

川西北地区晚三叠世须家河组初始成煤期古气候重建与成煤机制

王琴¹, 金鑫^{1,2}, 陈俞超¹, 张云望¹, 邹灏^{2,3}, 李滨兵¹, 杜怡星^{1,2},
芦刚⁴, 时志强^{1,2}

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

3. 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都 610059

4. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

摘要 【目的】早、中三叠世时期存在很长一段时间的煤沉积空缺, 四川盆地煤沉积在晚三叠世须家河组沉积早期(须一段)重新出现, 目前对须一段初始成煤期的古气候与成煤机制还缺乏清晰的认识。【方法】基于野外露头观察、岩石学镜下分析以及主微量元素分析对川西北地区须家河组一段含煤地层(工农镇剖面和王家梁剖面)的古气候与成煤机制开展研究。【结果】工农镇剖面须家河组一段的沉积相以三角洲前缘亚相为主, 而王家梁剖面须家河组一段的沉积相以三角洲平原亚相为主。此外, 须一段初始成煤期的古气候指数(Sr/Cu和C值)和风化指数(CIA_{corr}和Rb/Sr)呈现同步变化。【结论】川西北地区须家河组一段初始成煤期的古气候特征表现为炎热潮湿与温暖半干旱—半潮湿交替出现。煤层在潮湿气候条件下形成, 而这种湿润的古气候可能与超级季风活动有关。进一步研究发现, 煤的沉积还需要适宜的保存环境, 如在高位体系域的沼泽中, 煤层可以良好发育和保存。

关键词 晚三叠世; 须家河组; 成煤期; 古气候; 四川盆地

第一作者简介 王琴, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 沉积学, E-mail: wq981205@163.com

通信作者 金鑫, 男, 教授, E-mail: jinxin2012cdut@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

二叠纪—三叠纪之交(Permian-Triassic Boundary)的生物大灭绝事件是地质历史时期最严重的生物危机, 其导致了全球范围内大规模的动、植物消失^[1-2]。研究表明, 曾在二叠纪广泛分布的厚层煤在大灭绝事件之后的早三叠世突然消失, 造成了三叠纪内很长一段时间的煤炭空缺, Veevers *et al.*^[3]将这段时期称为“煤隙(coal gap)”。到了中三叠世时期, 全球仅有少部分地区存在薄层的煤线^[4], 直至晚三叠世煤层才重新开始大规模发育, 并逐渐恢复到与二叠纪相当水平^[4-5]。

早—中三叠世近 7 Ma 的陆地“煤隙”反映了早三叠世陆地植物埋藏环境消失，而导致“煤隙”形成的原因，目前存在多种推测。如与中—低纬度森林生态系统消失，陆地植被生产力降低有关^[5-7]，或与早三叠世异常动荡的气候环境抑制了成煤植物生长发育有关^[8-9]。此外，还有人提出在二叠纪—三叠纪界线附近季节性干旱气候增强，诱发广泛的野火事件，进一步导致了如大羽羊齿、鳞木等低地沼泽类型成煤植物的消失，致使煤沉积的空缺^[10-11]。

四川盆地位于上扬子板块的西北部，沉积地层完整、构造演化清晰，是中国重要的含煤盆地之一^[12-13]。在二叠纪龙潭组与吴家坪组沉积时期，华夏植物群分布十分广泛，煤层在川中—川南地区大面积分布^[14-15]，到长长期开始衰退。在 P-T 事件之后，低地成煤的孢子植物全部消失，到了早三叠世飞仙关组沉积时期，植物种属才开始增加，但地层中植物化石稀少，且缺乏煤层发育的相关记录，指示陆地植被仍未完全复苏^[16]。来自碳酸盐岩碳氧同位素^[17]、石盐岩中的原生包裹体^[18]、牙形石氧同位素^[19]以及碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[20]等数据，表明四川盆地在早、中三叠世时期，古气候炎热、沉积环境动荡，不适宜煤层的发育和保存。直到晚三叠世须家河组一段沉积时期，煤层才重新出现，但该时期的煤层不稳定，煤层薄且含硫高，无可采性^[21]。在须家河组三段沉积时期，苏铁类及蕨类开始大量发育，使得较厚的煤层出现（0.30~1.40 m），但可采煤层依旧较少。须家河组五段时期，裸子植物开始大量出现，银杏类和松柏类等植物生长繁盛，使得该时期发育的煤层厚度达 0.50~2.50 m^[21-22]，且以煤质较好的烟煤为主，具有较高的开采价值。到了侏罗纪时期，四川盆地沉积了厚达千米级且具频繁韵律结构的含煤地层^[23]。

前人对四川盆地晚三叠世须家河组沉积时期的古气候研究较多^[13,24-26]，但多数研究成果集中在须家河组沉积中—晚期，而对于须家河组一段初始成煤期的古气候与成煤机制的研究较少。此外，气候变化是影响成煤作用的重要因素^[27-28]，对成煤期的古气候重建能够为聚煤作用、成煤模式及古地理重建等提供有用的信息^[29]。本文以川西北广元地区须家河一段含煤地层为研究对象，对研究区工农镇剖面和王家梁剖面进行了系统测绘与采样，利用岩石学和元素地球化学分析，恢复了川西北地区晚三叠世须家河组初始成煤期的沉积环境与古气候演化序列，并进一步探讨了该时期的古气候驱动因素及其对煤形成的贡献，从而为其他地质时期的成煤作用研究提供借鉴。

1 地质背景

1.1 区域地质背景

四川盆地在晚三叠世处于特提斯东岸^[30]，四川盆地位于我国的西南部（28°~32° N，103°~108° E），北部为米仓山隆起和大巴山褶皱带，西北方向为龙门山褶皱带，东部和南部为滇黔川鄂台褶皱带（图 1a）^[31-32]。四川盆地是由深断裂活动形成的菱形构造沉积盆地^[33-34]。在构造上，四川盆地是上扬子稳定台地的一级构造单元。在中、晚三叠世之交，受到印支运动的影响，四川盆地地势变为东高西低，海水向西退出，自此再无海相沉积^[35-36]。

四川盆地上三叠统包括马鞍塘组、小塘子组和须家河组^[37]。须家河组的沉积时代为晚三叠世诺利期至瑞替期，主要以砂岩和泥岩互层，局部夹不等厚煤层为典型的岩性特征^[38]，须家河组与下伏中三叠统与上覆下侏罗统均为不整合接触^[39-40]。本文使用四川盆地陆相中生代地层古生物编写组^[41]的地层划分方案，自下而上将须家河组分为须一段至须六段。其中，须一段以薄层砂泥互层为主，须二段以厚层河道砂岩为主，须三段以泥页岩为主，须四段以砾岩、含砾砂岩为主，须五段为砂泥不等厚互层，须六段以粗粒砂岩为主，须家河组整体呈现泥岩与砂岩间互的“三明治”式结构^[13,41-42]。须家河组除须一段发育海陆过渡相沉积外，其余均为陆相沉积，沉积相主要为陆相冲积扇、河流、扇三角洲、辫状河三角洲及湖泊等^[43-45]。前人根据岩石学分析，认为研究区须一段为三角洲相沉积^[44-48]。

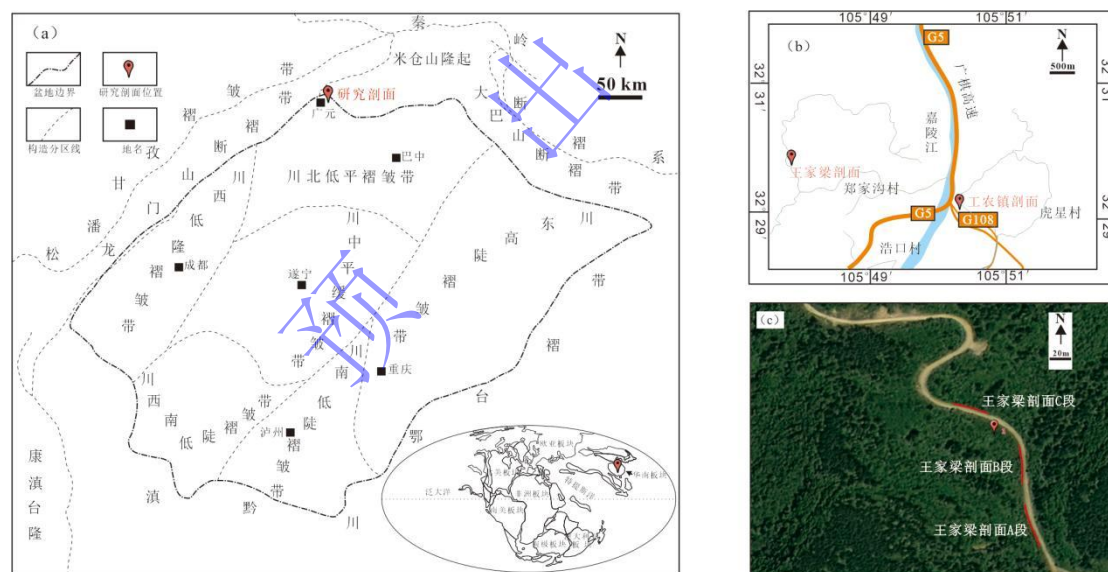


图 1 四川盆地构造简图、诺利期全球古地理图及采样剖面具体位置

(a) 诺利期古地理图据文献^[30]修改；四川盆地构造简图据文献^[31-32]修改；图中定位点为研究剖面位置；(b) 王家梁剖面 and 工农镇剖面的具体地理位置；(c) 王家梁剖面 A、B、C 三段具体沿路分布情况

Fig.1 (a) Schematic diagram of the tectonics of the Sichuan Basin^[30]; (b) global paleogeographic map of the Norian period^[31-32]; (c) sampling profile locations

1.2 研究剖面

本次研究采样剖面有 2 条（工农镇剖面和王家梁剖面）。工农镇剖面位于广元市利州区嘉陵江的东侧，在工农小学旁边的公路一侧（图 1b）；王家梁剖面位于嘉陵江西侧郑家沟

村的西北方向 5.70 km 处 (图 1b, c)。

1.2.1 王家梁剖面 (WJL)

王家梁剖面 A 段 (WJLA) 底部为巨厚层青灰色的中细砂岩, 厚度大于 20 m (图 2a), 该套地层并未实际测量, 仅野外观察研究。0~2.80 m 为粉砂岩, 在 1.60 m 处为中细砂岩, 局部见植物化石, 见板状交错层理 (图 2b)。2.80~9.40 m 为粉砂质泥岩夹泥质粉砂岩和泥岩, 其中 2.80~5.90 m 发育槽状交错层理。9.40~15.10 m 为灰色泥岩夹薄层粉砂岩, 局部见菱铁矿。15.10~16.40 m 为泥质粉砂岩夹泥岩, 局部见菱铁矿结核, 小型槽状交错层理与板状交错层理发育 (图 2c)。16.40~18.60 m 为粉砂岩。18.60~20.45 m 为泥岩夹粉砂质泥岩和煤。20.45~25.95 m 被覆盖。25.95~26.20 m 为黄色泥岩, 26.20~26.80 m 为煤。WJLA 段之上植被覆盖严重, 地层缺失达约 40 m (图 2d)。

王家梁剖面 B 段 (WJLB) 开始于距 WJLA 段顶部约 40 m 处, WJLB 段 0~2.20 m 处为泥岩夹砂岩沉积, 其中 0.40 m~0.60 m 为泥岩夹薄层煤线 (图 2e), 在 1.10 m 处见白色细粉砂岩夹煤线, 泥质成分含量高。2.20 m~10.80 m 为薄层粉砂岩夹少量泥质粉砂岩和粉砂质泥岩, 其中 2.30~2.50 m 发育板状交错层理, 在 8.30 m 处见大量植物化石。10.80~15.40 m 为粉砂质泥岩夹泥岩和粉砂岩, 在 10.80~11.20 m 处发育槽状交错层理, 11.20~13.20 m 为土黄色细砂岩夹薄层粉砂泥质岩, 13.20~15.20 m 以薄层的土黄色粉砂质泥岩为主, 局部可见透镜状的菱铁矿。15.20~15.40 m 为土黄色泥岩, 顶部 15.40~16.20 m 为深灰色泥岩与煤层混杂。

