

川西北地区中泥盆统一石炭统 碳氧同位素特征及地质意义*

石书缘¹ 任 川² 熊绍云³ 谷志东¹ 周 刚⁴ 刘静江¹ 白壮壮⁵

1 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

4 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

5 中国石油西南油气田公司页岩气研究院, 四川成都 610056

摘 要 川西北地区(四川盆地西北部简称)是中国泥盆系研究的重要区域之一, 但该地区的年代地层对比与古环境研究仍存在争议。本研究针对川西北地区中泥盆统观雾山组与下石炭统总长沟组系统开展野外露头剖面实测和薄片鉴定, 并对其中 210 个碳酸盐岩样品开展碳、氧同位素分析。结果显示: 川西北地区观雾山组中部古盐度较高, 水体较浅, 是白云岩发育的有利层段, 与上覆沙窝子组、下伏金宝石组呈整合接触; 泥盆系与石炭系之间为区域性不整合, 表现为观雾山组上部与总长沟组下部缺失; 观雾山组 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-3.72\text{‰} \sim 3.19\text{‰}$ 之间, 平均为 0.61‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-7.30\text{‰} \sim -1.11\text{‰}$ 之间, 平均为 -4.49‰ ; 总长沟组 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-4.47\text{‰} \sim 2.08\text{‰}$ 之间, 平均为 -0.92‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-5.83\text{‰} \sim -0.64\text{‰}$ 之间, 平均为 -3.52‰ 。古环境恢复表明, 观雾山组与总长沟组均属于典型的海相沉积, 观雾山组沉积期海水温度主要分布在 $15 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均 $25.32\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于亚热带—热带气候, 而总长沟组海水温度主要介于 $15 \sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均 $23.71\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于温带—亚热带气候, 也揭示了从泥盆纪到石炭纪存在降温事件。此外, $\delta^{13}\text{C}$ 的多期正—负漂移变化趋势受控于高频海平面波动及陆架周期性暴露, 反映了古海洋的碳循环扰动。实测的研究区 3 个露头的碳同位素整体变化趋势基本一致, 且与中国广西、法国和德国露头剖面的碳同位素变化趋势基本相同, 故其可有效应用于泥盆系与石炭系的年代地层对比与划分。本研究揭示的川西北地区泥盆系—石炭系碳氧同位素地球化学特征, 不仅为区域地层等时对比提供关键证据, 而且重建的古水温演变及碳循环波动机制, 有助于明确白云岩的有利发育时期, 对认识特提斯东缘古环境演化及油气储层预测有重要意义。

关键词 碳同位素 氧同位素 古环境 泥盆系—石炭系界线 观雾山组 总长沟组 四川盆地

第一作者简介 石书缘, 男, 1987 年生, 博士, 现为中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积学、沉积地球化学、深时古地理恢复、沉积大地构造和油气地质综合研究工作。E-mail: shi18yuan@163.com。

中图分类号: P597 文献标志码: A

Carbon and oxygen isotopic characteristics and geological implications of the Devonian-Carboniferous in northwestern Sichuan Basin

* 中国石油天然气集团有限公司科技重大专项 (编号: 2023ZZ02) 资助。[Financially supported by the PetroChina Science & Technology Major Project (No. 2023ZZ02)]

收稿日期: 2025-08-12 改回日期: 2025-11-18

SHI Shuyuan¹ REN Chuan² XIONG Shaoyun³ GU Zhidong¹ZHOU Gang⁴ LIU Jingjiang¹ BAI Zhuangzhuang⁵¹ Research Institution of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China² College of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China³ PetroChina Hangzhou Institute of Geology, Hangzhou 310023, China⁴ Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610041, China⁵ Shale Gas Research Institute of Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Chengdu 610056, China

Abstract The Longmen Mountains region is one of the key areas for Devonian geological research in China. However, controversies persist concerning stratigraphic correlation and paleoenvironmental studies in this area. This study focuses on the Middle Devonian Guanwushan Formation and the Lower Carboniferous Zongchanggou Formation in the northwestern Sichuan Basin. Systematic field surveys of outcrop sections were conducted, complemented by thin-section petrographic analyses. A total of 210 carbonate rock samples were analyzed for carbon and oxygen isotope compositions. The results indicate that the middle part of the Guanwushan Formation in the northwestern Sichuan Basin was deposited under relatively higher paleosalinity and shallow-water conditions, representing a favorable stage for dolomite formation. The Guanwushan Formation exhibits conformable contacts with the overlying Shawozi Formation and the underlying Jinbaoshi Formation. The Devonian-Carboniferous boundary is marked by a regional unconformity, resulting in the absence of the upper Guanwushan Formation and the lower Zongchanggou Formation. Within the Guanwushan Formation, $\delta^{13}\text{C}$ values range from -3.72‰ to 3.19‰ (average: 0.61‰), while $\delta^{18}\text{O}$ values vary between -7.30‰ to -1.11‰ (average: -4.49‰). In the Zongchanggou Formation, $\delta^{13}\text{C}$ values range from -4.47‰ to 2.08‰ (average: -0.92‰), and $\delta^{18}\text{O}$ values range from -5.83‰ to -0.64‰ (average: -3.52‰). Paleoenvironmental reconstruction indicates that both the Guanwushan and Zongchanggou formations were deposited in typical marine settings. During deposition of the Guanwushan Formation, seawater temperatures ranged from $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, with an average of $25.32\text{ }^{\circ}\text{C}$, suggesting a subtropical to tropical climate. In contrast, during deposition of the Zongchanggou Formation, seawater temperatures varied between $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $34\text{ }^{\circ}\text{C}$, averaging $23.71\text{ }^{\circ}\text{C}$, reflecting a temperate-tropical climate transition and revealing a cooling event across the Devonian-Carboniferous boundary. Furthermore, the multi-stage positive and negative excursions in $\delta^{13}\text{C}$ were controlled by high-frequency sea-level fluctuations and periodic exposure of continental shelves, reflecting perturbations in the paleo-oceanic carbon cycle. The overall trends in carbon isotope variations across three measured outcrops in the study area show consistency and are broadly comparable to those documented in sections from Guangxi (China), France, and Germany, demonstrating their utility for global Devonian-Carboniferous stratigraphic correlation and subdivision. This study reveals the carbon isotope geochemical characteristics of the Devonian-Carboniferous strata in the northwestern Sichuan Basin, providing key evidence for regional isochronous stratigraphic correlation. It reconstructs the evolution of paleo-seawater temperatures and the mechanisms of carbon cycle fluctuations, identifies the favorable period for dolomite development, and holds significant implications for understanding paleoenvironmental evolution along the eastern Paleo-Tethyan margin and for hydrocarbon reservoir prediction.

Key words carbon isotope, oxygen isotope, paleoenvironment, Devonian-Carboniferous boundary, Guanwushan Formation, Zongchanggou Formation, Sichuan Basin

About the first author SHI Shuyuan, born in 1987, Ph. D., is currently a senior engineer at the PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development (RIPEd). His primary research focuses on Carbonate sedimentology, sedimentary geochemistry, deep-time palaeogeography reconstruction, sedimentary tectonics, and integrated petroleum geology. E-mail: shi18yuan@163.com.

泥盆纪与石炭纪是显生宙较为重要的 2 个地质时期,其大地构造特征 (Zhao *et al.*, 2018; 李文渊, 2024; 孟勇等, 2025)、生物变迁 (Sheng *et al.*, 2018; Lu *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2025)、环境变化 (Sahoo *et al.*, 2023; 高万里等, 2024; Shen *et al.*, 2024) 和沉积演化 (成晓雨等, 2018; Yang *et al.*, 2023) 等方面一直是业内研究热点。碳氧同位素分析作为古环境研究的核心技术手段,在古温度重建、古盐度计算、全球地层划分与对比以及古气候演化研究中具有重要作用 (李启来等, 2017; 王元青等, 2019; Heath *et al.*, 2021; Cannell *et al.*, 2022; 申博恒等, 2022; Kabanov *et al.*, 2023)。其中,碳同位素可有效示踪碳循环过程及大气圈-海洋-生物圈相互作用机制 (Hu *et al.*, 2021; Mitchell *et al.*, 2023),同时反映海洋生产力水平与陆源物质输入特征,通常结合牙形石带和其他同位素曲线构建综合地层和时间框架 (邓成龙等, 2019; 邓涛等, 2019; 朱茂炎等, 2019; Wang *et al.*, 2023; Yin *et al.*, 2024; De Keyser *et al.*, 2025; Jamart *et al.*, 2025)。氧同位素则为重建古海洋温度和盐度提供关键地球化学指标 (张竹桐和曾敏, 2020)。

