

文章编号: 1000-0550(2012)04-0761-09

黔南坳陷下寒武统烃源岩地球化学特征及成因^①贺训云^{1,2,3,4} 姚根顺^{3,4} 蔡春芳¹ 沈安江^{3,4} 吴敬武^{3,4} 黄羚^{3,4} 陈子料^{3,4}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049;

3. 中国石油杭州地质研究院 杭州 310023; 4. 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室 杭州 310023)

摘要 为明确黔南坳陷下寒武统烃源岩地球化学特征及成因,采用岩石热解、GC、GC—MS等方法对3个典型剖面样品进行了系统分析。结果表明:黔南坳陷下寒武统黑色岩系为一套区域性海相优质烃源岩,厚约50~150 m;烃源岩TOC值为0.13%~15.40%,平均3.31%($n=169$);烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-35.79\text{‰} \sim -29.88\text{‰}$,平均 -32.85‰ ($n=35$)。显微组分主要为腐泥组;烃源岩干酪根海相镜质体反射率值为1.95%~3.96%,其等效镜质体反射率值为2.02%~3.47%;烃源岩饱和烃正构烷烃分布多为单峰形,主峰碳多为 C_{22} 、 C_{30} 藿烷和 C_{27} 规则甾烷含量高,规则甾烷多为 $\text{C}_{27} > \text{C}_{29} > \text{C}_{28}$,Pr/Ph值为0.27~0.62,具较高的伽马蜡烷和硫蒞含量,OEP值为0.82~1.11, C_{31} 升藿烷 $22\text{S}/(22\text{S}+22\text{R})$ 值为0.56~0.63,平均0.59;烃源岩总体具有富集轻稀土元素,Ba、Mo、V、U等元素含量高,具较强Ce负异常、Eu正异常和较高U/Th值等特征。总之,黔南坳陷下寒武统海相烃源岩分布广,厚度较大,有机质丰度高,类型好,热演化程度高,是高古生产力和缺氧环境共同作用的产物,可为黔南坳陷油气生成提供雄厚的成烃物质。

关键词 烃源岩评价 海相烃源岩 生物标志化合物 生产力 缺氧环境 牛蹄塘组 黔南坳陷

第一作者简介 贺训云 男 1975年出生 博士研究生 石油地质与地球化学 E-mail: hexunyun@sina.com

中图分类号 TE122 **文献标识码** A

近年来,古老烃源岩生烃机理及潜力评价获得重要新认识,如烃源岩热演化过程中有机碳质量与含量变化的定量分析表明I型有机质烃源岩有机碳质量补偿系数最大值可达2.104,在完全排烃条件下其有机碳含量最大减少幅度可达43%^[1];烃源岩干酪根生气死亡线 R_0 值可高达3%^[2]甚至4.21%^[3];烃源岩滞留液态烃裂解(对于泥质烃源岩,其滞留液态烃主生气期 R_0 值为1.3%~3.4%)是高、过成熟烃源岩晚期生气的重要途径^[4];碳酸盐岩及深层高压导致的热演化迟滞效应可使液态烃保持和裂解过程延至更高演化阶段^[4,5]等。这些新认识为客观评估高、过成熟烃源岩成烃潜力提供了重要新依据,提升了对高、过成熟烃源岩生烃潜力的评价,拓宽了勘探领域。

中国扬子地区广泛发育的下寒武统黑色泥岩一直是人们关注和研究的热点。该层位不但富集了多种类型的矿产资源^[6],而且保存了丰富的地球古环境、古气候与早期生命演化信息^[7~9]。在黔南地区,前人对其已开展了一些研究^[10],但对其可溶有机质和形成机理的研究仍显薄弱。选取黔南坳陷3个典型剖面进行实测及密集采样,采用岩石热解、GC、GC—MS等方法对其不溶和可溶有机质地球化学特

征进行了系统分析;在此基础上,从控制海相优质烃源岩发育的生产力和缺氧环境两大因素^[11,12]着手,对其成因进行了探讨。

1 地质背景

黔南坳陷位于贵州省南部,坳陷北部以安顺—贵阳—镇远断裂为界与黔中隆起相邻,东以三都—施洞口断裂与雪峰隆起为界,西南以紫云—罗甸—都安断裂为界与南盘江坳陷相接,整体呈三角形展布(图1),面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。坳陷处于扬子地块南缘、湘桂地体与扬子地块边缘碰撞拼贴构造带北侧,早寒武世古地理位置位于赤道附近。

黔南坳陷基底东浅西深,东部埋深约1 000~4 000 m,坳陷西部达8 000~15 000 m。基底之上主要发育震旦系—三叠系海相沉积盖层。坳陷经历了广西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅等多期构造运动^[13],受后期构造运动影响,坳陷东部抬升、变形强烈,广泛出露下古生界;坳陷中西部地层保存较完整,广泛出露三叠系。

黔南坳陷下寒武统主要出露于坳陷东部三都、麻江和瓮安等地,厚约50~150 m,地震资料及区域沉

^①全国油气资源战略选区调查与评价项目(编号:XQ-2007-01)及国家科技重大专项(编号:2008ZX05004-002)资助。

收稿日期:2011-09-16;收修改稿日期:2011-10-28

烃相表明坳陷中西部亦发育该套地层,据此推测该套烃源岩全区均有分布。

2 样品与分析方法

选取3个典型剖面(图1)进行实测和密集采样。共采集下寒武统黑色岩系200余个泥岩(少量硅质岩)样品进行有机碳、热解测定等,在此基础上进一步筛选了34个样品进行碳同位素分析、16个样品进行饱和烃GC—MS分析和10个样品进行芳烃GC—MS分析。

利用LECO CS—230碳硫测定仪和OGE—II油气评价工作站分别进行了烃源岩总有机碳(TOC)测定和热解分析;利用NIKON生物显微镜和Zeiss MPM显微光度计分别进行了干酪根镜检和干酪根镜质体反射率测定;利用MAT 251同位素质谱仪对干酪根碳同位素进行了测定;利用Agilent6890N气相色谱