王家梁剖面 C 段 (WJLC) 开始于距 WJLB 段顶部约 70 m 处。剖面 0~0.40 m 为深灰色泥岩, 见大量植物化石, 0.40~0.95 m 为土黄色泥岩。0.95~1.85 m 为浅灰色泥岩, 在 1.05 m 处见薄层煤线, 厚度约 1 cm 左右。在 1.85~4.45 m 处见深黑色泥岩夹大量煤线, 其中在 1.85~2.05 m 处有植物化石。4~4.26 m 为薄层煤沉积。4.45~8.70 m 为浅灰色泥岩夹浅黄色泥岩, 局部见菱铁矿 (图 2f), 菱铁矿结核内部见溶蚀孔, 溶蚀孔充填大量泥砾 (图 2g)。8.70~10.50 m 为粉砂岩。WJLC 段上部 10.50~12.90 m 主要发育煤沉积 (图 2h), 夹土黄色泥岩与薄层氧化色黏土层。WJLC 段顶部 13.40~13.70 m 处为土黄色泥岩, 局部见透镜状砂体, 其中顶部见煤层沉积, 厚达 0.70 m。剖面顶部见厚层砂岩 (未测量), 按照四川盆地陆相中生代地层古生物编写组^[41]对须家河组的描述, 该岩性为须家河组二段的典型岩性特征 (图 3a)。

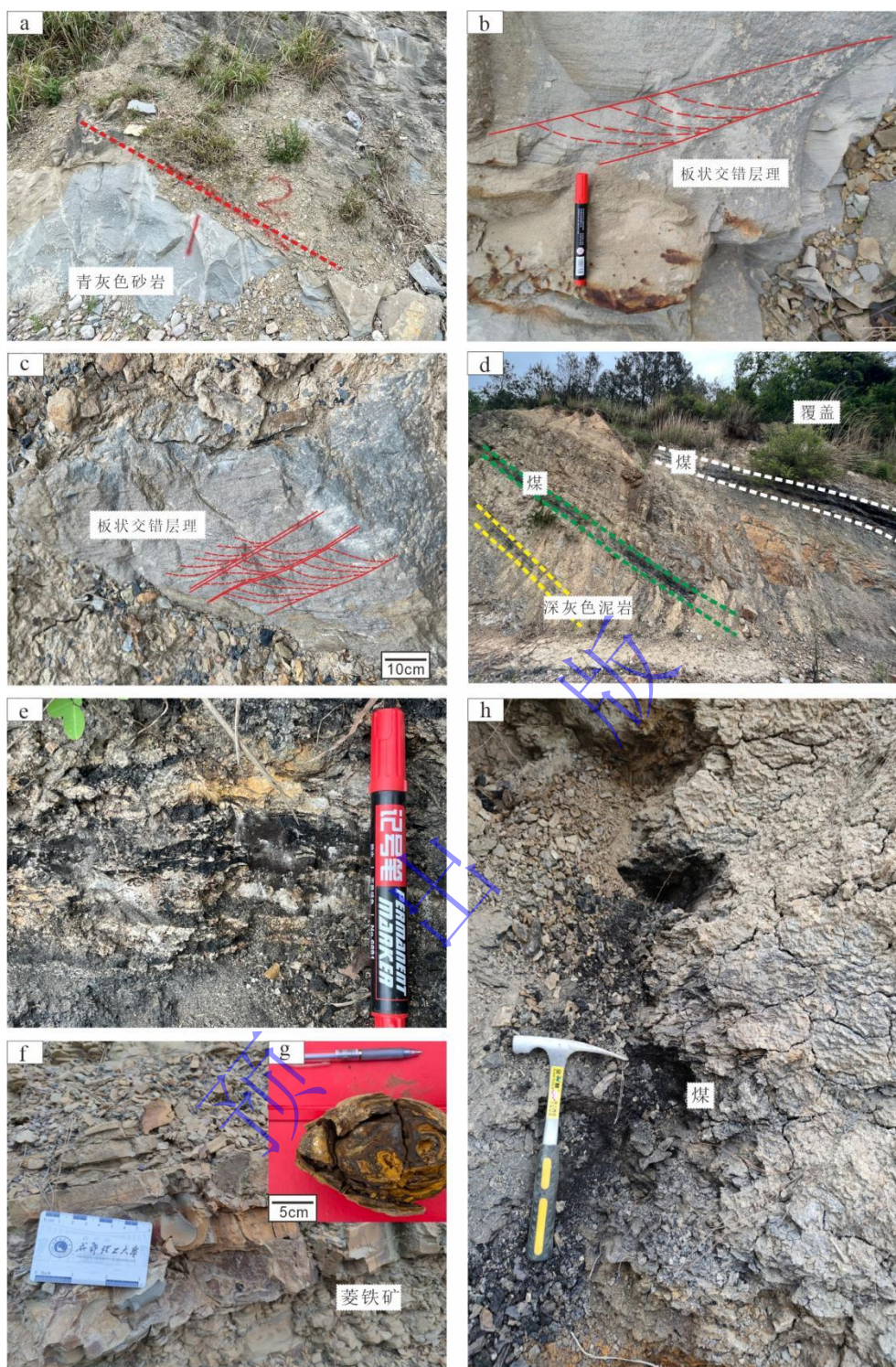


图2 王家梁剖面须一段露头特征

(a) 王家梁剖面 A 段底部的大套砂岩 (大于 20 m); (b) 王家梁剖面 A 段 1.60 m 处砂岩发育的板状交错层理; (c) 王家梁剖面 A 段 15.20~15.00 m 处发育小型板状交错层理; (d) 王家梁剖面 A 段 13.78~14.24 m 为深灰色泥岩 (黄色虚线内), 15.68~16.08 m 为煤层 (绿色虚线内), 25.70~26.30 m 为煤层 (白色虚线内), 之上约 40 m 的覆盖; (e) 王家梁剖面 B 段 0.40~0.60 m 处的深灰色泥岩夹薄层煤线; (f) 王家梁剖面 C 段 6.90~7.30 m 处见菱铁矿沉积特征; (g) 为菱铁矿结核细节图; (h) 王家梁剖面 C 段 10.80~11.20 m 处煤沉积特征

Fig.2 Photographs of outcrops of the first member of the Xujiahe Formation in the Wangjialiang section

王家梁剖面的 A、B、C 三段沿路分布，整体露头较为连续。根据地势走向，三段地层上下接触关系清晰（图 1c）。因此将王家梁剖面 A、B、C 段合并一起研究（图 3a）。

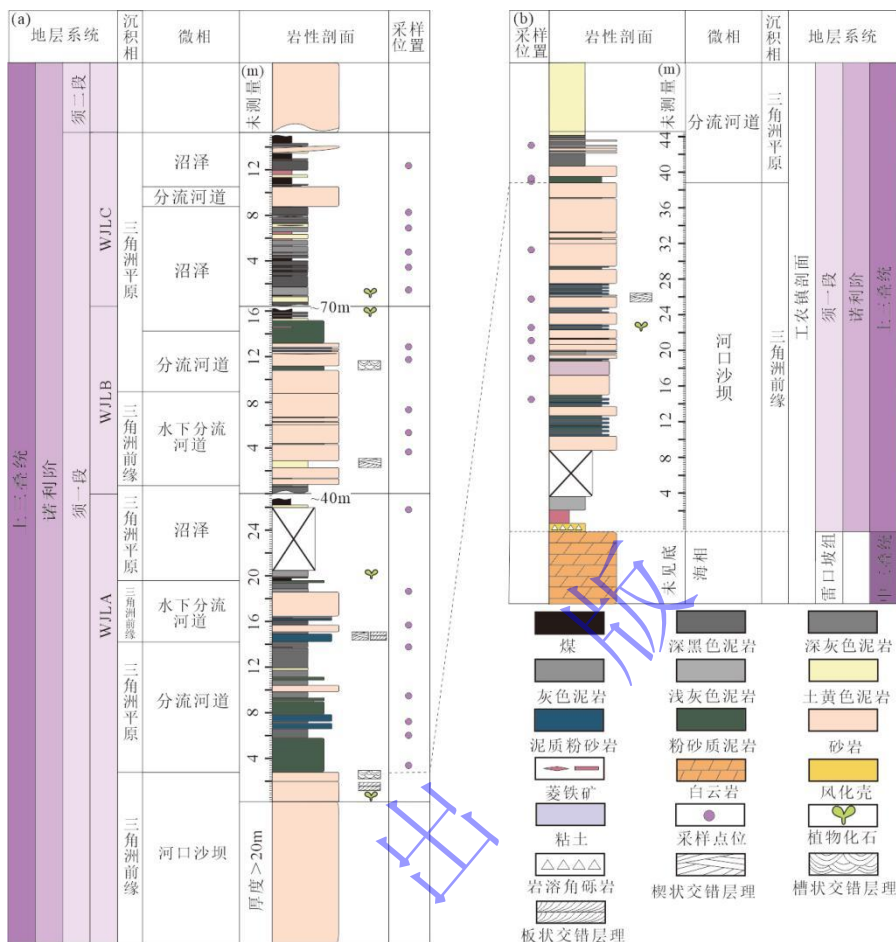


图 3 王家梁剖面和工农镇剖面须一段岩性柱子及采样点

(a) 王家梁剖面; (b) 工农镇剖面

Fig.3 Lithology columns and sampling positions of the first member of the Xujiache Formation in the Wangjialiang and Gongnongzhen sections

1.2.2 工农镇剖面

工农镇剖面主要由砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成，自下至上依次出露须家河组一段至四段^[34]，剖面底部地层不整合于雷口坡组之上（图 4a）。Li *et al.*^[49]对该剖面须家河组进行了磁性地层学和旋回地层学研究，将诺利—瑞替阶地层界线厘定在须二段下部（剖面约 135 m 处）。据此，可以推测剖面须一段的沉积时代应为诺利期。本文只实测了须一段 0~44.20 m 段地层，剖面自下至上描述如下。

底部 0~3.80 m 为灰白色与土黄色杂色泥岩夹厚层菱铁矿，其中 0~0.80 m 为风化壳，见岩溶角砾（图 4b）。3.80~8.80 m 被植物覆盖。8.80~10.30 m 为粉砂质泥岩。10.30~15.00 m 为粉砂质泥岩与泥质粉砂岩互层，夹两套薄层砂岩。15.00~22.30 m 发育粉砂岩，局部夹薄层土黄色泥岩、泥质粉砂岩与粉砂泥质岩。22.30~26.00 m 为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩以及

砂岩互层（图 4c）。26.00~29.10 m 为粉砂岩夹极薄层泥质粉砂岩，发育中小型的楔状交错层理。29.10~33.80 m 发育砂岩。38.80~43.80 m 为泥岩，中间夹薄层砂岩（图 4d）。42.00~43.90 m 为杂色泥岩夹薄层砂岩。43.90~44.40 m 为深灰色和土黄色泥岩。之上为厚度达几十米的土黄色泥岩，未测量（图 4e）。

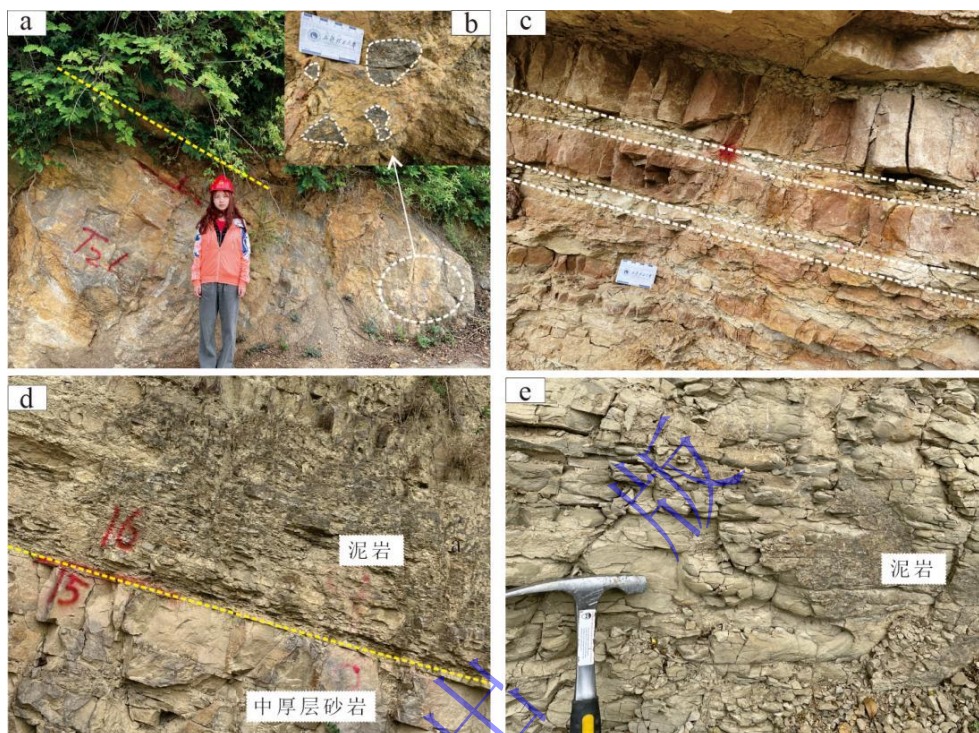


图 4 工农镇剖面须一段露头特征

(a) 工农镇剖面底部，黄色虚线下方为中三叠统雷口坡组，之上为上三叠统须家河组，为不整合接触；(b) 图 (a) 右下角的放大细节图，为工农镇剖面 0~0.80 m 的风化壳，见岩溶角砾（白色虚线内）；(c) 工农镇剖面 24.60~26.00 m 处，中层砂岩夹薄层粉砂质泥岩（白色虚线内为粉砂泥质岩）；(d) 工农镇剖面，36.40~38.80 m 为中厚层粉砂岩夹薄层粉砂泥质岩和泥质粉砂岩（黄色虚线下部），38.80~40.70 m 为灰色泥岩夹粉砂岩（黄色虚线上部）；(e) 工农镇剖面 44.42 m 以上出露的大套泥岩，未测量。