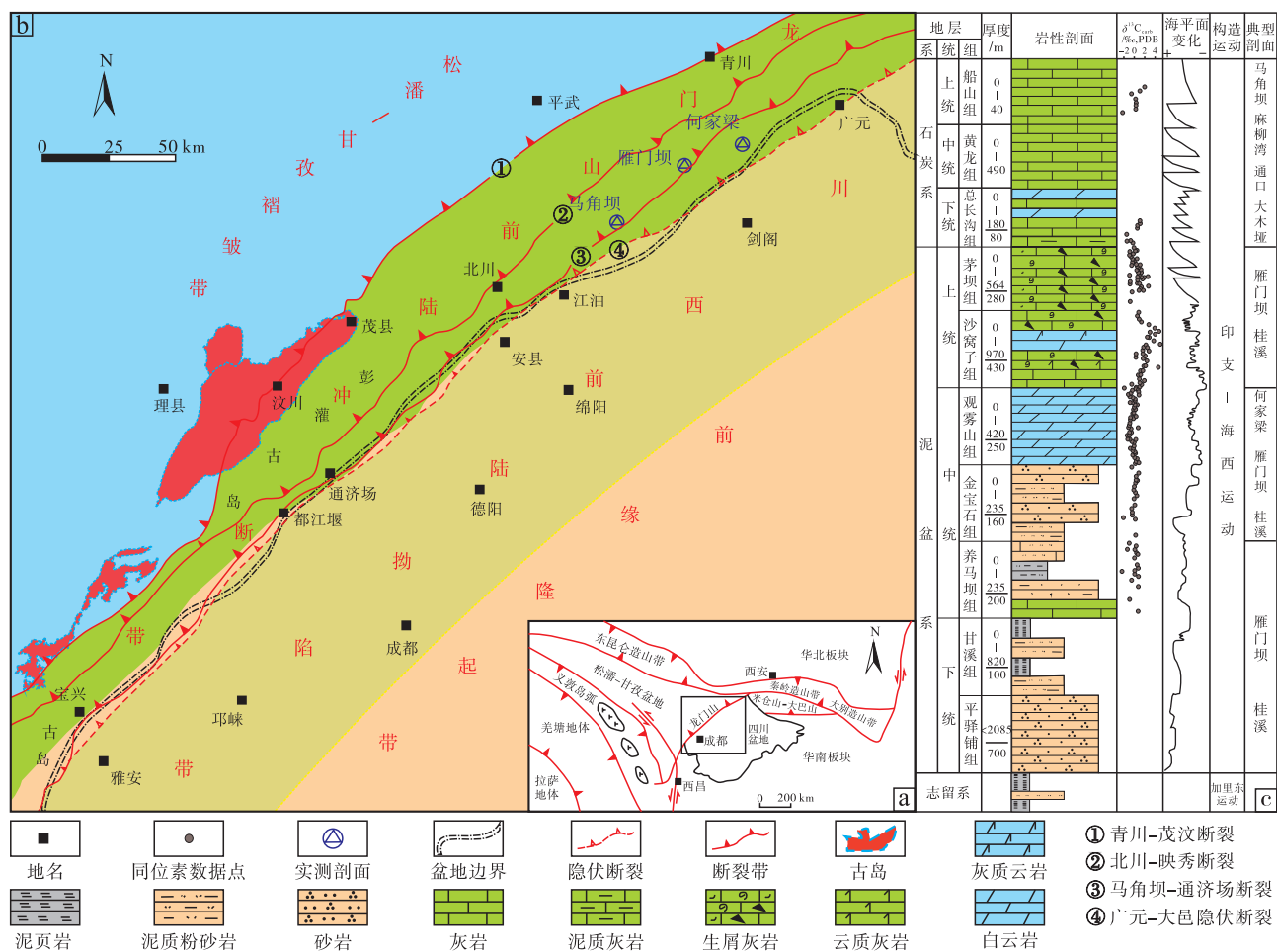
扬子板块位于特提斯东缘,泥盆系与石炭系发育较连续的海相地层,已有学者围绕青海、四川、云南、贵州等区域的地层开展碳氧同位素研究,取得了较好的研究成果 (Qie *et al.*, 2015, 2023; Ma *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2024)。川西北地区受多期构造运动影响,泥盆系与石炭系剥蚀严重 (梁瀚等, 2022),前人利用野外露头、地震资料、沉积相、区域构造演化等多种资料,证实川西北地区存在泥盆系和石炭系的残余海相地层 (刘殊等, 2020)。目前,诸多学者已经对泥盆系观雾山组开展了大量的研究,沉积演化方面主要认为观雾山组沉积环境为台地边缘、局限台地和开阔台地 (李凤杰等, 2015, 2017; 熊连桥等, 2017),古生物发育方面认为观雾山组包含牙形石、腕足类、珊瑚、植物和孢子生物化石 (郅文昆等, 2019,

2024),储层特征方面主要认为观雾山组白云岩储集层的储集空间为孔洞和裂缝,溶蚀孔发育,为优质储集层 (熊绍云等, 2020, 2021)。此外,关于川西北地区总长沟组研究的公开文献较少,仅有少量地层概况与生物特征研究成果 (范影年, 1980; 惠博等, 2009; 廖卓庭等, 2010)。

总体来说,目前川西北地区地球化学研究成果主要集中在甘溪地区 (卢武长等, 1994; 程红光等, 2009; 郅文昆等, 2024),全区研究成果相对较少,且缺少地质年代区域与全球对应关系研究,古环境特征尚不清晰,总长沟组研究尚处于早期阶段,仅有少量地层与生物研究成果。因此,作者聚焦川西北地区中泥盆统观雾山组与下石炭统总长沟组,针对川西北地区观雾山组与总长沟组的碳同位素演化是否与全球碳循环事件具有一致性等科学问题,系统开展野外露头剖面实测、薄片鉴定和碳、氧同位素测试分析,将碳同位素演化曲线与全球其他地区对比,识别出全球性碳同位素事件,以期完善全球泥盆系-石炭系碳同位素地层格架。此外,通过重建古温度和古盐度,明确川西北地区泥盆系-石炭系古环境演化特征,分析白云岩的优势发育时期,以进一步揭示特提斯东缘对全球环境演化的响应,同时为油气储集层有利相带预测提供理论依据。

1 区域地质概况

四川盆地位于中国西南部扬子板块西缘,为多旋回克拉通盆地 (赵文智等, 2012),其北接秦岭构造带,南连康滇构造带,西北缘的龙门山构造带呈 NE-SW 向展布,构成青藏高原与四川盆地的构造边界 (图 1-a)。龙门山北部泥盆系-石炭系受印支运动南东向挤压应力影响,发育一系列南东向逆冲断层,局部因构造抬升造成地层缺失,核部出露寒武系。喜马拉雅运动使早期逆冲断层再次活化,逆冲推覆前锋断层上盘的泥盆系-石炭系进一步冲断褶皱,形成紧闭倒转褶皱和次级逆断层 (贾东等, 2003; 金文正等, 2007; 陈竹新等,



a—四川盆地及其周边区域构造特征（据熊绍云等，2021）；b—研究区构造单元划分（据熊绍云等，2021）；

c—研究区泥盆系与石炭系综合柱状图（据郜文昆等，2024）

图 1 川西北地区地质概况

Fig. 1 Geological overview of northwestern Sichuan Basin

2008, 2019; 汤良杰等, 2008; 王丽宁等, 2014; 梁瀚等, 2022)。依据基底性质、地层演化、构造变形及活动特征等差异, 该造山带以怀远—安县为界分为 3 段: 安县以北至广元为北段, 怀远至安县为中段, 怀远以南至雅安为南段 (刘殊等, 2020)。该区下古生界—中生界下部发育以海相碳酸盐岩为主体的生储盖组合, 具备良好的区域石油地质基础。受构造层次与变形程度控制, 研究区自北西向东南依次为松潘—甘孜褶皱带、龙门山前陆冲断带、川西前陆拗陷带和前缘隆起带 4 个构造单元 (黄程等, 2022) (图 1-b)。

龙门山北部泥盆系自下而上分别为: (1) 平驿铺组, 发育河口湾、三角洲、滨岸和陆棚沉积体系 (郑荣才等, 1997), 岩性以石英砂岩、泥质粉砂

岩及部分杂砂岩为主; (2) 甘溪组, 为浅水陆棚沉积, 可见近源砂质风暴沉积 (许安涛等, 2018); (3) 养马坝组, 发育混积滨岸—混积陆棚沉积 (李佐强等, 2020); (4) 金宝石组, 发育河流、碎屑滨岸、陆棚和碳酸盐岩缓坡沉积 (李凤杰等, 2023); (5) 观雾山组, 沉积环境为台地边缘、开阔台地和局限台地 (熊绍云等, 2020); (6) 沙窝子组, 属潮坪—潟湖沉积 (鲜思远等, 1995); (7) 茅坝组, 为浅滩与潟湖沉积 (鲜思远等, 1995)。石炭系自下而上为: (1) 总长沟组, 属高能浅滩相沉积 (廖卓庭等, 2010); (2) 黄龙组, 为潟湖—海湾沉积 (方少仙等, 2000); (3) 船山组, 属开阔台地—台地边缘浅滩沉积 (徐锦龙等, 2013) (图 1-c)。

2 样品采集与测试

2.1 样品采集

本研究主要以川西北地区中泥盆统观雾山组与下石炭统总长沟组作为研究对象,系统开展野外剖面实测与样品采集工作。分别对马角坝、雁门坝及何家梁 3 条典型剖面进行样品采集,共计 210 个。马角坝剖面位于四川省江油市西北侧采石场,出露地层自下而上依次为金宝石组、观雾山组与总长沟组,该剖面采集碳酸盐岩样品 66 个;雁门坝剖面位于四川省剑阁县城西北侧,主要由金宝石组和观雾山组构成,采集样品 39 个;何家梁剖面位于剑阁县北侧,地层组合为金宝石组、观雾山组和总长沟组,系统采集样品 105 个。采样过程中严格遵循地质样品采集规范,优先采集断面新鲜露头样品,有效避让方解石脉体、次生裂隙及断层破碎带等次生改造区域,确保样品原始沉积特征的真实性和完整性。通过规避风化作用、重结晶作用等后期地质改造过程的影响,为后续地球化学分析获取具有原生沉积环境指示意义的可靠数据提供了基础保障。

