

# 四川剑门关侏罗—白垩系 红层分子化石的古环境和古气候意义

王红梅, 刘育燕, 王志远

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 利用气相色谱—质谱仪从四川剑门关侏罗—白垩系红层中检测出包括正构烷烃、类异戊二烯烃、长链三环萜、藿烷及甾烷等系列分子化石。分析了这些分子化石的分布特征及其来源, 利用分子化石的多项参数(如  $w(C_{21}^-)/w(C_{22}^+)$ ,  $w(Pr)/w(Ph)$ ,  $w(Pr)/w(nC_{17})$ ,  $w(Ph)/w(nC_{18})$ ), 伽马蜡烷指数、甾烷等)对沉积环境的盐度、氧化—还原条件、陆相标志等方面作了探讨。这些分子化石参数证实在中侏罗世—早白垩世, 剑门关一带的沉积环境应为低盐度淡水、弱氧化的陆相沉积环境。所研究的陆相样品高碳数正构烷烃均以与木本植物有关的  $C_{27}$ ,  $C_{29}$  为主峰, 未出现草本植物的  $C_{31}$  主峰, 反映了研究区总体格局是一种以木本植物占绝对优势、温暖湿润的气候环境, 与红盆发育的气候条件吻合, 充分体现了分子化石在恢复古环境、古植被和古气候方面有极大潜力。

**关键词:** 分子化石; 红层; 古环境; 古植被; 古气候; 剑门关。

**中图分类号:** P53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2001)03-0229-06

**作者简介:** 王红梅(1970), 女, 讲师, 1997年毕业于中国地质大学(武汉), 获矿床学硕士学位, 现主要从事有机地球化学和地质微生物的教学和科研工作。

分子地层学是介于沉积学、地层学、古生物学和生物学、有机化学之间的边缘学科, 研究对象为沉积地层中的分子化石, 即沉积物(岩)中那些来自生物遗体、具有一定沉积学、地层学和古生物学意义的有机分子。它们虽然经历过成岩作用的改造, 但仍保留了原有生物的碳骨架结构, 可以提供古生物学及与之相关的古环境信息。

由于 GC-MS, GC-MS-MS, GC-IRMS 等先进有机分析测试手段的引进, 当今地层学这一传统学科的发展已进入了分子水平。分子化石也由于其对古环境及古气候的指示意义而倍受注目, 分子地层学也获得了前所未有的发展。研究成果和内容主要集中在(1)沉积环境分析; (2)古生物标志; (3)古气候探讨; (4)地层对比和地层年龄的确定 4 个方面<sup>[1]</sup>。然而, 分子地层学的绝大多数成果集中在非氧化性的沉积盆地中, 对于像红色盆地这样的氧化性沉积环境的分子化石则几乎无人问津。在国土资源部科技攻关项目的资助下, 本文对四川剑门关侏罗

—白垩纪红色盆地的分子化石进行了尝试性的探讨, 并由此进一步挖掘与此相关的沉积环境和古植被、古气候信息, 以期能够将分子地层与磁性地层、沉积相、沉积环境的研究相互配合, 更好地解决红色盆地的环境及气候变迁问题。

## 1 材料与方法

分子地层学的采样要求同一般的有机地球化学样品一样, 必须保证样品新鲜。分别在四川剑门关侏罗—白垩纪红色盆地的沙溪庙组( $J_2$ )、遂宁组( $J_3$ )、莲花口组( $J_3$ )和剑门关组( $K_1$ )采集 5 件样品进行分析。从岩性组合上看, 中侏罗世沙溪庙组为一套由杂色中厚层状砂岩、粉砂岩及泥岩组成的河流相或河湖相沉积。晚侏罗世遂宁组岩性较单一, 主体为一套浅湖相或滨湖相的砖红色或鲜红色的泥岩、粉砂岩夹少量砂岩, 上部砂岩所占比例较大。晚侏罗世莲花口组底部为一套巨厚的冲积扇砾岩, 向上几乎均由砂砾岩和泥岩、粉砂岩所组成的河流相沉积旋回构成。早白垩世剑门关组特征与莲花口组十分相似, 底