Fig.4 Photographs of outcrop of the first member of the Xujiache Formation in the Gongnongzhen section

工农镇剖面与王家梁剖面（A、B、C 段）仅相距 5.70 km，属于同一研究区。王家梁剖面 A 段底部为厚度大于 20 m 的砂岩和剖面 2.80 m 之上出现的粉砂质泥岩和泥岩，该岩性组合可以与工农镇剖面 0~38.80 m 处的砂岩和上覆大套泥岩对比，两者应为等时异相沉积。综上所述，将工农镇剖面 0~38.80 m 置于王家梁剖面 A 段 2.80 m 处之下形成综合剖面（图 5），以此分析四川盆地晚三叠世须一段初始成煤期的古气候。

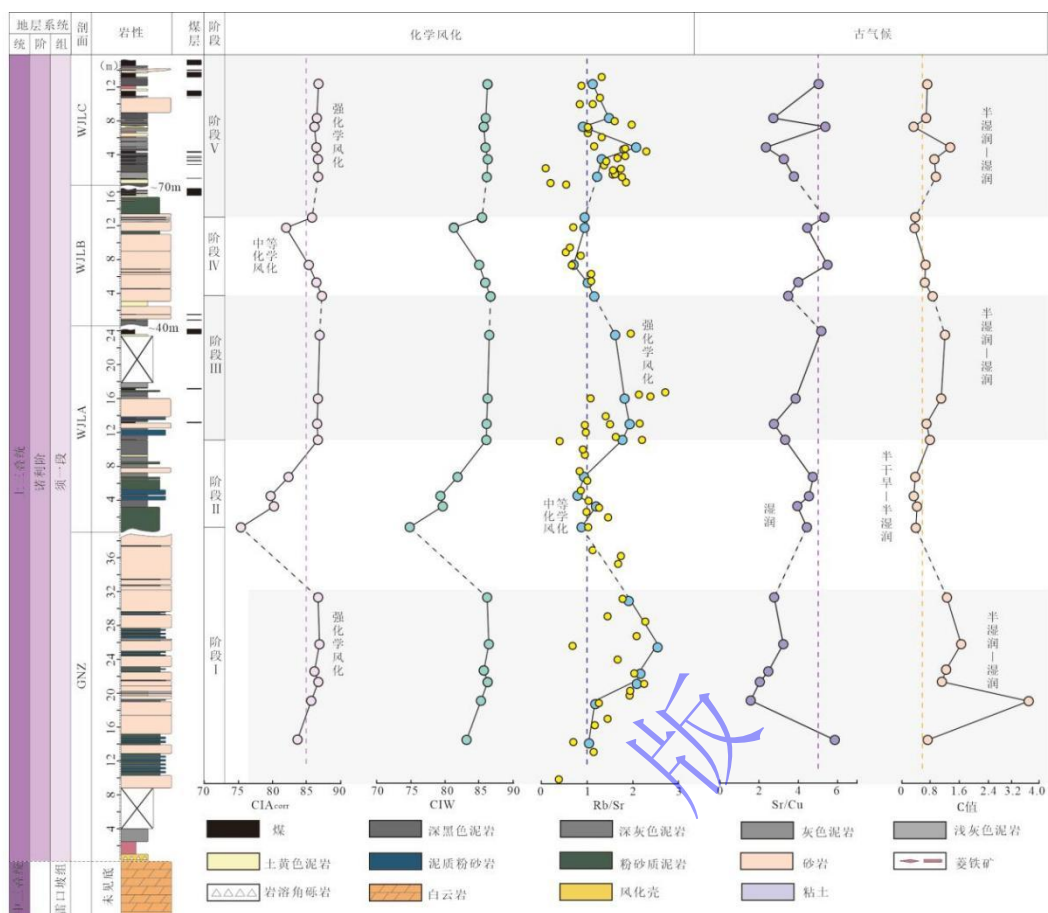


图5 川西北地区须一段化学风化指标和古气候指标在地层垂向上的变化

根据前文探讨,工农镇剖面 38.80 m 以上地层与王家梁剖面 2.80 m 之上为等时沉积,因此工农镇 38.80 m 之上所采的样品(样品号为 GNZ-20、GNZ-21、GNZ-28)与王家梁剖面 A 段底部(0~2.80 m)样品存在沉积时代重复,故而在综合剖面图并未显示。黄色点为手持 XRF 所测 Rb/Sr 数据投图。

Fig.5 Changes in chemical weathering and paleoclimatic proxies in the stratigraphic order of the first member of the Xujiahe Formation

2 样品采集与分析方法

对工农镇剖面和王家梁剖面的泥岩和砂岩进行采样,其中 6 件砂岩样品用于镜下观察和粒度分析,28 件泥岩样品进行 ICP-OES 主量元素测试和 ICP-MS 微量元素测试,92 件细粒碎屑岩进行手持 XRF 分析。

2.1 岩石学分析

岩石薄片的镜下观察、拍照和粒度分析均在成都理工大学沉积地质研究院完成,镜下观察、拍照显微镜型号为 BM2100 POL; 粒度分析显微镜型号为尼康 LV100/DS-FI1-U2。

2.2 主微量元素分析

2.2.1 ICP-OES 和 ICP-MS 分析

样品制备在成都理工大学完成。将样品用锉刀处理，去除表面灰尘和风化部分，再用去离子水冲洗，之后将样品放入 60 °C 烤箱中烘干，最后用钨钢材质碎样机磨至粒径 200 目以下。

28 件样品的主微量元素采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES; 仪器型号, 美国 PE 8300V) 和电感耦合等离子质谱 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS; 仪器型号, 美国 Agilent Technologies 7700 Series) 测试分析, 详细的实验方法参考国家标准 GB/T 3286(1~9)—2014。具体步骤如下: 首先称取 0.1 g 试样, 放入 50 mL 聚四氟乙烯烧杯中, 用少量水使样品湿润, 再加入 10 mL 硝酸, 10 mL 氢氟酸, 2 mL 高氯酸, 于电热板上加热 10 min 后关闭电源, 放置隔夜过后, 加热至高氯酸烟冒尽, 趁热加入 8 mL 王水, 再次加热至溶液体积只剩 2~3 mL, 用去离子水冲洗杯壁, 微热 5~10 min 至溶液清亮, 冷却后将溶液转入 10 mL 的聚乙烯试管中, 用去离子水稀释, 摇匀, 静置澄清后移取清液 1 mL 于聚乙烯试管中, 用硝酸 (3+97) 稀释至 10 mL, 摇匀, 待测。最后将处理好的试样放入仪器中进行测试。实验误差都在限定值内, 主量元素误差不超过 3%, 微量元素误差不超过 5%。以上分析均在成都谱谱检测技术有限公司完成。

2.2.2 手持 XRF 分析

手持 XRF (奥林巴斯 Vanta Cseries 手持式 X 射线荧光分析仪) 进行测试的操作如下: 首先打开电源开关, 再打开软件程序, 保证样品表面干燥、洁净和光滑, 将仪器对准检测样品的新鲜面, 按下测量键, 等待 55 秒直至显示测试结果。总共测试 92 件样品, 其中有效点为 87 个。

3 测试结果与分析

3.1 岩石学特性与粒度分析

WJLA 段砂岩粒度偏细, 泥岩所占比例较高, 镜下特征显示岩石主体泥质含量较高, 杂基支撑, 碎屑颗粒磨圆及分选较差 (图 6a)。WJLB 段镜下岩石结构为棱角一次棱角状, 磨圆度较差 (图 6b)。WJLC 段镜下岩石颗粒磨圆度和分选性都相对较好, 以次圆状粉晶结构为主。碎屑颗粒可见石英及岩屑, 泥质含量相对较少, 表现为颗粒支撑 (图 6c)。

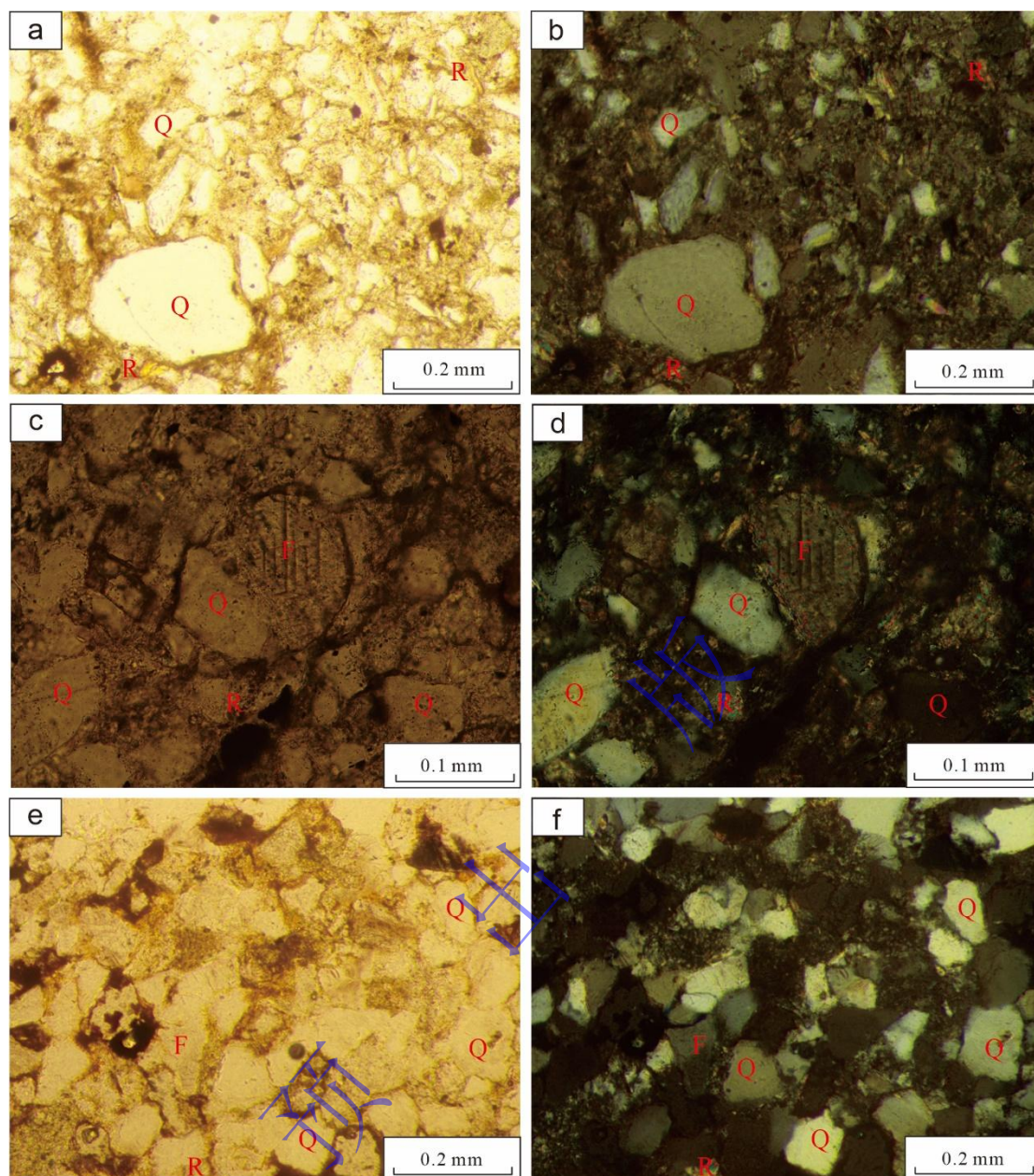


图 6 王家梁剖面须一段砂岩镜下照片

(a, b) WJLA 段砂岩单偏光及正交偏光显微照片, 碎屑颗粒呈棱角状, 杂基支撑, 分选较差; (c, d) WJLB 段砂岩单偏光及正交偏光显微照片, 碎屑颗粒呈次棱角-次圆状, 颗粒支撑; (e, f) WJLC 段砂岩单偏光及正交偏光显微照片, 碎屑颗粒呈次圆状, 颗粒支撑; Q:石英; F:长石; R:岩屑

Fig.6 Photomicrographs of thin section showing lithological characteristics of sandstone from the first member of the Xujiuhe Formation, Wangjiali section