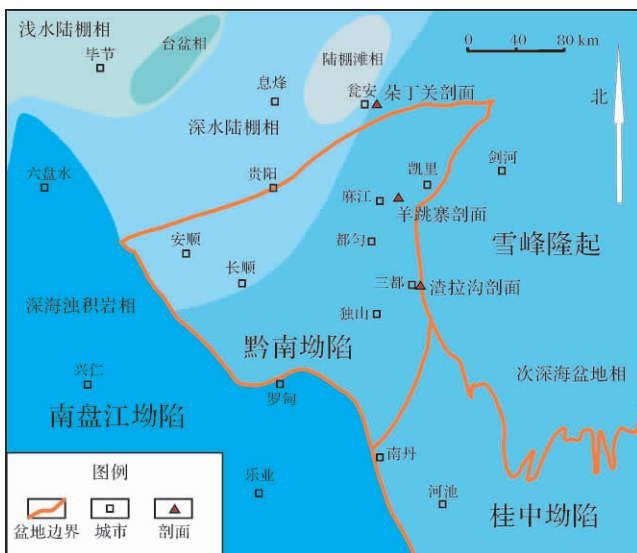


图1 黔南坳陷及周缘早寒武世沉积相图

Fig. 1 Sedimentary facies map of the southern Guizhou Depression during the Early Cambrian

仪对氯仿沥青“A”进行了饱和烃气相色谱分析;利用TRACE DSQ II气相色谱质谱联用仪进行了饱和烃和芳烃GC—MS分析。饱和烃GC—MS分析条件:HP—5MS色谱柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm);柱始温50℃,保持1 min,以10℃/min升到100℃,再以3℃/min升到310℃,保持20 min;载气为氦气;全扫描FID检测器;电子轰击离子化方式;电子能量70 eV;离子源温度250℃。芳烃GC—MS分析条件:色谱柱同上;柱始温60℃,保持1 min,以3℃/min升到

300℃,保持10分钟;载气为氦气;质谱条件同上。

3 结果与讨论

3.1 烃源岩地球化学特征

3.1.1 有机质丰度

三都渣拉沟剖面下寒武统渣拉沟组(其下部相当于牛蹄塘组)黑色泥质烃源岩(表1ZLG系列)厚度达150 m左右,分析表明烃源岩TOC值为0.13%~15.40%(表1),平均3.38%($n=83$),与腾格尔等^[10]结果接近;其中TOC值大于0.5%的样品占94%,大于2.0%的样品占61%,高值主要分布于该组中下部,往上TOC值降低(图2),低TOC值的主要为浅灰色、灰绿色层段样品;麻江羊跳寨剖面牛蹄塘组黑色泥质烃源岩(表1YTZ系列)厚约100 m,烃源岩TOC值为0.15%~7.87%,平均3.18%($n=47$),其中TOC值大于0.5%的样品占84%,大于2.0%的样品占55%,TOC高值主要分布在该组中下部,往上随颜色变浅和粉砂质含量增加TOC值逐渐降低(图3),低TOC值的主要为浅灰色、灰绿色层段样品,与前人研究结果一致^[14];瓮安朵丁关剖面牛蹄塘组黑色(深灰色)泥质烃源岩(表1DDG系列)厚达100 m左右,烃源岩TOC值为0.13%~8.15%,平均2.70%($n=26$),其中TOC值大于0.5%的样品占73%,大于2.0%的样品占41%,高值亦主要分布于该组中下部,往上TOC值趋低(图4)。受热演化程度影响,下寒武统牛蹄塘组烃源岩氯仿沥青“A”含量及热解生烃潜量均很低,已不能真实反映其原始面貌。按照有关标准^[14],该套黑色泥岩主要为好—极好烃源岩。

3.1.2 有机质类型

渣拉沟剖面渣拉沟组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值(PDB,下同)为-34.0‰~-30.5‰,平均-32.3‰($n=14$);羊跳寨剖面牛蹄塘组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-35.8‰~-30.8‰,平均-34.0‰($n=8$);朵丁关剖面牛蹄塘组烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-35.7‰~-29.9‰,平均-33.1‰($n=11$)。按梁狄刚等^[15]有关碳同位素划分有机质类型标准,均为I型有机质。与腾格尔等^[10]结果一致。此外,上述剖面烃源岩干酪根镜鉴结果及干酪根扫描电镜^[15]亦表明其显微组分主要为菌藻类腐泥无定形。

3.1.3 有机质成熟度

渣拉沟剖面渣拉沟组烃源岩干酪根海相镜质体反射率值为2.89%~3.96%,据王飞宇等^[16]公式换



图2 黔南坳陷渣拉沟剖面下寒武统渣拉沟组地球化学柱状图

Fig. 2 Geochemical column of the Lower Cambrian Zhalagou Formation at the Zhalagou Profile, southern Guizhou Depression

算成等效镜质体反射率值 (ER_o) 为 2.69% ~ 3.47%; 烃源岩 T_{max} 值为 444 ~ 591°C, 平均 527°C ($n = 83$)。羊跳寨剖面牛蹄塘组烃源岩干酪根海相镜质体反射率值为 2.00% ~ 3.34%, 其等效镜质体反射率为 2.05% ~ 3.02%; 烃源岩最大热解峰温 T_{max} 值为 476 ~ 590°C, 平均 522°C ($n = 47$)。朵丁关剖面牛蹄塘组烃源岩干酪根海相镜质体反射率值为 1.95% ~ 2.78%, 其等效镜质体反射率值为 2.02% ~ 2.62%; 烃源岩 T_{max} 值为 509 ~ 589°C, 平均 559°C ($n = 26$)。均表明牛蹄塘组黑色泥质烃源岩有机质热演化程度总体已达过成熟阶段, 与腾格尔等^[10] 结果总体一致。

