

文章编号: 1000-0550(2011)02-0235-10

古气候恢复及其对沉积的控制作用^①

——以四川盆地上三叠统须家河组为例

徐兆辉 胡素云 汪泽成 徐安娜 江青春

(中国石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 四川盆地上三叠统须家河组是盆地的主力产层,该组发育的6段地层表现为砂—泥间互的“三明治”式沉积结构。为了探讨古气候对这种沉积结构的控制作用,文章首次利用孢粉学方法、元素比值法和自然伽马曲线法分别恢复了四川盆地晚三叠世须家河期各段地层沉积时期的古气候。孢粉植被法识别出蕨类和裸子类孢粉化石共计78属,呈现“拟网叶蕨孢属—凹边孢属—苏铁粉属”的须家河组孢粉组合特色,这种孢粉组合反映温暖潮湿的热带、亚热带气候类型。元素比值法中的钙镁比和锶钡比分别反映古温度和古盐度(古湿度),其中,钙镁比值与古温度正相关,锶钡比值与古盐度正相关而与古湿度负相关。自然伽马值是反映气候的又一种方法,GR值高代表古气候潮湿、沉积水体深;反之亦然。在孢粉法恢复的气候背景上,元素比值法和自然伽马曲线法反映了各段地层沉积时期的气候变化细节。综合三种方法的结果,认为:须家河组沉积于温暖潮湿的热带亚热带环境,须1、3、5段沉积时期,气候炎热潮湿;须2、4、6段沉积时期,气候温和干燥。须5段地层最为炎热潮湿,须2段地层最为温和干燥。受控于这种周期性的温、湿度升降,须家河组奇数段地层以泥质沉积为主,偶数段地层以砂质沉积为主,从而形成了砂泥间互的“三明治”式沉积结构,这样“近水楼台先得月”的源储搭配关系为油气成藏提供了有利条件。

关键词 须家河期 古气候 孢粉 元素 自然伽马曲线 “三明治”结构

第一作者简介 徐兆辉 男 1981年出生 博士研究生 沉积学 E-mail: tadxu@126.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

随着中国石油勘探进程的推进,碳酸盐岩油气藏和岩性地层油气藏已经被列为了重要的油气勘探领域。其中,四川盆地兼有这两大重点领域,具有重要的战略意义^[1]。四川盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造上位于扬子陆块的偏西北一侧,其地貌特征可谓群山环抱:北部为米仓山,东北部为大巴山,东部为七曜山,南部为大凉山,东南部为娄山,西部则是龙门山。作为中国陆上七大富油气盆地之一,目前四川盆地累计探明石油资源量 $4 \times 10^8 \text{ t}$,天然气资源量 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (图1)。须家河组厚度差异较大,川西地区最厚,可逾千米;向川中和蜀南地区逐渐减薄,在威远和潼南地区最薄,厚度仅数百米,总体呈现由北西向南东逐渐减薄之势^[2]。须家河组地层自下而上发育的6段地层呈“三明治”式沉积结构,其中,须1、3、5段发育以泥页岩夹煤层为主的烃源岩,须2、4、6段则发育以砂岩为主的储集层,这种源—储接触关系为油气成藏提供了“近水楼台先得月”的有利条件^[3,4]。针对

这种“三明治”结构的成因,有学者认为沉积和构造作用是主控因素^[2,5,6],尤以前者为甚,而沉积作用则受古气候的控制^[7]。



图1 研究区样品采样点和GR曲线井点位置

Fig. 1 Location of samples and wells with GR logging curves

古气候对沉积作用的控制体现在多个方面:在物源区,古气候影响母岩的风化、剥蚀,决定了是以物理

^①国家基础研究发展规划项目(编号:2007CB209502)和中国石油科研项目(编号:2008A-0607)联合资助。
收稿日期:2009-12-21;收修改稿日期:2010-04-13

风化为主还是以化学风化为主;在沉积物质搬运过程中,古气候影响其搬运营力,决定了是流水搬运、冰川搬运还是风的搬运;在沉积卸载区,古气候的周期性变化造成沉积物的韵律和旋回等。由此可见,古气候对沉积的控制和影响是全方位的,恢复沉积古气候对于理解和分析沉积特征具有重要意义。

本文综合利用多种资料和方法恢复了四川盆地晚三叠世须家河组各段地层沉积时期的古气候,进而讨论了这种气候对形成该组地层“三明治”式沉积结构的控制作用。

1 古气候恢复方法

古气候恢复方法较多,主要包括:孢粉植被法、元素比值法、自然伽马曲线法、碳、氧同位素法、沉积物岩性颜色法和地磁磁化率法等。其中,前三种方法相对成熟且可操作性强。必须指出,恢复古气候是相对困难的,其结果具有较大的多解性。为了消除多解性,本文选取盆地不同部位的采样点(图1),采取室内、室外相结合,综合多种方法、求同去异。所用方法包括:露头 and 岩芯样品的室内孢粉和元素化验,测井数据的自然伽马曲线分析、野外露头伽马仪测试。其中,威远黄石板和华蓥观音溪两个露头剖面易于连续取样,因此,孢粉和元素所需样品主要采自这两个剖面(图2)。笔者委托中国石油华北油田研究院完成了孢粉和元素的分析,利用分析结果并结合野外分析数据和三口井的自然伽马(GR)曲线,分别使用三种方法进行了古气候的恢复。