对王家梁剖面 6 件砂岩样品进行粒度分析, 累积概率曲线结果如图 7 所示, 主要为一跳一悬式和一跳一悬夹过渡式两种类型。其中 WJLA-12、WJLB-7 和 WJLC-32 的粒度累计曲线为一跳一悬式; WJLA-16、WJLA-25 和 WJLB-5 的粒度累计曲线为一跳一悬夹过渡式(图 7)。

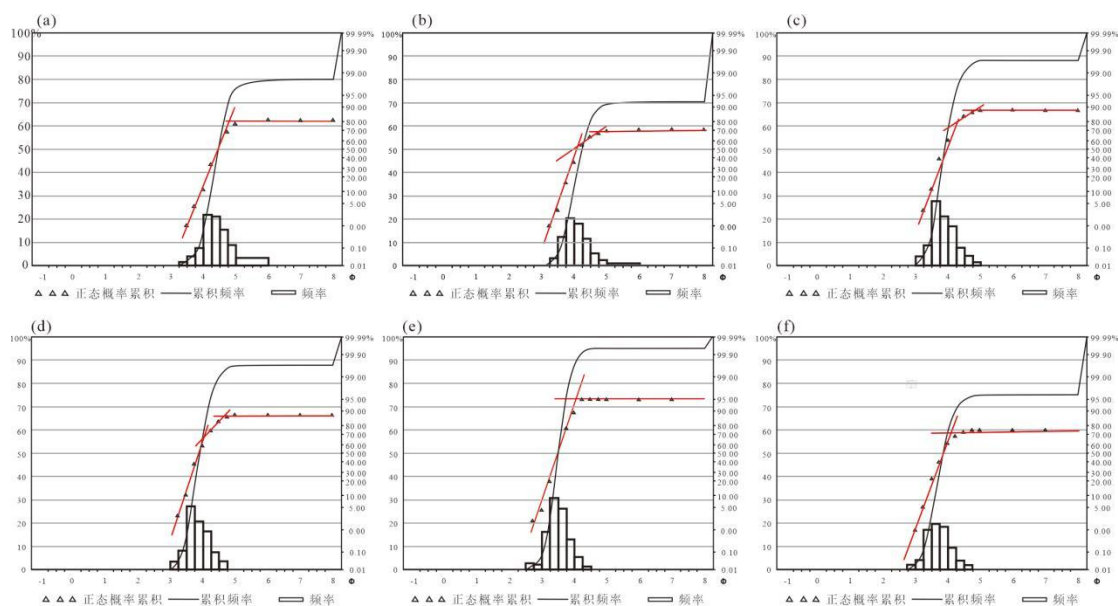


图7 王家梁剖面砂岩概率累积曲线

(a, c, f) 一跳一悬式, 样品号分别为: WJLA-12, WJLB-7, WJLC-32 (b, e, d) 一跳一悬夹过渡式, 样品号分别为: WJLA-16, WJLA-25, WJLB-5

Fig.7 Cumulative probability curves for sandstone in Wangjialiang section

3.2 主微量元素特征

须家河组样品主、微量元素含量见表1、表2。工农镇剖面样品的主量元素中 SiO_2 含量最高(平均值为 65.03%)；其次为 Al_2O_3 (平均值为 14.26%)， K_2O (平均值为 3.36%) 和 CaO (平均值为 1.94%)。王家梁剖面样品的主量元素中 SiO_2 含量最高(平均值为 60.78%)；其次为 Al_2O_3 (平均值为 14.62%)， CaO (平均值为 3.71%) 和 K_2O (平均值为 2.95%)。工农镇剖面样品的微量元素中 Ba 含量最高(平均值为 516.58 $\mu\text{g/g}$)，其次为 Rb (平均值为 132.45%)，Sr (平均值为 78.02 $\mu\text{g/g}$) 和 Cu (平均值为 25.07 $\mu\text{g/g}$)；王家梁剖面样品的微量元素中 Ba 的含量最高(平均值为 495.04 $\mu\text{g/g}$)，其次为 Rb (平均值为 134.75 $\mu\text{g/g}$)，Sr (平均值为 113.18 $\mu\text{g/g}$)，Cu (平均值为 28.46 $\mu\text{g/g}$)。手持 XRF 分析测试数据见附表1。

表 1 须一段样品主量元素含量表

Table 1 Major element contents in bulk rocks from the first member of the Xujiache Formation

样品号	深度/m	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
GNZ-04	14.50	89.56	1.37	0.12	0.28	0.23	5.27	0.95	0.04	0.35	0.02
GNZ-07	19.10	73.25	2.17	0.13	0.45	0.51	9.45	7.85	0.07	0.82	0.05
GNZ-10	21.35	63.42	4.26	0.17	0.84	1.90	16.72	5.54	0.07	1.01	0.24
GNZ-11	22.60	70.10	3.29	0.16	0.70	1.60	13.02	4.98	0.06	0.80	0.18
GNZ-13	25.80	54.01	5.06	0.20	0.58	1.88	20.70	8.57	0.03	1.28	0.11
GNZ-17	31.30	69.70	3.12	0.16	0.53	0.93	15.01	4.04	0.04	0.66	0.07
GNZ-20	38.95	54.58	3.92	0.16	2.07	2.04	19.02	7.81	0.09	1.14	0.20
GNZ-21	39.30	60.98	4.07	0.18	1.17	2.41	16.94	5.63	0.04	0.96	0.16
GNZ-28	43.02	49.67	3.01	0.16	10.84	3.43	12.17	4.56	0.07	0.67	0.17
WJLA-01	3.40	55.87	2.86	0.66	7.49	3.78	11.47	5.11	0.07	0.66	0.14
WJLA-04	6.05	53.90	3.28	0.49	6.54	3.91	13.73	5.26	0.08	0.75	0.15
WJLA-06	7.28	52.74	2.77	0.43	9.03	3.88	11.28	4.55	0.07	0.67	0.15
WJLA-08	9.55	53.36	2.95	0.33	7.95	3.80	12.34	5.02	0.10	0.71	0.15
WJLA-14	13.94	53.33	3.81	0.18	3.95	3.49	16.61	7.17	0.17	0.77	0.22
WJLA-18	15.79	58.79	3.66	0.19	2.17	3.06	17.18	4.80	0.04	0.88	0.18
WJLA-22	18.79	68.00	2.98	0.16	0.57	1.54	15.72	4.03	0.05	0.88	0.16
WJLA-30	26.29	67.86	2.44	0.16	0.34	0.98	16.78	3.26	0.01	0.93	0.05
WJLB-03	3.73	66.20	3.03	0.16	0.64	1.23	18.42	2.99	0.02	1.12	0.25
WJLB-04	5.40	68.27	2.45	0.14	2.86	1.68	12.33	3.77	0.09	0.76	0.15
WJLB-06	7.40	68.05	2.05	0.14	4.85	1.53	9.34	4.87	0.12	0.60	0.13
WJLB-10	11.80	57.41	2.70	0.32	7.22	3.59	11.22	4.27	0.08	0.69	0.15
WJLB-11	13.00	66.21	2.41	0.15	4.39	2.38	11.33	3.03	0.04	0.71	0.15
WJLC-06	1.40	63.98	3.13	0.19	0.81	1.80	17.89	4.02	0.06	1.01	0.10
WJLC-15	3.45	62.21	3.01	0.19	0.68	1.75	18.86	3.60	0.03	1.25	0.08
WJLC-22	4.85	64.92	3.49	0.19	0.25	1.81	16.71	5.25	0.05	0.94	0.05
WJLC-27	7.30	57.50	2.80	0.16	6.65	2.92	13.35	3.70	0.05	0.79	0.16
WJLC-31	8.32	57.70	2.92	0.18	2.02	2.81	16.10	4.15	0.03	0.97	0.14
WJLC-40	12.35	58.48	3.37	0.18	2.19	2.89	17.19	4.50	0.03	0.98	0.17

注: TFe₂O₃ 为全铁; 主量元素单位为%

表 2 须一段样品微量元素含量表

Table 2 Trace element contents in bulk rocks from the first member of the Xujiahe Formation

样品号	深度/m	V	Cr	Ni	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba	Pb
GNZ-04	14.50	22.29	20.00	11.56	14.13	5.30	37.01	35.21	7.37	158.61	6.37	183.15	8.95
GNZ-07	19.10	65.73	66.36	46.83	38.23	14.25	75.74	64.47	23.33	315.39	16.56	308.81	89.21
GNZ-10	21.35	154.06	129.83	39.93	119.15	26.85	157.41	75.67	33.14	308.76	22.68	622.99	9.15
GNZ-11	22.60	102.70	96.68	40.70	133.24	19.85	133.38	61.65	29.76	270.21	18.07	543.18	12.46
GNZ-13	25.80	187.04	145.83	55.73	98.57	34.89	221.09	87.11	42.96	524.90	30.97	576.25	41.18
GNZ-17	31.30	82.61	51.48	26.94	44.37	18.13	108.52	56.69	22.42	281.88	15.27	410.23	48.27
GNZ-20	38.95	133.39	148.61	47.42	79.61	30.70	158.45	79.57	33.66	403.62	26.39	690.79	26.67
GNZ-21	39.30	147.26	125.96	41.90	84.22	27.56	172.68	78.58	27.93	323.57	22.25	724.64	13.18
GNZ-28	43.02	106.94	100.47	32.03	73.30	18.36	127.74	163.26	25.38	217.66	16.08	589.19	13.56
WJLA-01	3.40	107.52	87.63	46.23	113.69	17.00	116.83	132.86	25.10	221.09	15.36	611.64	30.88
WJLA-04	6.05	123.49	93.49	46.48	90.93	20.29	145.02	121.39	26.27	253.63	18.15	609.91	24.47
WJLA-06	7.28	110.01	181.87	45.09	88.24	16.83	117.30	147.64	28.57	231.08	16.29	679.18	24.14
WJLA-08	9.55	113.77	121.93	45.70	98.08	17.68	127.69	138.08	25.19	240.11	16.78	535.31	24.51
WJLA-14	13.94	141.52	100.27	63.33	116.64	23.04	167.34	94.84	32.44	238.38	17.55	632.41	36.47
WJLA-18	15.79	141.49	111.40	54.04	107.58	24.54	155.60	80.73	25.44	282.31	20.18	622.09	22.66
WJLA-22	18.79	109.58	104.03	34.65	120.89	21.21	136.67	75.52	25.88	322.26	19.56	471.19	41.06
WJLA-30	26.29	108.56	91.33	14.43	48.61	27.03	126.00	77.61	26.66	309.64	25.74	376.40	22.73
WJLB-03	3.73	132.14	111.20	29.43	58.21	27.80	122.93	106.10	33.84	432.84	25.12	427.48	18.63
WJLB-04	5.40	92.68	71.13	47.61	93.35	18.86	103.86	102.98	24.07	274.36	17.00	368.20	23.44
WJLB-06	7.40	72.35	61.28	35.97	90.39	14.07	83.01	116.19	24.40	237.26	12.93	342.71	19.21
WJLB-10	11.80	100.09	65.34	43.64	85.31	17.77	114.43	122.32	23.16	223.26	18.14	491.21	22.22
WJLB-11	13.00	86.91	58.42	35.74	74.06	17.01	103.97	109.42	24.03	250.82	16.35	378.46	20.61
WJLC-06	1.40	141.60	93.69	51.50	101.40	28.15	158.69	129.30	138.23	281.58	21.72	483.57	30.82
WJLC-15	3.45	163.49	91.55	50.78	121.67	35.27	171.49	130.34	253.79	331.09	27.49	445.31	25.24
WJLC-22	4.85	144.12	118.68	76.94	87.72	29.19	179.65	87.23	166.63	285.03	21.39	634.10	37.35
WJLC-27	7.30	111.68	78.73	30.99	92.35	19.41	123.64	136.23	25.50	247.52	22.21	398.50	21.87
WJLC-31	8.32	139.99	82.56	61.92	114.70	23.24	141.50	95.40	25.24	319.79	25.07	416.45	40.46
WJLC-40	12.35	143.97	155.22	55.09	113.48	25.01	164.59	146.28	28.68	264.00	20.31	481.78	21.63

注：微量元素单位为 ug/g

4 讨论

4.1 沉积相划分

碎屑岩的颗粒分选性和磨圆度、颗粒的组合方式、胶结物特点以及碎屑与胶结物之间的接触关系可以反映水动力条件及搬运距离。搬运距离越远，碎屑颗粒平均直径越小，分选性增加，磨圆度也会相应变好^[50-51]。此外，粒度也是岩石结构的特征之一，粒度概率累积曲线的特征可以反映当时的沉积环境。一跳一悬式概率曲线由悬浮组分和跳跃组分组成，缺少滚动组分，反映了三角洲平原分流河道的特征^[52-53]。一跳一悬夹过渡式概率曲线是由跳跃组分、