3.1.4 可溶有机质特征

烃源岩可溶有机质饱和烃正构烷烃分布形态多为单峰形, 主峰碳为 $C_{18} \sim C_{25}$, 多为 C_{22} ; C_{30} 藿烷和 C_{27} 规则甾烷含量高(图5), 规则甾烷多为 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$ 。 C_{30} 藿烷主要来源于细菌藿烷四醇, 指示典型的原核生物(细菌)来源, C_{27} 规则甾烷则主要与低等藻类有关^[17]。据此可知烃源岩有机质主要来源于低等菌藻类, 与干酪根扫描电镜鉴定结果一致^[15]。

烃源岩可溶有机质 Pr/Ph 值为 0.27 ~ 0.62, 显著小于 1.0, 低 Pr/Ph 值常指示缺氧沉积环境。高含量伽马蜡烷常指示水体分层环境, 而低含量重排甾烷

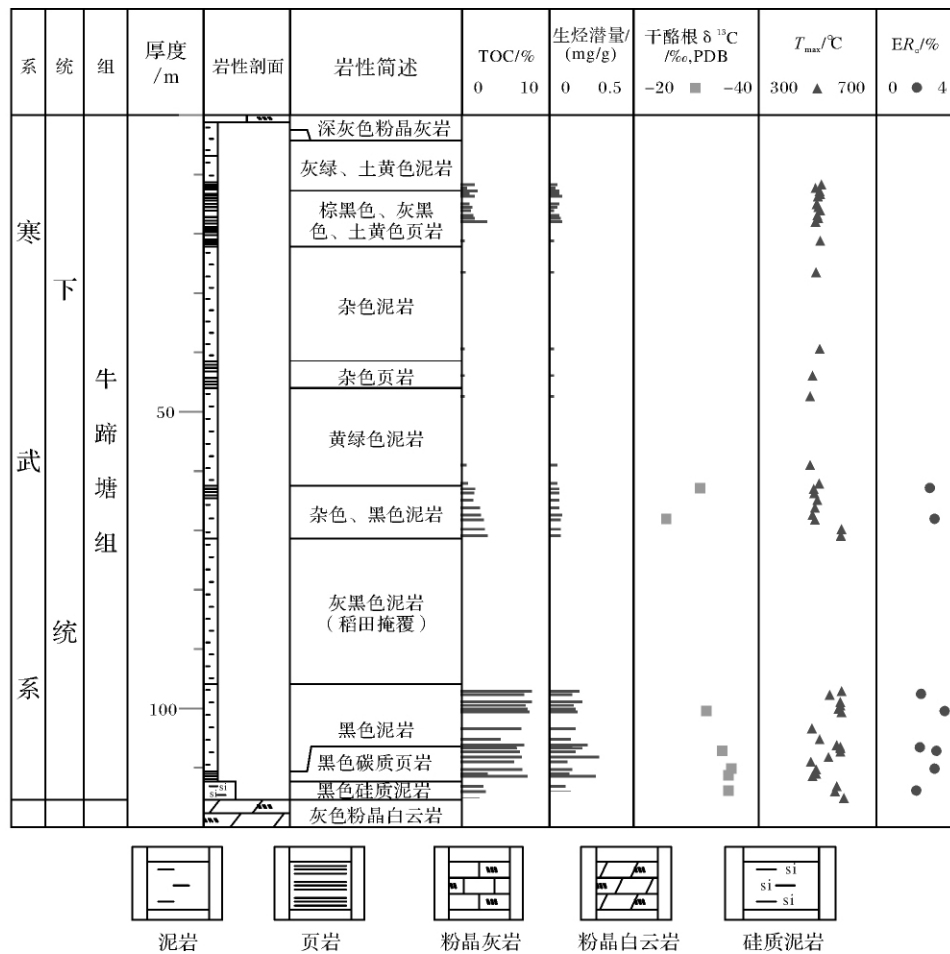


图3 黔南拗陷羊跳寨剖面下寒武统牛蹄塘组地球化学柱状图

Fig. 3 Geochemical column of the Lower Cambrian Niutitang Formation at the Yangtiaozhai Profile, southern Guizhou Depression

则可能与高盐度水体有关^[17]。分析表明可溶有机质具有较高伽马蜡烷和低重排甾烷含量。三芴系列可作为指示沉积环境的良好指标^[18],研究表明烃源岩具有非常高的硫芴含量(>90%)和很低的氧芴含量(<1%),芴含量介于其间。上述参数均指示有机质形成于还原—强还原沉积环境。此外,渣拉沟剖面和羊跳寨剖面泥岩样品普遍含有较丰富的三芳甾烷和芳基类异戊二烯烃,而西北部的朵丁关剖面则贫含或不含此类化合物,且其伽马蜡烷含量相对偏低,可能与当时东南部水体更深、还原性更强,向西北水体变浅、还原性变弱的古地理环境(图1)有关。Cai等^[19]在塔里木盆地寒武系地层中亦检出丰富的芳基类异戊二烯烃,并认为其指示硫化缺氧的沉积环境。

烃源岩可溶有机质 OEP 值为 0.82 ~ 1.11, 指示较高成熟度。有意思的是,饱和烃甾、萜烷异构化参

数 $Ts/(Ts + Tm)$ 、 C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 和 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 值均较低,其中 $Ts/(Ts + Tm)$ 值为 0.28 ~ 0.53, 平均 0.42 ($n = 16$), C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ 值为 0.21 ~ 0.49, 平均 0.35 ($n = 16$), C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta + \alpha\alpha\alpha)$ 值为 0.23 ~ 0.43, 平均 0.32 ($n = 16$), 均体现为低熟特征,尚未达热演化平衡值,与烃源岩镜质体反射率值反映的热演化程度差异很大。赵孟军等^[20]在研究邻区南盘江盆地中下泥盆统烃源岩、段毅等^[21]在研究塔里木盆地寒武系和奥陶系烃源岩时也发现这种现象,并认为可能是高过成熟阶段吸附的低成熟烃类被释放出来的缘故^[22]。此外,可能与超盐度环境对有关参数的影响有关^[17]。而 C_{31} 升藿烷 $22S/(22S + 22R)$ 值为 0.56 ~ 0.63, 平均 0.59 ($n = 16$), 一般认为该参数平衡值为 0.57 ~ 0.60^[17], 因此该指标能正常指示烃源岩至少已达成