2.2 实验方法

研究样品碳、氧同位素测试均由中国石油杭州地质研究院实验室完成。测试采用 McCrea 正磷酸法:选取样品新鲜部位研磨至 200 目,然后使样品与无水磷酸在 26℃ 水中反应 2 h,之后充入高纯 He 清洗,再加入浓度 100% 的 H_3PO_4 恒温 70℃ 溶解 2 h,湿度为 60%RH。测试仪器为 DELTA V Advantage SN09017D 同位素质谱仪,测试方法依据《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》SY/T 5238-2019,分析结果以 δ (‰) 单位表示,测试误差为 $\pm 0.02\text{‰}$ 。

3 岩石学特征

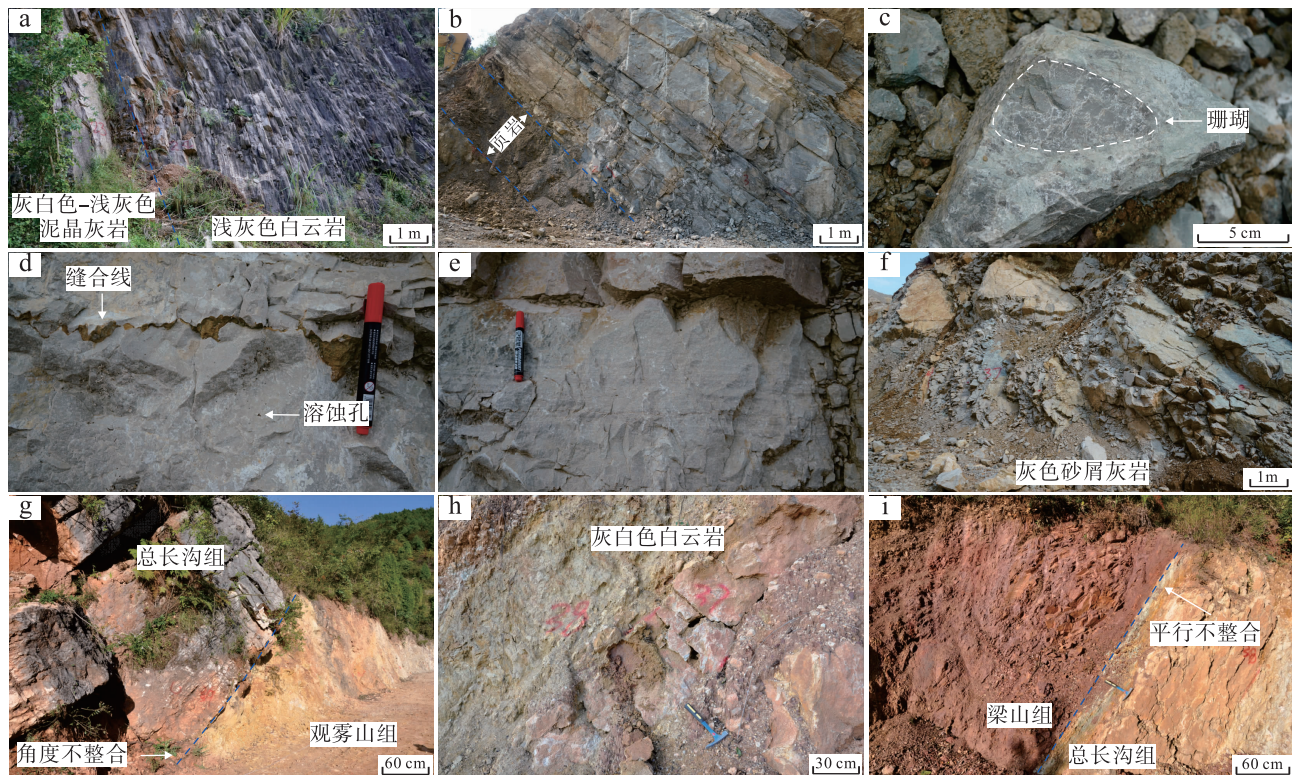
本研究系统采集 210 个碳酸盐岩样品,其中雁门坝剖面以泥盆系为主,马角坝与何家梁剖面涵盖泥盆系与石炭系。在观雾山组与总长沟组之间缺失上泥盆统,两者呈角度不整合接触。

综合马角坝、雁门坝和何家梁 3 条剖面岩性特征,认为川西北地区观雾山组底部以浅灰色薄层白云岩为主,夹一套灰白色—浅灰色中层泥晶灰岩、灰质泥岩和黑色页岩(图 2-a, 2-b);中下部为灰

白色—浅灰色中层生屑泥晶灰岩、灰色细粉晶和细晶白云岩夹少量薄层泥岩,向上过渡为浅灰色中—厚层细晶白云岩,可见珊瑚化石(图 2-c);中上部为浅灰色—灰色中层细晶白云岩夹薄层泥晶云岩,剖面中白云岩发育溶蚀孔与缝合线,可见平行层理(图 2-d, 2-e);上部为灰色中—厚层细晶—中晶白云岩,夹少量灰色粗晶白云岩、砂屑白云岩与砂屑灰岩,发育平行层理(图 2-e, 2-f)。在马角坝与何家梁剖面中,观雾山组与总长沟组呈不整合接触(图 2-g),总长沟组下部为薄层泥岩,中下部为一套中层亮晶球粒白云岩和白云岩,中部发育一套薄层灰色泥岩(图 2-h),上部为一套中—厚层生屑白云岩,向上过渡为铁质泥岩、铝土质泥岩夹生屑白云岩,与上覆梁山组呈平行不整合接触(图 2-i)。

镜下观察表明,观雾山组岩石类型以白云岩为主,多为晶粒白云岩,粒级以细晶为主,缝合线发育,溶蚀孔多被沥青充填;灰岩为生屑泥晶灰岩和砂屑灰岩等,生物碎屑保存完整,以有孔虫、海百合茎为主,含少量介形虫、棘皮动物、腕足类和藻类等生物碎屑。具体岩性特征为:(1)砂屑白云质灰岩,含少量砾屑、似球粒,白云石颗粒呈现条带状分布,构造裂缝被亮晶方解石充填,小型溶蚀孔,多被沥青填充(图 3-a);(2)粗晶白云岩,发育缝合线,缝合线两侧粒度变化明显,上部为粗晶颗粒,下部以中晶颗粒为主,含部分细晶颗粒(图 3-b);(3)细晶白云岩,发育大型溶蚀孔,为有效孔隙,晶形为半自形和他形(图 3-c),灰岩残余颗粒被中晶白云石颗粒充填,可见雾心亮边结构(图 3-d),部分细晶白云岩为泥晶灰岩内重结晶形成,不具有原生沉积结构,白云石颗粒呈零散状分布,泥质含量较高(图 3-e, 3-f);(4)泥晶—粉晶白云岩,泥质含量较高,发育较多小型溶蚀孔,多被沥青填充,受渗透回流白云石化的非均质性影响,粒级呈现条带状变化(图 3-e);(5)生屑泥晶灰岩,泥质含量较高,生物碎屑部分保存较好,框架多为亮晶方解石,主要含腕足类、有孔虫、介形虫、棘皮类等生物碎屑(图 3-g, 3-h, 3-i)。

野外剖面特征与岩石薄片镜下观察表明,研究区观雾山组沉积时期海平面波动频繁,总体经历了海退→海侵→海退的变化过程,且由于海退阶段持续时间较长,该组岩性以细晶白云岩为主,仅底部



a—灰白色—浅灰色泥晶灰岩与浅灰色白云岩，观雾山组底部；b—厚层页岩，观雾山组底部；c—浅灰色白云岩，发育珊瑚化石，观雾山组中部；d—灰色白云岩，发育溶蚀孔与缝合线，观雾山组中上部；e—灰色白云岩，观雾山组上部；f—灰色砂屑灰岩，观雾山组上部；g—观雾山组上部与总长沟组底部角度不整合接触；h—灰白色白云岩，总长沟组中部；i—总长沟组上部与梁山组底部平行不整合接触。a 至 f 来自于马角坝剖面，g 至 i 来自于何家梁剖面

图 2 川西北地区中泥盆统观雾山组与下石炭统总长沟组地层特征

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of the Middle Devonian Guanwushan Formation and Lower Carboniferous Changjougou Formation in northwestern Sichuan Basin

和中下部短期海侵阶段发育少量薄层泥晶生屑灰岩、页岩和泥岩。总长沟组整体以白云岩为主，浅水环境占主体，其顶部的铝土质泥岩为暴露地表的标志，中部与上部发生 2 次海侵，分别沉积了一套泥岩和铁质泥岩，可见总长沟组主要经历了海退→海侵→海退多次旋回的变化。

