

四川盆地中侏罗统凉高山组物源特征及沉积演化模式*

张釜源¹ 祝海华¹ 张本健² 王明磊³ 林思臣¹
张 芮² 杨希琳¹ 李育聪² 王兴志¹1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500
2 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041
3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 中侏罗统凉高山组是四川盆地重要产油气层系之一, 其宏观沉积体系及其演化过程尚不明确, 缺乏盆地级别沉积模式建立。基于轻重矿物、岩心、测录井、孢粉、微量元素及野外剖面资料, 针对凉高山组各段沉积时期主要物源体系、古气候特征、沉积微相类型、沉积体系及演化过程进行了研究。结果表明: 四川盆地凉高山组沉积时期, 发育龙门山中段和北段、米仓山、南秦岭、大巴山及雪峰古隆 6 个主要物源; 盆地内气候早期炎热干旱, 中期转变为温暖湿润气候, 至晚期再次炎热干旱; 发育分流河道、分流河道间、水下分流河道、水下分流河道间、河口坝、席状砂、滨滨浅湖滩坝、浅湖泥及半深湖泥 9 类沉积微相; 凉高山组沉积时期, 受周缘山系强弱交替隆升影响, 盆地东部、东北部基底发生挠曲并快速沉降, 形成大巴山前陆盆地, 构成东陡西缓古构造格局及多物源供给体系; 受构造活动、气候变化及古地貌影响, 凉高山组沉积早期湖盆沉积与沉降中心均分布于川东、川东北地区; 中期气候湿润, 陆源输入增加, 沉积中心迁移至川中地区, 沉积与沉降中心发生错位; 晚期湖盆填平补齐, 逐渐萎缩。

关键词 沉积模式 沉积演化 沉积相 物源特征 凉高山组 中侏罗统 四川盆地

第一作者简介 张釜源, 男, 1999 年生, 在读硕士研究生, 储层地质学及非常规油气地质。E-mail: 1062056522@qq.com。

通讯作者简介 祝海华, 男, 1987 年生, 副教授, 博士, 储层地质学及非常规油气地质。E-mail: zhhsupu@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Provenance characteristics and sedimentary evolutionary model of
the Middle Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan BasinZHANG Fuyuan¹ ZHU Haihua¹ ZHANG Benjian² WANG Minglei³ LIN Sichen¹
ZHANG Rui² YANG Xilin¹ LI Yucong² WANG Xingzhi¹

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil Gas Field Company, Chengdu 610041, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

* 中石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目 (编号: 2020CX050103) 及国家自然科学基金项目 (编号: 42202176) 联合资助。
[Co-funded by the Science and Technology Cooperation Project of the CNPC-SWPU Innovation Alliance (No. 2020CX050103) and National Natural Science Foundation of China (No. 42202176)]

收稿日期: 2024-01-29 改回日期: 2024-07-02

Abstract The Middle Jurassic Lianggaoshan Formation in the Sichuan Basin is one of the key hydrocarbon-bearing strata; however, its macro-scale sedimentary systems and evolutionary processes remain poorly understood, and a comprehensive basin-scale sedimentary model is lacking. This study integrates data from heavy and light mineral analyses, core and well logs, palynology, trace elements, and field outcrops to investigate the provenance systems, paleoclimatic conditions, sedimentary microfacies types, sedimentary systems, and their temporal evolution across different depositional intervals of the Lianggaoshan Formation. The results identify six primary provenance areas active during the deposition of the Lianggaoshan Formation: the central and northern Longmen Mountains, the Micang Mountains, the southern Qinling Mountains, the Daba Mountains, and the ancient Xuefeng Uplift. The basin experienced a climatic transition from hot and arid conditions in the early stage, to warm and humid in the middle stage, and a return to hot and arid conditions in the late stage. Nine types of sedimentary microfacies were recognized, including braided channels, interdistributary areas, subaqueous distributary channels and interdistributary zones, estuarine bars, sheet sands, coastal and shallow lacustrine bars, shallow lacustrine mud, and semi-deep lacustrine mud. During the Lianggaoshan depositional period, alternating uplift of surrounding mountain ranges led to flexural subsidence of the eastern and northeastern basin basement, forming a foreland basin in front of the Daba Mountains. This process established a paleo-tectonic framework characterized by a steep eastern and gentle western margin, with multiple sediment source systems. In the early stage, both the depositional and subsidence centers were concentrated in eastern and northeastern Sichuan due to active tectonism, climate variation, and paleotopography. In the middle stage, increased humidity led to enhanced terrigenous input, and the depositional center shifted toward central Sichuan, resulting in a spatial offset between deposition and subsidence centers. By the late stage, the lake basin was filled and gradually contracted.

Key words depositional model, sedimentary evolution, sedimentary facies, provenance, Lianggaoshan Formation, Middle Jurassic, Sichuan Basin

About the first author ZHANG Fuyuan, born in 1999, is a masteral candidate. He is engaged in reservoir geology and unconventional oil and gas geology. E-mail: 1062056522@qq.com.

About the corresponding author ZHU Haihua, born in 1987, is an associate professor and Ph.D. He is engaged in reservoir geology and unconventional oil and gas geology. E-mail: zhhswwp@163.com.

四川盆地属于在扬子地块基础上发展起来的大型叠合盆地（何登发等，2011），是中国最重要含油气盆地之一（陈洪德等，2007），“十三五”（2016—2020年）油气资源评价显示，盆地天然气资源总量约为 $40 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，居中国首位，截至 2022 年底探明地质储量约为 $7.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，具有巨大的勘探开发潜力（杨雨等，2023）。侏罗系作为四川盆地页岩油重要勘探层系（陈世加等，2015；杨跃明等，2016），近年来取得突破性进展，2021 年平安 1 井获日产油 112.8 m^3 、日产气 $11.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ （何文渊等，2022），同年泰页 1 井获日产油 9.8 m^3 、日产气 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ （胡东风等，2021），

2023 年巴中 1HF 井获日产油 126 m^3 ，日产气 $5.77 \times 10^4 \text{ m}^3$ （胡东风等，2023），显示良好的开发潜力。

凉高山组是四川盆地侏罗系油气重要产层之一（何文渊等，2022），受构造活动和古气候的影响，凉高山组物源供给及湖盆分布存在变迁（刘君龙等，2016；成大伟等，2023），进一步影响盆内沉积相带展布（李英强和何登发，2014），造成时空上沉积模式差异。前人对凉高山组物源特征及沉积特征已有部分研究：如凉高山组整体为湖泊—三角洲前缘沉积（胡东风等，2021）；川西—川北地区大巴山、龙门山具有“长短轴共存，近源远源汇砂”物源分布特征

(雷涛等, 2015; 刘君龙等, 2016; 钱利军等, 2016); “二分”层序地层结构下川东凉高山组具有三角洲前缘—前三角洲—半深湖—三角洲前缘—滨浅湖沉积演化过程(易娟子等, 2022); 高分辨率层序划分揭示川中沉积相带展布规律及演化过程(刘露, 2017; 仲泉城, 2018; 张天舒等, 2019)。上述研究多局限于盆地特定区块, 对盆地级别凉高山组小层物源供给体系、沉积模式及湖盆迁移过程的认识存在不足, 而最近基于凉高山组四级层序划分方案指出湖盆迁移需结合构造活动和古气候进一步明确(成大伟等, 2023), 为后期研究提出了思路。构造活动、古气候条件是沉积的基本控制因素(McCann and Saintot, 2000), 其地质记录对重建盆地物源体系及沉积演化过程具有重要参考意义。因此, 基于凉高山组“三分”地层划分方案, 利用重点井和野外露头样品的轻矿物、重矿物、孢粉、微量元素数据, 并筛选 485 口井的测井资料, 结合区域构造背景, 对凉高山组物源体系、古气候特征、沉积微相类型及沉积相分布进行总结, 建立凉高山组各段沉积模式并恢复沉积演化过程, 以期对凉高山组油气勘探开发提供一定的参考作用。

1 地质背景

1.1 构造地层特征

四川盆地属于扬子台地的一级构造单元, 是一个在前震旦系结晶基底上发育震旦纪—中三叠世(或晚三叠世早期)的海相沉积和晚三叠世(晚期)—第四纪陆相沉积的大型叠合盆地(何登发等, 2011)。四川盆地于印支期形成盆地雏形, 后经喜马拉雅运动发生褶皱变形而形成现今四周环山的构造格局, 根据地貌特征划分为川北低缓构造带、川西低陡构造带、川中平缓构造带、川西南低褶构造带、川南低陡构造带和川东高陡构造带(图 1-a)(何文渊等, 2022)。

中晚三叠世, 勉略洋关闭及秦岭造山带隆起, 四川盆地主体结束海相沉积, 晚三叠世以来开始接受大陆碎屑沉积(成大伟等, 2023)。四川盆地侏罗系以碎屑岩为主, 夹灰岩, 分布面积达 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地层厚度为 500~4500 m, 呈南薄北厚特征(李英强和何登发, 2014)。盆内中下侏罗统自下而上依次发育下侏罗统自流井组、中侏罗统凉高山组及沙溪庙组(图 1-b)。中侏罗统凉高山组在盆内不同区域存在多个岩相分区, 其同期异相在不同区域分别称为新田沟组和千佛崖组(黄迪颖,

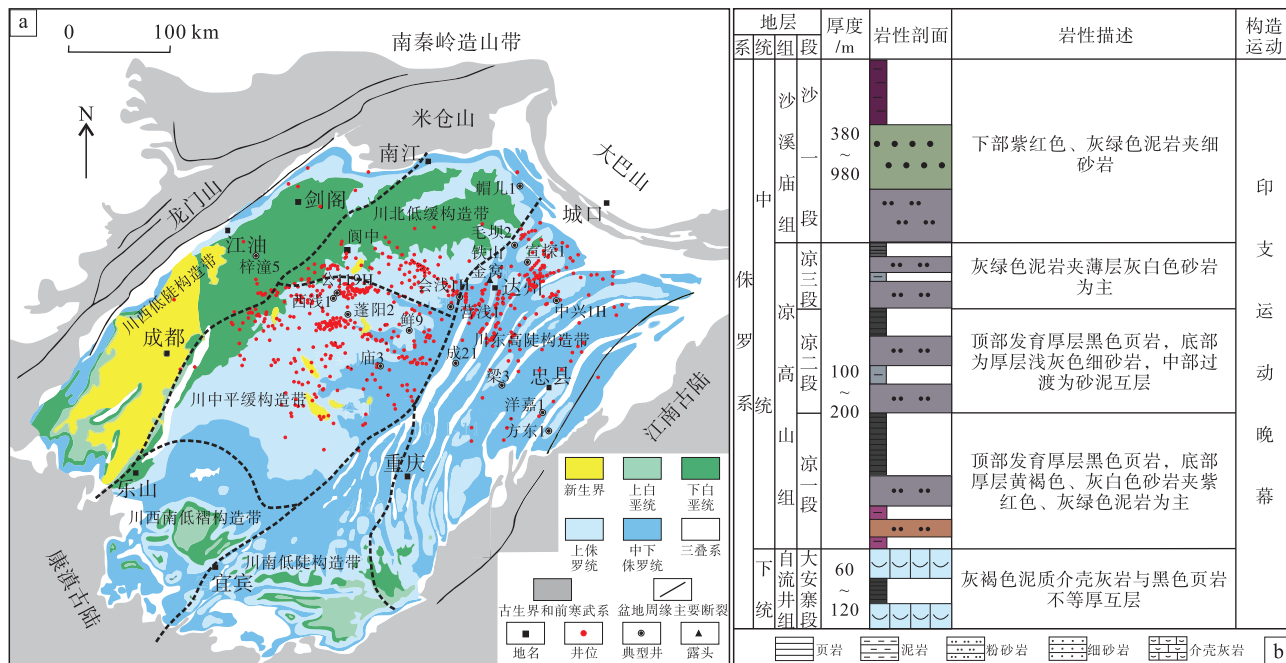


图 1 四川盆地地质简图 (a) 及中下侏罗统综合柱状图 (b) (据成大伟等, 2023; 有修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Sichuan Basin (a) and stratigraphic column of Middle-Lower Jurassic, Sichuan Basin (b) (modified from Cheng *et al.*, 2023)

