90061—2

Chamley, H., 1989. Clay Sedimentology. Springer Science & Business Media, New York.

Chen, H., Xie, X. N., Li, H. J., et al., 2010. Evaluation of the Permian Marine Hydrocarbon Source Rocks at Shangsi Section in Sichuan Province Using Multi-Proxies of Paleoproductivity and Paleoredox. *Journal of Palaeogeography*, 12 (3): 324—333 (in Chinese with English abstract).

Curry, K. J., Bennett, R. H., Mayer, L. M., et al., 2007. Direct Visualization of Clay Microfabric Signatures Driving Organic Matter Preservation in Fine-Grained Sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(7):1709—1720. doi:10.1016/ j.gca.2007.01.009

Curtis, M. E., Sondergeld, C. H., Ambrose, R. J., et al., 2012. Microstructural Investigation of Gas Shales in Two and Three Dimensions Using Nanometer-Scale Resolution

- Imaging. *AAPG Bulletin*, 96 (4): 665 — 677. doi: 10.1306/08151110188
- de Leeuw, J. W. D., Versteegh, G. J. M., van Bergen, P. F. V., 2006, Biomacromolecules of Algae and Plants and Their Fossil Analogues. *Plant Ecology*, 182(1—2): 209—233. doi: 10.1007/s11258-005-9027-x
- Ding, X. J., Liu, G. D., Huang, Z. L., et al., 2016. Controlling Function of Organic Matter Supply and Preservation on Formation of Source Rocks. *Earth Science*, 41 (5): 832—842(in Chinese with English abstract).
- Dong, D. Z., Cheng, K. M., Wang, Y. M., et al., 2010. Forming Conditions and Characteristics of Shale Gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze Region, China. *Oil & Gas Geology*, 31 (3): 288—299 (in Chinese with English abstract).
- Dong, D. Z., Wang, Y. M., Li, X. J., et al., 2016. Breakthrough and Prospect of Shale Gas Exploration and Development in China. *Natural Gas Industry*, 36(1): 19—32 (in Chinese with English abstract).
- Erbacher, J., Thurow, J., Littke, R., 1996. Evolution Patterns of Radiolaria and Organic Matter Variations: A New Approach to Identify Sea-Level Changes in Mid-Cretaceous Pelagic Environments. *Geology*, 24 (6): 499. doi: 10.1130/0091-7613(1996)024<0499:EPORAO>2.3.CO;2
- Fan, F., Cai, J. G., Xu, J. L., et al., 2011. Original Preservation of Different Organic Micro-Components in Muddy Source Rock. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 39 (3): 434—439 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Q. L., Algeo, T. J., 2014. Evolution of Oceanic Redox Conditions during the Permo-Triassic Transition: Evidence from Deepwater Radiolarian Facies. *Earth-Science Reviews*, 137: 34—51. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.12.003
- Fu, X. D., Qin, J. Z., Tenger, et al., 2010. Evaluation on Dalong Formation Source Rock in the North Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 32 (6): 566—571 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. D., Qin, J. Z., Tenger, et al., 2011. Mineral Components of Source Rocks and Their Petroleum Significance: A Case from Paleozoic Marine Source Rocks in the Middle-Upper Yangtze Region. *Petroleum Exploration and Development*, 38(6): 671—684(in Chinese with English abstract).
- Hartnett, H. E., Keil, R. G., Hedges, J. I., et al., 1998. Influence of Oxygen Exposure Time on Organic Carbon Preservation in Continental Margin Sediments. *Nature*, 391(6667): 572—574. doi: 10.1038/35351
- Harvey, R. H., Tuttle, J. H., Bell, J. T., 1995. Kinetics of Phytoplankton Decay during Simulated Sedimentation: Changes in Biochemical Composition and Microbial Activity under Oxidic and Anoxic Conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(16): 3367—3377. doi: 10.1016/0016-7037(95)00217-N
- He, Y. B., Luo, J. X., 2010. Lithofacies Palaeogeography of the Late Permian Changxing Age in Middle and Upper Yangtze Region. *Journal of Palaeogeography*, 12(5): 497—514(in Chinese with English abstract).