悬浮组分及过渡组分组成的三段式,反映一种特殊的水动力条件,即当河流注入湖初期,流速降低致使较粗的颗粒沉淀,水介质中较细的颗粒增加,导致悬浮组分的粗端斜率逐渐提高,Glaister *et al.*^[51]认为这是河口砂坝最明显的特征。

GNZ 剖面整体发育大套砂岩,且内部楔状交错层理发育(图 3b),前人已经明确了 GNZ 剖面须一段沉积相组合特征,认为其主要为三角洲前缘的河口沙坝沉积^[46-48]。WJL 剖面的沉积相划分主要依据野外露头岩性观察、岩石薄片观察和粒度概率曲线分析。

WJLA 段岩石类型多样,砂岩粒度偏细,泥岩所占比例较高。泥岩颜色以深灰色为主,岩性不纯,含较多粉砂。镜下特征显示岩石主体泥质含量较高,杂基支撑,碎屑颗粒磨圆及分选较差(图 6a, b),反映较弱水动力以及较近搬运距离的沉积环境。WJLA 段底部 0~2.80 m 见板状、槽状交错层理(图 3a),为三角洲前缘河口沙坝沉积。2.80~13.72 m 在局部见植物化石,发育板状、槽状交错层理,粒度曲线为一跳一悬式(图 7a),为三角洲平原分流河道微相沉积。13.72~15.69 m 主要为粉砂岩沉积,概率累积曲线为一跳一悬夹过渡式(图 7b),为三角洲前缘水下分流河道微相沉积。15.69~19.59 m 为粉砂质泥岩和泥岩沉积,粒度曲线为一跳一悬式(图 7c),为三角洲平原分流河道微相沉积。19.59~26.79 m 发育煤层,为沼泽微相沉积。

WJLB 段泥岩含量较少,底部发育大套砂岩,粒度较细,并且交错层理发育(图 3a)。岩石结构为棱角—次棱角状,磨圆度较差(图 6c, d)。WJLB 段 0~6.80 m 为粉砂岩为主,见槽状交错层理,概率累积曲线为一跳一悬夹过渡式(图 7d),为三角洲前缘水下分流河道微相沉积。6.80~13.20 m 以粉砂岩和泥质粉砂岩为主,发育槽状交错层理,见大量植物化石,粒度曲线为一跳一悬式(图 7e),为三角洲平原分流河道微相沉积。13.20~16.20 m 为泥质粉砂岩、泥岩和煤,为沼泽微相沉积。

WJLC 段以暗色泥岩为主,出现大量植物化石、煤,局部见菱铁矿结核(图 3a),沉积环境为三角洲平原沼泽。薄片镜下特征显示颗粒磨圆度和分选性都相对较好,以次圆状粉晶结构为主(图 6e, f)。8.70~10.50 m 的粉砂岩粒度分析概率曲线为一跳一悬式(图 7f),反映此处粉砂岩的沉积环境为三角洲平原分流河道沉积。

4.2 须一段古气候重建

在湿润的气候条件下,喜湿型微量元素 Fe、Mn、Cr、V、Ni、Co、Br 和 Cu 等含量较高;而在干燥条件下,水分容易蒸发,喜干型微量元素 Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba、Mo、Zn、U 和 B 等大量析出,形成各种盐类沉积而导致含量升高^[54]。喜干型元素 Sr 和喜湿型元素 Cu 的比值容易受到气候变化影响^[55-56],因此 Sr/Cu 比值能够较好反映沉积时期古气候的

演化特征。Lerman *et al.*^[57]提出 Sr/Cu 比值在 1.3~5.0 表明气候温暖湿润，大于 5.0 则表明气候干燥炎热。此外，在湿润条件下，Fe、Mn、Cr、Ni、V 和 Co 在沉积物中以胶体形式沉淀，导致气候指数 C 值（Climate index values）升高，而较大离子半径的碱金属（Ca、Mg、K、Na、Sr 和 Ba）在干旱气候下以盐类形式沉淀，导致 C 值降低^[58-59]。C 值与气候的对应关系为：0~0.2 指示干旱气候，0.2~0.4 指示半干旱气候，0.4~0.6 指示半干旱—半潮湿气候，0.6~0.8 指示半潮湿气候，0.8~1.0 指示潮湿气候。C 值的计算公式为：

$$C \text{ 值} = \sum (\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co}) / \sum (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na}) \quad (1)$$

基于 Sr/Cu 比值和 C 值的共变关系，将研究区须家河组一段古气候演化过程划分为五个阶段（I、II、III、IV 和 V 阶段）（图 5）。研究区 I、III、V 阶段 Sr/Cu 比值均小于 5，同时 C 值 > 0.6，两个指标共同指示潮湿气候。然而在 II 阶段和 IV 阶段，Sr/Cu 比值接近于 5 甚至大于 5，C 值均小于 0.6，说明气候由潮湿转变为半干旱—半湿润（图 5）。整体而言，须家河组一段沉积时期古气候仍以炎热潮湿为主（图 5）。须家河一段的植物群落和植物类别、孢粉组合、松科与罗汉松科孢粉的升降变化和自然伽马曲线等数据，也表明该时期古气候炎热湿润，与我国热带、亚热带温暖潮湿气候相对应^[21,24]。

4.3 须一段初始成煤期化学风化

4.3.1 化学风化指标

Rb⁺在风化过程中的稳定性大于 Sr²⁺，Rb⁺相较于 Sr²⁺能够在风化条件中保存更长时间，因此 Rb/Sr 比值可以用于判断化学风化的强度^[60]。在温暖的强降水气候条件下，强烈的风化作用会导致 Sr 含量降低，因此 Rb/Sr 比值与化学风化强度成正比^[60-61]。Rb/Sr > 1 指示化学风化强度较强，Rb/Sr < 1 指示弱至中等的化学风化强度。研究区 I 阶段中 ICP-MS 的 Rb/Sr 比值 0.78~2.53（平均值为 1.77），手持 XRF 为 0.38~2.27（平均值为 1.50），指示较强的风化强度；II 阶段中 ICP-MS 的 Rb/Sr 比值为 0.79~1.19（平均值 0.94），手持 XRF 为 0.42~2.32（平均值为 1.25），表明阶段 II 为中等风化强度；阶段 III 中 ICP-MS 的 Rb/Sr 比值为 1.01~1.93（平均值 1.55），手持 XRF 为 0.96~2.72（平均值为 1.76），表明化学风化强度再次增加；IV 阶段中 ICP-MS 的 Rb/Sr 比值为 0.71~1.22（平均值 0.95），手持 XRF 为 0.56~1.11（平均值为 0.82），指示风化强度减弱；V 阶段中 ICP-MS 的 Rb/Sr 比值为 0.91~2.05（平均值 1.38），手持 XRF 为 0.07~2.29（平均值为 1.40），显示较强的风化强度。综上所述，ICP-MS 和手持 XRF 的 Rb/Sr 比值呈现出很好的对应关系，且整体风化强度呈现强—中等—强—中等—强的趋势（图 5）。

化学蚀变指数（Chemical Index of Alteration，简称 CIA）是由 Nesbitt *et al.*^[62]提出的，

可以评定源区的风化强度，现已被广泛的用于古气候条件重建^[32,63-65]，计算公式为：

$$CIA_{corr} = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O^* + CaO^*) \times 100 \quad (2)$$

式中：CaO*代表硅酸盐矿物中 CaO 的比例，CaO*的计算方法如下（摩尔）： $CaO_{剩} = CaO - (10/3) \times P_2O_5$ 。若 $CaO_{剩} \leq Na_2O$ ，令 $CaO^* = CaO_{剩}$ ；若 $CaO_{剩} > Na_2O$ ，令 $CaO^* = Na_2O$ ^[66-67]。

一般来说 CIA 值为 50~65 指示寒冷干燥的弱化学风化，65~85 指示温暖湿润的中等风化，85~100 指示炎热潮湿的强化学风化^[62]。

4.3.2 后期成岩作用对化学指标风化的影响

沉积岩中的地球化学成分会因为受到沉积蚀变而发生改变，从而导致化学风化指数出现偏差，通过 A-CN-K 三角投图中发现，研究区样品略微偏向 K 点（钾长石）（图 8a）^[68]，表明样品受到了 K 交代作用的影响，沉积物中富含 K 的孔隙水和黏土矿物在沉积后的成岩作用下会使样品富集 K₂O^[67]，因此需要对 CIA 值进行 K 校正（CIA_{corr}），样品使用 Panahi *et al.*^[69]所描述的方法来进行 K 校正。

$$K_2O^* = [m \times Al_2O_3 + m \times (CaO^* + Na_2O)] / (1-m) \quad (3)$$

$$m = K_2O / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \quad (4)$$

其中 K₂O*是指发生 K 交代作用前沉积物中 K₂O 的含量，m 代表母岩中 K₂O 的比例。前人研究认为晚三叠世四川盆地物源为南秦岭造山带^[70-71]，因此母岩中各元素含量取自南秦岭上地壳岩石中各元素的平均含量^[68]。校正后的 CIA 值（CIA_{corr}）见表 3 和图 5。由于 CIW 和 PIA 不受 K₂O 含量和 K 交代的影响，因此 CIW 和 PIA 可以用于验证 K 校正结果的准确性（计算公式及结果见表 3、4）。结果显示 CIA_{corr} 与 CIW 和 PIA 都具有较好的相关性，R² 分别为 1 和 0.9983（图 8b, c），说明 K 校正消除了 K 的交代作用。

表 3 各风化指标计算公式

Table 3 Calculation formulas of chemical weathering indices

指标名称	公式	参考文献
化学蚀变指数 (CIA)	$= Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO^*) \times 100$	Nesbitt <i>et al.</i> ^[62]
化学风化指数 (CIW)	$= Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*) \times 100$	Harnois ^[72]
斜长石蚀变指数 (PIA)	$= (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 - K_2O + Na_2O + CaO^*) \times 100$	Fedo <i>et al.</i> ^[67]

表 4 研究区须一段样品风化指标值

Table 4 Chemical weathering indices in bulk rocks of the first member of Xujiahe Formation

样品号	深度/m	剖面	CIA	CIA _{corr}	CIW	PIA
GNZ-04	14.50	GNZ	73.90	83.70	93.30	90.90
GNZ-07	19.10	GNZ	77.20	85.80	95.60	94.30
GNZ-10	21.35	GNZ	76.30	86.70	96.70	95.60
GNZ-11	22.60	GNZ	76.10	86.20	96.10	94.80
GNZ-13	25.80	GNZ	77.10	87.00	97.00	96.00
GNZ-17	31.30	GNZ	79.40	86.70	96.70	95.80
GNZ-20	38.95	GNZ	79.90	87.20	97.30	96.50
GNZ-21	39.30	GNZ	77.20	86.70	96.70	95.50
GNZ-28	43.02	GNZ	76.20	85.90	95.80	94.40
WJLA-01	3.40	WJLA	68.50	75.40	84.00	79.30
WJLA-04	6.05	WJLA	72.60	80.20	89.50	86.30
WJLA-06	7.28	WJLA	71.90	79.80	88.90	85.50
WJLA-08	9.55	WJLA	74.20	82.30	91.80	89.30
WJLA-14	13.94	WJLA	77.90	86.70	96.60	95.60
WJLA-18	15.79	WJLA	79.00	86.60	96.60	95.60
WJLA-22	18.79	WJLA	80.70	86.80	96.80	96.00
WJLA-30	26.29	WJLA	84.10	87.00	97.00	96.40
WJLB-03	3.73	WJLB	82.90	87.20	97.30	96.70
WJLB-04	5.40	WJLB	79.80	86.40	96.40	95.40
WJLB-06	7.40	WJLB	77.70	85.50	95.40	94.00
WJLB-10	11.80	WJLB	73.70	81.90	91.30	88.60
WJLB-11	13.00	WJLB	78.40	85.90	95.80	94.60
WJLC-06	1.40	WJLC	81.70	86.70	96.70	95.90
WJLC-15	3.45	WJLC	82.90	86.80	96.80	96.10
WJLC-22	4.85	WJLC	79.10	86.40	96.40	95.40
WJLC-27	7.30	WJLC	78.90	86.20	96.20	95.10
WJLC-31	8.32	WJLC	81.10	86.50	96.50	95.60
WJLC-40	12.35	WJLC	80.20	86.70	96.70	95.90