2019), 本文将其统称为“凉高山组”。

凉高山组发育 2 套湖侵形成的厚层黑色页岩, 测井曲线上表现为高 GR、高 AC 和低电阻特征, 据此可将凉高山组内部划分为凉一、凉二、凉三 3 个段 (Fang *et al.*, 2023)。

1.2 沉积特征

中侏罗世凉高山组沉积时期是四川盆地中生代构造与沉积演化的重要转换阶段 (成大伟等, 2023)。凉高山组整合于大安寨段之上, 凉一段沉积早期继承了大安寨段晚期沉积格局, 湖泊进一步萎缩, 大规模湖侵发生于凉一段沉积中期, 并于凉一段沉积晚期达到最大, 此后湖泊逐渐萎缩直至消亡, 经历了湖侵—最大湖泛—湖退的演化序列 (Qing *et al.*, 2019)。受周缘造山带构造活动及古气候影响, 湖盆存在频繁湖进—湖退以及大范围迁移, 整体为湖泊—三角洲沉积体系, 多物源供砂, 主要发育三角洲平原、三角洲前缘、滨浅湖、半深湖亚相 (成大伟等, 2023)。岩性以泥页岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩及细砂岩为主, 砂泥频繁互层 (图 1-b) (易娟子等, 2022)。

2 物源分析

基于 31 口井重矿物数据、62 口井和 3 条野外露头剖面轻矿物及岩屑类型数据, 开展四川盆地凉高山组物源分析, 结果显示分区性明显, 可划分出北部 (I 区)、东北部 (II 区)、西北部 (III 区)、西部 (IV 区)、东南部 (V 区)、西南部 (VI 区) 及中部 (VII 区) 7 个区, 反映 6 个主要物源方向 (图 2; 图 3), 为后续沉积相展布研究提供了支撑。

2.1 重矿物分区特征

凉高山组重矿物类型多样, 主要重矿物有石榴子石、电气石、绿帘石、白钛石和锆石 5 种, 次要矿物有褐铁矿、锐钛矿、金红石、磷灰石和榍石 5 种, 含量低且不稳定的重矿物有铁白云石、辉石、铬尖晶矿和独居石 4 种, 平面上具有以下特征:

1) 主要重矿物组合为石榴子石+绿帘石+白钛石+锆石, 含量介于 44%~99.82% 之间, 平均 77.92% (图 2)。

2) 不同区块主导重矿物类型分区性明显, 石

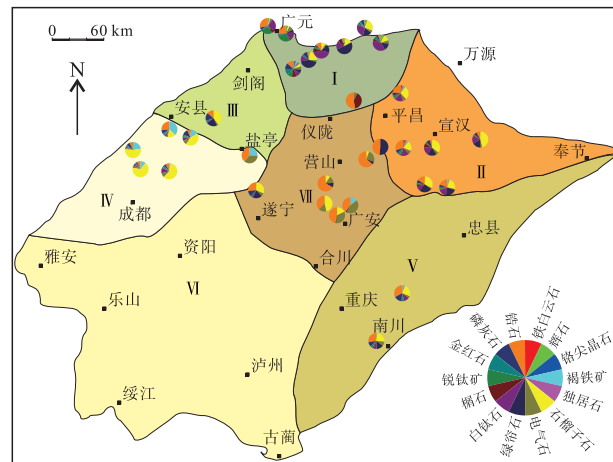


图 2 四川盆地凉高山组重矿物分区特征

(部分数据引自钱利军, 2013; 雷涛等, 2015)

Fig. 2 Sandstone heavy minerals distribution of the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin (part of the data cited from Qian, 2013; Lei *et al.*, 2015)

榴子石在 II、III、IV 区含量普遍较高, 介于 15.84%~66.67% 之间, 平均 37.98%; 锆石在 V、VII 区含量高且稳定存在 (27.6%~67.06%, 平均 45.85%), I 区少数井锆石含量可达 20% 以上; 白钛石主要分布于 I、II 区带内 (8.7%~38.6%, 平均 20.18%); 绿帘石主要在 I、II、III 区发育 (0%~51.43%, 平均 18.54%) (图 2)。

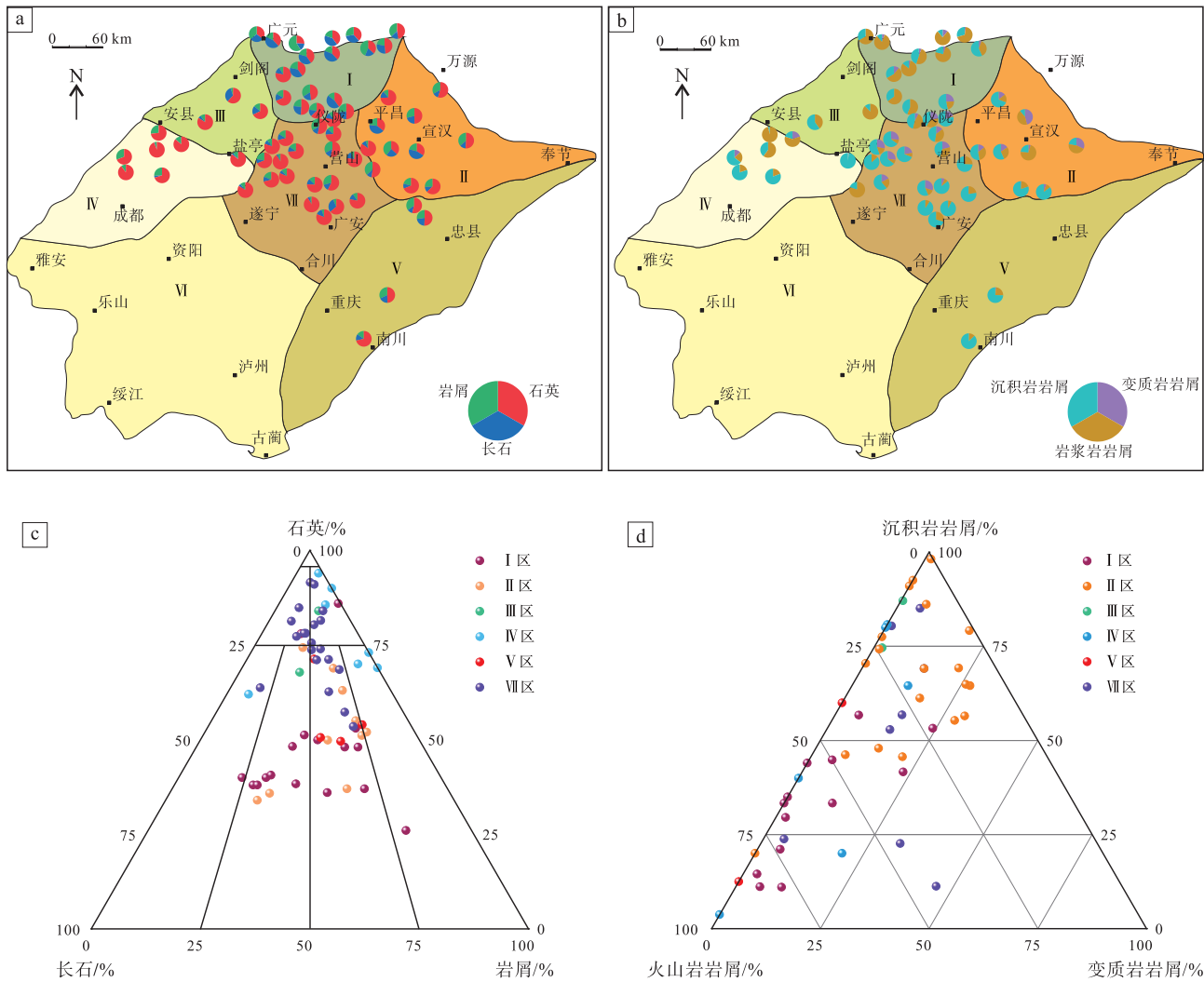
3) 主要重矿物绿帘石在 IV 区不发育, 白钛石仅在 VII 区文 4 井发育 (22%), 中部以东地区不发育 (图 2); 次要矿物褐铁矿含量变化较大 (0%~37.62%, 平均 4.73%), 集中发育于 IV 区 (3%~37.62%, 平均 18.98%); 不稳定重矿物辉石在 I 区普遍可见 (0%~7.1%, 平均 3.3%), II 区含量次之 (0%~1.57%, 平均 0.73%), 其他区块不发育 (图 2)。

2.2 碎屑组分特征

统计结果表明, 凉高山组砂岩碎屑组分具有明显的分区性, 表现为:

1) 石英含量自南西向北东方向逐渐减少 (图 3-a)。III、IV 区及 VII 区中部以西地区石英含量普遍较高 (62%~94%, 平均 79.97%), VII 区中部以东及 I、II 区石英含量大幅减少 (26%~86%, 平均 53.74%) (图 3-a, 3-c)。

2) 长石分布较为集中, 主要发育于 I 区及 II



a—碎屑组分分区特征；b—岩屑类型分区特征；c—碎屑组分三端元图；d—岩屑类型三端元图

图 3 四川盆地凉高山组碎屑组分分区特征及碎屑组分三端元图

(部分数据引自钱利军, 2013; 雷涛等, 2015; 仲泉城, 2018; 胡东风等, 2023)

Fig. 3 Partition characteristics of clastic components and three-endmember diagram of clastic components of Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin (part of the data cited from Qian, 2013; Lei *et al.*, 2015; Zhong, 2018; Hu *et al.*, 2023)

区以西少数地区 (0.5% ~ 45.5%, 平均 27.4%) (图 3-a, 3-c)。

3) 岩屑分布具有由盆地边缘向盆地中心逐渐减少的特征(图 3-b), I 区 (平均 26.97%)、II 区 (平均 27.76%)、IV 区 (平均 16.4%)、V 区 (平均 27.45%) 岩屑含量均明显高于盆地中部 VII 区 (平均 13.65%)(图 3-b, 3-d)。

4) 岩屑类型分区性明显(图 3-b, 3-d)。变质岩岩屑主要分布于 II 区、VII 区以北及 I 区以南 (1.2% ~ 46.02%, 平均 19.28%), VII 区中部以南不发育(图 3-b, 3-d); 岩浆岩岩屑自北向南含量递减, 北部 I 区含量最高 (22.49% ~ 83.33%, 平