1.1 孢粉植被法

生物演化是对环境变化的适应,因而利用生物化石恢复古气候是最为直接、可靠的方法。动物具有很大的可迁移性,对于气候的变化可以通过迁徙来适应。因此,动物对于原地性气候的指示作用较之植物为差。植物具有原地性生长的特征,因而植物对气候和环境变化更为敏感。作为植物的繁殖器官,孢粉是因其数量大、个体小而易于保存,成为了气候恢复理想指标^[8-9]。

王全伟等^[10]在四川盆地中西部地区两个剖面(炭坝和天全)共发现孢粉化石124属228种,新属种27属63种。其中,以蕨类植物孢子占优势,计80属153种,占孢粉总量的70%;裸子植物花粉约占30%。蕨类植物孢子中以双扇蕨科的网叶蕨孢、凹边孢为主,约占孢粉总量的40%;裸子植物花粉中则以苏铁类、松柏类植物居多。基于这些数据,认为四川

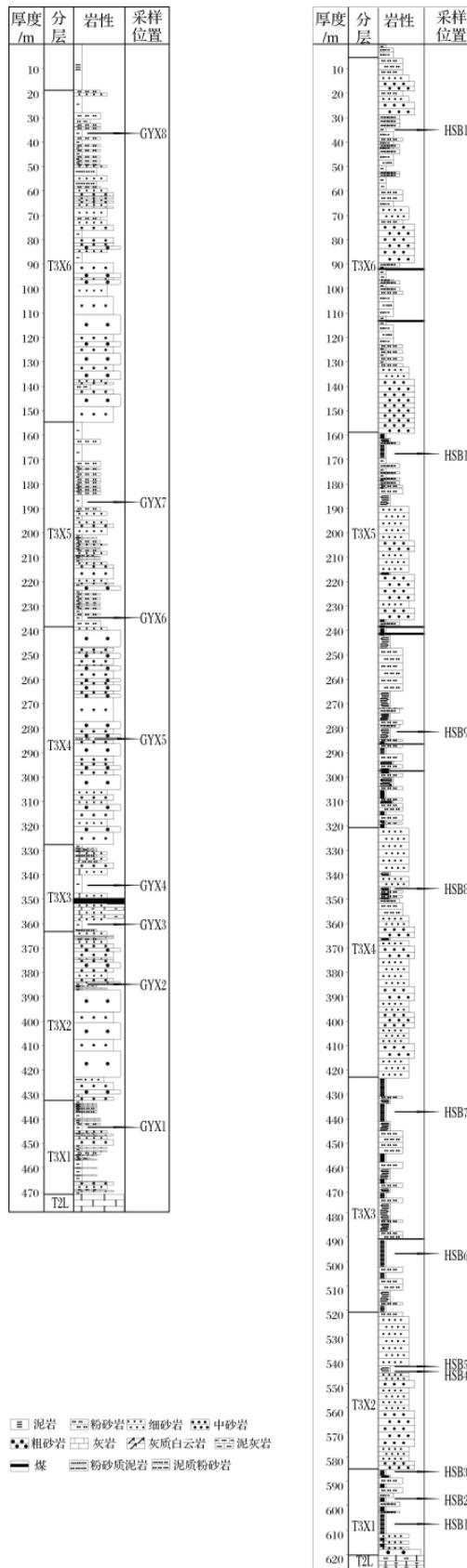


图2 华蓥观音溪(左)和威远黄石板(右)剖面及采样位置
Fig. 2 Sampling location in sections of Huaying Guanyinxi and Weiyuan Huangshiban

网叶蕨孢属、凹边孢属、弓堤孢属、格脉蕨孢属以及三角刺面孢属等)为最多,其中的拟网叶蕨孢属更是一枝独秀;裸子植物花粉主要是苏铁粉属,同时发现少量松科。因此,须家河组表现出“拟网叶蕨孢属—凹边孢属—苏铁粉属”的孢粉组合特色(图3、4)。通过对须家河组孢粉组合特色的分析,认为这些孢粉对应的植物主要分布于我国南方潮湿温暖的热带、亚热带,反映当时的古气候应为温暖—炎热、潮湿,这一结论与前人研究成果相符。

潮湿的森林环境,成为森林植被中草本层的主要组成部分。但是,四川盆地晚三叠世须家河期蕨类孢子化石占绝对优势,那么蕨类植物应该是主体。同时,在这里出现的裸子类孢粉化石较少,不太可能构成高大的森林植被,因而推测当时的蕨类植物应该是一种比较高大的树蕨,形成类似于现今海南、台湾、云南等热带—亚热带植物区系里比较高大的形如棕榈一般的树蕨群景观。

1.2 元素比值法

元素已经被广泛应用于古气候、古沉积环境的恢复,取得了良好效果。岩石中所含元素的性质和数量受到其本身的物理化学性质以及古气候、古环境的综合影响。泥岩中的元素一旦随沉积物沉积下来之后,在后续成岩过程中其性质和比例基本不发生改变。因此,微量元素和某些常量元素的相对含量及其比值携带了其原始沉积位置的古气候信息,可以用于其沉积期古温度和古湿度的恢复。