表 1 剑门关剖面样品分子化石参数  
Table 1 Parameters of molecular fossils on Jianmenguan profile

| 样号 | 时代             | 碳数范围                             | 主峰碳                                                 | $\frac{w(C_{21}^-)}{w(C_{22}^+)}$ | $CPI$ | $\frac{w(Pr)}{w(Ph)}$ | $\frac{w(Pr)}{w(Ph)}$ | $\frac{w(Ph)}{w(nC_{17})w(nC_{18})}$ | $\gamma$ 腊烷指数 | $\frac{w(C_{27}\text{甾烷})}{w(\sum\text{甾烷})}$ | $\frac{w(C_{28}\text{甾烷})}{w(\sum\text{甾烷})}$ | $\frac{w(C_{29}\text{甾烷})}{w(\sum\text{甾烷})}$ | $\frac{C_{31}a^{22}S}{(22S+22R)}$ | $\frac{w(Ts)}{w(Tm)}$ |
|----|----------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 1  | K <sub>1</sub> | C <sub>16</sub> ~C <sub>33</sub> | C <sub>18</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> | 2.65                              | 3.89  | 0.79                  | 1.04                  | 1.07                                 | 0.12          | 0.15                                          | 0.32                                          | 0.53                                          | 0.60                              | 1.11                  |
| 2  | J <sub>3</sub> | C <sub>16</sub> ~C <sub>33</sub> | C <sub>18</sub> , C <sub>27</sub> , C <sub>29</sub> | 1.99                              | 1.68  | 0.51                  | 1.15                  | 1.19                                 | 0.10          | 0.16                                          | 0.34                                          | 0.50                                          | 0.60                              | 0.95                  |
| 3  | J <sub>3</sub> | C <sub>16</sub> ~C <sub>33</sub> | C <sub>18</sub> , C <sub>29</sub>                   | 2.39                              | 1.76  | 0.96                  | 0.78                  | 1.02                                 | 0.14          | 0.20                                          | 0.29                                          | 0.51                                          | 0.60                              | 0.83                  |
| 4  | J <sub>3</sub> | C <sub>16</sub> ~C <sub>33</sub> | C <sub>18</sub> , C <sub>29</sub>                   | 3.31                              | 1.52  | 0.80                  | 0.78                  | 0.89                                 | 0.13          | 0.18                                          | 0.29                                          | 0.53                                          | 0.60                              | 0.90                  |
| 5  | J <sub>2</sub> | C <sub>16</sub> ~C <sub>33</sub> | C <sub>18</sub> , C <sub>27</sub>                   | 5.16                              | 3.50  | 0.86                  | 0.75                  | 0.87                                 | 0.08          | 0.15                                          | 0.34                                          | 0.52                                          | 0.60                              | 1.09                  |

1. JMGO—108; 2. JMGO—105; 3. JMGO—70; 4. JMGO—36; 5. JMGO—1.

部为巨厚的冲积扇砾岩,上部为河流相的砂砾岩和泥岩.由于本研究中沙溪庙组的样品采自该组的顶部,其沉积特征与遂宁组十分接近,基本上为湖相沉积,因此,整个剖面大致为一个从湖相到河流相及冲积扇相的沉积变化序列.

由于岩石样品中保存下来的有机质本身就少,再加上氧化条件不利于有机质的保存,红色盆地岩石中的有机质就更加微乎其微,因此室内分析过程中应严格把关,防止外界污染.室内首先将样品表面用小刀刮掉,碎至 80 目以下,用三氯甲烷在索氏抽提器中抽提 72 h,衡重后用色层柱法分离出烷烃、芳烃、非烃和沥青质.对烷烃组分进行 GC—MS 分析.分析过程中所用的一切器皿均需用洗液浸泡、洗涤,事先将棉花、滤纸、硅胶用三氯甲烷抽提备用.