熟阶段。而根据甲基菲指数 $I^{[23]}$ (MPI_1) 换算 ($R_o > 1.35\%$) 的等效镜质体反射率 (R_c) 值为 $1.40\% \sim 1.96\%$, 平均 1.78% ($n=8$) 指示烃源岩已达高成熟阶段, 但仍显著低于烃源岩干酪根海相镜质体反射率值 $2.56\% \sim 3.11\%$ (对于同一样品, 根据甲基菲指数换算的等效镜质体反射率值比实测的海相镜质体反射率值低 1.1% 左右), 反映了生标异构化参数在过成熟烃源岩评价中的局限性。

上述特征总体表明下寒武统牛蹄塘组烃源岩有机质丰度高, 类型好, 形成于以低等水生生物为母质来源的还原—强还原环境, 总体处于高过成熟阶段, 为一套好—极好烃源岩。

3.1.5 微量及稀土元素地球化学特征

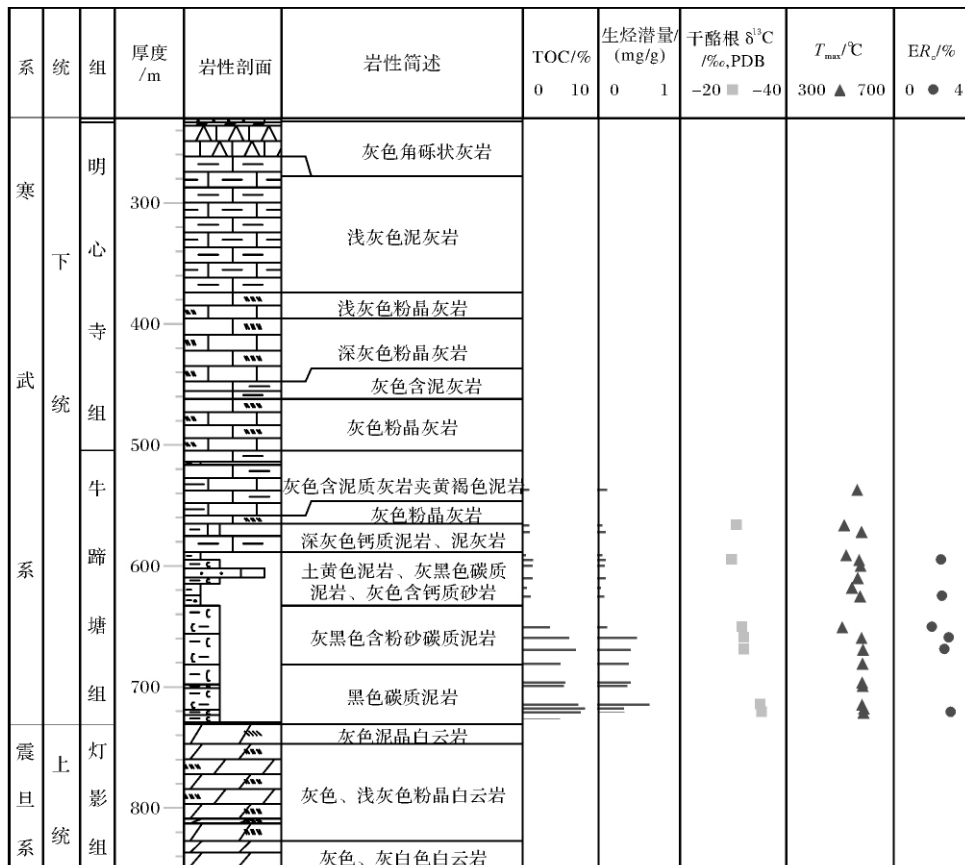
牛蹄塘组黑色泥岩微量及稀土元素地球化学特征在不同剖面具有一定差异, 但总体具有稀土总量及 Ba、Mo、V、U 等元素含量高, 富集轻稀土元素, 具较强 Ce 负异常^[24]、Eu 正异常和较高 U/Th 值等特征。而

稀土元素总量具有随海水深度增加而增高的特点, 较高的 Ba、Mo 等含量指示较高的古生产力, Ce 负异常和 U/Th 值 > 1 指示缺氧环境, Eu 正异常则指示热水活动。因此上述特征总体反映其形成于有热水活动的缺氧深水环境, 且当时古海洋具高的生物生产力。

3.2 成因探讨

3.2.1 生产力

震旦纪末—早寒武世初, 全球古气候迅速转暖, “雪球”地球开始冰川消融, 海平面快速上升。早寒武世黔南拗陷处于赤道附近^[25], 气候湿热, 海洋表层浮游藻类繁茂, 光合作用旺盛, 生物生产率高。牛蹄塘组烃源岩显著偏负的碳同位素组成^[26] 以及较高含量的 Ba、Mo 等元素正是这一生物事件的反映。此外, 上升洋流富含营养盐和富绿硫细菌, 可大大促进有机质生产力、埋藏率的激增^[27]。而早寒武世黔南拗陷的古气候、古地理^[25]、牛蹄塘组底部广泛发育的磷矿^[28] 及烃源岩中芳基类异戊二烯烷烃的检出均表



图例

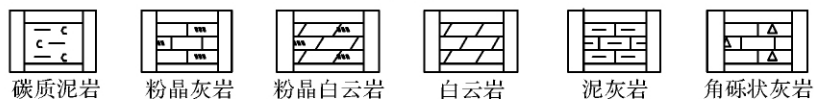


图4 黔南拗陷朵丁关剖面下寒武统牛蹄塘组地球化学柱状图

Fig. 4 Geochemical column of the Lower Cambrian Niutitang Formation at the Duodingguan Profile, southern Guizhou Depression