陈敬安等^[12]认为CaO/MgO值反映湖泊自生碳酸钙沉淀的相对多少,因此可以反映古气温,即:CaO/MgO值高指示气温相对较高,CaO/MgO值低则



拟网叶蕨孢属 *Dictyophyllidites* 凹边孢属 *Concavisporites* 苏铁粉属 *Cycadopites*

图3 四川盆地上三叠统须家河组典型孢粉

Fig. 3 Typical pollens of Xujiache Formation (Upper Triassic) in Sichuan Basin

值得注意的是,现今的蕨类植物大都喜生于温暖

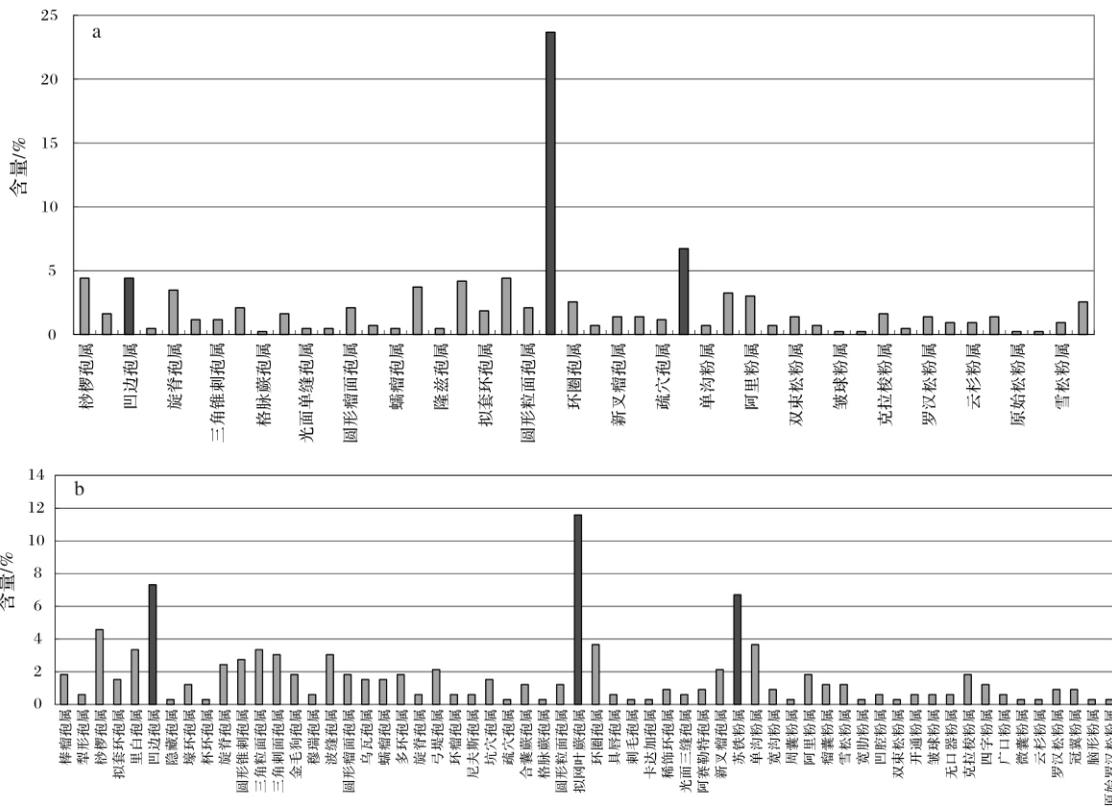


图4 四川盆地上三叠统须家河组孢粉含量(a. 华蓥观音溪剖面; b. 威远黄石板剖面)

Fig. 4 Spora content found in Xujiache Formation (Upper Triassic), Sichuan Basin

指示气温相对较低。田晓雪等^[13] 也认为 CaO/MgO 反映古温度的变化: 高值指示气温相对较高, 低值则指示气温相对较低。Sr/Ba 则是水体盐度“指示剂”: 高值代表水体盐度高、气候相对干燥, 低值则代表水体盐度低、气候相对湿润。根据这一原理, 田晓雪等分析了黑龙江嘉荫地区白垩系全岩样品的微量元素, 提取了能指示气候变化的 CaO/MgO 和 Sr/Ba 两项参数, 据此恢复了嘉荫地区的沉积古气候。认为自白垩纪末至古近纪初, 气候整体呈温度下降、降水增多的趋势。由此可见, 泥岩样品中的 Ca/Mg 和 Sr/Ba 可以用来反映古温度和古湿度, 效果较好。

基于以上讨论可知, 岩石中的元素比值可以用于古气候的恢复。本文从岩芯和露头泥岩样品中共检测出常量元素 5 种, 微量元素 10 种。其中, 包浅 001-16 井岩芯样品和威远黄石板露头样品的 Ca/Mg 和 Sr/Ba 值规律性明显(表 3, 图 5、6)。当然, 在利用 Ca/Mg 和 Sr/Ba 恢复古气候之前, 应该首先考虑到海

水对测定值的影响。因为须家河组开始沉积时海水逐渐从四川盆地西南部地区退出^[14], 威远黄石板 and 包浅 001-16 井区所在位置为海—陆过渡相沉积, 海水造成须一段沉积时期的 Ca/Mg 异常低, 而 Sr/Ba 则异常高。图 5 和 6 中的红色虚线框是去除海水影响后两个地区须一段沉积时期真实的 Ca/Mg 和 Sr/Ba 比值。去除海水干扰后, 两个地区的元素比值规律性显而易见。

包浅 001-16 井的 Ca/Mg 比值(图 5) 反映古温度的变化, 可以看出: 须家河组各段地层的 Ca/Mg 比值呈现规律性的高低起伏, 其中, 须 1、3、5 段比值高; 须 2、4、6 段比值低。这说明在须家河组奇数段地层沉积时期, 古温度较高; 偶数段地层发生沉积时, 古温度相对较低。须 5 段沉积时期的古温度表现出异常高, 而须 6 段的古温度则表现为异常低。从图 5 还可以看出: 须 1 段到须 4 段沉积时期, 须家河组的温度起伏变化不大, 呈现小幅震荡的态势, 而须 5 段