均 59.56%), 中部 VII 区大幅减少 (0.46% ~ 80%, 平均 20.66%), 南部 V 区含量最低 (12.45% ~ 23.45%, 平均 17.95%)(图 3-b, 3-d); 沉积岩岩屑则自北向南逐渐增加, I 区含量最低 (11% ~ 56.75%, 平均 33%), 中部 VII 区含量大幅增长 (20% ~ 98.17%, 平均 66.93%), 南部 V 区含量最高 (74.6% ~ 87.1%, 平均 80.95%)(图 3-b, 3-d)。

2.3 物源区讨论

I 区主要重矿物组合以白钛石+绿帘石为主 (西北缘局部地区除外), 碎屑组分特征一致 (中石英+中长石+富岩屑), 富含岩浆岩岩屑及沉积岩

岩屑,说明大物源背景一致,而北部秦岭造山带在这一时期的持续北东-南西向挤压、构造隆升(钱利军,2013),使得北缘米仓山新元古界花岗岩及南秦岭中部上三叠统岩浆岩出露并遭受剥蚀(何登发等,2011; Dong *et al.*, 2012; 谢晋强, 2014; 成大伟等, 2023),推断为该区带主要物质来源,局部地区可能受西部物源影响。

Ⅱ区主要重矿物组合基本一致(石榴子石+绿帘石+锆石+白钛石),不稳定重矿物含量较高(绿帘石),碎屑组分富含变质岩岩屑,说明Ⅱ区为近源搬运沉积,而临近的大巴山、东秦岭以及扬子板块北缘广泛分布前寒武系变质岩,再结合凉高山组沉积时期大巴山构造隆升背景(Dong *et al.*, 2013),推断大巴山及扬子板块北缘为Ⅱ区主要物源区。

Ⅲ区、Ⅳ区主要重矿物组合相似(高石榴子石),碎屑组分具有高石英、贫长石特征,富含沉积岩岩屑和岩浆岩岩屑,说明大物源背景一致,而西部龙门山出露元古界火山碎屑岩及岩浆岩基底(李英强,2018),并在这一时期保持缓慢隆升剥蚀状态(曾允孚和李勇,1995; Clark *et al.*, 2005),可能是Ⅲ区、Ⅳ区主要物源区,而Ⅳ区向Ⅲ区的长石及岩浆岩岩屑含量逐渐增加,且组分特征逐渐向Ⅰ区同化,说明Ⅲ区除龙门山北段物源外还受到北部米仓山物源影响,属于混源沉积。

Ⅴ区主要重矿物特征以锆石+石榴子石+白钛石+磷灰石为主,碎屑组分特征一致,富含沉积岩岩屑,而晚三叠世至早白垩世末期受印支运动晚幕影响导致雪峰古隆起再次抬升,核部新元古界岩体

遭受剥蚀(何登发等,2011; 陈洪德等,2012),可能为Ⅴ区提供沉积岩岩屑(杨帅,2014),并逐渐扩展影响到Ⅱ区南缘。Ⅶ区轻重矿物组合特征与周缘区带可对比,为混源区(表1)。

综上所述,凉高山组沉积时期龙门山中段、北段为盆地西北部主源区,米仓山及南秦岭为盆地北部主源区,大巴山为盆地东北部主源区,雪峰古隆为盆地东南部主源区,其余方向为次要源区。

3 孢粉组合及古气候特征

古气候是控制物源区母岩风化剥蚀强度的重要因素,并进一步影响了物源输入及盆内沉积充填过程(Warren,2010)。孢粉记录是较好的、最受重视的环境重建指标之一,被广泛应用于古环境重建(Guiot *et al.*, 1989; Xu *et al.*, 2010)。植物对气候变化极为敏感(Vajda *et al.*, 2017),通常桫欏孢(*Cyathidites*)和三角孢(*Deltoidospora*)的组合指示温暖湿润气候(杜宝安,1985; Frakes *et al.*, 1992; 黄斌和李建国,2007; Xu *et al.*, 2023); 裸子植物 *Cheirolepidiaceae* 科的喜暖针叶树及其花粉克拉梭粉(*Classopollis*)则被解释为半干旱和干旱气候的指标(Hallam *et al.*, 1993; Heimhofer and Hochuli, 2017)。特定元素相对浓度也是重建古环境重要指标(Wu *et al.*, 2022)。其中, *C* 值为易于潮湿环境富集元素之和与易于干旱环境富集元素之和的比值, $C > 0.6$ 时,指示温暖湿润气候, $C < 0.6$ 则指示较为干旱的气候(Yu *et al.*, 2022)。

基于铁山剖面露头,测定了多套页岩微量元素含量,得出相应 *C* 值(图4),另外,前期研究在

表 1 四川盆地中侏罗统凉高山组物源分析

Table 1 Provenance analysis of the Middle Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

区块	主要重矿物组合	轻矿物特征	岩屑类型特征	物源区	母岩性质
I	白钛石+绿帘石	中石英+中长石+富岩屑	岩浆岩+沉积岩	米仓山、南秦岭	新元古界花岗岩、上三叠统岩浆岩
II	石榴子石+绿帘石+锆石+白钛石	中石英+少长石+富岩屑	富变质岩	大巴山、扬子板块北缘	前寒武系变质岩
III	富含石榴子石	高石英+少长石+贫岩屑	沉积岩+岩浆岩	龙门山北段、米仓山、南秦岭	元古界碎屑岩、上三叠统岩浆岩
IV	富含石榴子石	高石英+少岩屑+贫长石	沉积岩+岩浆岩	龙门山中段、南段	元古界火山碎屑岩及岩浆岩
V	锆石+石榴子石+白钛石+磷灰石	高石英+中岩屑+少长石	沉积岩	雪峰古隆起	新元古界碎屑岩
VII	石榴子石+锆石+电气石+绿帘石	高石英	沉积岩+变质岩+岩浆岩	混源区	混源

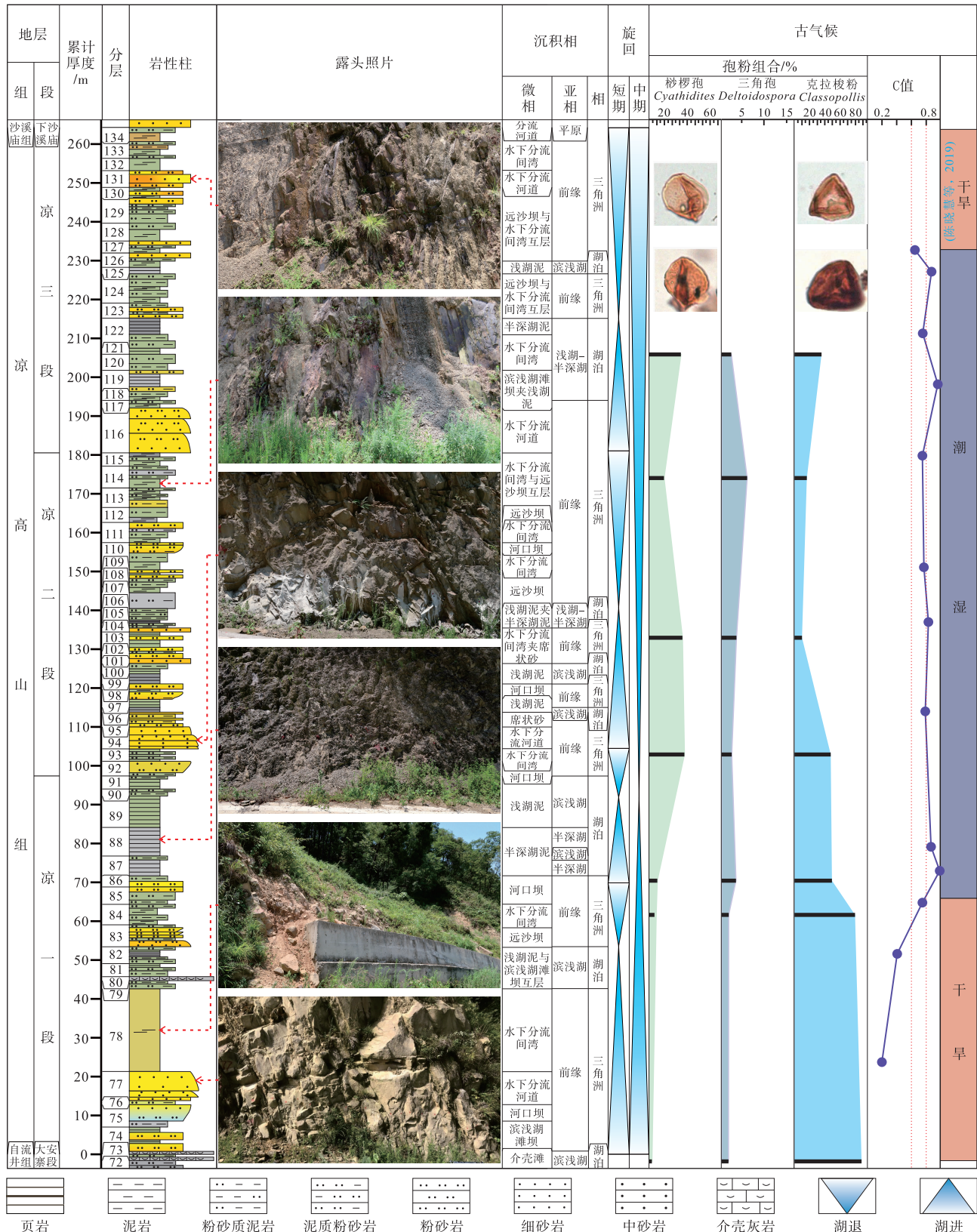


图 4 四川盆地达州铁山金窝剖面凉高山组综合柱状图及孢粉组合特征

Fig. 4 Comprehensive histogram and sporopollen assemblage characteristics of the Lianggaoshan Formation in Jinwo outcrop of Tieshan, Dazhou, Sichuan Basin

砂岩中共鉴定出桫欏孢（蕨类植物）(*Cyathidites*)、三角孢（蕨类植物）(*Deltoidospora*)、克拉梭粉（裸子植物）(*Classopollis*) 3 种孢粉组合(图 4)。其中，凉一段中下部主要以克拉梭粉为主，含量占 91%~95%，桫欏孢和三角孢的含量则较少；凉一段顶部、凉二、凉三段桫欏孢和三角孢的含量呈现迅速增加的趋势，最高含量达到 80%，而克拉梭粉的含量迅速降低，最低含量降至 20%(图 4)。

铁山剖面凉一段中下部孢粉组合主要以裸子植物花粉为主， $C < 0.6$ ，沉积大套黄色砂/泥岩，都指示着当时较为干旱的气候条件；凉一段上部至凉三段下部蕨类孢子比重呈现增加的趋势， C 值升高至 0.6 以上，发育多期黑色页岩，说明该阶段沉积环境逐渐转变为较为湿润的气候(图 4)；凉三段中部至沙一段底部可见红褐色砂泥岩沉积， C 值回落，预示此阶段开始向沙溪庙组极端干旱气候转变。这与重庆合川炭坝凉高山组（刘兆生，1982）、重庆北碚同期异相新田沟组及江油大康千佛崖组（王全伟等，2008）孢粉组合及古气候变化规律基本一致(图 4)，说明上述凉高山组古气候演变特征在盆内具有可对比性。