表1 黔南坳陷下寒武统烃源岩主要地球化学参数

Table 1 Geochemical parameters of the Lower Cambrian source rocks from the southern Guizhou Depression

样品编号	剖面名称	层位	岩性	TOC /%	干酪根 $\delta^{13}C/‰$	T_{max} /°C	ER_o /%	主峰碳	Pr/Ph	OEP	A	B	C	D	E	F	G	H	I	OF/%	SF/%	F/%	MPI ₁	$R_c/‰$	
ZLG-3	渣拉沟剖面	ϵ_{1z}	黑色泥岩	2.56	-33.8	579	2.18	22	0.53	0.95	36	28	36	0.56	1.54	0.14	0.77	0.42	0.23	-	-	-	-	-	
ZLG-4		ϵ_{1z}	黑色泥岩	5.35	-31.7	522	2.18	20	0.30	0.93	36	26	38	0.50	1.27	0.23	0.65	0.39	0.28	-	-	-	-	-	
ZLG-5		ϵ_{1z}	黑色泥岩	2.47	-	475	2.25	20	0.62	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG5-T2		ϵ_{1z}	黑色硅岩	4.18	-33.8	450	3.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG6-T4		ϵ_{1z}	黑色泥岩	5.57	-33.9	574	2.70	25	0.51	1.10	38	27	34	0.30	0.74	0.32	0.54	0.53	0.38	0.21	95.26	4.54	0.73	1.86	
ZLG6-T9		ϵ_{1z}	黑色泥岩	11.1	-32.7	559	2.74	22	0.42	0.93	34	25	41	0.23	0.53	0.29	0.55	0.37	0.36	0.02	99.15	0.83	0.63	1.92	
ZLG6-T16		ϵ_{1z}	黑色泥岩	9.43	-31.7	476	2.89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG6-T18		ϵ_{1z}	黑色泥岩	5.54	-34.0	478	2.85	25	0.23	1.11	42	27	31	0.20	0.45	1.05	0.58	0.47	0.43	0.05	99.55	0.40	0.57	1.96	
ZLG6-T32		ϵ_{1z}	黑色泥岩	2.81	-32.0	510	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG14-T8		ϵ_{1z}	黑色泥岩	2.47	-30.5	585	2.87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG15-T2		ϵ_{1z}	黑色泥岩	1.93	-30.5	587	2.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ZLG16-T2		ϵ_{1z}	黑色泥岩	1.49	-30.5	590	2.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
YTZ-1		羊跳寨剖面	ϵ_{1n}	黑色泥岩	6.77	-34.2	584	2.20	22	0.27	0.87	40	23	37	1.07	2.46	0.10	0.64	0.38	0.26	1.37	94.76	3.87	2.15	1.01
YTZ-2			ϵ_{1n}	黑色泥岩	6.06	-34.1	511	2.17	22	0.29	0.86	41	22	37	1.01	2.37	0.12	0.53	0.37	0.26	-	-	-	-	-
YTZ7-T2			ϵ_{1n}	黑色硅岩	2.62	-35.4	561	2.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
YTZ8-T1			ϵ_{1n}	黑色泥岩	7.42	-35.3	483	2.65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
YTZ9-T1	ϵ_{1n}		黑色泥岩	6.80	-35.8	496	2.68	18	0.51	0.82	41	24	35	0.57	1.57	0.18	0.56	0.45	0.30	0.13	96.54	3.34	0.58	1.95	
YTZ9-T4	ϵ_{1n}		黑色泥岩	6.50	-34.4	579	2.75	22	0.36	0.93	40	23	36	0.54	1.42	0.25	0.57	0.47	0.30	0.26	96.80	2.94	0.67	1.90	
YTZ9-T10	ϵ_{1n}		黑色泥岩	7.63	-31.9	582	3.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
YTZ11-T3	ϵ_{1n}		黑色泥岩	2.41	-	492	2.68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
YTZ11-T8	ϵ_{1n}		黑色泥岩	1.37	-30.8	487	2.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DDG-1	朵丁关剖面		ϵ_{1n}	黑色泥岩	3.63	-35.4	520	-	22	0.44	0.96	39	25	36	0.44	1.05	0.27	0.48	0.48	0.30	-	-	-	-	-
DDG-2		ϵ_{1n}	黑色泥岩	7.45	-35.7	583	2.37	22	0.51	0.94	31	25	43	0.45	1.13	0.14	0.41	0.28	0.24	-	-	-	-	-	
DDG-3		ϵ_{1n}	黑色泥岩	1.32	-35.2	509	2.26	22	0.40	0.97	42	28	30	0.38	0.97	0.24	0.53	0.42	0.33	-	-	-	-	-	
DDG18-T1		ϵ_{1n}	黑色泥岩	7.56	-35.5	588	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DDG19-T2		ϵ_{1n}	黑色泥岩	7.25	-35.2	582	-	25	0.49	1.05	38	29	33	0.27	0.75	0.57	0.51	0.42	0.36	0.07	96.64	3.28	0.85	1.79	
DDG22-T2		ϵ_{1n}	黑色泥岩	6.90	-32.1	586	2.45	25	0.54	1.10	38	27	36	0.22	0.56	0.37	0.51	0.44	0.37	0.39	11.93	87.68	1.51	1.40	
DDG22-T3		ϵ_{1n}	黑色泥岩	6.00	-32.1	580	2.61	25	0.35	1.06	39	31	30	0.26	0.57	0.44	0.68	0.43	0.38	0.37	49.35	50.29	1.14	1.62	
DDG23-T1		ϵ_{1n}	黑色泥岩	3.47	-31.8	509	2.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DDG27-T2		ϵ_{1n}	黑色泥岩	1.22	-29.9	571	2.33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DDG 石场		ϵ_{1n}	黑色泥岩	1.48	-30.4	574	-	19	0.47	1.04	40	24	35	0.19	0.44	0.55	0.57	0.40	0.36	0.13	93.84	6.03	1.12	1.63	