- Hedges, J. I., Keil, R. G., 1995. Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis. *Marine Chemistry*, 49 (2—3): 81—115. doi: 10.1016/0304-4203(95)00008-F
- Huang, S. J., 1992. Clay Minerals in Clay Rocks near P/T Boundary from Guangyuan and Chongqing, Sichuan. *Journal of Chengdu College of Geology*, 19(3): 66—73(in Chinese with English abstract).
- Hulthe, G., Hulth, S., Hall, P. O. J., 1998. Effect of Oxygen on Degradation Rate of Refractory and Labile Organic Matter in Continental Margin Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(8): 1319—1328. doi: 10.1016/S0016-7037(98)00044-1
- Jiang, H. S., Lai, X. L., Yan, C. B., et al., 2011. Revised Conodont Zonation and Conodont Evolution across the Permian-Triassic Boundary at the Shangsi Section, Guangyuan, Sichuan, South China. *Global and Planetary Change*, 77 (3—4): 103—115. doi: 10.1016/j.gloplacha.2011.04.003
- Jones, B., Manning, D. A. C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, 111 (1—4): 111—129. doi: 10.1016/0009-2541(94)90085-X
- Keil, R. G., Montlucon, D. B., Prahl, F. G., et al., 1994. Sorptive Preservation of Labile Organic-Matter in Marine-Sediments. *Nature*, 370(6490): 549—552. doi: 10.1038/370549a0
- Kennedy, M. J., 2002. Mineral Surface Control of Organic Carbon in Black Shale. *Science*, 295 (5555): 657—660. doi: 10.1126/science.1066611
- Kennedy, M. J., Löhner, S. C., Fraser, S. A., et al., 2014. Direct Evidence for Organic Carbon Preservation as Clay-Organic Nanocomposites in a Devonian Black Shale, from Deposition to Diagenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 59—70. doi: 10.1016/j.epsl.2013.11.044
- Lai, X. L., Yang, F. Q., Hallam, A., et al., 1996. The Shangsi Section, Candidate of the Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary. In: Yin, H. F. ed., The Palaeozoic-Mesozoic Boundary Candidates of Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary. China University of Geosciences Press, Wuhan, 113—124.
- Lei, Y., Feng, Q. L., Gui, B. W., 2010. Geobiological Model for Organic Enrichment in the Upper Permian Dalong For-

- mation of Pingdingshan Section at Chaohu, Anhui. *Journal of Palaeogeography*, 12(2):202–211(in Chinese with English abstract).
- Lei, Y., Thomas, S., Feng, Q. L., et al., 2012. The Spatial (Nearshore-Offshore) Distribution of Latest Permian Phytoplankton from the Yangtze Block, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 363–364;151–162.doi:10.1016/j.palaeo.2012.09.010
- Lei, Y., Thomas, S., Feng, Q. L., et al., 2013. Latest Permian Acritarchs from South China and the Micrhystridium/Veryhachium Complex Revisited. *Palynology*, 2(37):325–344.doi:10.1080/01916122.2013.793625
- Li, H. J., Xie, X. N., Lin, Z. L., et al., 2009. Organic Matter Enrichment of Dalong Formation in Guangyuan Area of the Sichuan Basin. *Geological Science and Technology Information*, 28(2):98–103(in Chinese with English abstract).
- Li, H. J., Xie, X. N., Huang, J. H., et al., 2012. Main Factors Controlling the Formation of Excellent Marine Source Rocks in Permian Maokou Formation of Northwest Sichuan, China. *Earth Science*, 37(1):171–180(in Chinese with English abstract).
- Li, H. M., Wang, J. D., Heller, F., et al., 1988. Palaeomagnetic Study of Permian Triassic Boundary Section of Shangsi, Guangyuan, Sichuan. *Chinese Science Bulletin*, (8):612–615(in Chinese).
- Li, J. G., Batten, D. J., 2005. Palynofacies: Principles and Methods. *Acta Palaeontologica Sinica*, 44(1):138–156(in Chinese with English abstract).