表 3 威远黄石板剖面和包浅 001-16 元素含量
Table 3 Element content in Weiyuan Huangshiban section and Well Baoqian 001-16

层位	元素含量/($\mu\text{g/g}$)										元素含量/%				
	B	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Ga	Sr	Ba	Na	Mg	K	Ca	Fe
威远黄石板剖面															
须 6	78	122	68	159	75	25	160	20	57	328	0.1	1.1	2	0.1	3.2
须 5	61	116	59.5	291.5	14.4	23	56.5	28	67	431	0.2	1.1	2.1	0.8	2.3
须 4	98.5	138	72	546.5	25.5	32.5	73.5	27	97.5	523.5	0.5	2.2	2.6	1.3	3.8
须 3	107.5	169	94.5	271.5	36.5	45	112	30.5	69	405	0.2	1.8	3.1	0.5	4.3
须 2	46.5	104	56	42	18.2	31	43	26	50.5	228.5	0.1	0.6	2.3	0.1	1.2
须 1	141	168	74	139.5	26.3	41	72.5	35	80	218	0.1	0.6	2	0.1	5.2
包浅 001-16 井岩芯															
须 6	59.5	130	68	238	24	11	51	21.5	87.5	392	0.465	0.775	1.97	0.34	2.26
须 5	55	97	50	487	12	21	67	20	126	344	0.03	1.86	2.12	5.53	2.44
须 4	76.5	100	46	306.5	12.1	18.5	27	18.5	84	474	0.475	0.96	2.43	0.55	3.06
须 3	100	139	75	213	26	25	44	29	95	484	0.16	1.54	3.82	1.16	4.15
须 2	108	153	75	184	16.5	24	40.5	26	101.5	514	0.145	1.98	4.75	1.1	2.92
须 1	63	138	73	144	19.5	17.5	50	23.5	100	324.5	0.125	1.44	4.3	0.11	2.57

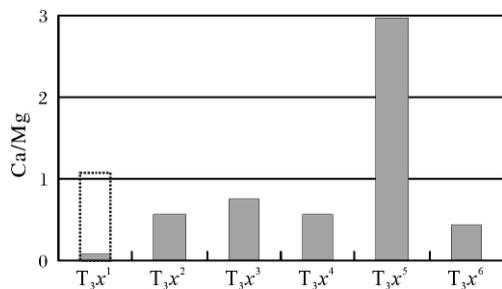


图 5 包浅 001-16 井 Ca/Mg 比值

Fig. 5 Ratio of Ca/Mg in Well Baoqian 001-16

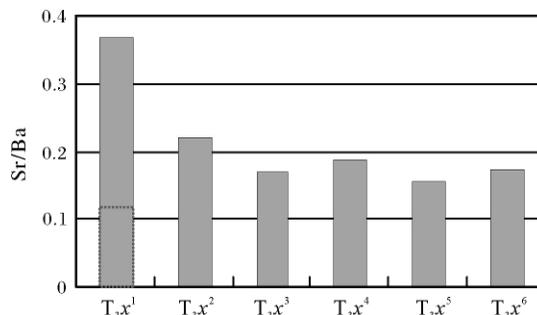


图 6 威远黄石板 Sr/Ba 比值

Fig. 6 Ratio of Sr/Ba in Weiyuan Huangshiban

沉积时期则出现一个明显的升温过程,温度达到最高,进入须6段后温度又迅速降低。因此可以将须家河组的古温度变化特征概括为“早期变化平缓、晚期变化剧烈”。

威远黄石的 Sr/Ba 比值(图6)反映水体盐度的变化,也就指示古湿度的变化情况。从图中可以看出:须家河组各段地层的 Sr/Ba 比值同样呈现规律性变化,其中,须1、3、5段比值低;须2、4、6段比值高。这说明在须家河组奇数段地层沉积时期,水体古盐度低、古湿度较高;偶数段地层发生沉积时,水体古盐度高、古湿度相对较低。与图5所反映的古温度变化不同,图6所反映的古湿度变化幅度整体平缓,没有出现湿度的剧烈变化,这说明须家河组沉积时期的降雨量平稳,古湿度没有发生重大变化。相对而言,须2段沉积时期的古湿度最低,而须1和须5段沉积时期的古湿度则较高。