注: A: $\alpha\alpha C_{27}$ 甾烷 R/%; B: $\alpha\alpha C_{28}$ 甾烷 R/%; C: $\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷 R/%; D: 伽马蜡烷/ C_{30} 甾烷; E: 伽马蜡烷/ C_{31} 升藿烷(22S+22R); F: C_{23} 三环萜烷/ C_{30} 藿烷; G: C_{24} 四环萜烷/ C_{26} 三环萜烷; H: $Ts/(Ts+Tm)$; I: C_{29} 甾烷- $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha)$; OF/%, SF/%, F/%: 藜萜、硫萜和芬的相对百分含量; MPI₁: 甲基菲指数 $1, MPI_1 = 1.5 \times (3\text{-甲基菲} + 2\text{-甲基菲}) / (1\text{-甲基菲} + 1\text{-甲基菲})$; R_c : 根据公式 $R_c(\%) = -0.6 \times MPI_1 + 2.3$ 换算得到的等效镜质体反射率值。

明当时发育上升洋流,因此位于被动大陆边缘环境的黔南坳陷普遍富集有机质。海底热水活动对沉积有机质的富集也具有明显的控制作用^[29]。羊跳寨剖面热水生物群^[25]以及羊跳寨、渣拉沟等剖面较强的 Eu 正异常等表明黔南坳陷乃至黔北地区普遍存在海底热水活动^[24, 30],因此,热水活动也促进了早寒武世黔南坳陷具有高的古生产力。

3.2.2 缺氧环境

早寒武世古气候迅速转暖时,表层水受太阳辐射而迅速变暖,底层水因得不到太阳辐射而在长时期内继续保持震旦纪时的古低水温,从而形成水体分层^[27],表层水中浮游生物繁盛,形成的有机质则在缺

氧的底层水中得以良好保存,由此造就了分布广泛的暗色缺氧沉积。此外,上升流亦可造成局部缺氧^[27]。上述事件得到羊跳寨等剖面黑色泥岩碳同位素显著偏负、低 Pr/Ph 值、高伽马蜡烷含量普遍存在芳基类异戊二烯烃、极高的硫萜含量、普遍赋存细粒莓状黄铁矿、Ce 负异常和高 U/Th 值等证据的支持,表明黔南坳陷当时为水体分层和缺氧强还原甚至硫化环境。陈兰等^[26]通过生物标志物和碳同位素分析亦认为早寒武世黑色岩系为缺氧环境产物。

此外,深水陆棚—盆地环境(图1)一般远离物源区(富集轻稀土元素),具有较低的沉积速率,从而有利于有机质的富集。

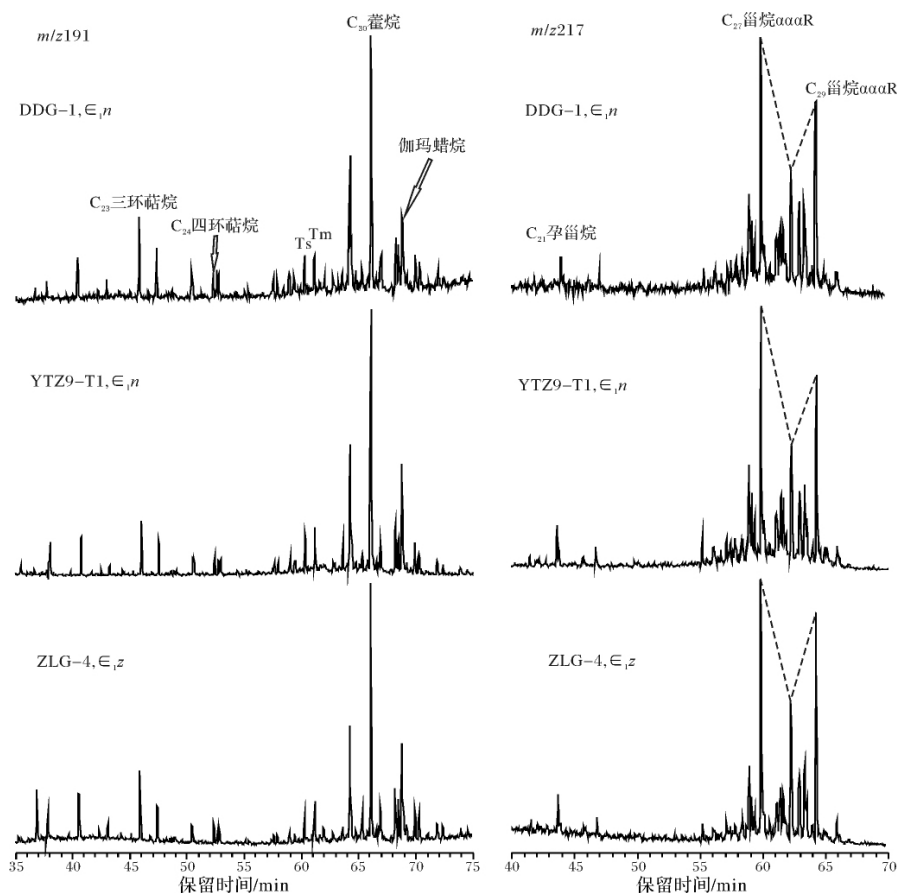


图5 黔南坳陷下寒武统烃源岩甾、萜烷分布特征

Fig. 5 Distribution of steranes and terpanes of the Lower Cambrian source rocks from the southern Guizhou Depression

从海相烃源岩形成模式^[25]来看,研究区烃源岩似乎并非简单套用某单一模式可解释,而是多种模式多因素综合作用的结果。

总之,黔南坳陷下寒武统牛蹄塘组黑色泥岩厚度较大,形成于深水缺氧还原—强还原环境,有机质丰度高,类型好,热演化程度高,为一套好—极好的烃源岩。该套海相优质烃源岩的形成是地质环境和生物演化协同作用的结果。