4 沉积相类型及特征

根据岩心及野外露头观察、测井相分析，四川盆地凉高山组主要发育三角洲相和湖泊相，进一步划分为 4 种亚相，9 种微相(图 5)，盆地西北缘局部地区发育冲积扇相。

4.1 三角洲相

4.1.1 三角洲平原

三角洲平原为三角洲沉积的水上部分，主要发育分流河道与泛滥平原微相。

1) 分流河道。分流河道砂体以浅灰色、黄褐色中一厚层中一细砂岩为主，纵向上具有正粒序特征。近源沉积，不稳定组分含量高。底部见砾石，常见块状层理(图 6-a)和槽状交错层理、楔状交错层理，顶底突变接触，表明水动力条件突然减弱或者物源中断。GR 曲线表现为中高幅微齿状箱型或钟型(图 5)。

2) 泛滥平原。泛滥平原岩性以泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主(图 6-b)，红褐色泥岩可指示其炎热干旱的古气候或长期暴露环境。可见平

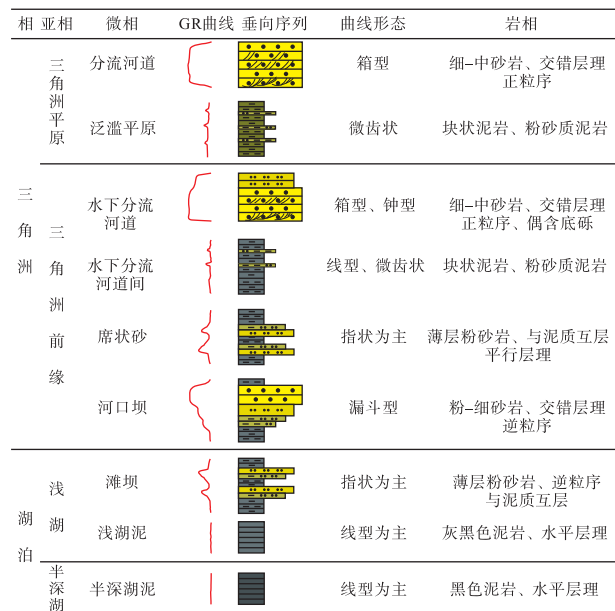


图 5 四川盆地凉高山组典型测井相图版

Fig. 5 Typical logging facies chart of the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

行层理及块状层理(图 6-b)。GR 曲线响应特征为近平直微齿状线型(图 5)。

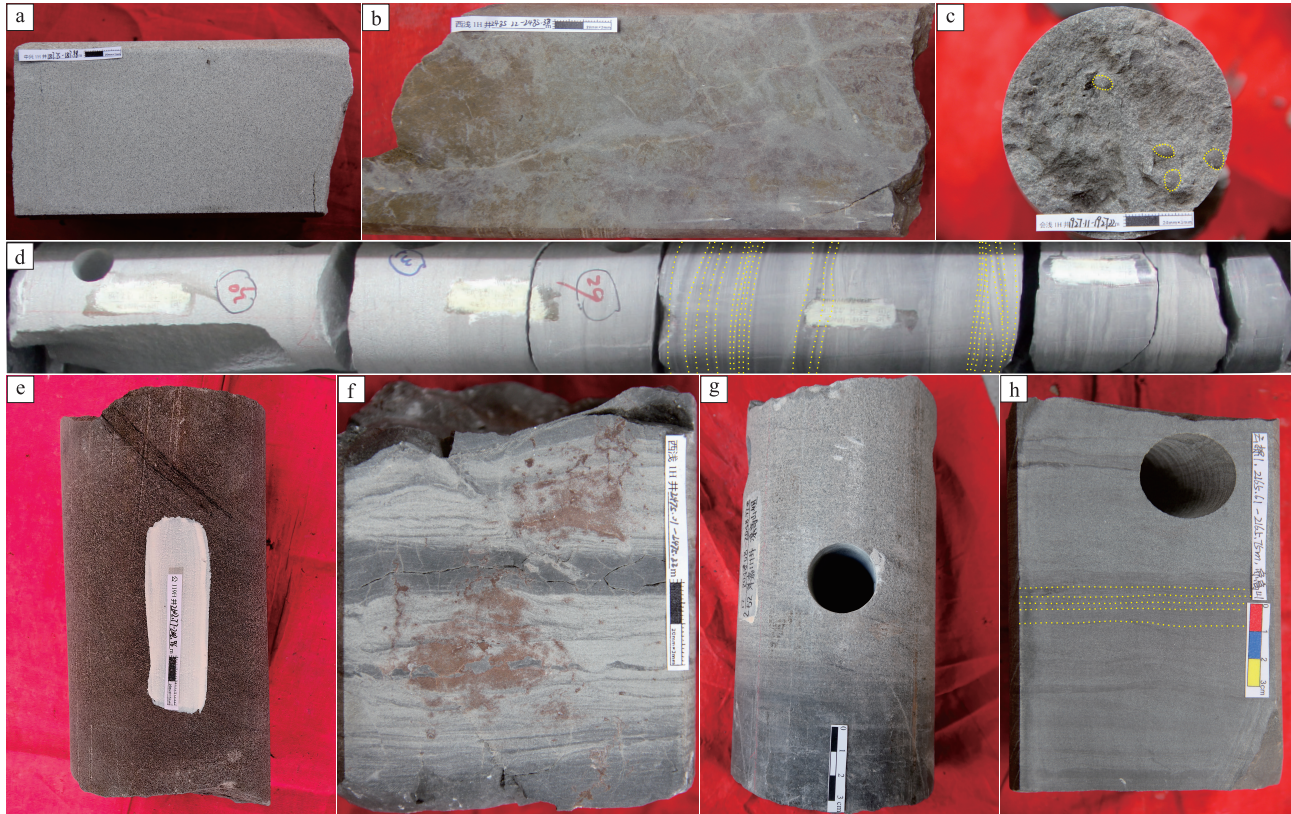
4.1.2 三角洲前缘

在多物源体系持续供给下，三角洲前缘亚相于盆内广泛分布，可划分出水下分流河道、水下分流间湾、河口坝、席状砂等沉积微相。

1) 水下分流河道。水下分流河道是三角洲平原分流河道在水下向湖内的延伸，具有与分流河道相似的结构构造特征及测井响应(图 5)，可根据垂向沉积序列加以区分。内部通常由多个下粗上细的透镜状砂体相互叠置。碎屑粒度随搬运距离增大有所减小，以中一厚层灰绿色或浅灰色细砂岩、粉砂岩为主，发育块状、平行层理及槽状交错层理、板状交错层理、楔状交错层理，局部可见生物潜穴和扰动(图 6-c, 6-d, 6-e)。

2) 水下分流河道间。水下分流间湾岩性主要为一套细粒悬浮成因的薄层灰一灰绿色、黄绿色、棕红色的泥岩、粉砂质泥岩，少量粉砂岩或泥质粉砂岩复合韵律互层组合(图 6-f)。常见水平层理、波状层理和透镜状层理(图 6-f)，表明安静的低能环境并伴有间歇性湖浪改造作用。常见较完整的植物茎、叶、果实化石以及介壳。GR 曲线为微齿线状(图 5)。

3) 河口坝。河口坝岩性上主要以薄一中层灰



a—浅灰色细砂岩, 块状层理, 分流河道, 中兴 1H 井, 井深 1817.75~1817.98 m; b—灰绿色、黄褐色、紫红色泥质粉砂岩, 块状层理, 泛滥平原, 西浅 1H 井, 井深 2485.22~2485.38 m; c—灰绿色细砂岩, 层面见介壳化石, 滨浅湖, 会浅 1H 井, 井深 1927.11~1927.22 m; d—灰白色细砂岩向上渐变为灰色细砂岩, 粉砂岩, 平行层理、小型交错层理、水平层理, 水下分流河道, 大页 1 井, 井深 1693.81~1694.30 m; e—黄褐色细砂岩, 块状, 水下分流河道, 公 119 井, 井深 2602.77~2602.96 m; f—灰白色粉砂岩夹泥质条带, 水下分流河道间, 波状层理、变形构造, 西浅 1H 井, 井深 2475.01~2474.22 m; g—灰色泥质粉砂、粉砂岩向上递变为灰白色细砂岩, 河口坝, 洋嘉 1 井, 井深 2048.68~2048.97 m; h—灰色泥质粉砂岩向上递变为粉砂岩, 水平层理, 河口坝, 云探 1 井, 井深 2165.61~2165.75 m

图 6 四川盆地凉高山组三角洲沉积微相典型沉积构造特征

Fig. 6 Typical sedimentary structure characteristics of delta sediments microfacies in the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

绿色粉砂岩、灰白色细砂岩为主, 少量泥质粉砂岩, 上部通常被河道切割, 发育较少且规模小, 纵向上呈逆粒序特征, 常见板状交错层理、楔状交错层理(图 6-g, 6-h), 坝体底部常见碳化植物碎屑。GR 曲线为反韵律漏斗状(图 5)。

4) 席状砂。席状砂厚度较薄, 砂质较纯。岩性多由细砂、粉砂组成, 夹薄层泥质, 常见平行层理, 沙纹层理少, GR 曲线为指状(图 5)。

4.2 湖泊相

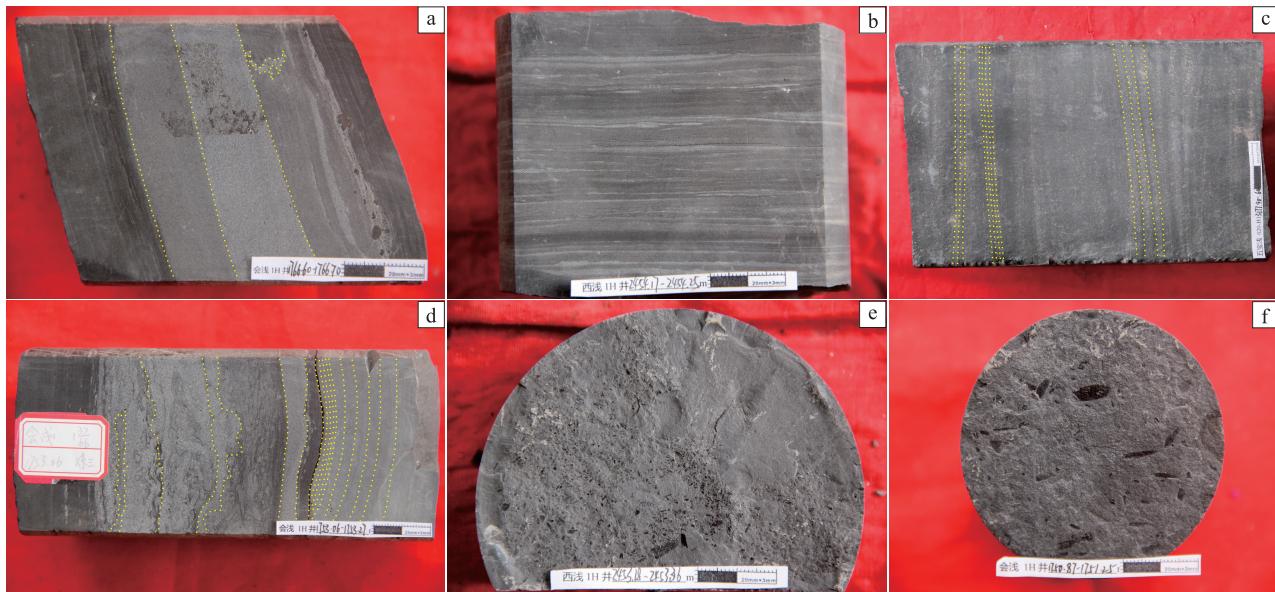
凉高山组沉积时期构造相对稳定, 盆地地形平缓, 气候不稳定, 存在短期干旱和潮湿的相互转换(陈晓慧等, 2019), 以滨浅湖为主, 半深湖分布面积较小。