气相色谱—质谱联用仪(GC—MS)分析在中国地质大学(武汉)地球表层系统实验室完成. GC—MS 为 HP6890+GC/5973MS. 色谱条件:HP—5MS 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),始温 70℃,升温速率 3℃/min,终温 280℃,终温稳定 20 min,进样口温度 300℃,进样量 1 μL,氦气为载气. 质谱条件:电子轰击源,电离能量 70 eV,GC 与 MS 接口温度 280℃.

2 分子化石特征

剑门关剖面所选 5 件样品氯仿沥青“A”的质量分数变化于  $3.9 \times 10^{-6} \sim 10.7 \times 10^{-6}$ ,比一般岩石中的有机质要少得多.尽管如此,还是从中检测出了种类丰富的分子化石,包括正构烷烃、类异戊二稀烃、萜类和甾类化合物.具体分述如下.

2.1 正构烷烃

正构烷烃的碳数分布范围为 C<sub>16</sub>~C<sub>33</sub>,低碳数分子的主峰在 C<sub>18</sub>,高碳数分子的主峰为 C<sub>27</sub>, C<sub>29</sub>. 正构烷烃广泛存在于植物及其他生物体内,不同生物

来源的正构烷烃具有不同的分布特征.源于菌藻等低等生物的正构烷烃碳数主要集中在 C<sub>20</sub> 以前,多以 C<sub>17</sub> 或 C<sub>18</sub> 为主峰,且无明显的奇偶优势.源于高等植物的正构烷烃中高碳数占优势,多以 C<sub>27</sub>, C<sub>29</sub>, C<sub>31</sub> 为主峰,且在 C<sub>23</sub>~C<sub>33</sub> 范围内有明显的奇偶优势<sup>[2,3]</sup>.从样品的正构烷烃分布看,本区的有机质为混合来源,以 C<sub>18</sub> 为主峰的低碳数分子来源于水生低等生物,高碳数分子则来源于高等植物.但总体看来, C<sub>23</sub> 以前的低分子量正构烷烃占主要地位. 样品分子化石参数如表 1 所示.

剑门关剖面中侏罗世到早白垩世,正构烷烃的分布范围和主峰碳数基本相同.  $CPI$  值显示了正构烷烃有一定的奇偶优势,但样品中的该值远比一般高等植物体中的低,反映了检测出的分子化石确实经历了一定的成岩作用,但具有原生性.  $w(C_{21}^-)/w(C_{22}^+)$  常用来指示水生低等生物和陆生高等生物的比例.该比值自下而上先是降低,至晚侏罗世晚期剑门关组上部(JMGO—105)降至最低点,然后又缓慢上升,反映了水生生物和高等植物间含量的变化趋势,即水生生物含量先是降低然后又升高,这与当时沉积水体的大小变化有关.但是,在有机质的高演化阶段,反映有机母质的良好参数  $w(C_{21}^-)/w(C_{22}^+)$  也会失去其原有的成因意义.因为在高演化阶段,由于 C—C 键的断裂,高分子正构烷烃会裂解成低分子量的正构烷烃,结果使得这一比值升高<sup>[4]</sup>.由表 1 可知,该区有机质的成熟度已达到演化终点,故  $w(C_{21}^-)/w(C_{22}^+)$  比值可能掩盖了高等植物对有机质的贡献.

2.2 萜烷

从样品中检测出了较为丰富的长链三环萜和五环三萜烷化合物.长链三环萜碳数分布范围为 C<sub>19</sub>~C<sub>29</sub>,以 C<sub>23</sub> 为主峰, C<sub>22</sub> 和 C<sub>27</sub> 含量甚少, C<sub>26</sub>, C<sub>28</sub>, C<sub>29</sub> 各带两个光学异构体.同时,还检测到了 C<sub>24</sub> 的四环萜. Aquino Neto 等<sup>[5,6]</sup> 在对近 40 个原油样品的

分析后提出长链三环萜是藻类和菌类成因。 $C_{24}$  四环萜则是指示陆源高等植物来源的分子化石<sup>[7]</sup>。因此,从样品长链三环萜分布特点来看,有机质应主要来源于藻类、古细菌和部分高等植物。