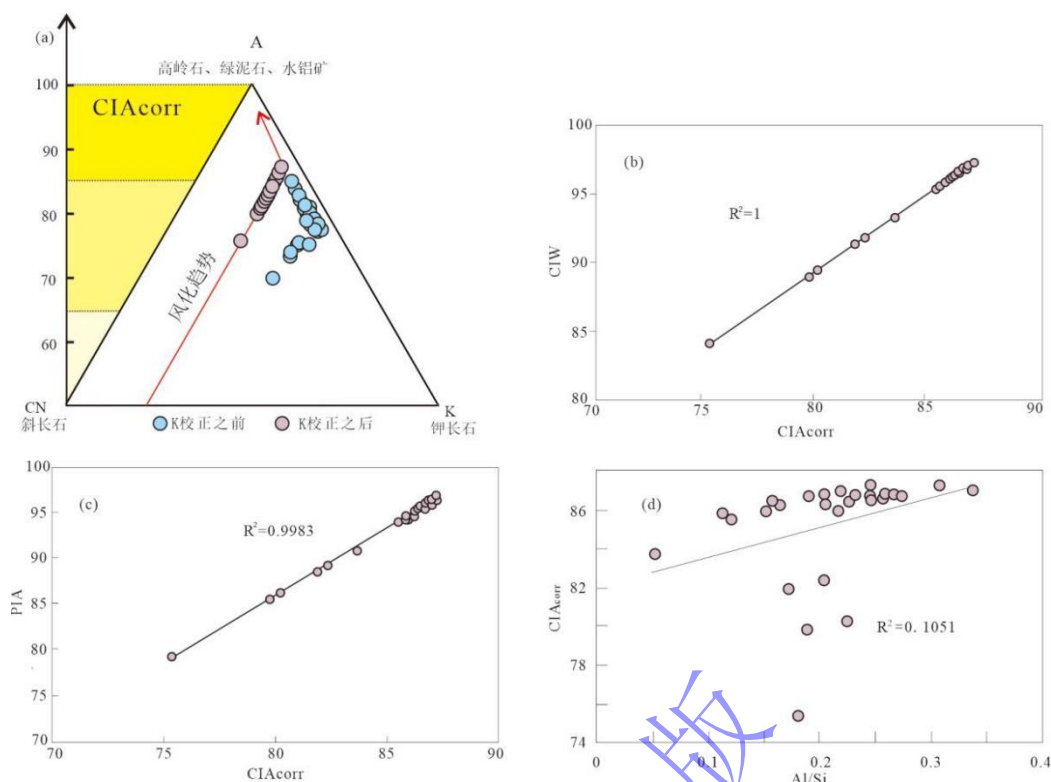


图8 (a) A-CN-K图; (b) K校正之后 CIA_{corr} 和 CIW 相关性图; (c) K校正之后 CIA_{corr} 与 PIA 相关性图; (d) CIA_{corr} 与 Al/Si 的相关性

图(a)显示了南秦岭上地壳(SQ)的风化趋势^[68]

Fig.8 (a) Plots of A-CN-K; (b) correlation diagram between CIA_{corr} and CIW after K correction; (c) Correlation diagram between CIA_{corr} and PIA after K correction; (d) correlation between CIA_{corr} and Al/Si

此外, 矿物在沉积和分选过程中, 会导致硅元素(Si)和高场强元素(U、Th、Zr、Hf)趋于富集在石英和重矿物中, 而大部分主微量元素则趋于富集在细粒沉积物中^[73], 从而影响风化指数。因此, 在相同的风化条件下, 细粒沉积物的CIA值会大于粗粒沉积物的CIA值。Al元素含量可代表沉积岩中细粒沉积物的占比, Si元素含量则代表沉积岩中粗粒沉积物的占比。据此, Al/Si的元素含量比值可以作为水动力分选的指标^[74]。 CIA_{corr} 与Al/Si比值低相关性(图8d), 表明这些风化指标值的变化不受沉积分选过程控制。

综上所述, CIA_{corr} 值可真实反映物源区的化学风化作用强度和古气候特征。综合剖面中I、III、V等三个阶段的 CIA_{corr} 值均大于85, 指示炎热潮湿的强化学风化; II、IV阶段的 CIA_{corr} 值只有一个大于85, 其他均小于85, 指示温暖湿润的中等化学风化。综合分析古气候指数(Sr/Cu比值和C值)与风化指数(Rb/Sr比值和 CIA_{corr}), I、III和V阶段古气候为炎热潮湿, 化学风化作用强; II和IV阶段为温暖半干旱一半潮湿气候, 化学风化作用中等(图5)。

4.4 古气候驱动因素

运用风化指数（CIA、CIW、PIA、WIP 和 Rb/Sr）和气候指数（C 值和 Sr/Cu）重建了须家河组须一段初始煤沉积期的古气候。该时期炎热潮湿的古气候是煤沉积的关键，而潮湿的古气候可能与超级季风活动有关。硅化木、风暴沉积以及植物化石等证据表明了四川盆地在晚三叠世受到超级季风的影响^[75-76]。此外，欧洲南阿尔卑斯山脉^[77]、亚利桑那州 Chinle 组^[78]等地区上三叠统也记录了超级季风活动的证据。晚三叠世时期，美国西南部地区^[79]和南美洲^[80-81]的古气候湿润也可能与超级季风活动有关。季风活动会导致气候呈现干湿交替变化，当季风增强时，会带来华南板块东侧的泛大洋和南侧的特提斯洋的水分，造成潮湿的古气候，而季风减弱时带来的水分减少，导致气候逐渐变为干旱^[82-83]。前人对须家河组各段植物群落组合与丰度统计的研究，表明在须家河组沉积时期存在炎热潮湿与温暖干旱（或半干旱）气候交替出现的现象^[24]。四川盆地须家河组中高岭石（K）和伊利石（I）含量的垂直变化，也反映了该时期古气候为冷热交替、干湿更迭的特征，这种气候特征进一步导致了须家河组砂—泥互层的叠置模式^[13]。综合前人的研究成果，认为晚三叠世川西北地区须家河组一段沉积时期干—湿交替的古气候与超级季风活动密切相关。Dai *et al.*^[83]和 Zhao *et al.*^[84]对华南板块的古纬度重建结果表明，在中三叠世之后，华南板块持续向北移动，逐渐靠近中纬度湿润气候带；与此同时，晚三叠世时期大气二氧化碳浓度较高（平均值 $>1\,500 \times 10^{-6}$ ）^[40]，高 $p\text{CO}_2$ 也可能是温暖湿润气候形成的驱动因素之一^[40,85]，叠加上该时期超级季风的影响，它们共同促进了研究区潮湿的古气候形成与强烈的化学风化作用。

4.5 初始成煤机制

4.5.1 古气候因素

古气候、古水深以及造煤植物都是影响煤系发育的重要因素^[21,45,86-87]，其中古气候是前提条件^[88]。前人研究表明，煤的沉积需要在潮湿的环境中进行。在 P-T 事件以后，煤形成的年平均降水约为 900 mm^[89]，并且成煤古植物群主要以喜湿植物为主，因此煤的沉积通常指示着湿润的古气候特征^[65]。在炎热潮湿的气候环境下，陆地木质植物大量繁盛而聚集为泥炭，经变质作用后从而形成煤。同时，植物的种类、分布以及适应环境的能力又受到古气候的控制。

研究剖面中的煤线主要出现在 III、V 阶段，气候指标表明这些阶段的古气候湿润（图 5），因此为煤的形成提供了必要的气候条件。反之，半干旱—干旱的古气候条件不利于煤层的形成。研究剖面中的 II、IV 阶段没有煤沉积的原因可能与半干旱—干旱的气候条件有关系。Sun *et al.*^[65]认为早二叠世华北克拉通山西组上部煤层的消失就与该地区的干旱化以及喜湿植物的大规模灭绝有关，干旱的条件会导致泥炭氧化，难以保存煤层^[90]。

此外,煤层的发育通常受到喜湿植物生长发育的制约^[27-28]。四川盆地上三叠统须家河组中蕨类和裸子植物发育繁盛^[21,91-93],其中蕨类植物孢子占有明显优势,以异常繁盛的苏铁和双扇蕨科植物为主,称为 *Dictyophyllum-Clathropteris* 植物群 (DC 植物群)^[16]。它们的出现预示着须家河组沉积时期的整体为湿热的古气候,同时也为须家河组中煤层发育提供了物质基础。在须一段时期,植物类型以木贼类 (*Neocalamites*) 和蕨类 (*Leptopteris, Dictyophyllum, Phlebopteris*) 为主;其次为裸子植物和少数的针叶植被^[94-95],它们可能是该时期主要的成煤古植物类型。

4.5.2 沉积环境因素

自埃迪卡拉纪至中三叠世拉丁期,四川盆地以海相碳酸盐沉积为主^[96]。到了中三叠世晚期,受到印支运动作用影响,龙门山岛链抬升成陆并且遭受剥蚀,四川盆地受到挤压形成东高西低的地貌,沉积环境由海相转为陆相,加之炎热潮湿的气候,丰富的雨水与北部山区河流的陆源补给,使沉积物快速堆积,使该区域发育三角洲沉积。

根据前人所建立的聚煤模式^[45,87-88],煤形成的最根本因素为泥炭,但泥炭的堆积和保存对水位有一定的要求。一方面,水位要足够高能够覆盖正在腐烂的植被防止其被氧化;另一方面,水位又不能过高防止植被被淹死^[97],当可容空间的增加速率与泥炭堆积速率的比值为 1~1.18 时,煤层厚度最大^[98]。在高彩霞等^[45]对须家河组层序地层的研究基础上,本文认为研究区受到北部物源区的影响较大,沉积一套以砂岩和泥岩为主的碎屑岩沉积,而工农镇剖面为低位体系域,没有适合泥炭发育的环境,也不能提供泥炭堆积的可容空间,导致煤不沉积。王家梁剖面地势相对低洼,发育沼泽环境,为高位体系域沉积,有利于泥炭(煤)层的形成,但由于该剖面靠近南秦岭物源区,导致陆源碎屑的供给充足,会破坏煤形成所需的还原环境,从而煤层较薄且不连续。此外,王家梁剖面 C 段上部出现大量薄层菱铁矿,菱铁矿为煤系常见的共生矿物,菱铁矿的富集也会导致煤层较薄^[21]。

4.5.3 成煤模式

在古气候和沉积相研究的基础上,提出了川西北须家河组一段沉积时期煤的形成模式。即在 I 阶段时期,古气候炎热潮湿,化学风化较强,在该古环境下沉积了一套代表河口砂坝微相的粉砂岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩组合。虽然该阶段气候适宜、植被发育,但沉积环境为低位体系域,因此不适合泥炭的堆积和煤的形成,故没有煤的沉积;在 II、IV 阶段时期,古气候由炎热潮湿转为温暖半干旱—半潮湿气候,化学风化作用变弱,沉积环境由河口砂坝微相转为三角洲沼泽微相沉积,岩性主要为粉砂岩和粉砂质泥岩,沉积环境为适宜煤层发育的高位体系域,但较为干旱的古气候可能导致喜湿的成煤植物不发育,因此 II、IV 阶段也未

见煤层沉积；在Ⅲ、Ⅴ阶段时期，古气候炎热潮湿，随着湿度的增加，化学风化作用也随之增强，在炎热潮湿的气候背景下，成煤植被（如真蕨类、裸子植物）大量发育，提供充足的物质来源，且处于高位体系域的沼泽微相提供了适宜泥炭堆积的沉积环境，因此出现煤层沉积（图9）。

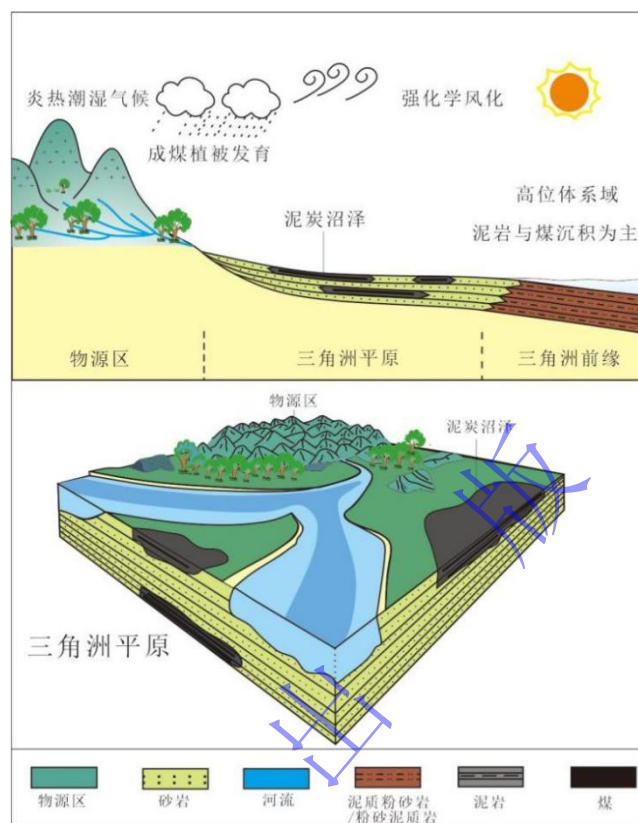


图9 川西北地区须家河组一段初始成煤期的成煤模式图

Fig.9 Coal deposition model of the initial coal-forming period of the Upper Triassic Xujiahe Formation, northwestern Sichuan Basin