4.2.1 滨浅湖

滨浅湖亚相水体深度较浅, 受湖浪的改造作用较强, 动植物种类繁多。主要沉积微相为滨浅湖滩坝和浅湖泥。

1) 滨浅湖滩坝。滨浅湖滩坝微相由于受湖浪的反复冲洗作用, 岩性以中—薄层细—粉砂岩为主, 常见平行层理、浪成沙纹层理等沉积构造, 局部可见波痕, 虫迹发育, 偶见少量碳化植物碎片, 成层性良好(图 7-a, 7-d)。GR 曲线为厚层齿状漏斗型或薄层指状(图 5)。

2) 浅湖泥。浅湖泥微相主要形成于水深位于浪基面附近或之下, 并有间歇性湖浪改造作用的低能弱还原环境, 以中—薄层灰绿色泥页岩、灰色泥页岩、灰绿—黄绿色粉砂质泥岩或含粉砂泥岩为



a—灰色粉砂岩、泥质粉砂岩与泥质互层，水平纹层，生物扰动，滨浅湖滩坝，会浅 1H 井，井深 1766.60~1766.70 m；b—灰色泥页岩与灰绿色粉砂质泥岩互层，水平层理，浅湖泥，西浅 1H 井，井深 2454.17~2454.25 m；c—灰黑色泥页岩，平行层理，半深湖泥，五宝浅 020-H1 井，井深 3177.40~3177.64 m；d—浅灰色粉砂岩夹泥质条带，浪成沙纹层理、变形构造、生物扰动强烈，滨浅湖滩坝，会浅 1H 井，井深 1753.06~1753.27；e—灰色泥页岩，碳质植物碎屑，浅湖泥，西浅 1H 井，井深 2453.18 m；f—灰黑色泥页岩，碳质植物碎屑，半深湖泥，会浅 1H 井，井深 1750.87 m

图 7 四川盆地凉高山组湖泊沉积微相典型沉积构造特征

Fig. 7 Typical sedimentary structure characteristics of lacustrine sedimentary microfacies in the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

主，发育水平层理，见碳质碎屑(图 7-b, 7-e)。GR 曲线为微齿状线型(图 5)。

4.2.2 半深湖

半深湖亚相属于深水还原环境，以发育大套灰色、黑色页岩为典型特征，偶夹厘米级深灰色粉砂岩、粉砂质泥岩或介壳层，测井响应特征为高伽马、高声波、低电阻，低幅微齿线状。发育水平层理，见碳质碎屑(图 7-c, 7-f)。GR 曲线为微齿状线型(图 5)。

4.3 冲积扇

该相带仅在盆地西缘龙门山北段安县地区发育(刘君龙等, 2016)，由山前带或陡崖朝邻近低地延伸的扇形沉积体。岩性以大套厚层灰色、灰褐色砾岩或砾岩夹砂岩沉积为主，扇端可见黄绿色粉砂岩及杂色泥岩，含钙质结核，具有典型沉积相标志洪积层理。GR 曲线呈低幅箱型。

5 沉积相空间展布特征

5.1 沉积相连井剖面对比

在上述研究基础上，选取研究区 8 口井建立北

东—南西向连井相剖面，结合地震剖面进行沉积相分析。结果表明，平面上地层整体呈西薄东厚特征，西侧地形坡度平缓，东侧地层厚度急剧变化。地震剖面上可见 2 期低速波谷特征页岩向西逐渐上超尖灭，凉一段湖盆沉积中心主要发育在川东地区，凉二段湖盆沉积中心向中部迁移，凉三段湖盆震荡并逐渐消亡(图 8-a)。剖面上，凉一段底部沉积 1 套陆上沉积，由高石 1 井向营山 114 井逐渐减薄，中上部为大面积滨浅湖沉积，顶部于营山 109-营山 114 井一带发育半深湖，三角洲砂体主要分布于盆地边缘，延伸距离短且连续性差；凉二段下部两端陆上沉积向中部推进，纵向上砂体沉积期次较凉一段发育，横向上砂体向沉积中心延伸，滨浅湖沉积范围缩小，半深湖沉积向西迁移至合川 111 井-营山 109 井一带；凉三段两端陆上沉积向岸退积，河道砂体主要分布于广安 8 井以东，西部多以薄层滩坝沉积为主，滨浅湖沉积广泛分布，纵向发育 1~3 套广泛分布的薄层半深湖沉积(图 8-b)。

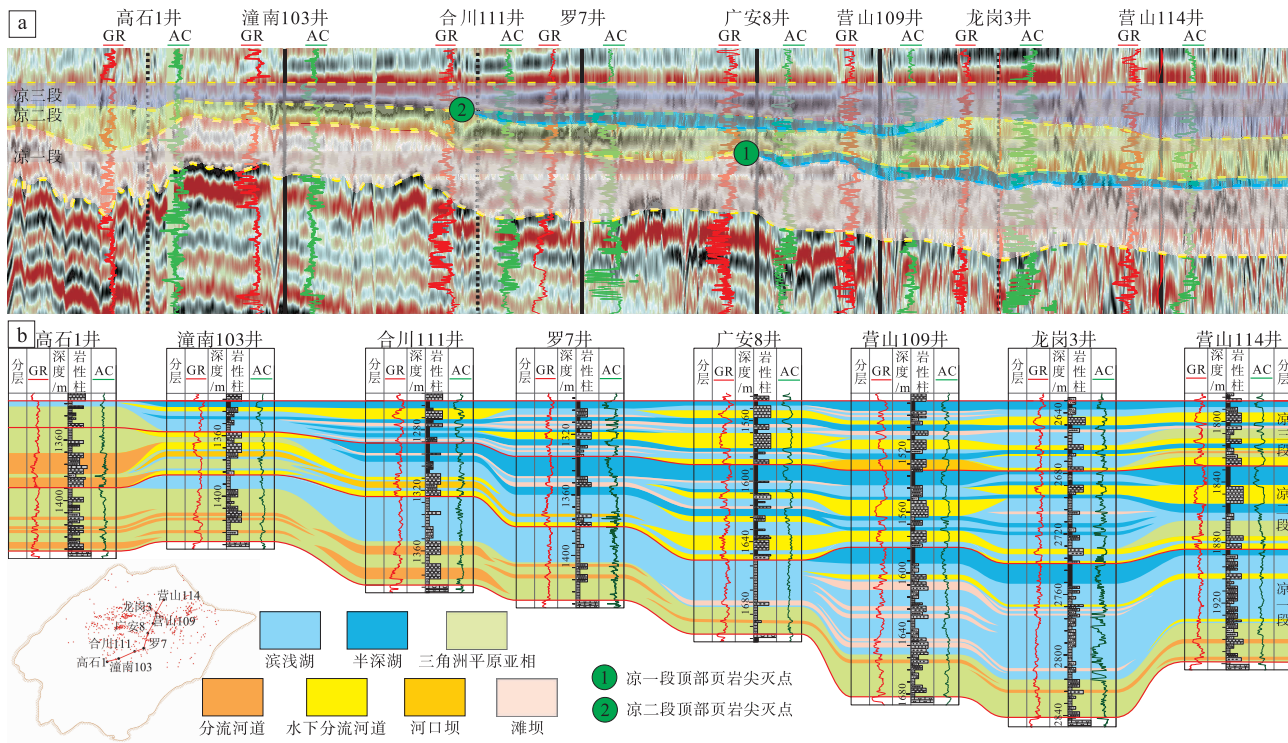


图 8 四川盆地凉高山组北东—南西向地震剖面 (a) 及连井沉积相对比剖面 (b)

Fig. 8 NE-SW seismic profile (a) and corresponding sedimentary correlation profile (b) of the Liangaoshan Formation in Sichuan Basin

5.2 沉积相平面展布

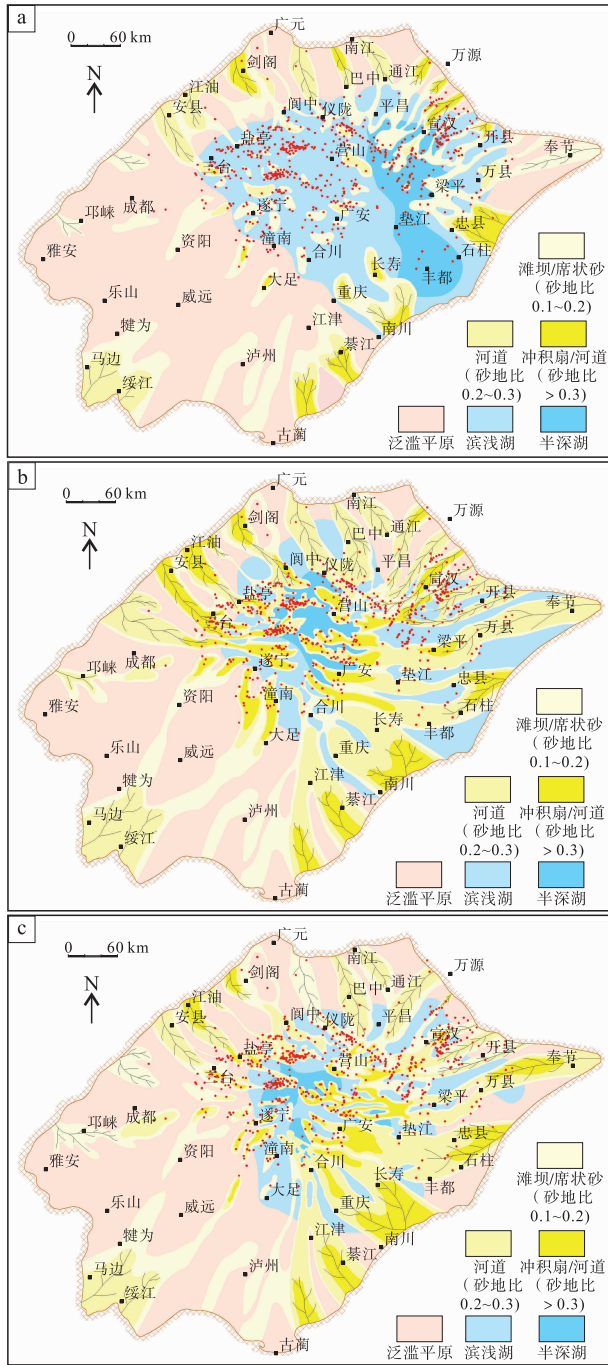
基于物源分析、沉积微相分析及 485 口井的钻测井资料，整理出凉高山组各小段砂地比值，绘制各小段砂岩等值线与沉积相叠合图(图 9)，明确凉高山组沉积相平面展布规律。