五环三萜化合物主要是  $\alpha\beta$  型藿烷系列,碳数分布范围为  $C_{27} \sim C_{33}$ ,主峰碳为  $C_{30}$ 。同时还检测到了一定量的  $\gamma$  蜡烷。五环三萜普遍存在于生油岩和原油中,过去认为它们主要来自植物的类异戊二烯环状物,以后发现细菌、蓝藻中有带 4 个羟基官能团的藿烷结构化合物,从而提出藿烷类可以来自原核生物<sup>[8]</sup>。史继扬等<sup>[9]</sup>研究后认为,五环三萜化合物不但可以来源于原核生物,而且可以来源于高等植物;但是,二者对五环三萜的贡献并不相同。碳数  $< C_{31}$  的藿烷主要来源于高等植物,而碳数  $> C_{32}$  的藿烷主要来源于细菌和藻类等原核生物。如我国江汉盆地、泌阳盆地和东濮盆地部分生油母质具有较多的细菌和低等生物的输入,其藿烷有  $C_{35} > C_{34} > C_{33} > C_{32} > C_{31}$  的现象;而高等植物产生的藿烷具有  $C_{31} > C_{32} \sim C_{35}$  的特征,如贵州草海盆地的木本泥炭和褐煤中就有大量的  $C_{31}\alpha\beta-22R$  升藿烷;阿根廷 Rio Turbio 煤矿的第三系煤和炭质页岩中的藿烷也以  $C_{31}$  占绝对优势,除有微量的  $C_{32}$  升藿烷外,没有发现  $> C_{32}$  的其他升藿烷<sup>[10]</sup>。从藿烷的分布特征看,应主要来源于高等植物,少量来源于细菌和藻类。

样品中检测出的五环三萜主要为  $\alpha\beta$  型藿烷,没有发现  $\beta\beta$  型藿烷,也表明了有机质经历了成岩作用的改造,但具原生性,尤其是其成熟度参数(表 1)显示了有机质的演化已接近平衡终点值。

### 2.3 甾烷

样品中的甾类化合物含量很少。规则胆甾烷有  $C_{27}$ ,  $C_{28}$  和  $C_{29}$ ,以  $C_{29}$  为主。甾族化合物是由生物体中的甾醇经过成岩改造转化而成的。从目前的资料来看,水生浮游动植物(主要是藻类)以  $C_{27}$  为主,其次是  $C_{29}$  的甾醇。陆生植物主要含  $C_{29}$  甾醇,其次是  $C_{28}$  甾醇。甾族化合物的大量出现,一般认为与海相沉积有关,而甾族化合物稀少,是陆源物质大量输入的标志。因此本区生物分子化石应主要来源于陆源高等植物。

## 3 分子化石的古环境意义

分子化石同原地埋藏的大化石一样,其分布特征和种类组合可以反映沉积环境的原始面貌。与沉

积环境有关的分子化石参数列于表 1。高等植物和水生生物对不同种类的分子化石的贡献并不相同,而这些分子化石组合又进一步记录了生物生活时的沉积环境信息。

### 3.1 盐度和氧化—还原条件

伽马蜡烷最早从地质体中被检测出来是在 1966 年,此后,不断有人报道从陆相新生代沉积物和原油中检测到这一五环三萜化合物<sup>[11~14]</sup>,王锐良等<sup>[15]</sup>则对不同沉积环境的沉积物和原油中的伽马蜡烷进行了研究,发现不同沉积环境中的伽马蜡烷含量有很大变化,伽马蜡烷指数在不同沉积物中的分布规律为:盐湖相  $>$  海相  $>$  半咸水沼泽相  $>$  淡水湖相。该指数在淡水湖相的分布范围为  $0 \sim 0.22$ ,平均为 0.1。从样品伽马蜡烷指数的大小看,刚好落入淡水湖的分布范围,表明当时的沉积环境盐度较低,应为淡水环境,这与前面提到的岩相分析结果一致。