4 碳氧同位素特征

4.1 马角坝剖面

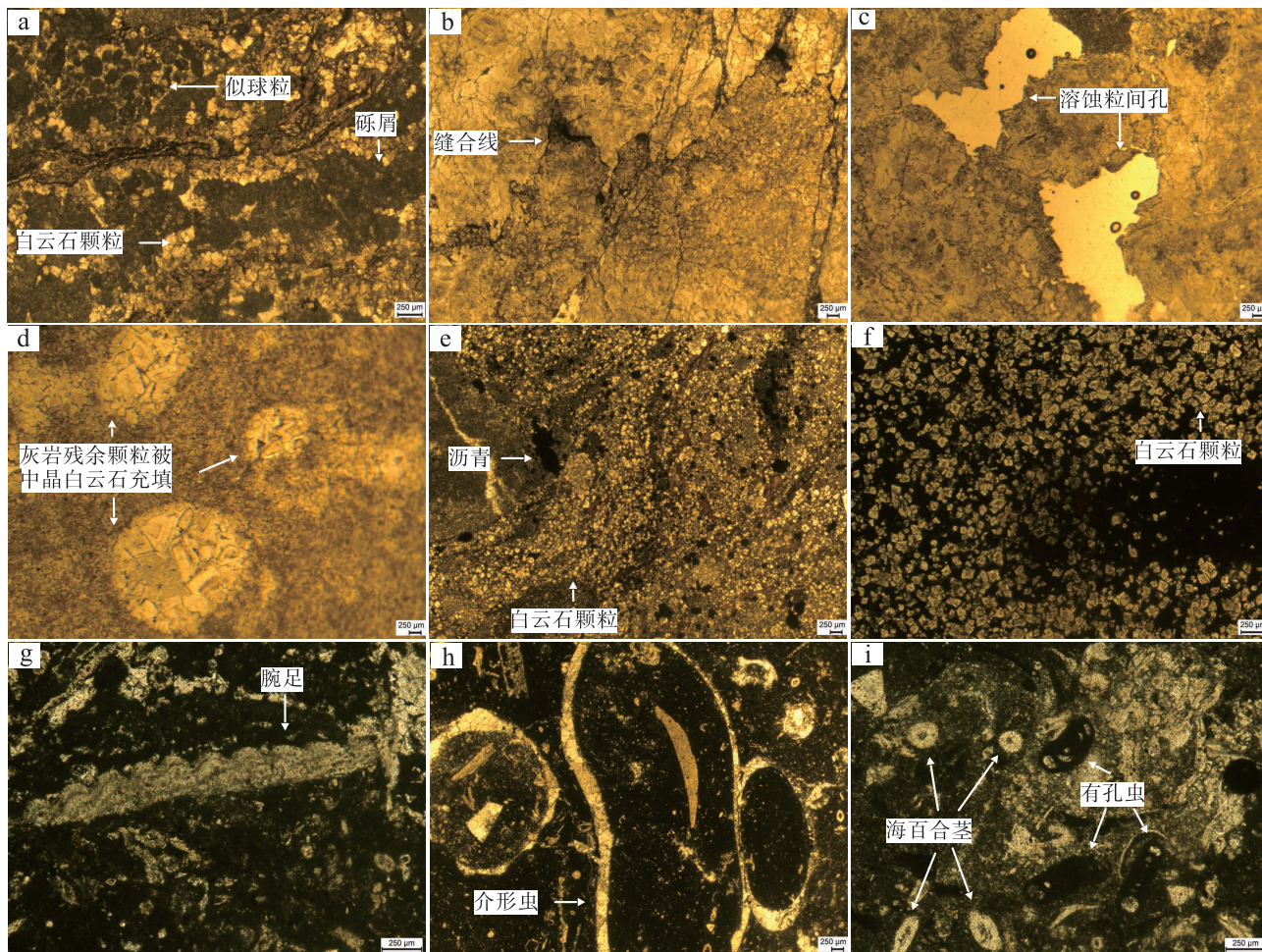
马角坝剖面观雾山组碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -4.47‰ ~ 1.83‰ 之间，平均值为 -0.38‰ 。碳同位素曲线特征表现为：整体为正值，仅底部、中部和顶部呈现波动幅度较小的负值（图 4）。具体变化过程为：样品 MJB-4 处为首次负漂移，幅度达 2‰ ，在样品 MJB-5 处急速正漂移；在样品 MJB-8

和 MJB-9 之间， $\delta^{13}\text{C}$ 发生第 2 次急速负漂移，幅度略小于第 1 次，为 1.5‰ ，在样品 MJB-9 处迅速正偏，变为正值； $\delta^{13}\text{C}$ 值第 3 次正、负漂移分别出现在样品 MJB-20 处、MJB-22 处，并在样品 MJB-23 处迅速完成负值与正值的转换，直至样品 MJB-35 处； $\delta^{13}\text{C}$ 值在样品 MJB-36 处逐渐降低，在样品 MJB-41 处达到观雾山组 $\delta^{13}\text{C}$ 最低值；在观雾山组与总长沟组界线处， $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增大，处于负漂移向正漂移转折阶段（图 4）。

马角坝剖面观雾山组碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.21‰ ~ -1.11‰ ，平均值为 -5.03‰ 。同位素曲线特征表现为仅在地层顶部较为平稳，维持在 -0.5‰ 左右，其余位置 $\delta^{18}\text{O}$ 值波动较大，发生多次正、负漂移（图 4）。

4.2 雁门坝剖面

雁门坝剖面观雾山组碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.31‰



a—砂屑白云质灰岩，含砾屑、似球粒、少量沥青，白云石颗粒呈条带状展布，单偏光；b—粗晶白云岩，发育缝合线，缝合线两侧粒度变化明显，上部为粗晶，下部为中晶，单偏光；c—细晶白云岩，发育粒间溶蚀，单偏光；d—细晶白云岩，灰岩残余颗粒被中晶白云石充填，单偏光；e—泥晶—粉晶白云岩，泥质含量较高，含较多孔洞，多被沥青充填，单偏光；f—细晶白云岩，泥质含量较高，单偏光；g—泥晶生物屑灰岩，含腕足类、海百合茎等生物碎屑，单偏光；h—泥晶生物屑灰岩，含介形虫等生物碎屑，单偏光；i—泥晶生物屑灰岩，含海百合茎、有孔虫等生物碎屑，单偏光

图 3 川西北地区马角坝剖面中泥盆统观雾山组岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of the Middle Devonian Guanwushan Formation at Majiaoba section in northwestern Sichuan Basin

~3.19‰，平均值为 1.49‰(图 5)。相比马角坝剖面，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为稳定，漂移频次少，总体表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 均为正值，仅底部、中下部和顶部共发生 3 次正漂移，其余位置 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为稳定，无明显正、负漂移(图 5)。具体表现为：样品 YMB-3 处 $\delta^{13}\text{C}$ 值首次发生正漂移，幅度为 2‰，在样品 YMB-4 处急速负漂移， $\delta^{13}\text{C}$ 值稳定在 0~0.5‰之间；样品 YMB-11 与 YMB-12 之间 $\delta^{13}\text{C}$ 值再次出现正漂移，幅度达 3‰，在样品 YMB-12 处急速负漂移至 0.5‰； $\delta^{13}\text{C}$ 值第 3 次正、负漂移分别出现在 YMB-25、YMB-31 处，并在观雾山组顶部趋于稳定。

雁门坝剖面观雾山组的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在-7.30‰

~-1.20‰之间，平均值为-4.39‰。氧同位素组成变化总体表现为在地层顶部、中部、中下部和底部波动幅度大，仅上部波动幅度较小(图 5)。当碳同位素曲线变化不明显时，可借助氧同位素曲线变化判断海平面变化，如图 5 所示，观雾山组 $\delta^{18}\text{O}$ 值整体波动幅度大且岩石类型以细晶白云岩为主，仅在底部与中部沉积薄层泥岩、页岩和灰岩，可见该时期以浅水环境为主。