凉一段沉积时期滨浅湖发育，岸线位于南川—中江—通江一线及开县—忠县东一线(图 9-a)。该时期盆内平均含砂量约为 30%；盆地北部、东北部、东南部及南部均分布有含砂量大于 30% 的相对富砂带，呈朵状发育。含砂量在 20%~30% 之间的相对贫砂带环带状分布于富砂带周缘；含砂量小于 20% 的贫砂带在盆内分布广泛，在盆缘呈近平行条带状向盆内延伸，于前端汇聚呈连片状，盆地中部贫砂带呈离散片状分布(图 9-a)。沉积体系包括冲积扇、三角洲、湖泊。盆内(除西南部)辫状河三角洲以三角洲平原亚相为主体，盆缘至岸线间泛滥平原和分流间湾为主，分流河道呈细窄条带状垂直岸线展布；三角洲前缘发育规模较小，仅东部发育群带状水下分流河道，河道间发育大面积水下分流间湾。西南部发育小规模曲流河沉积，向

盆内延伸距离短，远离岸线。安县以北地区发育小型冲积扇沉积，向前过渡为冲积平原呈狭长带状展布，向盆内延伸至岸线附近；中部滨浅湖内发育大量滩坝砂体，受湖浪改造呈离散状分布；东南缘半深湖—深湖亚相发育，以暗色泥岩为主(图 9-a)。

凉二段沉积时期湖盆发生迁移，湖岸线位于宣汉—旺苍南—盐亭—遂宁—南川一线(图 9-b)。该时期盆内平均含砂量约 40%。含砂量大于 30% 的相对富砂带较凉一段发育，向盆内推进至中部地区，分布较广，连续性好；含砂量 20%~30% 的相对贫砂带分布广泛，是凉二段砂体主要格架，含砂量小于 20% 的贫砂带主要分布于西部地区(图 9-b)。区域内主要沉积相类型变化不大，但受岸线迁移影响，东部三角洲平原退至盆外，北部界限均有不同程度前进或后退，三角洲前缘亚相发育规模增大，曲流河延伸入湖形成曲流河三角洲。整体河道密度及规模相对增大，河道间范围相对减小，滩坝砂体相对不发育(图 9-b)。

凉三段沉积时期湖盆面积逐渐减小，湖岸线位于大足—阆中—开县—丰都沿线(图 9-c)。该时期盆内砂体分布与凉二段基本一致，仅西北部及西



a—凉一段沉积时期；b—凉二段沉积时期；c—凉三段沉积时期

图 9 四川盆地凉高山组砂岩等值线与沉积相叠合图

Fig. 9 Sandstone isoline and sedimentary facies superposition diagram of the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

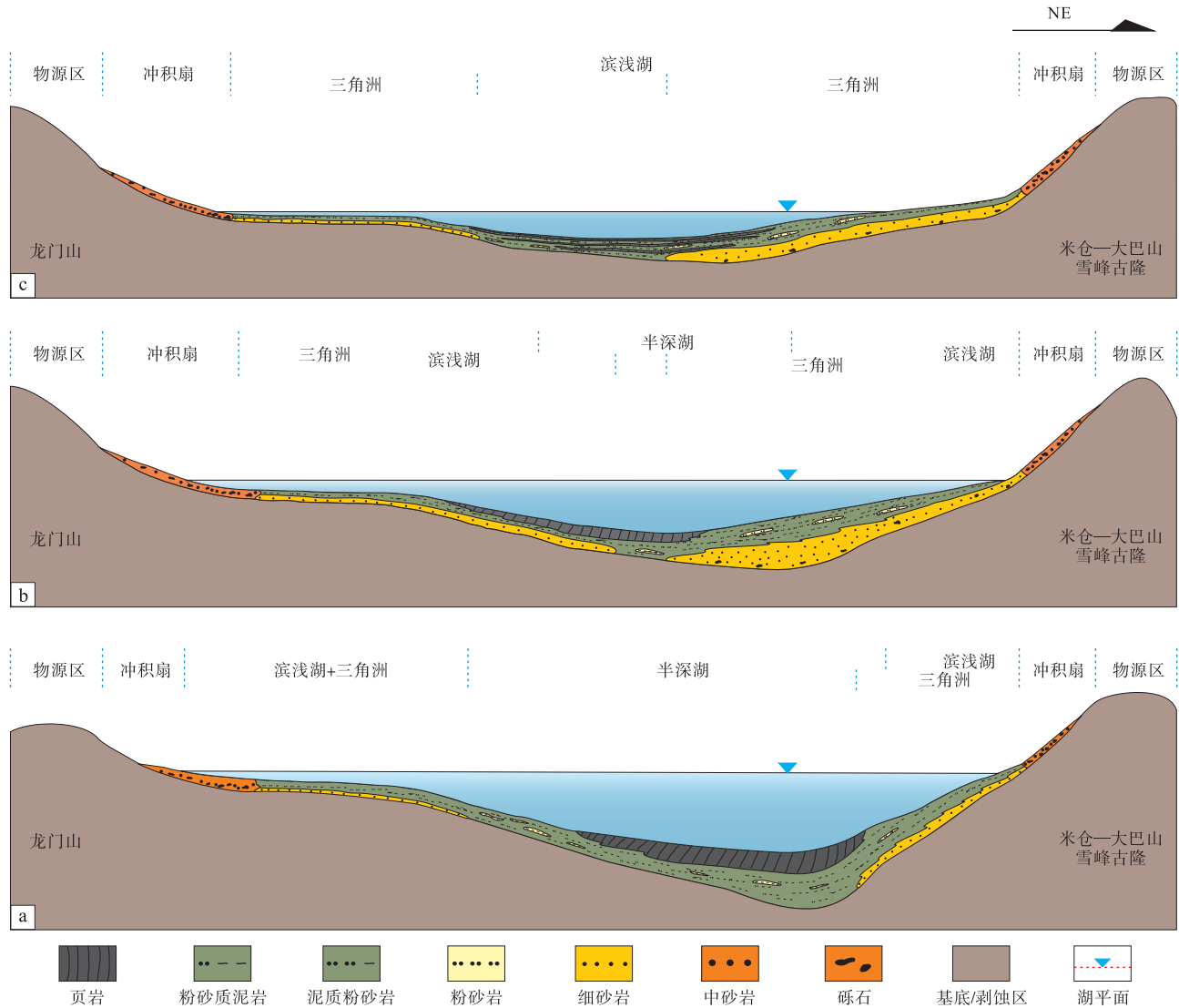
南部规模有所减小(图 9-c)。沉积相类型保持一致,但湖盆向中部萎缩导致三角洲平原向中部推进,三角洲前缘相对减小,曲流河退至岸线外,河道砂体密度及规模除东南部外均有不同程度减小,河道间面积相对增加,中部滩坝砂体发育(图 9-c)。

6 沉积演化模式

四川盆地于中晚三叠世勉略洋关闭之后开始接受陆相沉积 (Chao *et al.*, 2023; 成大伟等, 2023), 中上扬子地区进入与新提斯特洋演化密切相关时期, 早侏罗世—中侏罗世早期的沉积构造背景由三叠世汇聚挤压转变为弱拉张环境, 盆内表现为弱伸展拗陷, 扬子板块北缘前陆盆地形成锥形 (李英强和何登发, 2014), 并于中侏罗世凉高山组沉积时期迁移至大巴山前 (邓宾, 2013; 刘君龙等, 2016), 形成东陡西缓古地理格局。周缘造山带由早侏罗世安静稳定状态逐渐转变为强弱交替挤压隆升 (陈竹新等, 2008; 何登发等, 2011; 李英强和何登发, 2014; 刘君龙等, 2016), 盆内形成了多物源供给的沉积格局。同时秦岭造山带的阻隔, 导致盆内气候炎热、干旱 (刘君龙等, 2016), 该时期特提斯洋西北缘的降温事件引发阶段性温暖湿润气候 (陈晓慧等, 2019) (图 4)。由于构造活动、气候波动、湖盆演化的影响及古地貌的复杂性, 不同时期砂体规模及分布特征存在差异。

凉一段沉积早期继承了大安寨晚期沉积格局, 湖盆持续萎缩, 气候炎热干旱 (图 4), 源区母岩遭受风化剥蚀作用较弱, 物源碎屑输入不足 (刘君龙等, 2016), 盆地整体处于欠补偿状态, 三角洲规模小, 砂岩厚度薄, 受沿岸流影响零散分布于湖盆边缘 (图 9; 图 10; 图 11); 凉一段沉积中后期大巴一米仓山边界逆冲带向盆内推进所产生的构造载荷导致山前盆地基底快速沉降, 前陆盆地前渊带在大巴山前逐渐成熟 (李英强, 2018; 杨雨等, 2023), 加上阶段性湿润气候 (图 4), 使得发生一次大规模湖侵, 湖泊快速扩张, 导致可容空间增长率远大于碎屑物质供应速率, 于川东地区沉积相对较厚的浅湖—半深湖泥岩 (图 10; 图 11)。

凉二段沉积时期 (最大湖泛之后) 整体是一次快速湖退—湖进的过程 (Qing *et al.*, 2019)。北部秦岭北东—南西向挤压持续增强, 导致盆地东北缘的挠曲与快速沉降, 大巴山逆冲推覆作用加强, 进入快速隆升阶段 (谢晋强, 2014), 同时雪峰古隆剥蚀性隆起受近南北向应力影响而加强 (何登发等, 2011; 杨帅, 2014), 加上较为湿润的气候造成较强的风化剥蚀 (图 4), 向盆内输入大量碎屑物质, 三角洲向半深湖进积, 填平补齐作用明显,



a—凉一段沉积时期；b—凉二段沉积时期；c—凉三段沉积时期

图 10 四川盆地凉高山组沉积演化剖面

Fig. 10 Sedimentary evolution profile of the Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

导致湖盆沉积中心被推向中部与沉降中心发生错位 (图 9; 图 10; 图 11)。西部龙门山褶皱和冲断带构造相对静止, 但存在集中于北段的持续推力变形 (颜照坤等, 2013), 在近物源和地形梯度大的沉积构造背景下 (Robert *et al.*, 2010), 沉积物以冲积扇沉积入盆, 这也导致了安县以北地区在这一时期沉积了较厚的砂体。整体上盆内砂岩沉积期次及厚度均有不同程度增加, 在前渊带表现为由凉一段大套泥岩转变为砂泥互层沉积, 导致半深湖受陆源输入影响不发育页岩, 在水体相对安静的川中地区半深湖环境沉积页岩 (图 8; 图 9; 图 10; 图 11)。

凉三段沉积时期湖平面频繁变化, 整体呈湖进

—湖退—湖盆消亡的沉积序列, 该时期的岩相古地理整体继承了凉二段的沉积格局 (图 9)。秦岭造山带、米仓—大巴山以及雪峰古隆稳定持续隆升 (何登发等, 2011; 谢晋强, 2014; 杨雨等, 2023), 古老岩层风化剥蚀向盆内输入碎屑物质, 三角洲体系稳定沉积 (图 9; 图 10; 图 11)。而气候逐渐炎热干旱 (图 4), 湖水面积明显较凉二段减小, 湖盆持续向盆地中部推进并逐渐萎缩 (图 8; 图 9; 图 10)。受古地貌及湖平面升降影响, 半深湖呈短期间歇性发育 (图 8; 图 10)。整体上砂质含量高, 泥页岩横向连续纵向多期薄层发育, 砂泥频繁互层 (图 8; 图 10)。