- Li, N., Hu, N. Y., Ma, Z. W., et al., 2011. Main Control Factors of High Quality Hydrocarbon Source Rocks of the Upper Permian Dalong Formation at Shangsi Section of Guangyuan, Sichuan Province. *Journal of Palaeogeography*, 13(3):347–354(in Chinese with English abstract).
- Li, X. Q., Zhong, N. N., Xiong, B., et al., 1996. The Comparative Study between Whole Rock Analysis and Kerogen Analysis. *Journal of Southwestern Petroleum Institute*, 18(1):29–36(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., Chen, Y. C., Xu, Z. M., et al., 2000. The Study on Indigenous Characteristics of Organic Matter in Marine Carbonate Hydrocarbon Source Rock with Low Abundance and High Evolution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1):146–150(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. S., Zhan, L. P., Zhu, X. F., 1986. Mass Extinction and Geological Events between Palaeozoic and Mesozoic Era. *Acta Geologica Sinica*, (1):1–17(in Chinese with English abstract).
- Liang, X. Q., Zhou, Y., Jiang, Y., et al., 2013. Difference of Sedimentary Response to Dongwu Movement: Study on LA-ICPMS U-Pb Ages of Detrital Zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10):3592–3606(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen, P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247:133–153.doi:10.1016/j.chemgeo.2007.10.016
- Löhr, S. C., Kennedy, M. J., 2014. Organomineral Nanocomposite Carbon Burial during Oceanic Anoxic Event 2. *Biogeosciences*, 11(18):4971–4983.doi:10.5194/bg-11-4971-2014
- Loucks, R. G., Reed, R. M., Ruppel, S. C., et al., 2012. Spectrum of Pore Types and Networks in Mudrocks and a Descriptive Classification for Matrix-Related Mudrock Pores. *AAPG Bulletin*, 96(6):1071–1098. doi: 10.1306/08171111061
- Lu, L. F., Cai, J. G., Liu, W. H., 2011. Water Bridges Mechanism of Organo-Smectite Interaction in Argillaceous Hydrocarbon Source Rocks: Evidences from In Situ DRIFT Spectroscopic Study. *Oil & Gas Geology*, 32(1):47–55(in Chinese with English abstract).
- Lu, L. F., Cai, J. G., Liu, W. H., et al., 2012. Infra-Red Emission Spectroscopy Study of Thermal Evolution of Organic Matter Bound by Clay Minerals in Muddy Hydrocarbon Source Rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2):215–222(in Chinese with English abstract).
- Lu, L. F., Cai, J. G., Liu, W. H., 2013. Occurrence and Thermostability of Absorbed Organic Matter on Clay Minerals in Mudstones and Muddy Sediments. *Oil & Gas Geology*, 34(1):16–26(in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. L., 1981. Influence of Taphrogenesis on Oil and Other Mineral Formation since Late Palaeozoic in Southwest China. *Acta Geologica Sichuan*, 2(1):1–22(in Chinese).
- Ma, Z. W., Hu, C. Y., Yan, J. X., et al., 2008. Biogeochemical Records at Shangsi Section, Northeast Sichuan in China: The Permian Paleoproductivity Proxies. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5):461–470.doi:10.1016/S1002-0705(08)60051-5
- Makeen, Y. M., Hakimi, M. H., Abdullah, W. H., 2015. The Origin, Type and Preservation of Organic Matter of the Barremian-Aptian Organic-Rich Shales in the Muglad Basin, Southern Sudan, and Their Relation to Paleoenvironmental and Paleoclimate Conditions. *Marine and*

- Petroleum Geology*, 65: 187—197. doi: 10.1016/ j. mar-petgeo. 2015. 03. 003
- Mayer, L. M., 1994a. Relationships between Mineral Surfaces and Organic Carbon Concentrations in Soils and Sediments. *Chemical Geology*, 114 (3): 347—363. doi: 10.1016/0009—2541(94)90063—9
- Mayer, L. M., 1994b. Surface Area Control of Organic Carbon Accumulation in Continental Shelf Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(4): 1271—1284. doi: 10.1016/ 0016—7037(94)90381—6
- Murray, R. W., Leinen, M., 1996. Scavenged Excess Aluminum and Its Relationship to Bulk Titanium in Biogenic Sediment from the Central Equatorial Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (20): 3869—3878. doi: 10.1016/ 0016—7037(96)00236—0
- Nie, X. M., Lei, Y., Feng, Q. L., et al., 2012. Evolution and Its Control Factors of the Changsingian Radiolarian Fauna at the Shangsi Section in Jiange County, Guangyuan City, Sichuan Province. *Geological Review*, 58(5): 809—815 (in Chinese with English abstract).