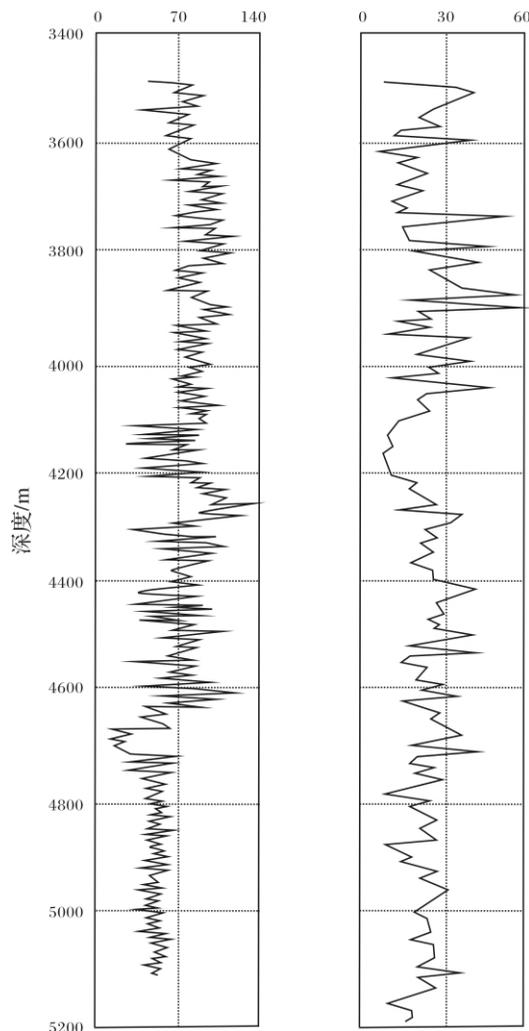
综合分析 Ca/Mg 和 Sr/Ba 比值所反映的温度和湿度变化,可以对四川盆地须家河组沉积时期的古气候做出如下推测:须家河组须1、3、5段沉积时期,气候相对炎热、湿度较大;须2、4、6段沉积时期,气候相对温和、湿度较小。其中,须5段沉积时期的古气候特征最明显,表现为温度异常高而湿度异常大的炎热潮湿气候。

1.3 自然伽马(GR)曲线法

自然伽马测量的是放射性矿物衰变过程中放射出的伽马射线强度,反映放射性元素含量的高低。放射性矿物的富集对区域条件和沉积次序有很强的依赖性,碳酸盐、矿物质和有机质含量变化则受到诸如气候等外部因素的控制^[15]。自然伽马值的大小与古气候的干湿、沉积水体的深浅有内在联系:GR值高、古气候潮湿、沉积水体深;反之亦然。GR曲线的振幅与频率则可以反映沉积环境的稳定性特征:高频高幅代表较动荡的浅水环境;高频低幅代表较封闭的浅水湖湾环境^[16]。由于GR曲线连续性好、敏感度高、所需费用低,因此可以作为很好的古气候恢复方法。

Johan H V等^[17]对克里特岛3个剖面的研究表明,采用自然伽马曲线研究放射性矿物,可以恢复沉积古气候。特别值得指出的是,杨平等^[16]利用柴达木盆地冷科1井下侏罗统孢粉谱中的松科和罗汉松科的百分含量变化勾绘了孢粉曲线,曲线反映出温暖潮湿的古气候背景。其中,曲线高值段反映气候相对暖湿;低值段反映气候相对干冷。将此孢粉曲线与对应深度段的GR曲线对比,可以看出总体吻合度较高

(图7)。以上中外学者的研究均证实了GR曲线可以很好地反应古气候演化,为本文的研究提供了科学依据。



柴达木盆地冷科1井自然伽马曲线(左)与孢粉曲线(右)对比(据杨平等 2003)

Fig. 7 GR logging curve (left) and pollen curve (right) of Well Lengke-1 Qaidam Basin (From Yang Ping, et al., 2003)

图8展示了采自华莹观音溪露头的样品中松科和罗汉松科孢粉含量,虽然由于该露头剖面中须4段不发育泥岩段而缺少了该段的数据,但规律性仍很明显:从须1段开始,松科与罗汉松科孢粉含量呈现“高一低一高”周期性的升降变化。这反映出须1、3、5段沉积时期的气候比较暖湿而须2、6段沉积时期则比较干凉。其中,须3段和须5段温湿度最高而须2段温湿度最低,这与利用孢粉和元素恢复的古气候结果相吻合。根据杨平等人的研究成果,在四川盆地

上三叠统须家河组同样可以利用自然伽马曲线变化来反映沉积古气候的变化。

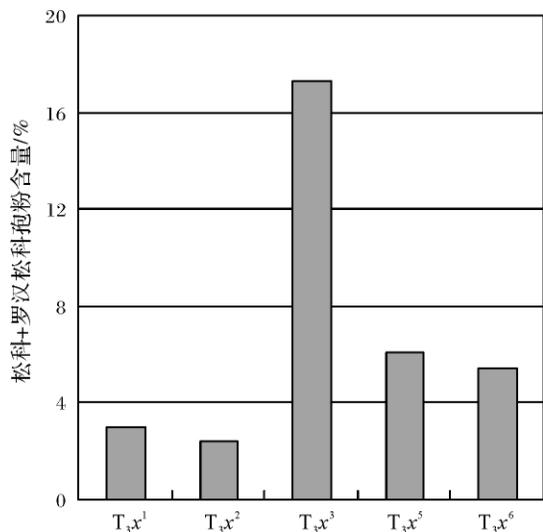


图 8 四川盆地华莹观音溪露头松科和罗汉松科孢粉含量

Fig. 8 Content of Pinaceae and Podocarpaceae pollen in Huaying Guangyinxi, Sichuan Basin

选取分属于蜀南、川中和川北三个地区的须家河组三口探井(资 2 井、广安 13 井和 LG3 井)的 GR 曲线(图 9), 分层段研究曲线变化情况。三口井的 GR 曲线同时表现出须 1、3、5 段曲线值高, 须 2、4、6 段曲线值低的特征。根据上述的讨论可知, GR 曲线的高低分别对应着气候的干湿交替和冷暖更迭。从广安 13 井的曲线中还可以看出, 在须 6 段沉积后期, GR 曲线略有升高, 说明这一时期的气候有向暖湿变化的趋势。而从采自华莹观音溪露头须 6 段上部样品的孢粉谱中松科和罗汉松科含量(图 8)可以看出, 须 6 段的数值仅略低于须 5 段, 同样说明此时的温度和湿度比须 5 段略低。值得注意的是, 三口井的 GR 曲线中, 须 5 段沉积所对应的数值均为持续高值, 这与通过元素比值法恢复古气候所得结论相互印证。