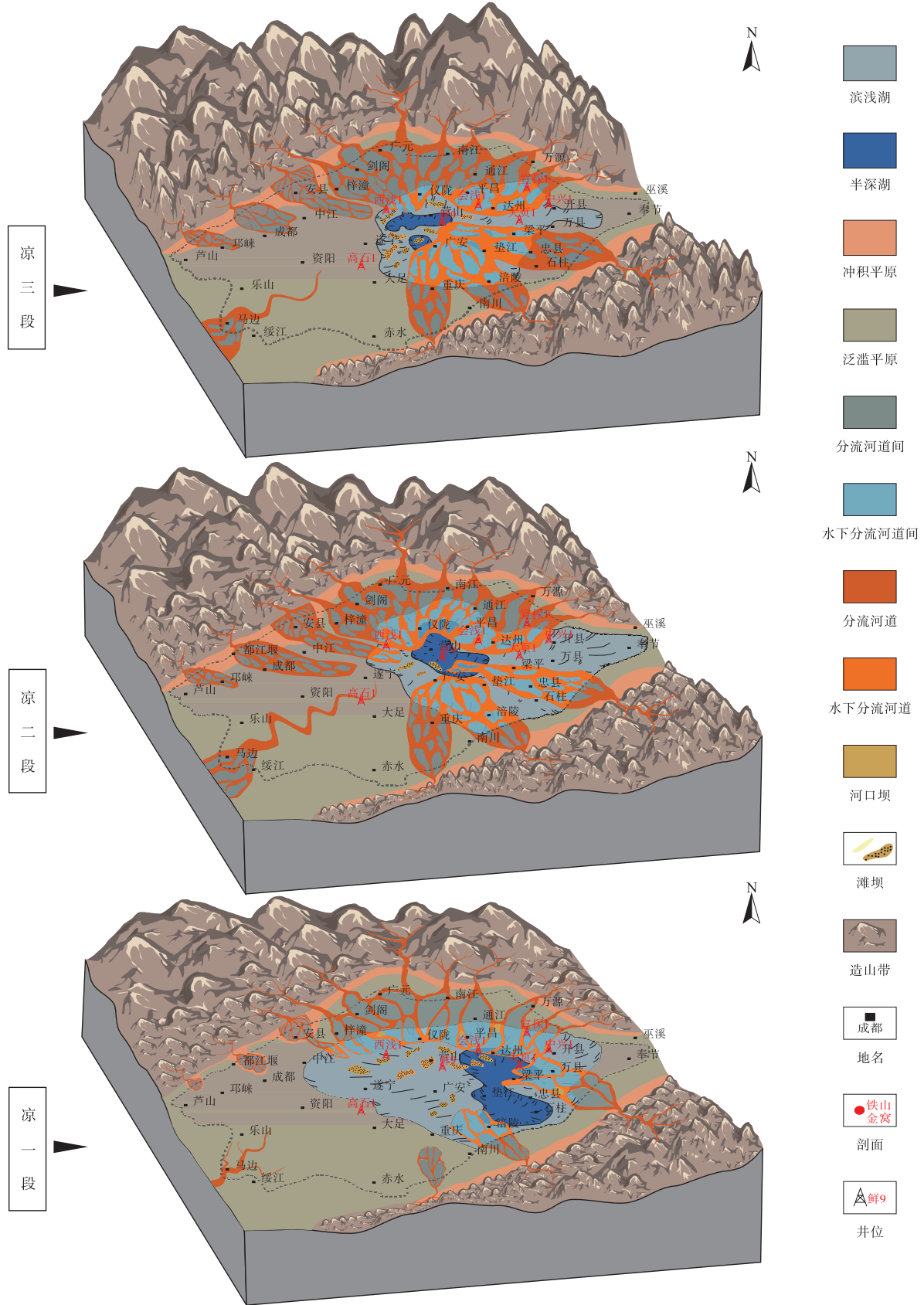


图 11 四川盆地中侏罗统凉高山组沉积模式

Fig. 11 Sedimentary model of the Middle Jurassic Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin

凉高山组沉积类型多样,盆地东部、北部及南部发育辫状河三角洲(图 11);盆地西南部,沉积地层逐渐减薄,砂体规模减小,发育小规模曲流河三角洲;局部地区(如安县地区)发育冲积扇—辫状河三角洲(图 10;图 11)。构造挤压导致的川中微隆起对湖岸线向西推进起到了限制,盆地西部广泛分布泛滥平原(图 9;图 11)。整个沉积时期湖浪作用逐渐被弱化,河流作用不断加强,是早中侏罗世沉积体系快速转变的重要阶段。

7 结论

1) 四川盆地凉高山组沉积时期,受秦岭—大别造山带、扬子板块北缘及雪峰古隆构造活动影响,多物源供砂,其中龙门山中段、北段为盆地西北部主源区,米仓山及南秦岭为盆地北部主源区,大巴山为盆地东北部主源区,雪峰古隆为盆地东南部主源区,其余方向为次要源区。

2) 四川盆地凉高山组以湖泊—三角洲沉积体系为主,发育分流河道、分流河道间、水下分流河道、水下分流河道间、河口坝、席状砂、滨浅湖滩坝、浅湖泥及半深湖泥 9 个沉积微相类型。

3) 凉高山组沉积时期,受秦岭造山带阻隔导致盆内气候炎热干旱,同时期特提斯洋西北缘降温事件引发阶段性温暖湿润气候。大巴山逆冲推覆作用加强,川东、川东北地区形成前陆盆地前渊带,构成东陡西缓古地貌格局。

4) 受构造活动、气候变化及古地貌影响,凉高山组早期湖盆沉积与沉降中心均分布于川东、川东北地区,中期气候湿润,陆源输入增加,沉积中心迁移川中地区,沉积与沉降中心发生错位,晚期湖盆填平补齐,逐渐萎缩。

参考文献 (References)

成大伟,张志杰,洪海涛,张少敏,秦春雨,袁选俊,张斌,周川闽,邓庆杰. 2023. 四川盆地东部侏罗系凉高山组层序结构、沉积演化及其主控因素. 石油勘探与开发,50(2): 262-272. [Cheng D W, Zhang Z J, Hong H T, Zhang S M, Qin C Y, Yuan X J, Zhang B, Zhou C M, Deng Q J. 2023. Sedimentary and provenance characteristics and the basin-mountain relationship of the Jurassic Lianggaoshan Formation in eastern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 50(2): 262-272]

陈洪德,庞林,倪新锋,郝毅. 2007. 中上扬子地区海相油气勘探前景. 石油实验地质,29(1): 13-18. [Chen H D, Pang L, Ni X F, Hao

Y. 2007. New brief remarks on hydrocarbon prospecting of marine strata in the Middle and Upper Yangtze region. Petroleum Geology & Experiment, 29(1): 13-18]

陈洪德,郭彤楼,侯明才,刘文均,林良彪,李智武,徐胜林,钟怡江,黄福喜,王约,张成弓,陈清安. 2012. 中上扬子叠合盆地沉积充填过程与物质分布规律. 北京: 科学出版社. [Chen H D, Guo T L, Hou M C, Liu W J, Lin L B, Li Z W, Xu S L, Zhong Y J, Huang F X, Wang Y, Zhang C G, Chen Q A. 2012. Sedimentary Filling Process and Material Distribution Law of the Middle-Upper Yangtze Superimposed Basin. Beijing: Science Press]

陈世加,张焕旭,路俊刚,杨跃明,刘超威,王力,邹贤利,杨家静,唐海评,姚宜同,黄囿霖,倪帅,陈莹莹. 2015. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素. 石油勘探与开发,42(2): 186-193. [Chen S J, Zhang H X, Lu J G, Yang Y M, Liu C W, Wang L, Zou X L, Yang J J, Tang H P, Yao Y T, Huang Y L, Ni S, Chen Y Y. 2015. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 42(2): 186-193]

陈晓慧,曾建理,张廷山,祝海华,张婧璇,李世鑫,李耀羽. 2019. 川东北地区中侏罗世新田沟期古气候波动的地球化学响应. 地质学报,93(12): 3223-3238. [Chen X H, Zeng J L, Zhang T S, Zhu H H, Zhang J X, Li S X, Li Y Y. 2019. Geochemical response to paleoclimate fluctuation during Xintiangou Period (Middle Jurassic), Northeastern Sichuan. Acta Geologica Sinica, 93(12): 3223-3238]

陈竹新,贾东,魏国齐,李本亮,雷永良. 2008. 川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换. 中国地质,38(3): 472-481. [Chen X Z, Jia D, Wei G Q, Li B L, Lei Y L. 2008. Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan foreland basin. Geology in China, 38(3): 472-481]

杜宝安. 1985. 甘肃靖远王家山中侏罗世孢粉及其地层、古地理意义. 地质论评,31(2): 131-141, 200-201. [Du B A. 1985. Sporopollen assemblages from the Middle Jurassic in the Wangjiashan Basin of Jingyuan, Gansu, and their stratigraphic and paleogeographic significance. Geological Review, 31(2): 131-141, 200-201]

邓宾. 2013. 四川盆地中—新生代盆—山结构与油气分布. 成都理工大学硕士学位论文. [Deng B. 2013. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan Basin and its gas distribution. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]

何登发,李德生,张国伟,赵路子,樊春,鲁人齐,文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. 地质科学,46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606]

何文渊,白雪峰,蒙启安,李军辉,张大智,王有智. 2022. 四川盆地陆相页岩油成藏地质特征与重大发现. 石油学报,43(7): 885-898. [He W Y, Bai X F, Meng Q A, Li J H, Zhang D Z, Wang Y Z. 2022. Accumulation geological characteristics and major discoveries of lacustrine shale oil in Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 43(7): 885-898]