- Pedersen, T. F., Calvert, S. E., 1990. Anoxia vs. Productivity: What Controls the Formation of Organic-Carbon-Rich Sediments and Sedimentary Rocks? *AAPG Bulletin*, 74 (4): 454—466
- Piper, D. Z., Perkins, R. B., 2004. A Modern vs. Permian Black Shale—The Hydrography, Primary Productivity, and Water-Column Chemistry of Deposition. *Chemical Geology*, 206(3—4): 177—197. doi: 10.1016/ j. chemgeo. 2003. 12. 006
- Qin, J. Z., Tenger, Fu, X. D., 2009. Study of Forming Condition on Marine Excellent Source Rocks and Its Evaluation. *Petroleum Geology & Experiment*, 31(4): 366—372 (in Chinese with English abstract).
- Qin, J. Z., Tenger, Shen, B. J., et al., 2015. Ultramicroscopic Organic Petrology Characteristics and Component Classification of Excellent Marine Source Rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(6): 671—680 (in Chinese with English abstract).
- Salmon, V., Derenne, S., Lallier-Vergès, E., et al., 2000. Protection of Organic Matter by Mineral Matrix in a Cenomanian Black Shale. *Organic Geochemistry*, 31 (5): 463—474. doi: 10.1016/ S0146—6380 (00)00013—9
- Schoepfer, S., D., Shen, J., Wei, H. Y., 2015. Total Organic Carbon, Organic Phosphorus, and Biogenic Barium Fluxes as Proxies for Paleomarine Productivity. *Earth-Science Reviews*, 149: 23—52. doi: 10.1016/ j. earscirev. 2014. 08. 017
- Sephton, M. A., Looy, C. V., Brinkhuis, H., et al., 2005. Catastrophic Soil Erosion during the End-Permian Biotic Crisis. *Geology*, 33(12): 941. doi: 10.1130/ G21784.1
- Shen, J., Feng, Q. L., 2010. Paleoproductivity Evolution across the Permian-Triassic Boundary of Dongpan Section at Fusui in Guangxi. *Journal of Palaeogeography*, 12(3): 291—300 (in Chinese with English abstract).
- Shen, J., Lei, Y., Algeo, T. J., et al., 2013. Volcanic Effects on Microplankton during the Permian-Triassic Transition (Shangsi and Xinmin, South China). *Palaaios*, 28 (8): 552—567. doi: 10.2110/ palo. 2013. p13— 014r
- Shen, J., Shi, Z. Y., Feng, Q. L., 2011. Review on Geochemical Proxies in Paleo-Productivity Studies. *Geological Science and Technology Information*, 30 (2): 69—77 (in Chinese with English abstract).
- Shen, J., Zhou, L., Feng, Q. L., et al., 2014. Paleo-Productivity Evolution across the Permian-Triassic Boundary and Quantitative Calculation of Primary Productivity of Black Rock Series from the Dalong Formation, South China. *Science China: Earth Sciences*, 57 (7): 1583—1594. doi: 10.1007/s11430—013—4780—5
- Silva, R. L., Duarte, L. V., 2015. Organic Matter Production and Preservation in the Lusitanian Basin (Portugal) and Pliensbachian Climatic Hot Snaps. *Global and Planetary Change*, 131: 24—34. doi: 10.1016/ j. gloplacha. 2015. 05. 002
- Simon, A., Poulicek, M., Velimirov, B., et al., 1994. Comparison of Anaerobic and Aerobic Biodegradation of Mineralized Skeletal Structures in Marine and Estuarine Conditions. *Biogeochemistry*, 25(3): 167—195. doi: 10.1007/ BF00024391
- Slatt, R. M., O'Brien, N. R., 2011. Pore Types in the Barnett and Woodford Gas Shales; Contribution to Understanding Gas Storage and Migration Pathways in Fine-Grained Rocks. *AAPG Bulletin*, 95 (12): 2017—2030. doi: 10.1306/ 03301110145
- Song, H. J., Tong, J. N., 2016. Mass Extinction and Survival during the Permian-Triassic Crisis. *Earth Science*, 41 (6): 901—918 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA, U.S.A..