5 结论

(1) 川西北地区晚三叠世须家河组一段初始成煤期以炎热潮湿与温暖半干旱一半潮湿的古气候交替出现为特征，且化学风化强度与古气候变化呈现同步变化。

(2) 川西北须家河组一段沉积时期干—湿交替的古气候与超级季风活动密切相关。高 $p\text{CO}_2$ 浓度叠加超级季风活动的影响，共同促进了研究区潮湿的古气候形成与强烈的化学风化作用。

(3) 本次研究的煤层在Ⅲ和Ⅴ阶段发育，该两阶段气候炎热潮湿，满足适宜煤层发育的气候条件，此外还需要适宜的沉积环境，高位体系域的沼泽环境更利于煤层的发育和保存。

- [1] Erwin D H. The great Paleozoic crisis: Life and death in the Permian[M]. New York: Columbia University Press, 1993.
- [2] Jin Y G, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China[J]. Science, 2000, 289(5478): 432-436.
- [3] Veevers J J, Conaghan P J, Shaw S E. Turning point in Pangean environmental history at the Permian/Triassic (P/Tr) boundary[J]. 1994.
- [4] Retallack G J, Veevers J J, Morante R. Global coal gap between Permian - Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants[J]. GSA Bulletin, 1996, 108(2): 195-207.
- [5] Retallack G J. Permian - Triassic life crisis on land[J]. Science, 1995, 267(5194): 77-80.
- [6] Yu J X. Flores et dynamique évolutive au passage de la limite Permien - Trias dans la zone de contact entre le Guizhou et le Yunnan, Chine du Sud[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [7] Yu J X, Broutin J, Huang Q S, et al. *Annalepis*, a pioneering lycopsid genus in the recovery of the Triassic land flora in South China[J]. Comptes Rendus Palevol, 2010, 9(8): 479-486.
- [8] Preto N, Kustatscher E, Wignall P B. Triassic climates—State of the art and perspectives[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 290(1/2/3/4): 1-10.
- [9] Payne J L, Lehrmann D J, Wei J Y, et al. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction[J]. Science, 2004, 305(5683): 506-509.
- [10] Xu Z, Hilton J, Yu J X, et al. End Permian to Middle Triassic plant species richness and abundance patterns in South China: Coevolution of plants and the environment through the Permian-Triassic transition[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 232: 104136.
- [11] Dal Corso J, Song H J, Callegaro S, et al. Environmental crises at the Permian - Triassic mass extinction[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(3): 197-214.
- [12] Mao J, Xu H. China's coal resource distribution and perspective prediction[J]. Meitiandizhi yu Kantan, 1999, 27(3): 1-4.
- [13] 徐兆辉, 汪泽成, 胡素云, 等. 四川盆地上三叠统须家河组沉积时期古气候[J]. 古地理学报, 2010, 12(4): 415-424. [Xu Zhaohui, Wang Zecheng, Hu Suyun, et al. Paleoclimate during depositional Period of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(4): 415-424.]
- [14] 张建勇, 刘文汇, 腾格尔, 等. 建南气田长兴组—飞仙关组天然气特征及气源分析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 1004-1013. [Zhang Jianyong, Liu Wenhui, Tenger, et al. Characteristics of natural gas in P₂ch—T₁f Layers in Jiannan gas field and gas source correlation[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 1004-1013.]
- [15] 赵宗举, 周慧, 陈轩, 等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 35-51. [Zhao Zongju, Zhou Hui, Chen Xuan, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Suppl.2): 35-51.]
- [16] 徐珍. 晚二叠世—中三叠世植物演化及其环境效应[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023: 17-140. [Xu Zhen. End Permian to Middle Triassic plant evolution pattern and the environmental impact[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023: 17-140.]
- [17] 丁婷. 四川盆地早中三叠世古气候、古环境重建—来自同位素及元素地球化学的约束[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017: 25-107. [Ding Ting. The Early-Middle Triassic paloclimate and Paloenvironment rebulite in Sichuan Basin—from isotope and Element Geochemistry[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017: 25-107.]
- [18] 汪明泉. 四川盆地东部早中三叠世古水温及其成钾效应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016: 7-42. [Wang Mingquan. Paleotemperature and its potash-forming effect in early and Middle Triassic in eastern Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016: 7-42.]
- [19] Sun Y D, Joachimski M M, Wignall P B, et al. Lethally hot temperatures during the Early Triassic greenhouse[J]. Science, 2012, 338(6105): 366-370.
- [20] 李宸, 周游, 郎兴海, 等. 四川盆地西北缘早—中三叠世世界线附近沉积岩地球化学特征及古环境意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(2): 220-236. [Li Chen, Zhou You, Lang Xinghai, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of sedimentary rocks near the Early-Middle Triassic boundary on the northwest margin of the Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2023, 42(2): 220-236.]

- [21] 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.]
- [22] 李英娇, 梁万林, 邵龙义, 等. 四川省晚三叠世含煤地层层序地层及聚煤特征[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(8): 32-37. [Li Yingjiao, Liang Wanlin, Shao Longyi, et al. Late Triassic coal-bearing strata sequence stratigraphy and coal accumulation characteristics in Sichuan province[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(8): 32-37.]
- [23] 李朝辉. 四川盆地侏罗纪岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016: 8-76. [Li Chaohui. Study on the Jurassic Lithofacies and paleogeography of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016: 8-76.]
- [24] 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用: 以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 235-244. [Xu Zhaohui, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 235-244.]
- [25] 贾子策, 林志成, 瞿雪姣, 等. 真蕨植物化石 *Cladophlebis kwangyuanensis* 在重庆云阳上三叠统的发现及其古气候意义[J/OL]. 古生物学报: 1-15[2024-06-28]. <https://doi.org/10.19800/j.cnki.aps.2023059>. [Jia Zice, Lin Zhicheng, Qu Xuejiao, et al. Discovery of fossil fern *Cladophlebis kwangyuanensis* in the Upper Triassic of Yunyang, Chongqing and its paleoclimatic significance[J/OL]. Acta Palaeontologica Sinica: 1-15[2024-06-28]. <https://doi.org/10.19800/j.cnki.aps.2023059>.]
- [26] 孙勇, 李振江, 宋伟, 等. 宜宾刘家镇上三叠统须家河组植物化石特征与古环境意义[J]. 资源环境与工程, 2023, 37(1): 1-8. [Sun Yong, Li Zhenjiang, Song Wei, et al. Plant fossils characteristics and palaeoenvironment significances of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Liujia Town of Yibin City[J]. Resources Environment & Engineering, 2023, 37(1): 1-8.]
- [27] Hilton J, Cleal C J. The relationship between Euramerican and Cathaysian tropical floras in the Late Palaeozoic: Palaeobiogeographical and palaeogeographical implications[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 85(3/4): 85-116.
- [28] 石彦强, 邢立杰. 动态聚煤模式: 兼论成煤植物在聚煤环境中的主导作用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(增刊1): 6-8, 39. [Shi Yanqiang, Xing Lijie. Dynamic coal-accumulation model: On leading role of coal-forming plants in coal-accumulating environment[J]. Coal Geology of China, 2009, 21(Suppl.1): 6-8, 39.]
- [29] 张泓, 何宗莲, 沈光隆. 成煤古气候研究进展: 替代参数、方法与问题[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(6): 1-5. [Zhang Hong, He Zonglian, Shen Guanglong. Advances in studies of coal-forming palaeoclimate: Substitute parameters, methods and problems[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(6): 1-5.]
- [30] Scotese C R. Atlas of Permo-Triassic paleogeographic maps (mollweide projection), maps 43-52, volumes 3 & 4 of the paleomap atlas for ArcGIS[M]. Evanston: Paleomap Project, 2014.
- [31] 向芳, 肖倩, 喻显涛, 等. 四川盆地元坝地区上二叠统海相凝灰沉积储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 889-901. [Xiang Fang, Xiao Qian, Yu Xiantao, et al. Reservoir characteristics of the Upper Permian marine tuffaceous deposits in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 889-901.]
- [32] 陈俞超, 金鑫, 杜怡星, 等. 四川盆地须家河组诺利—瑞替期之交气候变迁及其驱动机制[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.147>. [Chen Yuchao, Jin Xin, Du Yixing, et al. Paleoclimate perturbation and its driving mechanism across Norian-Rhaetian transition (Late Triassic) in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.147>.]
- [33] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志卷十(四川油气区)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-516. [Compilation Group of Petroleum Geological Records of Sichuan Oil and Gas Region. Petroleum geology of China vol. 10[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-516.]
- [34] 孟昱璋. 四川盆地嘉陵江组岩相古地理与天然气成藏研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 9-59. [Meng Yuzhang. The Lithofacies-paleogeographic and the natural gas accumulation of Jialingjiang Formation in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 9-59.]
- [35] 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 65-72. [Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. Evolution and miner-alization of earth crust of paleocontinent in the southern China [M]. Beijing: Science Press, 1993: 65-72.]

- [36] 林良彪. 川西前陆盆地上三叠统须家河组沉积相及岩相古地理演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2005: 6-81. [Lin Liangbiao. Sedimentary facies and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in West Sichuan Foreland Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005: 6-81.]
- [37] 王永栋, 付碧宏, 谢小平, 等. 四川盆地陆相三叠系与侏罗系[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 1-178. [Wang Yongdong, Fu Bihong, Xie Xiaoping, et al. The terrestrial Triassic and Jurassic systems in the Sichuan Basin, China[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 1-178.]
- [38] 张峰. 川东北地区上三叠统须家河组层序岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 11-132. [Zhang Feng. Study on Sequence-Lithofacies paleogeography of the Xujiahe Formation of Upper Triassic in northeast of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 11-132.]
- [39] 段金宝, 张升磊, 李平平, 等. 四川盆地北部须家河组裂缝发育特征与控制因素: 以广元和旺苍地区地表露头为例[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(23): 7-14, 44. [Duan Jinbao, Zhang Shenglei, Li Pingping, et al. Characteristics of fracture development and its controlling factors of Xujiahe Formation in the North of Sichuan Basin: A case study of outcrops in Guangyuan and Wangcang Areas[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(23): 7-14, 44.]
- [40] 戴贤铎. 中扬子北缘秭归及当阳盆地中三叠世一晚侏罗世古气候演化[D]. 武汉: 中国地质大学, 2023: 24-184. [Dai Xianduo. Middle Triassic to Late Jurassic climate change in the Zigui and Dangyang basins on the northern margin of the Middle Yangtze[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2023: 24-184.]
- [41] 四川盆地陆相中生代地层古生物编写组. 四川盆地陆相中生代地层古生物[M]. 成都: 四川人民出版社, 1982. [Paleontological Compilation Group of Mesozoic Strata in the Sichuan Basin. Continental Mesozoic Stratigraphy and palaeontology in the Sichuan Basin[M]. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 1982.]
- [42] 姜在兴, 田继军, 陈桂菊, 等. 川西前陆盆地上三叠统沉积特征[J]. 古地理学报, 2007, 9(2): 143-154. [Jiang Zaixing, Tian Jijun, Chen Guiju, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Triassic in western Sichuan foreland Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(2): 143-154.]
- [43] 邹光富, 夏彤, 楼雄英. 四川广元地区上三叠统小塘子组、须家河组层序地层研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(3): 73-80. [Zou Guangfu, Xia Tong, Lou Xiongying. Sequence stratigraphy of the Late Triassic strata in the Guangyuan region, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(3): 73-80.]
- [44] 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 Lihong, et al. Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 46-55.]
- [45] 高彩霞, 邵龙义, 李长林, 等. 四川盆地东部上三叠统须家河组层序地层及聚煤特征研究[J]. 古地理学报, 2009, 11(6): 689-696. [Gao Caixia, Shao Longyi, Li Changlin, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of the Upper Triassic Xujiahe Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(6): 689-696.]
- [46] 程立雪. 广元地区上三叠统须家河组沉积体系与层序地层学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 11-72. [Cheng Lixue. The research of Depositional system and Sequence stratigraphy of Xujiahe Formation of Upper Triassic in Guangyuan area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 11-72.]
- [47] Lai J, Wang G W, Fan Z Y, et al. Sedimentary characterization of a braided delta using well logs: The Upper Triassic Xujiahe Formation in central Sichuan Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 154: 172-193.
- [48] 谢小平, 李姝臻, 鲁宁, 等. 川北广元须家河组一段沉积相与沉积环境演化分析[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 493-505. [Xie Xiaoping, Li Shuzhen, Lu Ning, et al. Sedimentary Facies and sedimentary environment evolution of first member of the Xujiahe Formation in Guangyuan area, northern Sichuan province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 493-505.]
- [49] Li M S, Zhang Y, Huang C J, et al. Astronomical tuning and magnetostratigraphy of the Upper Triassic Xujiahe Formation of South China and Newark Supergroup of North America: Implications for the Late Triassic time scale[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2017, 475: 207-223.