应该指出, GR 曲线受到岩性等因素的干扰, 其数值的局部震荡频率和幅度未必与气候变化一一对应。但是, 如果从须家河组各段地层的尺度进行研究, GR 曲线法还是可以比较合理地反映气候变化, 不失为一种可行的古气候恢复方法。

2 古气候恢复结果及其地质意义探讨

2.1 古气候恢复结果

利用孢粉、元素比值和自然伽马曲线三种方法分别对四川盆地晚三叠世须家河组沉积时期的古气候

进行了恢复, 恢复结果相互吻合。三种方法各有利弊、相互补充。其中, 孢粉植被法能够确定植物类型组合, 并根据这种组合明确地指出当时所处的古气候带类型和特征。其弊端是在晚三叠世须家河组沉积过程所经历的 30 Ma 中, 植物演化相对缓慢, 植被组合没有发生重大变化。因此, 不能通过孢粉组合反映须家河组各段地层沉积时期的气候变化细节。元素比值法和自然伽马曲线法的优势在于能够灵敏地反映气候相对变化细节, 其不足是不能判定古环境所处的气候带类型。

基于上述讨论, 综合孢粉、元素比值和 GR 曲线三种方法可以定性、定量地恢复古气候。孢粉植被法奠定了四川盆地须家河组沉积时期热带和亚热带炎热潮湿的气候背景, 另外两种方法则在此基调之上, 描绘了须家河组各段地层沉积时期的气候变化细节。

综合分析利用三种方法得到的气候恢复结果, 我们可以确定四川盆地上三叠统须家河组各段地层沉积时期的古气候情况。整个须家河组沉积时期, 四川盆地基本处于炎热潮湿的热带、亚热带气候背景。温度呈现须 1、3、5 段高, 须 2、4、6 段低的特点。其中尤以须 5 段温度最高, 须 6 段温度最低。湿度则呈现须 1、3、5 段湿度大, 须 2、4、6 段湿度小的特点。其中尤以须 2 段湿度最小, 须 5 段湿度最大。对比元素比值和“松科+罗汉松科”两项古气候指标(图 5、6 和 8), 还可以看出: 须 3 段地层沉积时期是四川盆地除了须 5 段之外的另一个炎热潮湿期。

2.2 古气候对沉积的控制

四川盆地上三叠统须家河组沉积地层呈现出典型的砂泥岩间互特征, 其中, 须 1、3、5 段主要发育泥岩、碳质泥岩和煤层, 是良好的烃源岩; 须 2、4、6 段主要发育中细砂岩和粉砂岩, 是主要的储层集中发育段。对于须家河组这种“三明治”式的沉积结构的成因有多种解释^[18-20], 但是古气候无疑是重要的影响因素之一。

须家河组奇数段地层沉积时期, 湿度大、温度高, 有利于物源区母岩发生化学风化, 造成风化剥蚀物质以细粒为主。湿度大往往造成水系大, 在长距离的搬运过程中, 细粒物质被进一步粉碎成泥质, 这就造成了奇数段地层主要沉积了细粒泥页岩。植物在这种潮湿炎热的环境中非常繁盛, 从而形成了须家河组广泛分布的煤系烃源岩。须家河组偶数段地层沉积时期, 湿度小、温度较低, 物源区的母岩主要遭受机械风化, 沉积物质主要以砂质为主, 形成了须家河组须 2、