姥鲛烷和植烷都是植醇的降解产物,一般在强还原环境下以形成植烷为主,在弱氧化条件下以形成姥鲛烷为主,因此姥鲛烷和植烷的相对丰度比值  $w(Pr)/w(Ph)$  可以指示沉积环境的氧化还原状态。目前较为统一的认识为,该比值  $\ll 1$ ,表示强还原环境;近于 1 表示弱氧化和弱还原环境,  $\gg 1$  表示强氧化环境<sup>[16]</sup>。本区样品的  $w(Pr)/w(Ph)$  大都接近于 1 (表 1),且样品宏观上呈砖红色、紫红色,反映当时的环境应为弱氧化环境。

### 3.2 陆相标志

岩相资料表明研究区是处于一种陆相环境,这也在分子化石中得以体现。前已述及,陆生植物主要含  $C_{29}$  甾醇,其次是  $C_{28}$  甾醇,动物则主要含  $C_{27}$  胆甾醇;水生浮游动物(主要是藻类)以  $C_{27}$  为主,其次是  $C_{29}$  甾醇。甾醇经成岩作用后转变成甾烷,甾烷的分布同样反映了甾醇的分布特征。所分析的样品以  $C_{29}$  甾烷占绝对优势(表 1),显示了陆生高等植物占据主要地位,甾烷的相对质量分数所作的三角图解进一步显示,样品甾烷分子化石落入了大陆区域范围(图 1),说明有机质沉积时的环境为陆相环境。

尽管许多分子化石指标如甾烷指标、萜类指标等显示了有机质以高等植物源为主,水生低等生物相对较少,尽管正构烷烃也指示了高等植物的存在,但一个值得注意的现象是,正构烷烃的分布情况却反映了一种以水生低等生物源为主、陆生高等植物源较少的特点。与甾烷、萜烷这些高稳定性的分子化石相比,正构烷烃最易于受后期生物和地质作用诸

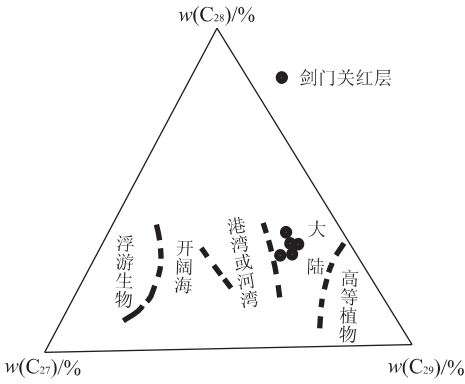


图 1 剑门关剖面样品  $C_{27}$ ,  $C_{28}$ ,  $C_{29}$  规则甾烷三角图  
Fig. 1 Distribution of regular steranes

如细菌降解作用、氧化作用、水洗、热降解等的改造。因此与正构烷烃相比,甾烷、萜烷更能真实反映原有生物的面貌,这反映了在利用分子化石进行有机质来源及古环境分析时,要综合各个指标,并结合其他方面的研究成果,才能彼此补充,使研究结果更贴近实际的地质过程。

3.3 沉积环境的演变

由样品正构烷烃总量、长链三环萜总量、藿烷总量及甾烷总量变化图(图 2)可知,晚侏罗世晚期(莲花口组底部 JMGO-70)是一个转折点,分子化石的这些变化一定是由某些环境因子的变化所引起的。 $w(C_{29})/w(C_{31})$  在此时达到了最大,表明木本植物的生长环境得到改善及所占领域面积的扩大;伽马蜡烷指数在此时最大,表明此时水体的盐度也最大; $w(Pr)/w(Ph)$ ,  $w(Ph)/w(nC_{18})$  在此时也都是转折点。 $w(Pr)/w(Ph)$  在此时最大,表明环境的氧化性最强; $w(Ph)/w(nC_{18})$  从该点开始大于 1。所有这些指标均表明该区自晚侏罗世晚期沉积环境发生了较明显的变化。 $w(C_{21}^-)/w(C_{22}^+)$  及  $w(C_{29} + C_{31})/w(C_{18})$  的变化均在莲花口组上部降至最低点,表明晚侏罗世末期,水生生物的数量降至最少,而高等植物的数量却增大到最高点,反映了当时沉积水体最小,陆地面积最大。 $w(Pr)/w(nC_{17})$  自晚侏罗世末期(莲花口组上部 JMGO-105)后开始大于 1。Lijmbach<sup>[17]</sup> 在对 50 个原油的研究中发现,形成于开放水体中的原油,其  $w(Pr)/w(nC_{17})$  均小于 0.5;而来自内陆泥炭沼泽环境的原油该比值都大于 1;0.5~1.0 的中间比值表示水体变换于沼泽和开放水域之间。样品的  $w(Pr)/w(nC_{17})$  变化表明自中侏罗世至晚侏罗世早期,该区的沉积水体均处于开放水体与泥炭沼泽环境的变换之中,而晚侏罗世晚期至早白垩世,该区则