4.3 何家梁剖面

何家梁剖面是泥盆系与石炭系的界线，下伏地层为中泥盆统观雾山组，上覆地层为下石炭统总长

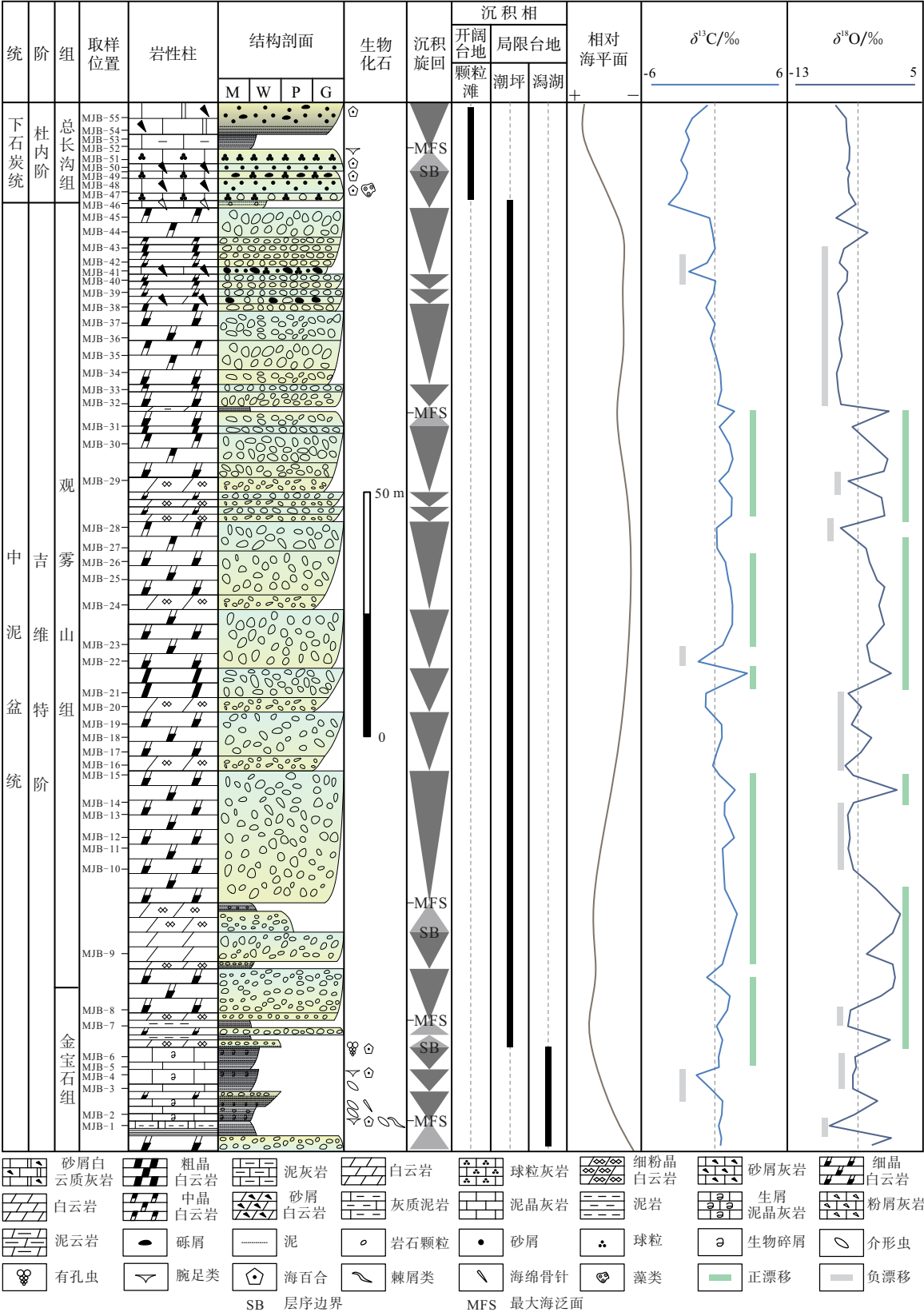


图 4 川西北地区马角坝剖面中泥盆统和下石炭统碳氧同位素演化综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive column of carbon-oxygen isotope evolution in the Devonian and Lower Carboniferous in Majiaoba section, northwestern Sichuan Basin

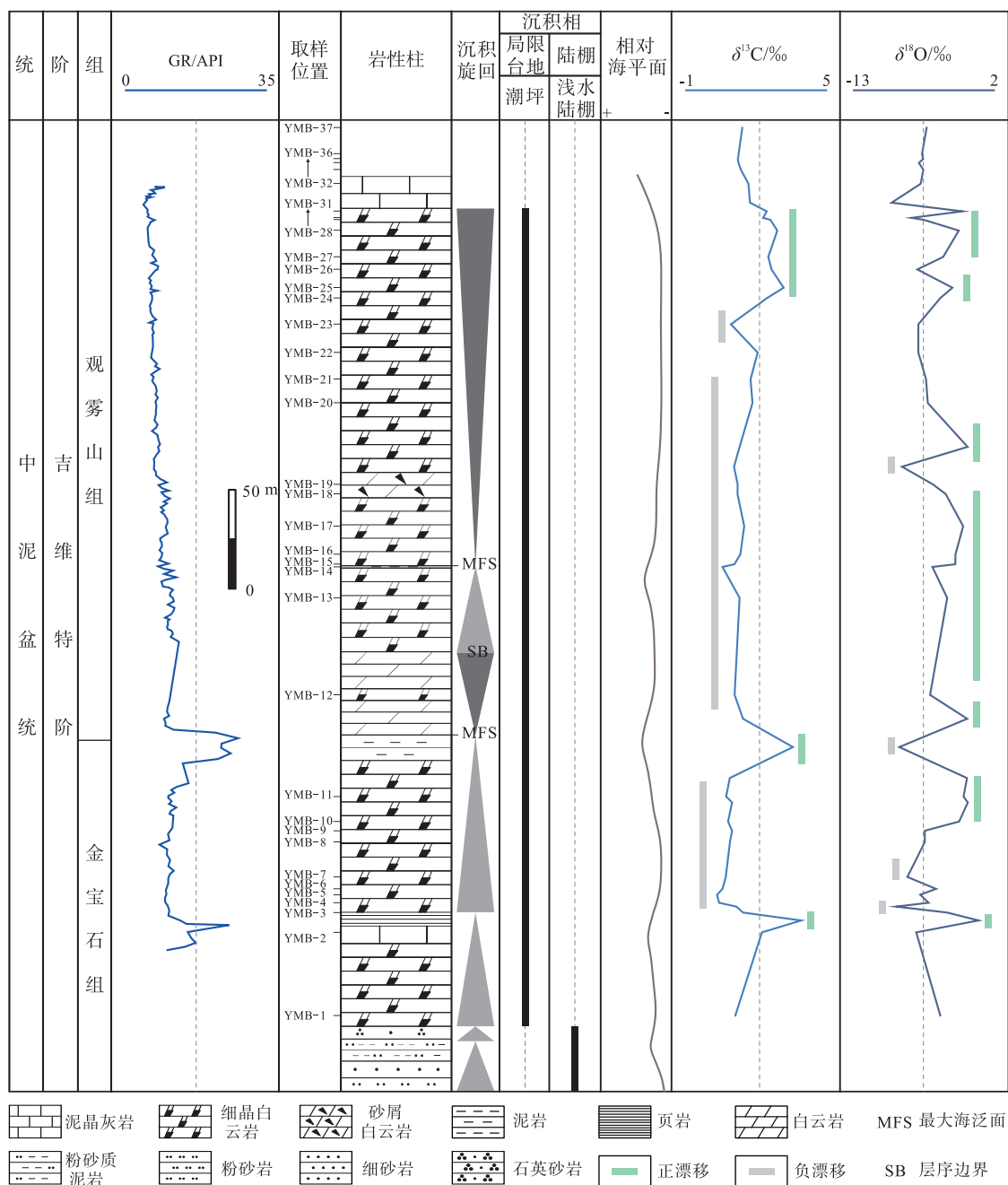


图 5 川西北地区雁门坝剖面中泥盆统碳氧同位素演化综合柱状图

Fig. 5 Comprehensive column of carbon and oxygen isotope evolution of the Middle Devonian in Yanmenba section, northwestern Sichuan Basin

沟组，中间缺失上泥盆统，为不整合接触(图 6)。

该剖面观雾山组 $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -9.50‰ ~ 2.88‰ 之间，平均值为 -0.45‰ (图 6)， $\delta^{13}\text{C}$ 在地层顶部、底部总体为负值，变化幅度大，中部、中下部表现为正值，波动幅度较大。具体特征如下：金宝石组与观雾山组界线至样品 HJL-32 处，碳同位素正、负漂移频繁交替，但 $\delta^{13}\text{C}$ 总体为负值，在样品

HJL-32 处急速正漂移，碳同位素变为正值；在样品 HJL-41 处再次发生负漂移，HJL-42 处迅速正漂移，再次变为正值，直至样品 HJL-46 处；在样品 HJL-48 至样品 HJL-54 之间，碳同位素曲线发生小幅波动，但均为正值；样品 HJL-55 至观雾山组与总长沟组界线， $\delta^{13}\text{C}$ 值总体呈现逐渐增大的趋势，处于负漂移向正漂移转折期，仅在样品

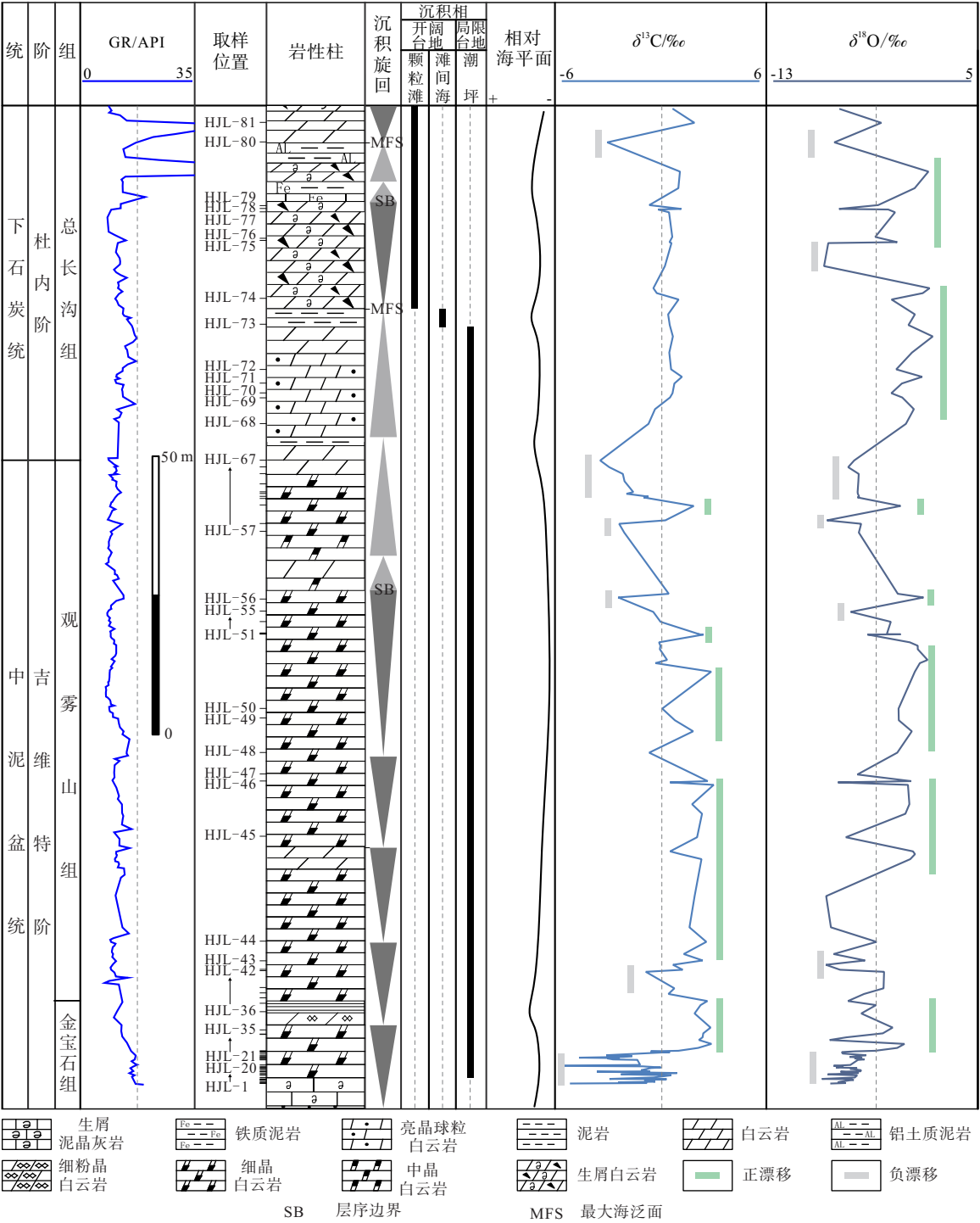


图 6 川西北地区何家梁剖面中泥盆统和下石炭统碳氧同位素演化综合柱状图

Fig. 6 Comprehensive column of carbon and oxygen isotope evolution of the Devonian and Lower Carboniferous in Hejialiang section, northwestern Sichuan Basin