- Tenger, Qin, J. Z., Fu, X. D., et al., 2008. Basic Conditions of Marine Hydrocarbon Accumulation in Northwest Sichuan Basin—High Quality Source Rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 30 (5): 478—483 (in Chinese with English abstract).
- Tessin, A., Hendy, I., Sheldon, N., et al., 2015. Redox-Controlled Preservation of Organic Matter during “OAE 3” within the Western Interior Seaway. *Paleoceanography*, 30 (6): 702—717. doi: 10.1002/ 2014PA002729

- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., et al., 2006. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32. doi: 10.1016/j.chemgeo.2006.02.012
- van Helmond, N. A. G. M., Hennekam, R., Donders, T. H., et al., 2015. Marine Productivity Leads Organic Matter Preservation in Sapropel S1: Palynological Evidence from a Core East of the Nile River Outflow. *Quaternary Science Reviews*, 108: 130–138. doi: 10.1016/j.quascirev.2014.11.014
- Williams, L. B., Canfield, B., Voglesonger, K. M., et al., 2005. Organic Molecules Formed in a “Primordial Womb”. *Geology*, 33(11): 913. doi: 10.1130/G21751.1
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Huang, J. H., et al., 2007. Changes in the Global Carbon Cycle Occurred as Two Episodes During the Permian-Triassic Crisis. *Geology*, 35(12): 1083–1086. doi: 10.1130/G24224A.1
- Yan, D. T., Wang, H., Fu, Q. L., et al., 2015. Organic Matter Accumulation of Late Ordovician Sediments in North Guizhou Province, China: Sulfur Isotope and Trace Element Evidences. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 348–358. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.09.017
- Yan, J. X., Ma, Z. Y., Xie, X. N., et al., 2008. Subdivision of Permian Fossil Communities and Habitat Types in Northeast Sichuan, South China. *Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 441–450. doi: 10.1016/S1002-0705(08)60049-7
- Yin, H. F., Jiang, H. S., Xia, W. C., et al., 2014. The End-Permian Regression in South China and Its Implication on Mass Extinction. *Earth-Science Reviews*, 137: 19–33. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.06.003
- Zhang, K., Zhang, Q., Yao, H. J., et al., 1983. Meso-Cenozoic Tectonics and Evolution of Riftogenic Petroliferous Basins along China's Sea Area and Its Vicinity. *Oil & Gas Geology*, 4(4): 353–364 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Tong, Z. Y., 1992. The Composition and Hydrocarbon-Generation Evolution of Organic Matter Associated with Carbonate Minerals. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(1): 76–82 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., Zhang, Y., He, D. T., 2014. Study on Particle Phase Analysis Method of Energy Disperse Spectroscopy: A Case Study of Cenozoic Basalts from Datong, Shanxi Province. *Earth Science*, 39(9): 1301–1308 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., Zhang, S. C., Zhao, L., et al., 2007. The Geochemical Characteristics and Genesis of Ancient Oil Reservoir Bitumen and Natural Gas in the Nanpanjiang Basin. *Science China: Earth Science*, 37(2): 167–177 (in Chinese).