处于一种相对较封闭的沉积水体中。

总体来讲,沉积环境的改变以晚侏罗世早、晚期之间的变化最显著,而中、晚侏罗世之间沉积环境则是渐变的,晚侏罗世与早白垩世之间有变化,但不及晚侏罗世早、晚期之间的变化大。

从沉积相上分析,中侏罗世沙溪庙组顶部与晚侏罗世早期遂宁组岩性特征十分接近,为典型的浅湖相或滨湖相沉积;而晚侏罗世晚期莲花口组和早白垩世剑门关组的沉积特征较相似,为一套河流相和冲积扇相砾岩、砂砾岩夹砖红色泥岩及粉砂岩。反映了研究区在晚侏罗世的早、晚期之间沉积环境发生了较大的变化。而中、晚侏罗世之间及晚侏罗世和早白垩世之间变化较小。这些结论与分子化石的记录并不矛盾。

4 分子化石的古植被与古气候意义

分子化石的沉积环境分析显示了所研究的地区为陆相,因此分子化石应该可以进一步反映出古植被及与之相伴的古气候信息。已有的研究表明<sup>[18~20]</sup>,正构烷烃  $C_{27}$ ,  $C_{29}$  主峰主要与木本植物有关,而  $C_{31}$  主峰主要来自草本植物,因此正构烷烃  $w(C_{29})/w(C_{31})$  的变化可以反映出这两类植物的相对变化情况。总的来说,所分析的样品高碳数正构烷烃均以  $C_{27}$ ,  $C_{29}$  为主峰(表 1),  $w(C_{29}) > w(C_{31})$  (图 2),反映了研究区从中侏罗世到早白垩世总体上以木本植物占绝对优势。木本植物的大量繁盛(森林景观)主要与温暖湿润的气候环境有关,而草本植物的大规模(草原景观)出现往往与寒冷干燥气候有关。例如,在我国黄土高原的黄土—古土壤系列中,黄土层形成时气候干冷,主要发育了草原,而形成于温暖湿润环境的古土壤层,则发育了森林景观或森林草原<sup>[21]</sup>。因此正构烷烃  $C_{27}$ ,  $C_{29}$  主峰也进一步说明了研究区在中侏罗世到早白垩世总体上是一种温暖湿润的古气候环境。这与红盆发育的气候条件是一致的。在这种总体格局下,晚侏罗世早期(JMGO-36)突然出现相对较多的草本植物(但还没有超过木本植物),而在晚侏罗世晚期(JMGO-70)草本植物又缓慢减少,晚侏罗世末期至早白垩世,草本植物基本维持在一个水平。表明中、晚侏罗世是本研究区古植被和古气候相对变化最大的分界线。相反,从晚侏罗世晚期到早白垩世,本研究区古植被和古气候的变化则是渐变的。分子化石参数反映出晚侏罗世早、晚