HJL-56处和样品 HJL-58 处发生正漂移，幅度分别为 3‰和 4.4‰。

何家梁剖面观雾山组碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-8.64\text{‰} \sim 1.12\text{‰}$ 之间，平均值为 -4.41‰ 。该剖

面氧同位素曲线波动幅度大，底部、顶部 $\delta^{18}\text{O}$ 为负值，中部为正值(图 6)。

何家梁剖面总长沟组碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-3.29\text{‰} \sim 2.08\text{‰}$ ，平均值为 0.4‰ 。碳同位素曲

线总体表现为顶部、底部为负值, 波动幅度较大, 中部为正值, 总体较为平稳(图 6)。具体变化特征如下: 总长沟组与观雾山组界线处, 碳同位素处于负漂移向正漂移的转折期, $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐增大; 在样品 HJL-69 至样品 HJL-74 之间, $\delta^{13}\text{C}$ 值无明显漂移特征, 在样品 HJL-70 处碳同位素发生小幅负漂移, 变为负值, 随后立即在样品 HJL-74 处正漂移, 回归正值; $\delta^{13}\text{C}$ 的第 2 次正漂移出现在样品 HJL-80 处, 幅度为 3.9‰。

该剖面总长沟组碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $-8.44\text{‰} \sim -0.64\text{‰}$ 之间, 平均值为 -4.77‰ 。总长沟组氧同位素曲线与碳同位素曲线变化特征相似, 总体表现为在地层顶部、底部波动幅度大, 中部较为平稳, 仅上部第 2 次负漂移处幅度大于碳同位素曲线。

5 讨论

5.1 数据有效性判别

碳氧同位素作为古环境重建的重要指标, 能够有效记录碳酸盐岩沉积期的环境特征, 但可能受到后期成岩影响发生蚀变, 使得该信息无法反映古环境信息。为确保同位素数据的可靠性, 需通过原始性评价排除成岩改造的影响。

目前常用的评价方法主要包括阈值法和相关性分析 (Kaufman and Knoll, 1995; 李文正等, 2019; 刘安等, 2021)。基于上述方法对所测 210 组数据进行筛选, 剔除无效数据后, 最终获得的有效数据见表 1。3 个剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布于 $-6\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 分布于 $-9\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 之间。表 1 中数据显示, 仅 1 个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 略低于 -9‰ , 整体符合海相碳酸盐岩同位素组成的特征范围。

通过线性回归分析进一步发现, 马角坝、雁门坝和何家梁 3 个剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关性分别为 0.055、0.003 和 0.121, 均未达到显著相关水平, 缺乏明显线性关系(图 7)。这表明在本次实测的 3 个剖面上, 研究样品未遭受大规模成岩蚀变改造, 原始同位素组成较好地保存了有效的古沉积环境信息, 可以用于后续的地层对比和沉积环境分析。

5.2 古海洋盐度

前人的研究成果已经证实, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都与古海洋盐度呈正相关, 且 $\delta^{13}\text{C}$ 与古海洋盐度相关性更

高, 受温度影响较小 (Clayton and Degens, 1959)。随后, 有学者结合 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$, 提出了一个古海洋盐度公式 (Keith and Weber, 1964):

$$Z = 2.048 * (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 * (\delta^{18}\text{O} + 50) \quad (1)$$

其中, Z 为古盐度, $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 均采用 PDB 标准。在侏罗纪之前沉积的地层, ^{13}C 和 ^{12}C 基本不发生交换, 总体较为稳定, 且寒武纪之后, $\delta^{13}\text{C}$ 变化并不明显 (张秀莲, 1985), 所以该公式仍适用泥盆系与石炭系。通常认为, $Z > 120$ 为海相灰岩, $Z < 120$ 为淡水灰岩, 目前该公式广泛应用于国内元古界、古生界等碳酸盐岩地层古盐度分析, 并取得了较好的成果 (孔为伦等, 2011; 李倩文等, 2014; 姬国锋等, 2016)。

利用上述公式, 分别求取马角坝、何家梁和雁门坝剖面已采集样品的有效 Z 值, 得到古海洋盐度的演化结果。

1) 马角坝剖面观雾山组 Z 值为 119.39 ~ 130.16, 平均值为 125.30 (表 1)。仅有 1 个数据点低于 120, 说明这一时期观雾山组总体为稳定的海相沉积环境, 中、下部盐度总体较高, 岩性以细粉晶白云岩和细晶白云岩为主, 顶部发育少量砂屑白云岩和砂屑灰岩, 说明此时随着海水盐度下降, 白云岩含量减少, 反映同沉积白云石化作用减弱, 可能受到少量陆源河流淡水的影响(图 8)。总长沟组 Z 值介于 115.95 ~ 119.92 之间, 平均值为 118.52, 盐度略低于观雾山组, 但整体仍为高盐环境。

2) 雁门坝剖面观雾山组 Z 值为 125.00 ~ 132.63, 平均 128.16 (表 1)。底部沉积薄层泥岩与黑色页岩, 相比马角坝剖面, 雁门坝剖面由下至上古盐度变化较小, 总体为稳定的高盐度的海相潮坪沉积环境, 岩性以细晶白云岩为主(图 8)。

3) 何家梁剖面观雾山组 Z 值为 116.86 ~ 131.41, 平均值为 125.19 (表 1)。该剖面与马角坝和雁门坝剖面观雾山组岩性相似, 以细晶白云岩为主, 夹少量细粉晶白云岩和薄层页岩, 中部盐度更高, 仅发育白云岩这一类岩性。总长沟组 Z 值范围为 116.83 ~ 129.99, 平均值 126.52。虽然在总长沟组与观雾山组界线处发育薄层泥岩, 但该时期为稳定的高盐度海相沉积环境, 岩性仍以白云岩为主(图 8)。

表 1 川西北地区中泥盆统和下石炭统碳氧同位素组成

Table 1 Carbon and oxygen isotope composition of the Middle Devonian and Lower Carboniferous in northwestern Sichuan Basin