4 结论

(1) 黔南坳陷下寒武统黑色岩系厚约 50 ~ 150 m,有机质丰度非常高,类型好,总体处于过成熟阶段,是一套区域分布的海相优质烃源岩。

(2) 该套海相优质烃源岩的形成是高古生产力和缺氧环境共同作用的产物。

(3) 下寒武统海相优质烃源岩可为黔南坳陷油气生成提供雄厚的成烃物质。

参考文献 (References)

1 周总瑛. 烃源岩演化中有机碳质量与含量变化定量分析[J]. 石油

勘探与开发, 2009, 36(4): 463-468 [Zhou Zongying. Quantitative analysis of variation of organic carbon mass and content in source rock during evolution process[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 463-468]

2 陈建平, 赵文智, 王招明, 等. 海相干酪根天然气生成成熟度上限与生气潜力极限探讨——以塔里木盆地研究为例[J]. 科学通报, 2007, 52(增1): 95-100 [Chen Jianping, Zhao Wenzhi, Wang Zhaoming, et al. The upper limit of maturity degree and potential of natural gas generation from marine kerogen: Tarim Basin as an example[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Sup. 1): 95-100]

3 蒋启贵, 王延斌, 秦建中, 等. 中国南海相烃源岩生烃过程动力学研究[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 174-180 [Jiang Qigui, Wang Yanbin, Qin Jianzhong, et al. Kinetics of the hydrocarbon generation process of marine source rocks in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 174-180]

4 赵文智, 王兆云, 王红军, 等. 再论有机质“接力成气”的内涵与意义[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(2): 129-135 [Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Wang Hongjun, et al. Further discussion on the connotation and significance of the natural gas relaying generation model from organic materials[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 129-135]

5 周世新, 宋振响, 王保忠, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩中有机质特征[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 287-293 [Zhou Shixin,

- Song Zhenxiang, Wang Baozhong, *et al.* Organic matter in deep carbonate rocks of the Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(3): 287-293
- 6 杨光龙, 崔登伟. 黔北牛蹄塘组黑色岩系中的矿产特征及找矿远景分析[J]. *贵州地质*, 2010, 27(3): 208-212 [Yang Guanglong, Cui Dengwei. Mineral character and prospecting potential in the black rock measures of Niutitang Formation in north Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 2010, 27(3): 208-212]
- 7 杨瑞东, 张位华, 姜立君, 等. 澄江生物群分子在贵州遵义牛蹄塘组发现[J]. *地质学报*, 2003, 77(2): 145-150 [Yang Ruidong, Zhang Weihua, Jiang Lijun, *et al.* Members of the Chenjiang Biota from the Lower Cambrian Niutitang Formation, Zunyi County, Guizhou Province, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(2): 145-150]
- 8 袁宏, 肖加飞, 何熙琦, 等. 黔北牛蹄塘组的地球化学特征及形成环境[J]. *贵州地质*, 2007, 24(1): 55-59, 63 [Yuan Hong, Xiao Jiafei, He Xiqi, *et al.* Geochemical characteristics and formation environment of the Niutitang Formation in the north Guizhou [J]. *Guizhou Geology*, 2007, 24(1): 55-59, 63]
- 9 杨兴莲, 赵元龙, 朱茂炎, 等. 贵州丹寨寒武系牛蹄塘组海绵动物化石及其环境背景[J]. *古生物学报*, 2010, 49(3): 348-359 [Yang Xinglian, Zhao Yuanlong, Zhu Maoyan *et al.* Sponges from the early Cambrian Niutitang Formation at Danzhai, Guizhou and their environmental background [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2010, 49(3): 348-359]
- 10 腾格尔, 秦建中, 郑伦举. 黔南拗陷海相优质烃源岩的生烃潜力及时空分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 366-372 [Tenger, Qin Jianzhong, Zheng Lunju. Hydrocarbon potential on excellent hydrocarbon source rock in the southern Guizhou Depression and its special-temporal distribution [J]. *Acta Geologica Sinica* 2008, 82(3): 366-372]
- 11 Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bed genesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1980, 64(8): 1179-1209
- 12 Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia versus productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks [J]? *AAPG Bulletin*, 1990, 74(4): 454-466
- 13 徐政语, 姚根顺, 郭庆新, 等. 黔南拗陷构造变形特征及其成因解析[J]. *大地构造与成矿学*, 2010, 34(1): 20-30 [Xu Zhengyu, Yao Genshun, Guo Qingxin, *et al.* Genetic interpretation about geotectonics and structural transfiguration of the southern Guizhou Depression [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34(1): 20-30]
- 14 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. *海相油气地质*, 2008, 13(2): 1-16 [Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, *et al.* Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2008, 13(2): 1-16]
- 15 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二) 南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 1-15 [Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, *et al.* Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 2): Geochemical characteristics of four suits of regional marine source rocks, South China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 1-15]
- 16 王飞宇, 陈敬轶, 高岗, 等. 源于宏观藻类的镜状体反射率—前泥盆纪海相地层成熟度标尺[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 250-256 [Wang Feiyu, Chen Jingyi, Gao Gang, *et al.* Reflectance of macroalgae-derived vitrinite-like macerals: An organic maturity indicator for pre-Devonian marine strata [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 250-256]
- 17 Peters K E, Moldowan J M. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993
- 18 李水福, 何生. 原油芳烃中三芴系列化合物的环境指示作用[J]. *地球化学*, 2008, 37(1): 45-50 [Li Shuifu, He Sheng. Geochemical characteristics of dibenzothiophene, dibenzofuran and fluorene and their homologues and their environmental indication [J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 45-50]
- 19 Cai C F, Li K K, Ma A L, *et al.* Distinguishing Cambrian from Upper Ordovician source rocks: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers in the Tarim Basin [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40: 755-768
- 20 赵孟军, 赵陵, 张水昌, 等. 南盘江盆地主要烃源岩地球化学特征研究[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 162-167 [Zhao Mengjun, Zhao Ling, Zhang Shuichang, *et al.* Geochemical characteristics of main source rocks in the Nanpanjiang Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment* 2006, 28(2): 162-167]
- 21 段毅, 于文修, 郑朝阳, 等. 塔里木盆地塔河油田原油与源岩对比研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 164-171 [Duan Yi, Yu Wenxiu, Zhen Zhaoyang, *et al.* Study of oil-source correlation for Tahe Oilfield of Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 164-171]
- 22 Peters K E, Moldowan J M, Sundararaman P. Effects of hydrous pyrolysis on biomarker thermal maturity parameters: monterey phosphatic and siliceous members [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15: 249-265
- 23 Radke M, Welte D H, Willsch H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 1-10
- 24 陶树, 汤达祯, 周传祯, 等. 川东南-黔中及其周边地区下组合烃源岩稀土元素地球化学特征及沉积环境[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(3): 41-43, 47 [Tao Shu, Tang Dazhen, Zhou Chuanyi, *et al.* REE geochemical characteristics and implication on sedimentary environment of lower assemblage source rocks in Chuandongnan-Qianzhong and adjacent area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(3): 41-43, 47]
- 25 梁狄刚, 郭彤楼, 边立曾, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(2): 1-19 [Liang Digang, Guo Tonglou, Bian Lizeng, *et al.* Some progresses on studies of hy-

- drocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions , Southern China (Part 3) : controlling factors on the sedimentary facies and development of Paleozoic marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology* , 2009 , 14 (2) : 1-19]
- 26 陈兰, 钟宏, 胡瑞忠, 等. 黔北早寒武世缺氧事件: 生物标志化合物及有机碳同位素特征 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (9) : 2413-2423 [Chen Lan, Zhong Hong, Hu Ruizhong, *et al.* Early Cambrian oceanic anoxic event in northern Guizhou: biomarkers and organic carbon isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 2006, 22 (9) : 2413-2423]
- 27 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素 [J]. *地学前缘*, 2005, 12 (3) : 39-48 [Zhang Shuichang, Zhang Baoming, Bian Lizeng, *et al.* Development constraints of marine source rocks in China [J]. *Earth Science Frontiers* , 2005, 12 (3) : 39-48]
- 28 林丽, 周玉华, 付修根, 等. 贵州瓮安地区早寒武世含磷岩系有机地球化学特征 [J]. *矿物岩石* 2010, 30 (1) : 93-98 [Lin Li, Zhou Yuhua, Fu Xiugen, *et al.* Organic geochemistry of rock series bearing phosphor in early Cambrian in Weng'an, Guizhou Province [J]. *Journal of Mineral Petrology* 2010, 30 (1) : 93-98]
- 29 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要因素 [J]. *地质学报*, 2006, 80 (3) : 467-472 [Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, *et al.* Main factors influencing marine carbonate source rock formation [J]. *Acta Geologica Sinica* , 2006, 80 (3) : 467-472]
- 30 杨剑, 易发成, 侯兰杰. 黔北黑色岩系的岩石地球化学特征和成因 [J]. *矿物学报*, 2004, 24 (3) : 285-289 [Yang Jian, Yi Facheng, Hou Lanjie. Genesis and petrogeochemistry characteristics of Lower Cambrian black shale series in northern Guizhou [J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 2004, 24 (3) : 285-289]

Geochemical Characteristics and Origins of the Lower Cambrian Source Rocks from the Southern Guizhou Depression , SW China

HE Xun-yun^{1 2 3 4} YAO Gen-shun^{3 4} CAI Chun-fang¹ SHEN An-jiang^{3 4}
WU Jing-wu^{3 4} HUANG Ling^{3 4} CHEN Zi-liao^{3 4}

(1. Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049;

3. Hangzhou Research Institute of Geology , PetroChina , Hangzhou 310023;

4. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs , CNPC , Hangzhou 310023)

Abstract: The Lower Cambrian source rock samples from three typical profiles in the southern Guizhou Depression were analyzed for TOC values , $\delta^{13}\text{C}$ values , T_{max} temperatures , potential generation , and biomarkers using Rock-Eval , GC , GC-MS to elucidate the geochemical characteristics and its origin. The results show that the Lower Cambrian black shales in the southern Guizhou Depression are regional marine excellent source rocks with depth of 50-150m , and have the TOC values of 0.13% -15.40% , average 3.31% ($n = 169$) ; the kerogens of the source rocks have the $\delta^{13}\text{C}$ values of -35.79‰ - -29.88‰ , average -32.85‰ ($n = 35$) , and the kerogen macerals are mainly sapropelinites; the values of the marine vitrinite reflectance of the kerogens are 1.95% -3.96% , and the values of the equivalent vitrinite reflectance are 2.02% -3.47% ; the distribution shapes of the n -alkanes are mainly single peak , and the maximum peak carbon are mainly C_{22} , the C_{30} hopane and $\text{C}_{27}\alpha\alpha\alpha 20\text{R}$ regular sterane are abundant , the regular steranes are mainly $\text{C}_{27} > \text{C}_{29} > \text{C}_{28}$, the Pr/Ph values are 0.27-0.62 , the source rocks have relative high abundance of gammacerane and dibenzothiophene , the OEP values are 0.82-1.11 , C_{31} homohopane 22S/(22S + 22R) have values of 0.56-0.63 , average 0.59; the source rocks are generally characterized by enrichment in light REE , Ba , Mo , V and U element , relative strong negative anomaly of Ce element , relative strong positive anomaly of Eu element and relative high ratio of U/Th. In summary , the Lower Cambrian marine source rocks in the southern Guizhou Depression have a wide distribution with a thickness of from tens of meters to hundreds of meters , the source rocks have high TOC values , are excellent for organic matter type , and have a post-maturity. It is the product which is jointly controlled by high paleo-productivity and anoxic environment. It can provide abundant organic matter for hydrocarbon generation in the southern Guizhou Depression.

Key words: source rock evaluation; marine source rock; biomarker; productivity; anoxic environment; Niutitang Formation; southern Guizhou Depression