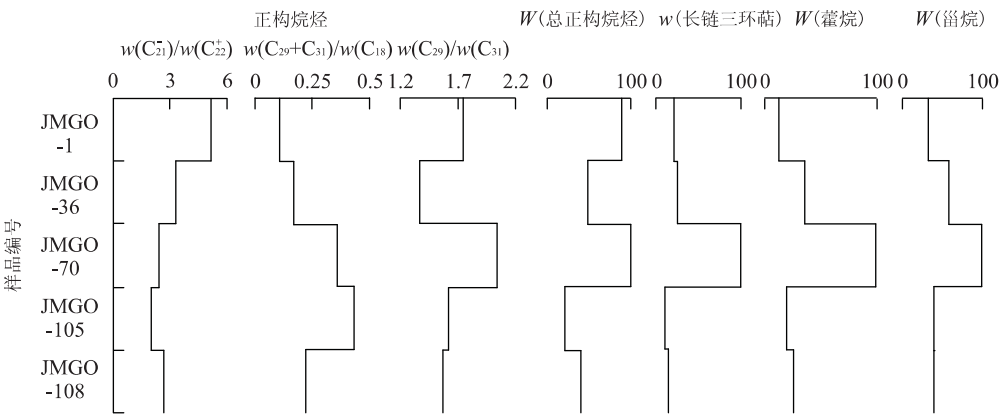


图 2 剑门关红色盆地分子化石指标分布

Fig. 2 Distributions of molecular fossil parameters from red strata of Jianmenguan, Sichuan basin

期之间为沉积环境变化最显著的时期;而气候变化最显著处则是在中、晚侏罗世之间,揭示了环境的变化滞后于气候变化的现象。

5 结论

$\gamma$  蜡烷指数变化于 0.08~0.14, $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$  接近于 1,以及占绝对优势的  $\text{C}_{29}$  甾烷的存在等分子化石指标反映了研究区在中侏罗世至早白垩世是一种弱氧化的陆相淡水沉积环境。正构烷烃高碳数主峰以来自木本植物的  $\text{C}_{27}$ ,  $\text{C}_{29}$  为主峰,没有出现与草本植物有关的  $\text{C}_{31}$  主峰,反映了研究区是一种以木本植物为主的古植被景观和温暖湿润的古气候条件。 $w(\text{C}_{29})/w(\text{C}_{31})$  参数的变化还表明古气候变化最显著点是中、晚侏罗世之间;而烷烃、长链三环萜、藿烷、及甾烷总量的变化和  $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$ ,  $w(\text{Ph})/w(\text{C}_{18})$ ,  $\gamma$  蜡烷指数等则指示了沉积环境在晚侏罗世的早、晚期之间变化最大,说明沉积环境的变化滞后于古气候的变化。体现了红色盆地中的分子化石记录沉积古环境和古气候信息的极大潜力。

参考文献:

[1] 李任伟. 分子地层学[A]. 见:刘全根,孙成权,张志强,等编. 地球科学新学科新概念集成[C]. 兰州:地震出版社, 1995. 267—269.

[2] Philip R P. 化石燃料生物标志物——应用与图谱[M]. 傅家谟,盛国英,译. 北京:科学出版社,1987. 1—268.

[3] Johns R B. 沉积记录中的生物标识物[M]. 王铁冠,黄第藩,徐丽娜,等译. 北京:科学出版社,1991. 1—69.

[4] 包建平,王铁冠,王金渝,等. 下扬子地区海相中、古生界有机地球化学[M]. 重庆:重庆大学出版社,1996. 85—

99.

[5] Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum [A]. In: Bjoroy M, Maxwell J R, eds. Adv In Org Geochemistry 1981 [C]. Oxford: Pergamon, 1983. 659—667.

[6] Aquino Neto F R, Restle A, Connan J, et al. Novel tricyclic terpanes ( $\text{C}_{19}$ ,  $\text{C}_{20}$ ) in sediments and petroleum [J]. Tet Letts, 1982, 23: 2027—2030.

[7] 顾永达,林明辉,盛国英,等. 浑源煤和乐平煤抽出物的化学组成及其地球化学特征[J]. 沉积学报,1991, 9(增刊): 34—42.

[8] Dorsselaer Van A, Ersminger A, Spyckerelle C, et al. Degraded and extended hopane derivatives ( $\text{C}_{27}$ — $\text{C}_{35}$ ) as ubiquitous geochemical markers [J]. Terabed on Letters, 1974, 1349—1352.