剖面	层位	深度 /m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	Z	T/℃	剖面	层位	深度 /m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	Z	T/℃
马角坝	总长沟组	3.0	石灰岩	-2.19	-5.83	119.92	33.77	总长沟组		117.998	白云岩	2.08	-3.16	129.99	20.97
		5.6	石灰岩	-2.82	-5.74	118.67	33.29			121.504	白云岩	-3.29	-7.50	116.83	22.26
		7.4	灰质泥岩	-2.48	-5.57	119.45	32.45			132.777	白云岩	-0.70	-3.45	124.15	18.14
		8.9	灰质泥岩	-2.74	-5.32	119.04	31.20			133.561	白云岩	-0.16	-2.51	125.73	15.52
		11.6	石灰岩	-3.26	-5.38	117.94	31.48			134.062	白云岩	0.52	-1.88	127.42	23.48
		13.2	石灰岩	-2.83	-5.74	118.65	33.30			138.497	白云岩	0.72	-3.71	126.92	14.71
		14.1	石灰岩	-2.65	-5.31	119.23	31.16			139.421	白云岩	0.55	-1.69	127.59	16.85
		15.4	石灰岩	-2.77	-5.56	118.86	32.42			149.732	白云岩	1.11	-2.21	128.47	10.61
		18.2	石灰岩	-3.45	-5.41	117.54	31.64			154.322	白云岩	0.56	-0.64	128.13	15.06
		20.6	石灰岩	-4.47	-4.42	115.95	26.79			162.278	白云岩	0.65	-1.77	127.74	12.97
		23.4	白云岩	-0.53	-7.26	122.60	38.81			164.819	白云岩	0.85	-1.25	128.41	16.93
		26.4	白云岩	-0.24	-2.72	125.46	17.02			166.566	白云岩	0.73	-2.22	127.69	12.84
		29.7	白云岩	0.01	-6.13	124.26	32.90			167.325	白云岩	0.58	-1.22	127.88	11.52
		32.6	白云岩	-0.76	-6.78	122.36	36.26			172.072	白云岩	-0.75	-0.88	125.33	30.55
		34.4	石灰岩	-2.50	-5.62	119.39	30.31			178.642	白云岩	-3.72	-5.66	116.86	33.34
	观雾山组	36.3	白云岩	0.04	-5.72	124.54	30.83	何家梁		179.847	白云岩	-3.17	-6.22	117.72	28.46
		38.8	白云岩	-0.14	-7.04	123.51	37.62			181.052	白云岩	-2.33	-5.24	119.92	28.62
		41.8	白云岩	-0.87	-6.64	122.22	35.53			182.378	白云岩	-2.22	-5.27	120.12	28.97
		45.1	白云岩	0.00	-6.35	124.13	34.03			184.325	白云岩	-1.68	-5.34	121.19	28.86
		48.1	白云岩	-0.43	-6.80	123.03	36.36			184.620	白云岩	-2.10	-5.32	120.34	28.27
		51.7	白云岩	0.09	-6.42	124.29	34.41			185.137	白云岩	-0.75	-5.20	123.18	29.03
		55.2	白云岩	0.50	-7.18	124.76	38.40			185.284	白云岩	-1.05	-5.36	122.49	11.59
		58.7	白云岩	0.61	-6.95	125.09	37.17			186.816	白云岩	2.04	-1.37	130.80	27.38
		61.6	白云岩	0.25	-6.56	124.54	35.11			190.015	白云岩	-2.56	-5.02	119.57	28.42
		66.2	白云岩	0.41	-4.94	125.69	27.02			191.597	白云岩	-2.24	-5.23	120.11	12.60
		69.8	白云岩	1.40	-2.14	129.09	14.64			202.594	白云岩	0.50	-1.63	127.52	32.15
		77.3	白云岩	0.39	-5.52	125.34	29.82			205.845	白云岩	-0.45	-5.98	123.39	15.19
		86.9	白云岩	0.15	-6.62	124.31	35.44			207.623	白云岩	-0.01	-2.28	126.15	16.72
		91.1	白云岩	0.20	-2.95	126.24	18.03			209.853	白云岩	2.39	-2.65	130.87	11.57
		93.9	白云岩	0.99	-2.46	128.09	15.97			209.878	白云岩	2.34	-1.37	131.41	24.60
		97.6	白云岩	1.28	-1.38	129.23	11.63			209.910	白云岩	2.65	-4.43	130.51	12.32
		102.8	白云岩	1.67	-1.11	130.16	10.58			223.217	白云岩	0.10	-1.56	126.73	12.24
		110.9	白云岩	0.74	-2.85	127.39	17.56			225.303	白云岩	0.88	-1.54	128.33	12.79
		114.3	白云岩	-1.61	-2.36	122.84	15.55			231.129	白云岩	-0.71	-1.68	125.02	29.08
		120.8	白云岩	-0.87	-5.51	122.77	29.81			235.059	白云岩	2.07	-5.37	128.87	38.29
		123.6	白云岩	-0.91	-3.63	123.62	20.97			236.467	白云岩	0.58	-7.16	124.92	34.45
		127.2	白云岩	0.62	-5.04	126.07	27.48			246.329	白云岩	2.25	-6.43	128.70	20.80
		129.9	白云岩	0.66	-2.18	127.56	14.80			265.106	白云岩	2.82	-3.59	131.28	25.68
		132.9	白云岩	0.16	-3.71	125.79	21.32			268.454	白云岩	2.59	-4.66	130.29	37.26
		135.6	白云岩	-0.22	-5.95	123.89	32.00			270.128	白云岩	1.36	-6.97	126.62	17.79
		137.6	白云岩	0.44	-4.79	125.81	26.32			270.494	白云岩	-0.91	-2.90	123.99	18.00
		143.2	白云岩	0.92	-4.75	126.83	26.10			273.458	白云岩	0.85	-2.95	127.57	26.11
		145.7	白云岩	0.90	-5.59	126.35	28.62			274.472	白云岩	0.48	-4.75	125.92	26.22
		150.4	白云岩	1.83	-5.27	128.42	29.83			275.740	白云岩	2.88	-6.23	130.10	14.79
		152.6	白云岩	0.72	-5.52	126.03	26.16	金宝石组		276.472	白云岩	2.46	-3.64	130.54	20.60
		156.9	白云岩	0.82	-4.76	126.62	12.11			277.978	白云岩	2.09	-5.00	129.09	12.32
		174.2	白云岩	0.97	-2.88	127.86	17.73			281.544	白云岩	2.63	-3.02	131.18	26.89

续表 1

剖面	层位	深度 /m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	Z	T/℃	剖面	层位	深度 /m	岩性	$\delta^{13}\text{C}$ /‰	$\delta^{18}\text{O}$ /‰	Z	T/℃
马 角 坝	金 宝 石 组	185.7	白云岩	1.17	-5.19	127.12	21.42	何 家 梁	金 宝 石 组	282.258	白云岩	2.59	-6.37	129.43	34.61
		189.0	石灰岩	0.15	-5.56	124.84	23.08			282.733	白云岩	2.36	-7.92	128.19	15.12
		195.3	石灰岩	0.34	-4.55	125.72	18.63			284.672	白云岩	1.09	-3.72	127.69	23.28
		197.4	石灰岩	0.38	-4.37	125.89	17.87			284.772	白云岩	-0.61	-5.60	123.26	28.98
		199.0	石灰岩	-1.79	-4.85	121.22	19.94			284.912	白云岩	0.57	-6.80	125.09	28.58
		201.8	石灰岩	-0.41	-4.84	124.04	19.89			285.172	白云岩	-1.23	-6.72	121.43	18.65
		207.1	石灰岩	0.64	-4.63	126.31	18.95			285.472	白云岩	-3.35	-4.56	118.16	22.07
		209.4	灰质泥岩	0.35	-8.21	123.92	36.11			285.632	白云岩	-1.74	-5.33	121.08	25.55
雁 门 坝	观 雾 山 组	613.5	石灰岩	1.40	-5.21	127.57	28.32			285.772	白云岩	-2.27	-6.09	119.62	20.96
		626.7	石灰岩	1.24	-5.71	127.00	30.78			285.912	白云岩	-5.03	-5.09	114.47	20.23
		629.2	石灰岩	1.21	-5.59	126.99	30.19			285.992	白云岩	-2.52	-4.92	119.69	23.43
		631.2	石灰岩	1.23	-6.04	126.81	32.44			286.052	白云岩	-3.27	-5.63	117.79	19.33
		634.7	石灰岩	1.34	-5.57	127.27	30.09			286.232	白云岩	-2.94	-4.72	118.94	21.97
		641.8	石灰岩	1.67	-5.85	127.81	31.48			286.312	白云岩	-1.43	-5.31	121.72	25.19
		655.7	白云岩	2.46	-1.33	131.68	11.44			287.222	白云岩	-1.26	-6.01	121.73	32.74
		659.0	白云岩	2.30	-6.85	128.60	36.64			287.472	白云岩	-1.12	-6.65	121.70	28.23
		660.0	白云岩	2.62	-5.52	129.92	29.84			287.672	白云岩	0.02	-7.35	123.67	31.71
		665.4	白云岩	2.92	-1.73	132.42	13.00			287.772	白云岩	-0.59	-5.38	123.42	22.30
		678.8	白云岩	2.53	-3.41	130.78	20.00			287.912	白云岩	-0.81	-6.04	122.63	25.31
		685.1	白云岩	2.67	-6.22	129.67	33.36			288.172	白云岩	-1.21	-5.01	122.33	20.65
		694.3	白云岩	3.19	-2.41	132.63	15.74			288.372	白云岩	-0.64	-5.08	123.45	20.96
		699.6	白云岩	2.47	-3.74	130.50	21.46			288.432	白云岩	-3.93	-6.92	115.80	29.55
		712.8	白云岩	0.91	-6.11	126.12	32.80			288.672	白云岩	1.01	-5.27	126.75	21.79
		727.1	白云岩	2.07	-6.10	128.50	32.75			288.912	白云岩	-2.44	-8.11	118.26	35.60
		740.5	白云岩	1.76	-5.28	128.28	28.66			289.072	白云岩	0.66	-5.38	125.97	22.29
		752.5	白云岩	1.84	-5.08	128.54	27.69			289.472	白云岩	-0.43	-5.60	123.63	23.28
		793.7	白云岩	1.20	-4.53	127.50	25.08			289.732	石灰岩	-3.15	-8.64	116.54	38.39
		798.5	白云岩	1.19	-3.14	128.17	18.83			289.772	石灰岩	0.37	-5.93	125.10	24.82
		814.8	白云岩	1.48	-1.25	129.71	11.13			289.922	石灰岩	-1.01	-5.70	122.39	23.75
		829.0	白云岩	1.32	-2.09	128.96	14.44			289.972	石灰岩	-0.90	-6.05	122.45	25.39
		834.0	白云岩	1.06	-2.11	128.42	14.52			290.222	石灰岩	-0.34	-6.93	123.16	29.60
		835.4	白云岩	0.54	-4.59	126.12	25.36			290.352	石灰岩	-2.62	-7.18	118.36	30.83
		851.0	白云岩	1.28	-2.99	128.43	18.18			290.472	石灰岩	-0.84	-6.45	122.36	27.25
		900.0	白云岩	1.07	-4.83	127.09	26.50			290.552	石灰岩	-5.53	-7.78	112.10	33.89
		951.4	白云岩	0.70	-1.20	128.14	10.94								
		964.0	白云岩	0.78	-1.68	128.06	12.80								
		968.7	白云岩	0.96	-5.42	126.57	29.35								
		974.3	白云岩	0.87	-5.40	126.39	29.25								
		992.0	白云岩	0.68	-7.30	125.06	39.04								
		998.0	白云岩	0.54	-4.18	126.32	23.46								
		1001.0	白云岩	0.31	-5.89	125.00	31.69								
		1005.0	白云岩	0.39	-5.01	125.60	27.36								
		1010.0	白云岩	1.43	-2.99	128.74	18.18								
		1020.0	白云岩	2.25	-6.34	128.75	33.98								
		1062.0	白云岩	1.10	-3.74	127.69	21.46								