- Zhou, W. F., Algeo, T. J., Ruan, X. Y., et al., 2016. Expansion of Photic-Zone Euxinia during the Permian-Triassic Biotic Crisis and Its Causes: Microbial Biomarker Records. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 10.1016/j.palaeo.2016.06.027
- Zhu, T. X., Huang, Z. Y., Hui, L., 1999. Geology of Organic Reef Facies in Late Permian of Upper Yangtze Platform. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhu, X. J., Cai, J. G., Song, G. Q., et al., 2015. Factors Influencing the Specific Surface Areas of Argillaceous Source Rocks. *Applied Clay Science*, 109–110: 83–94. doi: 10.1016/j.clay.2015.02.016
- Zhu, X. J., Cai, J. G., Wang, X. J., et al., 2014. Effects of Organic Components on the Relationships between Specific Surface Areas and Organic Matter in Mudrocks. *International Journal of Coal Geology*, 133: 24–34. doi: 10.1016/j.coal.2014.08.009
- Zhu, Y. M., Li, Y., Hao, F., et al., 2012. Compositional Characteristics and Origin of Marine and Terrestrial Solid Reservoir Bitumen in the Northeast Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 870–878 (in Chinese with English abstract).
- Zonneveld, K. A. F., Versteegh, G. J. M., Kasten, S., et al., 2010. Selective Preservation of Organic Matter in Marine Environments: Processes and Impact on the Sedimentary Record. *Biogeosciences*, 7(2): 483–511. doi: 10.5194/bg-7-483-2010
- Zou, N. N., Dong, D. Z., Wang, S. J., et al., 2010. Geological Characteristics, Formation Mechanism and Resource Potential of Shale Gas in China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(6): 641–653 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡进功, 包于进, 杨守业, 等, 2007. 泥质沉积物和泥岩中有机质的赋存形式与富集机制. *中国科学: 地球科学*, 37(2): 244–253.
- 蔡进功, 卢龙飞, 包于进, 等, 2012. 烃源岩中蒙皂石结合有机质后层间水的变化特征及其意义. *中国科学: 地球科学*, 42(4): 483–491.
- 蔡雄飞, 冯庆来, 顾松竹, 等, 2011. 海退型陆棚相: 烃源岩形成的重要部位——以中、上扬子地区北缘上二叠统大隆组为例. *石油与天然气地质*, 32(1): 29–37.
- 蔡雄飞, 张志峰, 彭兴芳, 等, 2007. 鄂湘黔桂地区大隆组的沉积特征及与烃源岩的关系. *地球科学*, 32(6): 774–780.
- 陈慧, 解习农, 李红敬, 等, 2010. 利用古氧相和古生产力替代

- 指标评价四川上寺剖面二叠系海相烃源岩.古地学报,12(3):324—333.
- 丁修建,柳广弟,黄志龙,等,2016.有机质供给和保存在烃源岩形成中的控制作用.地球科学,41(5):832—842.
- 董大忠,程克明,王玉满,等,2010.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征.石油与天然气地质,31(3):288—299.
- 董大忠,王玉满,李新景,等,2016.中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考.天然气工业,36(1):19—32.
- 樊馥,蔡进功,徐金鲤,等,2011.泥质烃源岩不同有机显微组分的原始赋存态.同济大学学报(自然科学版),39(3):434—439.
- 付小东,秦建中,腾格尔,等,2010.四川盆地北缘上二叠统大隆组烃源岩评价.石油实验地质,32(6):566—571.
- 付小东,秦建中,滕格尔,等,2011.烃源岩矿物组成特征及油气地质意义——以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例.石油勘探与开发,38(6):671—684.
- 何幼斌,罗进雄,2010.中上扬子地区晚二叠世长兴期岩相古地理.古地学报,12(5):497—514.
- 黄思静,1992.重庆中梁山和广元上寺 P-T 界线粘土层中粘土矿物的类型及成因.成都地质学院学报,19(3):66—73.
- 雷勇,冯庆来,桂碧雯,2010.安徽巢湖平顶山剖面上二叠统大隆组有机质富集的地球生物学模式.古地学报,12(2):202—211.
- 李红敬,解习农,黄俊华,等,2012.川西北二叠系茅口组海相优质烃源岩发育控制因素.地球科学,37(1):171—180.
- 李红敬,解习农,林正良,等,2009.四川盆地广元地区大隆组有机质富集规律.地质科技情报,28(2):98—103.