- [50] 陈逵. 元坝地区须家河组储层岩石学特征和图像法粒度分析研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014: 8-52. [Chen Kui. Reservoir petrology characteristics study and image method grain-size analysis of Xujiache Formation in Yuanba area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 8-52.]
- [51] Glaister R P, Nelson H W. Grain-size distributions, an aid in facies identification[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1974, 22(3): 203-240.
- [52] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 4版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1-484. [Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1-484.]
- [53] 木红旭. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020: 14-119. [Mu Hongxu. Formation and evolution of the Late Triassic foreland Basin in western Sichuan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020: 14-119.]
- [54] 吴颖, 杜贵超, 马明. 鄂尔多斯盆地南部旬邑地区延长组砂岩地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(2): 194-209. [Wu Ying, Du Guichao, Ma Ming. Geochemical characteristics of the sandstones of the Yanchang Formation in the Xunyi area, southern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(2): 194-209.]
- [55] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405-414. [Xiong Xiaohui, Xiao Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405-414.]
- [56] Wang L J, Lv D W, Hower J C, et al. Geochemical characteristics and paleoclimate implication of Middle Jurassic coal in the Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 144: 104848.
- [57] Lerman A, Imboden D M, Gat J R, et al. Physics and chemistry of lakes[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [58] 赵增义, 赵建华, 王海静, 等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30(2): 30-32, 40. [Zhao Zengyi, Zhao Jianhua, Wang Haijing, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30(2): 30-32, 40.]
- [59] Cao J, Wu M, Chen Y, et al. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China[J]. *Geochemistry*, 2012, 72(3): 245-252.
- [60] Long X P, Sun M, Yuan C, et al. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 208(3/4): 88-100.
- [61] Asiedu D K, Ageo M, Amponsah P O, et al. Geochemical constraints on provenance and source area weathering of metasedimentary rocks from the Paleoproterozoic (~2.1 Ga) Wa-Lawra Belt, southeastern margin of the West African Craton[J]. *Geodinamica Acta*, 2019, 31(1): 27-39.
- [62] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [63] Fu X G, Jian W, Chen W B, et al. Organic accumulation in lacustrine rift Basin: Constraints from mineralogical and multiple geochemical proxies[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2015, 104(2): 495-511.
- [64] Bai Y Y, Liu Z J, Sun P C, et al. Rare earth and major element geochemistry of Eocene fine-grained sediments in oil shale-and coal-bearing layers of the Meihe Basin, Northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 89-101.
- [65] Sun S, Chen A Q, Chen H D, et al. Early Permian chemical weathering indices and paleoclimate transition linked to the end of the coal-forming episode, Ordos Basin, North China Craton[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585: 110743.
- [66] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [67] Fedo C M, Wayne H, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23(10): 921-924.
- [68] Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(11): 1959-1975.

- [69] Panahi A, Young G M, Rainbird R H. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(13): 2199-2220.
- [70] Luo L, Qi J F, Zhang M Z, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Late Jurassic deposits in the western and northern Sichuan Basin margin: Constraints on the foreland Basin provenance and tectonic implications[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(6): 1553-1568.
- [71] Shao T B, Cheng N F, Song M S. Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan Basin, central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 12-31.
- [72] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319-322.
- [73] Pang H L, Pan B T, Garzanti E, et al. Mineralogy and geochemistry of modern Yellow River sediments: Implications for weathering and provenance[J]. *Chemical Geology*, 2018, 488: 76-86.
- [74] Lupker M, France-Lanord C, Galy V, et al. Increasing chemical weathering in the Himalayan system since the Last Glacial Maximum[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 365: 243-252.
- [75] 钱利军, 时志强, 李智武, 等. 四川盆地西缘地区上三叠统须家河组化石木年轮的古气候意义[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 324-330. [Qian Lijun, Shi Zhiqiang, Li Zhiwu, et al. Fossil wood of the Upper Triassic Xujiahe Formation on the western Margin of Sichuan Basin: Implication for palaeoclimate[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 324-330.]
- [76] Tian N, Wang Y D, Philippe M, et al. New record of fossil wood Xenoxylon from the Late Triassic in the Sichuan Basin, southern China and its paleoclimatic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 464: 65-75.
- [77] Mutti M, Weissert H. Triassic monsoonal climate and its signature in Ladinian-Carnian carbonate platforms (southern Alps, Italy)[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(3b): 357-367.
- [78] Therrien F, Fastovsky D E. Palaeoenvironments of Early Theropods, Chinle Formation (Late Triassic), petrified forest national park, Arizona[J]. *Palaios*, 2000, 15(3): 194-211.
- [79] Prochnow S J, Nordt L C, Atchley S C, et al. Multi-proxy paleosol evidence for Middle and Late Triassic climate trends in eastern Utah[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 232(1): 53-72.
- [80] Colombi C E, Parrish J T. Late Triassic environmental evolution in southwestern Pangea: Plant taphonomy of the Ischigualasto Formation[J]. *Palaios*, 2008, 23(12): 778-795.
- [81] Cesar J, Grice K. Molecular fingerprint from plant biomarkers in Triassic-Jurassic petroleum source rocks from the Dampier sub-Basin, Northwest Shelf of Australia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 189-197.
- [82] Tanner L H. *Climates of the Late Triassic: Perspectives, proxies and problems*[M]/Tanner L H. *The Late Triassic world: Earth in a time of transition*. Cham: Springer, 2018: 59-90.
- [83] Dai X D, Du Y S, Ziegler M, et al. Middle Triassic to Late Jurassic climate change on the northern margin of the South China Plate: Insights from chemical weathering indices and clay mineralogy[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 585: 110744.
- [84] Zhao J, Dong Y, Huang B. Paleomagnetic constraints of the lower Triassic strata in south Qinling Belt: Evidence for a discrete terrane between the north and South China blocks[J]. *Tectonics*, 2020, 39(3): e2019TC005698.
- [85] Taheri A, Jafarzadeh M, Armstrong-Altrin J S, et al. Geochemistry of siliciclastic rocks from the Shemshak Group (Upper Triassic - Middle Jurassic), northeastern Alborz, northern Iran: Implications for palaeoweathering, provenance, and tectonic setting[J]. *Geological Quarterly*, 2018, 62(3): 522-535.
- [86] Shao L Y, Wang X T, Wang D D, et al. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2020, 7(2): 240-262.
- [87] 邵龙义, 李英娇, 靳凤仙, 等. 华南地区晚三叠世含煤岩系层序—古地理[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 613-630. [Shao Longyi, Li Yingjiao, Jin Fengxian, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies palaeogeography of the Late Triassic coal measures in South China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(5): 613-630.]

- [88] 阳伟. 盐源地区晚三叠世含煤地层沉积、层序及聚煤规律研究[D]. 成都：成都理工大学，2019：14-112. [Yang Wei. The researches on sedimentary, sequence and coal-accumulating patterns of coal-bearing strata of the Late Triassic in Yanyuan area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 14-112.]
- [89] Bao X J, Hu Y Y, Scotese C R, et al. Quantifying climate conditions for the Formation of coals and evaporites[J]. National Science Review, 2023, 10(6): nwad051.
- [90] 白通. 鲁西北石炭一二叠纪含煤地层与控制因素研究[D]. 青岛：山东科技大学，2011：9-63. [Bai Tong. Carboniferous-Permian coal-bearing strata and control factors research in area of Luxibei[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011: 9-63.]
- [91] 黄其胜, 鲁胜梅. 川东地区晚三叠世须家河植物群古生态初探[J]. 地球科学：中国地质大学学报, 1992, 17(3): 329-335. [Huang Qisheng, Lu Shengmei. The primary studies on the palaeoecology of the Late Triassic Xujiahe flora in eastern Sichuan[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1992, 17(3): 329-335.]
- [92] 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.]
- [93] 刘兆生, 李丽琴, 王永栋. 四川宣汉晚三叠世孢粉组合及其古植被与古气候意义[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(1): 43-62. [Liu Zhaosheng, Li Liqin, Wang Yongdong. Late Triassic spore-pollen assemblage from Xuanhan of Sichuan, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2015, 32(1): 43-62.]
- [94] Li L Q, Wang Y D, Liu Z S, et al. Late Triassic palaeoclimate and palaeoecosystem variations inferred by palynological record in the northeastern Sichuan Basin, China[J]. PalZ, 2016, 90(2): 327-348.
- [95] Li L Q, Wang Y D, Kürschner W M, et al. Palaeovegetation and palaeoclimate changes across the Triassic - Jurassic transition in the Sichuan Basin, China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 556: 109891.
- [96] 贾承造, 李本亮, 张兴阳, 等. 中国海相盆地的形成与演化[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊1): 1-8. [Jia Chengzao, Li Benliang, Zhang Xingyang, et al. Formation and evolution of the Chinese marine Basins[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 1-8.]
- [97] Diessel C, Boyd R, Wadsworth J, et al. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, western Canada, and their sequence-stratigraphic significance[J]. International Journal of Coal Geology, 2000, 43(1/2/3/4): 143-186.
- [98] Bohacs K, Suter J. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(10): 1612-1639.

Coal-forming Paleoclimate and Mechanism during the Initial Coal-forming Period of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Northwestern Sichuan Basin

WANG Qin¹, JIN Xin^{1,2}, CHEN YuChao¹, ZHANG YunWang¹, ZOU Hao^{2,3}, LI BinBing¹, DU YiXing^{1,2}, LU Gang⁴, SHI ZhiQiang^{1,2}

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: [Objective] The end-Permian mass extinction event (EPME) led to a global decline in flora and biota. The thick coal seams prevalent during the Permian, no longer appear following this event, resulting in a prolonged coal shortage throughout the Triassic. In the Sichuan Basin, following the EPME, peat-forming spore plants that contributed to coal formation were lost in the lowlands, with no recorded subsequent coal seam development. This period is called "coal gap". The climate was hot during the Lower and Middle Triassic, and the turbulent sedimentary environment in the Sichuan Basin suppressed the growth and development of peat-forming plants. Coal seams re-appear in the Sichuan Basin during the deposition of the Upper Triassic Xujiahe Formation (T_{3x_1}), characterized by thin coal seams and poor spatial continuity. During the middle to late sedimentation stages in the Xujiahe Formation, thicker coal seams developed with highly regular spatial distribution. Current studies of the Upper Triassic paleoclimate in the Sichuan Basin have mainly concentrated on the middle and late stages of Xujiahe Formation sedimentation, leaving a gap in research on paleoclimatic conditions during the initial coal-forming phase of the Upper Triassic (early stage of the Xujiahe Formation). To fill this gap, a focused study was conducted on the Norian T_{3x_1} (specifically the Gongnongzhen and Wangjialiang sections) in the northwestern part of the Sichuan Basin. **[Methods]** Conducted on the paleoclimate and coal-forming mechanism of the coal bearing strata (Gongnongzhen and Wangjialiang sections) of the Xujiahe Formation in the northwest Sichuan region based on field outcrop observation, petrological microscopy analysis, and principal and trace element analysis. **[Results and Discussion]** It was found that the sedimentary facies of the T_{3x_1} in the Gongnongzhen section are mainly delta front subfacies, whereas those in the Wangjialiang section are mainly delta plain subfacies. Weathering indices (CIA_{corr}, Rb/Sr) and climate indices (Sr/Cu and C values) of the T_{3x_1} in the Gongnongzhen and Wangjialiang sections displayed an overall fluctuating trend. The humid and hot climate corresponds to strong chemical weathering intensity, whereas the period of warm semi-arid/semi-humid climate corresponds to moderate chemical weathering intensity. **[Conclusions]** The paleoclimate during the initial coal-forming period of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northwestern Sichuan Basin is of two types: (1) a hot, humid climate; and (2) alternating warm, semi-arid to semi-humid climates. Coal seams in the study area are associated with Type 1. The hot, humid conditions promoted the reproduction of peat-forming plants, providing abundant source material for

the formation of coal seams. The paleoclimate alternating between dry to wet during the T_{3x1} in the region is closely related to super-monsoon activity. After the Middle Triassic, the South China block gradually moved closer to the Mid-latitude humid climate zone, and the high concentration of $p\text{CO}_2$ combined with the influence of monsoonal activity in the study area jointly promoted the formation of a humid climate and consequent strong chemical weathering. Further research indicated that coal deposition requires both a suitable paleoclimate and an appropriate preservational environment. For instance, coal seams tend to be well-developed and preserved in the swamps of high-level system tracts.

Keywords: Upper Triassic; Xujiahe Formation; coal formation; paleoclimate; Sichuan Basin