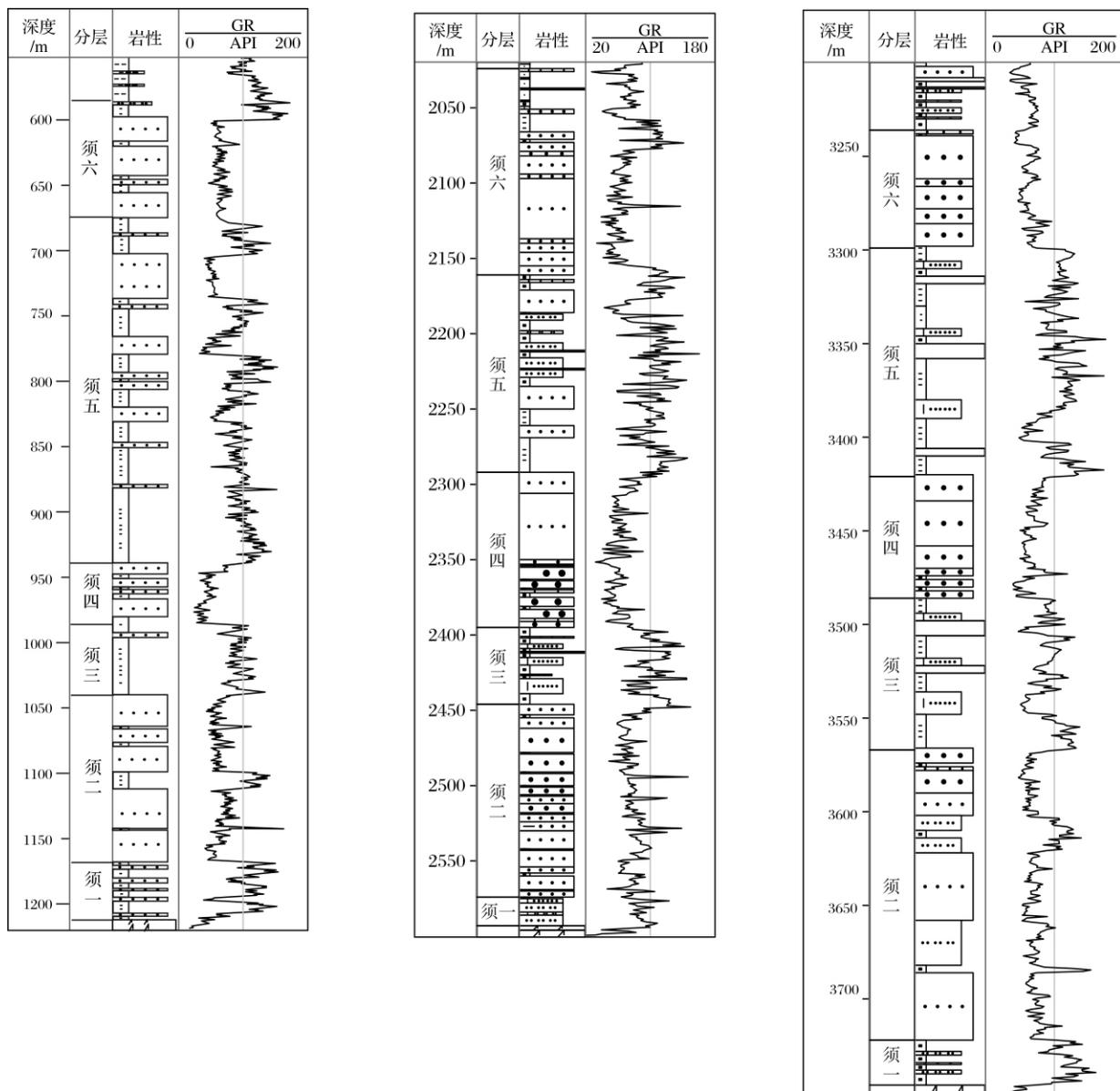


图9 资2井(左)、广安13井(中)和LG3井(右)须家河组GR曲线特征(图例见图2)

Fig. 9 Characteristics of GR logging curves of Xujiache Formation in Well Zi 2 (left) ,
Guangan13 (middle) and LG3 (right)

4、6段大范围、广覆式的砂岩储集层。这种大面积的砂泥间互(源储)接触关系为须家河组天然气大面积成藏提供了坚实的沉积基础。

3 结论

本文分别利用孢粉、元素和自然伽马曲线三种常用方法对四川盆地晚三叠世须家河组地层发育时期的沉积古气候进行了恢复,得到的结果能够互相印证,具有较好的一致性。经过综合对比和分析不同方法的气候恢复结果,首次系统总结了须家河组各段地

层沉积时期的古气候。在孢粉学方法确定的热带、亚热带气候背景下,每段地层发育时期的气候特征略有差异。其中,须1、3、5段沉积时期,气候炎热潮湿;须2、4、6段沉积时期,气候温和干燥。须5沉积期最为炎热潮湿,须2沉积期则最为温和干爽。在这种温湿度周期性升降的古气候背景的控制下,四川盆地须家河组各段地层沉积特征表现为砂泥间互的“三明治”式结构,这样的源储搭配关系为油气成藏起到了“近水楼台先得月”的作用,为天然气成藏提供了有利条件。

参考文献(References)