[9] 史继扬,向明菊,洪紫青,等. 五环三萜烷的物源和演化[J]. 沉积学报,1991, 9(增刊): 26—33.

[10] Hector J V, Wilhel P, Monika W. Organic geochemistry and petrography of Tertiary coals and carbonaceous shales from Argentina [J]. Org Geochem, 1988, 13(4—6):1011—1021.

[11] Seifert W K, Moldowan J M. Application of steranes terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1978, 42: 77—95.

[12] Makenzie A S, Patience L, Maxwell J R, et al. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris basin, France—I: changes in the configuration of acyclic alkanes, strance and riterpanes [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1980, 44:1709—1721.

[13] 尚惠云,姜乃煌. 陆相沉积物及生油岩中的特征生物标志物——伽马蜡烷[J]. 沉积学报,1984, 2(4): 88—95.

- [14] 史继扬. 陆相沉积物和原油中的胡萝卜素和伽马蜡烷 [A]. 见: 中国科学院地球化学研究所有机地球化学研究室. 有机地球化学论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 1986. 59—67.
- [15] 王锐良, 尚惠云, 傅家谟, 等. 不同沉积环境中的伽马蜡烷的分布特征及其成因探讨 [A]. 中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放研究实验室研究年报 [C]. 北京: 科学出版社, 1988. 100—107.
- [16] Didyk B M, Simoneit B R T, Brassel S C, et al. Organic geochemical indicator of palaeoenvironmental conditions of sedimentation [J]. *Nature*, 1978, 272: 216—222.
- [17] Lijmbach G W M. On the origin of petroleum [A]. In: *Proc 9th World Pet Congr* [C]. [s. l.]: [s. n.], 1975. 357—369.
- [18] Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments II [J]. *Org Geochem*, 1987, 11: 513—527.
- [19] Cranwell P A. Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change [J]. *Freshwater Biol*, 1973, 3: 259—265.
- [20] Wakeham S G. A comparative survey of petroleum hydrocarbon in lake sediments [J]. *Mar Poll Bull*, 1976, 7: 206—211.
- [21] 陈发虎, 张维信. 甘肃地区的黄土地层学与第四纪冰川问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1993. 47—85.

## MOLECULAR FOSSILS AS INDICATORS FOR PALEOENVIRONMENT AND PALEO-CLIMATE FROM RED CLASTIC ROCKS OF MIDDLE JURASSIC—EARLY CRETACEOUS IN JIANMENGUAN, SICHUAN BASIN OF CHINA

Wang Hongmei, Liu Yuyan, Wang Zhiyuan

(*Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** Series of molecular fossils, including *n*-alkanes, extended tricyclic terpanes, hopanes and regular steranes, have been detected from the red clastic strata of Middle Jurassic—Early Cretaceous in Jianmenguan profile, Sichuan basin in China. These molecular fossils are supposed to be derived from higher plants and aquatic organisms. Their parameters such as low gammaceran abundance, relative higher  $w(\text{Pr})/w(\text{Ph})$  and the dominance of  $\text{C}_{27}$ -ethylcholestane suggest the occurrence of a limnetic, non-reductive continental environment in the study area during Middle Jurassic and Early Cretaceous.  $\text{C}_{27}$  and  $\text{C}_{29}$  *n*-alkanes, believed to be related to woody plants, constitute the main high-carbon number *n*-alkanes in the studied samples, while  $\text{C}_{31}$  *n*-alkane, supposed to be the main *n*-alkane in herbal plants, does not prevail over  $\text{C}_{27}$  and/or  $\text{C}_{29}$  *n*-alkanes in the samples. This suggests the flourishing of woody plants other than grassy plants at that geological time. This kind of vegetation further indicates the existence of a warm and humid climate from Middle Jurassic—Early Cretaceous, a kind of climate favorable for the development of the red basin. This investigation of the red sedimentary rocks shows that the molecular fossils have a high potential in recovering the paleoenvironment, paleo-vegetation and palaeoclimate.

**Key words:** molecular fossils; red strata; paleoenvironment; paleo-vegetation; paleo-climate; Jianmenguan.