胡东风,魏志红,刘若冰,魏祥峰,刘珠江,陈斐然. 2021. 四川盆地拔

- 山寺向斜泰页1井页岩油气重大突破及意义. 中国石油勘探, 26(2): 21-32. [Hu D F, Wei Z H, Liu R B, Wei X F, Liu Z J, Chen F R. 2021. Major breakthrough of shale oil and gas in Well Taiye 1 in Bashansi Syncline in the Sichuan Basin and its significance. *China Petroleum Exploration*, 26(2): 21-32]
- 胡东风, 李真祥, 魏志红, 段金宝, 缪志伟, 潘磊, 黎承银, 段华. 2023. 四川盆地北部地区巴中1HF井侏罗系河道砂岩油气勘探突破及意义. 天然气工业, 43(3): 1-11. [Hu D F, Li Z X, Wei Z H, Duan J B, Miu Z W, Pai L, Li C Y, Duan H. 2023. Breakthrough in oil and gas exploration of Jurassic channel sandstone in Well Bazhong 1HF in northern Sichuan Basin and its significance. *Natural Gas Industry*, 43(3): 1-11]
- 黄滨, 李建国. 2007. 新疆玛纳斯河畔红沟剖面西山窑组和头屯河组孢粉组合及地层意义. 微体古生物学报, 24(2): 170-193. [Huang B, Li J G. 2007. Sporo-pollen assemblages from the Xishanyao and Toutunhe Formations at the Honggou section of the Manasi river, Xinjiang and their stratigraphical significance. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 24(2): 170-193]
- 黄迪颖. 2019. 中国侏罗纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 227-256. [Huang D Y. 2019. Jurassic integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica(Terrae)*, 49(1): 227-256]
- 雷涛, 唐文斌, 徐胜林, 陈安清, 林良彪. 2015. 川北地区千佛崖组物源及岩相古地理特征. 科学技术与工程, 15(16): 149-155. [Lei T, Tang W B, Xu S L, Chen A Q, Lin L B. 2015. Provenance and lithofacies paleogeographic characteristics of Qianfoya Formation in northern Sichuan Basin. *Science Technology and Engineering*, 15(16): 149-155]
- 李英强. 2018. 龙门山与四川盆地结合带的地质结构与成因机制. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li Y Q. 2018. Geological architecture and formation mechanism of the transitional zone between Longmenshan Mountains and Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 李英强, 何登发. 2014. 四川盆地及邻区早侏罗世构造-沉积环境与原型盆地演化. 石油学报, 35(2): 219-232. [Li Y Q, He D F. 2014. Evolution of tectonic-depositional environment and prototype basins of the Early Jurassic in Sichuan Basin and adjacent areas. *Acta Petrolei Sinica*, 35(2): 219-232]
- 刘君龙, 纪友亮, 张克银, 李龙迪, 王天云, 杨永, 张洁. 2016. 川西前陆盆地侏罗系沉积体系变迁及演化模式. 石油学报, 37(6): 743-756. [Liu J L, Jou Y L, Zhang K Y, Li L D, Wang T Y, Yang Y, Zhang J. 2016. Jurassic sedimentary system transition and evolution model in Western Sichuan Foreland Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(6): 743-756]
- 刘露. 2017. 川中公山庙油田公39井区侏罗系凉高山组高分辨率层序地层学与沉积相研究. 西南石油大学硕士学位论文. [Liu L. 2017. Study on high-resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies of Jurassic Liangaoshan Formation in Gong 39 well area of Gongshanmiao oilfield, central Sichuan. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 刘兆生. 1982. 四川合川、梓潼、巴中中生代孢粉组合. 成都: 四川人民出版社, 440-461. [Liu Z S. 1982. Sichuan Hechuan, Zitong, Bazhong Mesozoic Spore Pollen Combination. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 440-461]
- 钱利军. 2013. 川西北地区中、下侏罗统物质分布规律与沉积充填过程. 成都理工大学博士学位论文. [Qian L J. 2013. Regulation of sedimentary distribution and sedimentary filling process during Middle and Lower Jurassic in western and northern Sichuan, China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 钱利军, 欧莉华, 郝强, 林良彪, 徐胜林. 2016. 川西—川北地区中侏罗统千佛岩组物源分析及沉积相展布. 科学技术与工程, 16(8): 79-86. [Qian L J, Ou L H, Hao Q, Lin L B, Xu S L. 2016. Provenance and sedimentary facies evolution of the Middle Jurassic Qianfoyan Formation in the western-northern Sichuan. *Science Technology and Engineering*, 16(8): 79-86]
- 王全伟, 阚泽忠, 刘啸虎, 梁斌, 朱兵. 2008. 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. 四川地质学报, 28(2): 89-95. [Wang Q W, Han Z Z, Liu X H, Liang B, Zhu B. 2008. The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to paleovegetation and paleoclimate. *Acta Geologica Sichuan*, 28(2): 89-95]
- 谢晋强. 2014. 北大巴山推覆构造形成时代及其复合演化. 西北大学博士学位论文. [Xie J Q. 2014. Formation age and composite evolution of nappe structure in north Daba Mountain. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 颜照坤, 李勇, 李海兵, 董顺利, 闫亮, 李奋生. 2013. 晚三叠世以来龙门山的隆升—剥蚀过程研究: 来自前陆盆地沉积通量的证据. 地质论评, 59(4): 665-676. [Yan Z K, Li Y, Li H B, Dong S L, Ni L, Li F S. 2013. Study on the uplift and denudation of Longmen Mountains since Late Triassic: evidence from the sediment flux of the Longmen Mountains Foreland Basin. *Geological Review*, 59(4): 665-676]
- 杨帅. 2014. 四川盆地侏罗系沉积演化与相控储层预测. 成都理工大学博士学位论文. [Yang S. 2014. Sedimentary evolution during Jurassic and facies-controlling reservoir prediction in Sichuan Basin, China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 杨雨, 文龙, 周刚, 战薇芸, 李海涛, 宋泽章, 张晶, 陶佳丽, 田兴旺, 苑九涛, 金世贵, 史国梁. 2023. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报, 44(12): 2045-2069. [Yang Y, Wen L, Zhou G, Zhan W Y, Li H T, Song Z Z, Zhang J, Tao J L, Tian X W, Yuan J T, Jin S G, Shi G L. 2023. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2045-2069]
- 杨跃明, 杨家静, 杨光, 陶士振, 倪超, 张斌, 何晓东, 林建平, 黄东, 刘敏, 邹娟. 2016. 四川盆地中部地区侏罗系致密油研究新进展. 石油勘探与开发, 43(6): 873-882. [Yang Y M, Yang J J, Yang G, Tao S Z, Ni C, Zhang B, He X D, Lin J P, Huang D, Liu M, Zou J. 2016. New research progress of Jurassic tight oil in central Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 43(6): 873-882]
- 易娟子, 张少敏, 蔡来星, 陈守春, 罗鑫, 于吉星, 罗妮娜, 杨田. 2022. 川东地区下侏罗统凉高山组地层—沉积充填特征与油气勘探方

- 向. 吉林大学学报(地球科学版), 52(3): 795-815. [Yi J Z, Zhang S M, Cai L X, Chen S C, Luo X, Yu J X, Luo N N, Yang T. 2022. Strata and sedimentary filling characteristics of the Lower Jurassic Lianggaoshan Formation and its hydrocarbon exploration in eastern Sichuan Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 52(3): 795-815]
- 曾允孚, 李勇. 1995. 龙门前陆盆地形成与演化. *矿物岩石*, 15(1): 40-49. [Zeng Y F, Li Y. 1995. The formation and evolution of Longmen mountains foreland basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 15(1): 40-49]
- 张天舒, 陶士振, 吴因业, 杨家静, 庞正炼, 杨晓萍, 陈燕燕, 袁苗, 刘敏, 范建玮, 冯昌荣. 2019. 层序演化对三角洲—滩坝沉积体系有利储层类型与分布的控制作用: 以四川盆地中部侏罗系凉高山组为例. *天然气地球科学*, 30(9): 1286-1300. [Zhang T S, Tao S Z, Wu Y Y, Yang J J, Pang Z L, Yang X P, Chen Y Y, Yuan M, Liu M, Fan J W, Feng C R. 2019. Control of sequence stratigraphic evolution on the types and distribution of favorable reservoir in the delta and beach-bar sedimentary system: case study of Jurassic Lianggaoshan Formation in Central Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 30(9): 1286-1300]
- 仲泉城. 2018. 川中地区公山庙油田凉高山组沉积相及储层特征研究. 西南石油大学硕士学位论文. [Zhong Q C. 2018. Study on sedimentary facies and reservoir characteristics of Lianggaoshan Formation in Gongshanmiao Oilfield, Central Sichuan Basin. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University]
- Bai X F, Wang X D, Wang Z G, Deng H C, Li Y, Li A, Cao H X, Wang L, Zhu Y P, Lu S F, Cao F, He J H. 2023. Characteristics and evolution of tectonic fractures in the Jurassic Lianggaoshan Formation shale in the Northeast Sichuan Basin. *Minerals*, 13(7): 946.
- Chao N, Lü X J, Zhu X J, Zhang J Y, Wang J H, Wang M Y, Xu R B. 2023. Sedimentary facies types and their control of reservoirs in the Lower Jurassic lacustrine facies shale of the Lianggaoshan Formation, northeastern Sichuan Basin, China. *Processes*, 11(8): 2463.
- Clark M K, House M A, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 33(6): 525-528.
- Dong S W, Gao R, Yin A, Guo T L, Zhang Y Q, Hu J M, Li J H, Shi W, Li Q S. 2013. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China. *Geology*, 41(6): 671-674.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Chen Q, Zhang X N, Wei L, He D F, Zhang G W. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Precambrian Research*, 196/197: 247-274.
- Fang R, Jiang Y Q, Sun S S, Luo Y, Qi L, Dong D Z, Lai Q, Luo Y Z, Jiang Z Z. 2023. Controlling factors of organic matter accumulation and lacustrine shale distribution in Lianggaoshan Formation, Sichuan Basin, SW China. *Front. Earth Sci*; 11.
- Frakes L A, Francis J E, Syktus J I. 1992. Climate modes of the Phanerozoic. *Sedimentary Geology*, 61(1): 45-53.
- Guiot J, Pons A, Beaulieu J L de, Reille M. 1989. A 140,000-year continental climate reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 338(6213): 309-313.
- Hallam A, Crame J A, Mancenido M O, Francis J, Parrish J T. 1993. Jurassic climates as inferred from the sedimentary and fossil record. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 341(1297): 287-296.
- Heimhofer U, Hochuli P-A. 2017. Early Cretaceous angiosperm pollen from a low-latitude succession (Araripe Basin, NE Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161(3-4): 105-126.
- Huang D Y. 2019. Jurassic integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 62(1): 223-255.
- McCann T, Saintot A. 2000. Tracing tectonic deformation using the sedimentary record. London: Geological Society of London, 208.
- Qing Y H, Lü Z X, Wu J Y, Yang J J, Zhang S L, Xiong C H, Liu J F. 2019. Formation mechanisms of calcite cements in tight sandstones of the Jurassic Lianggaoshan Formation, northeastern Central Sichuan Basin. *Australian Journal of Earth Sciences*, 66(5): 723-740.
- Robert A, Pubellier M, Sigoyer J, Vergne J, Lahfid A, Cattin R, Findling N, Zhu J. 2010. Structural and thermal characters of the Longmen Shan (Sichuan, China). *Tectonophysics*, 491(1-4): 165-173.
- Vajda V, Pucetaite M, McLoughlin S, Engdahl A, Heimdal J, Uvdal P. 2017. Molecular signatures of fossil leaves provide unexpected new evidence for extinct plant relationships. *Nature Ecology & Evolution*, 1: 1093-1099.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth Science Reviews*, 98(3/4): 217-268.
- Wu Z R, He S, He Z L, Li X C, Zhai G Y, Huang Z Q. 2022. Petrographical and geochemical characterization of the Upper Permian Longtan Formation and Dalong Formation in the Lower Yangtze region, South China: implications for provenance, paleoclimate, paleoenvironment and organic matter accumulation mechanisms. *Marine and Petroleum Geology*, 139: 105580.
- Xu Q, Xiao J, Li Y, Tian F, Nakagawa T. 2010. Pollen-based quantitative reconstruction of Holocene climate changes in the Daihai lake area, Inner Mongolia, China. *Journal of Climate*, 23(11): 2856-2868.
- Xu Z L, Cheng Y H, Ao C, Zhang T F, Wang S Y. 2023. Middle Jurassic palaeoclimate changes within the central Ordos Basin based on palynological records. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 103: 21-42.
- Yu W, Tian J C, Wang F, Liang Q S, Yang T, Kneller B, Liang X W. 2022. Sedimentary environment and organic matter enrichment of black mudstones from the upper Triassic Chang-7 member in the Ordos Basin, northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 224: 105009.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)