- 1 贾承造,赵政璋,杜金虎,等. 中国石油重点勘探领域——地质认识、核心技术、勘探成效及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 385-396 [Jia Chengzao, Zhao Zhengzhang, Du Jinhu, *et al.* PetroChina key exploration domains: Geological cognition, core technology, exploration effect and exploration direction [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(4): 385-396]
- 2 朱如凯,赵霞,刘柳红,等. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 46-55 [Zhu Rukai, Zhao Xia, Liu Liuhong, *et al.* Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 46-55]
- 3 赵文智,汪泽成,王红军,等. 中国中、低丰度大油气田基本特征及形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(9): 641-650 [Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Hongjun, *et al.* Principal characteristics and forming conditions for medium-low abundance large scale oil/gas fields in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(9): 641-650]
- 4 侯方浩,蒋裕强,方少仙,等. 四川盆地上三叠统香溪组二段和四段砂岩沉积模式[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 30-37 [Hou Fanghao, Jiang Yuqiang, Fang Shaoxian, *et al.* Sedimentary model of sandstone in the second and fourth members of Xiangxi Formation in the Upper Triassic of Sichuan Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2005, 26(2): 30-37]
- 5 郑荣才,朱如凯,翟文亮,等. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 246-255 [Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Zhai Wenliang, *et al.* Tectonic evolution and sequence filling patterns in the western Sichuan foreland-like basin in the Upper Triassic Xujiahe period [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 246-255]
- 6 郑荣才,朱如凯,戴朝成,等. 川东北类前陆盆地须家河组盆-山耦合过程的沉积-层序特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1077-1087 [Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Dai Zhaocheng, *et al.* Depositional sequence features during coupling process between basin and mountain of the Xujiahe Formation of Upper Triassic in the foreland basin, NE Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1077-1087]
- 7 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学(第三版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001 [Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary Geology (III Edition) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001]
- 8 周山富,杨方之. 孢粉地质学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2007 [Zhou Shanfu, Yang Fangzhi. Palynogeology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007]
- 9 高瑞琪. 中国含油气盆地孢粉学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000 [Gao Ruiqi. Palynological in Sedimentary Basins of China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000]
- 10 王全伟,阚泽忠,刘啸虎,等. 四川中生代陆相盆地孢粉组合所反映的古植被与古气候特征[J]. 四川地质学报, 2008, 28(2): 89-95 [Wang Quanwei, Kan Zezhong, Liu Xiaohu, *et al.* The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to paleovegetation and paleoclimate [J]. Acta Geologica Sichuan, 2008, 28(2): 89-95]
- 11 黄其胜. 川北晚三叠世须家河期古气候及成煤特征[J]. 地质论评, 1995, 41(1): 92-99 [Huang Qisheng. Paleoclimate and coal-forming characteristics of the Late Triassic Xujiahe Stage in Northern Sichuan [J]. Geological Review, 1995, 41(1): 92-99]
- 12 陈敬安,万国江,陈振楼,等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学, 1999, 28(6): 562-570 [Chen Jingan, Wan Guojiang, Chen Zhenlou, *et al.* Chemical elements in sediments of lake Erhai and palaeoclimate evolution [J]. Geochimica, 1999, 28(6): 562-570]
- 13 田晓雪,雒昆利,谭见安,等. 黑龙江嘉荫地区白垩系与古近系界线附近的古气候分析[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 425-432 [Tian Xiaoxue, Luo Kunli, Tan Jianan, *et al.* Analysis on palaeoclimate neighbouring the Cretaceous and Paleogene boundary in Jiayin area, Heilongjiang Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(3): 425-432]
- 14 邓康龄. 四川盆地形成演化与油气勘探领域[J]. 天然气工业, 1992, 12(5): 7-13 [Deng Kangling. Formation and evolution of Sichuan Basin and domains for oil and gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 1992, 12(5): 7-13]
- 15 陈晔,袁林旺,周春林,等. 柴达木盆地第四纪古气候变化在自然伽马测井曲线上的记录[J]. 古地理学报, 2001, 3(2): 29-37 [Chen Ye, Yuan Linwang, Zhou Chunlin, *et al.* Quaternary palaeoclimatic changes recorded by natural gamma logging curve in Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(2): 29-37]
- 16 杨平,陈晔,刘泽纯. 柴达木盆地自然伽马曲线在古气候及沉积环境研究中的应用[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 94-102 [Yang Ping, Chen Ye, Liu Zechun. Application of gamma ray logging to study on palaeoclimate and sedimentary environments of the Jurassic in Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1): 94-102]
- 17 Johann H V, George Postma. Astronomically forced variations in gamma-ray intensity: Latest Miocene hemipelagic successions in the eastern Mediterranean Basin as a test case [J]. Geology, 1996, 24(1): 15-18
- 18 郑荣才,戴朝成,朱如凯,等. 四川类前陆盆地须家河组层序-岩相古地理特征[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 484-495 [Zheng Rongcai, Dai Zhaocheng, Zhu Rukai, *et al.* Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Geological Review, 2009, 55(4): 484-495]
- 19 孙治雷,黄思静,张玉修,等. 四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 459-468 [Sun Zhilei, Huang Sijing, Zhang Yuxiu, *et al.* Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 459-468]
- 20 谢继容,李国辉,唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 1-13 [Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai. Analysis of provenance system of Xujiahe Formation, Upper Jurassic, Sichuan Basin, China [J]. Natural

Restoration of Paleoclimate and Its Geological Significance: As an example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin

XU Zhao-hui HU Su-yun WANG Ze-cheng XU An-na JIANG Qing-chun
(Research Institute of Petroleum Exploration and Development ,PetroChina Beijing 100083)

Abstract Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin is the principal producing formation. Six members of Xujiahe Formation form sandwich-like sedimentation structure with interbedded sandstone and mudstone. In order to discuss the contribution of paleoclimate on this kind of sedimentation structure , three commonly-used methods of restoring paleoclimate , namely sporopollen , elements and GR-ray logging were used to restore the paleoclimate of the time when each member of Xujiahe Formation was deposited. 78 genera of sporopollen were found in the samples of Xujiahe Formation , forming the sporopollen combination of Dictyophyllidites-Concavisporites-Cycadopites. The combination indicates warm and humid climate in tropic and/or subtropic zone. The ratio of Ca/Mg has a positive correlation with paleotemperature while the ratio of Sr/Ba has a negative correlation with salinity(paleomoisture) . The Gamma Ray can also illustrate the change of paleoclimate. The high GR data indicate humid climate , and vice versa. The proofs from sporopollen provided the climate background , and the other two methods described the details of paleoclimate. Combined all the three methods , we can find that the paleoclimate when Xujiahe Formation was sediment belongs to warm-humid tropics-subtropics zone. Paleoclimate when T_3x^1 , T_3x^3 and T_3x^5 were formed showed hot and humid. In the meantime , when T_3x^2 , T_3x^4 and T_3x^6 were formed it was warm and relatively dry. The climate of T_3x^5 was outstanding hot and humid , while the temperature and moisture of T_3x^2 was lowest. Controlled by the regular changes of paleoclimate , even numbered members were dominated by mudstone , and odd numbered members were dominated by sandstones. This kind of sandwich-like sedimentation structure formed by alternating layers of mudstone and sandstone provided favorite conditions for the formation of hydrocarbon reservoirs.

Key words Xujiahe stage; paleoclimate; sporopollen; elements; GR curve; sandwich-like structure