- 李华梅,王俊达,Heller,F.,等,1988.四川广元上寺二叠—三叠系界限剖面的古地磁研究.科学通报,(8):612—615.
- 李建国,Batten,D.J.,2005.孢粉相:原理及方法.古生物学报,44(1):138—156.
- 李牛,胡超涌,马仲武,等,2011.四川广元上寺剖面上二叠统大隆组优质烃源岩发育主控因素初探.古地学报,13(3):347—354.
- 李贤庆,钟宁宁,熊波,等,1996.全岩分析与干酪根分析的对比研究.西南石油学院学报,18(1):29—36.
- 李延钧,陈义才,徐志明,等,2000.低丰度高演化海相碳酸盐烃源岩有机质原生性研究.沉积学报,18(1):146—150.
- 李子舜,詹立培,朱秀芳,等,1986.古生代—中生代之交的生物绝灭和地质事件——四川广元上寺二叠系—三叠系界线和事件的初步研究.地质学报,(1):1—17.
- 梁新权,周云,蒋英,等,2013.二叠纪东吴运动的沉积响应差异:来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄研究.岩石学报,29(10):3592—3606.
- 卢龙飞,蔡进功,刘文汇,等,2011.泥质烃源岩中蒙皂石与有机质的水桥结合作用——来自原位漫反射红外光谱的证据.石油与天然气地质,32(1):47—55.
- 卢龙飞,蔡进功,刘文汇,等,2012.泥质烃源岩中粘土矿物结合有机质热演化的红外发射光谱研究.石油实验地质,34(2):215—222.
- 卢龙飞,蔡进功,刘文汇,等,2013.泥岩与沉积物中粘土矿物吸附有机质的三种赋存状态及其热稳定性.石油与天然气地质,34(1):16—26.
- 罗志立,1981.中国西南地区晚古生代以来地裂运动对石油等矿产形成的影响.四川地质学报,2(1):1—22.
- 聂小妹,雷勇,冯庆来,等,2012.四川广元上寺剖面长兴阶放射虫动物群演变及控制因素.地质论评,58(5):809—815.
- 秦建中,腾格尔,付小东,2009.海相优质烃源层评价与形成条件研究.石油实验地质,31(4):366—372.
- 秦建中,腾格尔,申宝剑,等,2015.海相优质烃源岩的超显微有机岩石学特征与岩石学组分分类.石油实验地质,37(6):671—680.
- 沈俊,冯庆来,2010.广西扶绥东攀剖面二叠纪—三叠纪之交古生产力演化.古地学报,12(3):291—300.
- 沈俊,施张燕,冯庆来,2011.古海洋生产力地球化学指标的研究.地质科技情报,30(2):69—77.
- 宋海军,童金南,2016.二叠纪—三叠纪之交生物大灭绝与残存.地球科学,41(6):901—918.
- 腾格尔,秦建中,付小东,等,2008.川西北地区海相油气成藏物质基础——优质烃源岩.石油实验地质,30(5):478—483.
- 张恺,张清,姚慧君,等,1983.中国海域及邻区中—新生代大地构造演化特征与裂谷型含油气盆地演化系列.石油与天然气地质,4(4):353—364.
- 张水昌,童箴言,1992.海相碳酸盐岩中矿物结合有机质的组成及成烃演化.沉积学报,10(1):76—82.
- 张素新,张毅,何德涛,2014.能谱仪 PPA 分析方法的实验研究:以山西大同新生代玄武岩样品为例.地球科学,39(9):1301—1308.
- 赵孟军,张水昌,赵陵,等,2007.南盘江盆地古油藏沥青、天然气的地球化学特征及成因.中国科学:地球科学,37(2):167—177.
- 朱同兴,黄志英,惠兰,1999.上扬子台地晚二叠世生物礁相地质.北京:地质出版社.
- 朱扬明,李颖,郝芳,等,2012.四川盆地东北部海、陆相储层沥青组成特征及来源.岩石学报,28(3):870—878.
- 邹才能,董大忠,王社教,等,2010.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力.石油勘探与开发,37(6):641—653.