注：Z 代表盐度指数： $Z=2.048\times(\delta^{13}\text{C}+50)+0.498\times(\delta^{18}\text{O}+50)$ ；T 代表成岩温度： $T=15.976-4.2\times\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}+0.13\times(\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}+0.22)^2$ 。

何家梁剖面观雾山组+总长沟组数据依据 Shi 等（2026）。

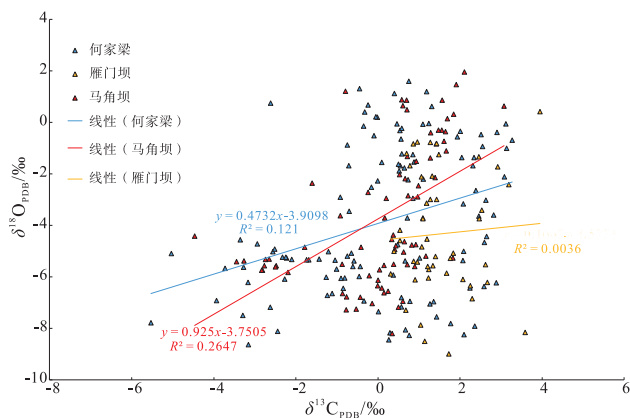
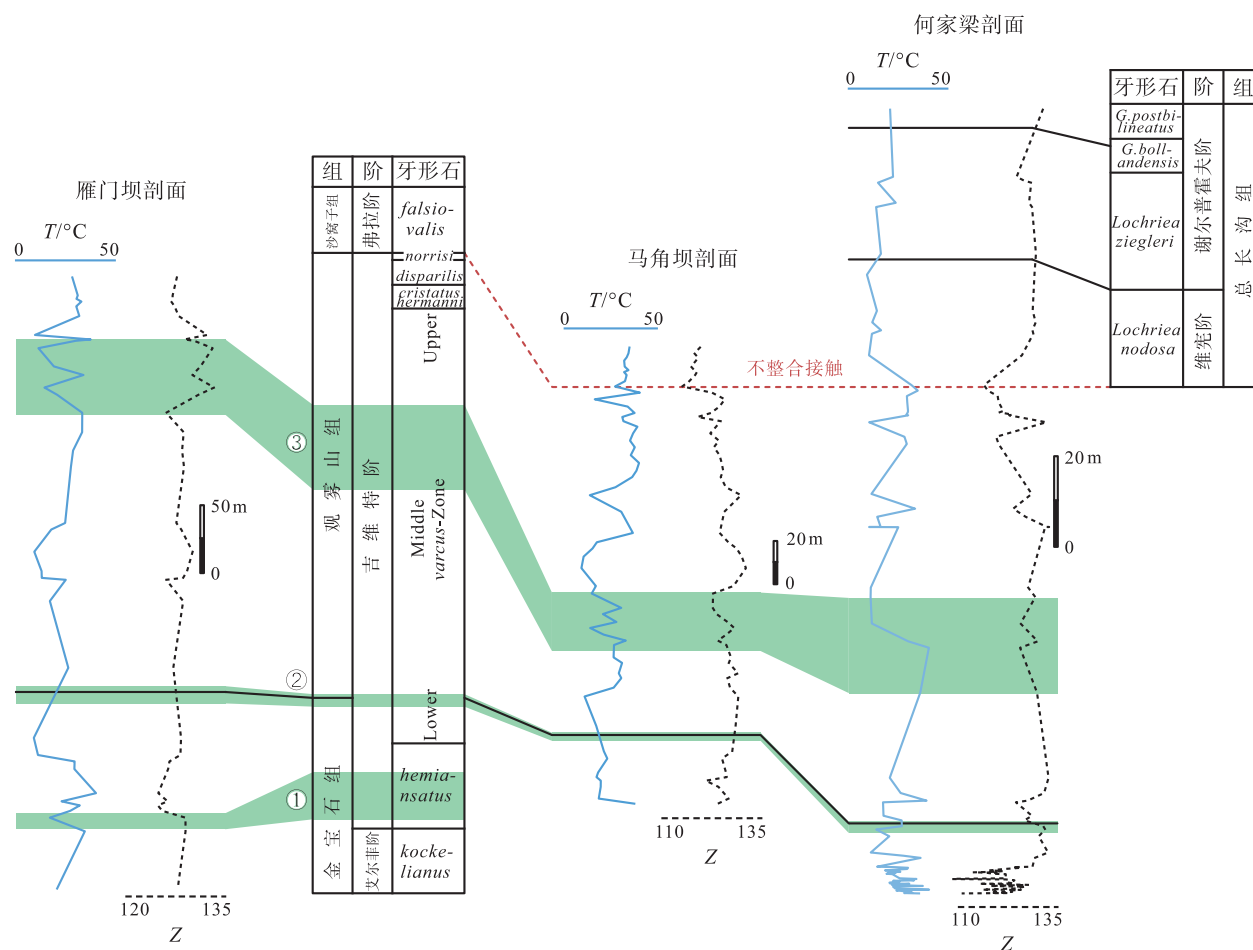


图 7 川西北地区中泥盆统和下石炭统碳酸盐岩碳氧同位素相关性

Fig. 7 Correlation of carbon and oxygen isotopes within carbonate rocks of the Middle Devonian and Lower Carboniferous in northwestern Sichuan Basin

5.3 古海洋温度

碳酸盐岩的稳定同位素含量受水体温度控制 (李倩文等, 2014)。前人研究成果表示, 当盐度不变时, 水体温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 呈负相关, 对 $\delta^{13}\text{C}$ 几乎没有影响, 因此, 当盐度不变时, $\delta^{18}\text{O}$ 可作为反映古海洋温度的重要标志。由于成岩作用和年代效应的影响, 较早沉积的碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值往往偏低, 前人以第四纪碳酸盐岩中的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值 -1.2‰ 作为矫正基准 (邵龙义等, 1996; 孟昊等, 2016), 取得了较好的成果 (杨雪琪等, 2017)。依据上述方法对本次 $\delta^{18}\text{O}$ 进行矫正后, 金宝石组、观雾山组和总长沟组 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 -3.19‰ 、 -3.66‰ 、 -5.12‰ , 与第四系 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值相差 1.99‰ 、 2.46‰ 、 3.92‰ , 基于上述差值校正本次 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 并将 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 代入相关经验公式求取古海洋温度:



①—Kaèáks 事件；②—Lower pumilio 事件；③—Upper pumilio 事件

图 8 川西北地区中泥盆统和下石炭统古温度与古盐度特征

Fig. 8 Paleotemperature and paleosalinity characteristics of the Middle Devonian and Lower Carboniferous in northwestern Sichuan Basin

$$T(^{\circ}\text{C}) = 15.976 - 4.2 * \delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3} + 0.13 * (\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3} + 0.22)^2 \quad (2)$$

结果显示, 观雾山组古温度分布在 10.58 ~ 33.71 °C 之间, 平均值为 25.32 °C, 其中 15 ~ 40 °C 占比约 82.69%, 说明研究区观雾山组沉积时期为亚热带—热带气候。总长沟组古水体温度分布在 10.61 ~ 39.71 °C 之间, 平均值为 23.71 °C, 古水体温度 15 ~ 34 °C 占比约 95.74%, 属于温带—热带气候。可见, 在雾山组与总长沟组不整合处, 水体温度显著降低, 说明在进入石炭纪之后发生了显著的降温事件。

总体来看, 观雾山组沉积时期古海洋温度由下至上呈现升高→降低→升高→降低→升高多次变化的特征, 观雾山组中部沉积时期水体盐度高、温度适宜、海平面较浅, 是白云岩发育的有利时期; 马角坝、雁门坝和何家梁剖面观雾山组中部岩性均以细粉晶和细晶白云岩为主, 也从侧面证实了这一观点。总长沟组沉积初期水体温度较低, 随后呈现上升并迅速下降的趋势。

5.4 碳同位素全球对比

前人针对华南地区中泥盆统吉维特阶碳酸盐岩的碳同位素开展了系统性研究, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布于 $-2\text{‰} \sim +2.5\text{‰}$ 之间 (崔秉荃等, 1993; Bai *et al.*, 1994; 王大锐和白志强, 2002)。郅文昆等 (2019) 结合生物地层格架与碳同位素地层学, 提出吉维特阶中期存在一次显著的 $\delta^{13}\text{C}$ 正漂移事件, 增幅超过 3.5‰。该事件在欧洲同期地层中可广泛识别 (Buggisch and Joachimski, 2006; 郅文昆等, 2019)。相比之下, 国内对石炭系碳同位素的研究较为薄弱。近年来, 部分学者以华南、北美及欧洲等剖面为基础, 逐步构建全球石炭系碳同位素完整演化曲线, 推动了高精度对比框架的建立 (王向东等, 2019; Chen *et al.*, 2022)。

本次共实测 3 条川西北地区野外剖面, 三者间具有良好的区域对比性。为验证碳同位素事件的全球性意义, 进一步选取法国、德国、北美等区域野外露头碳同位素进行对比。结果显示, 雁门坝剖面中泥盆统吉维特阶可识别出 Kaëaks、Lower pumilio

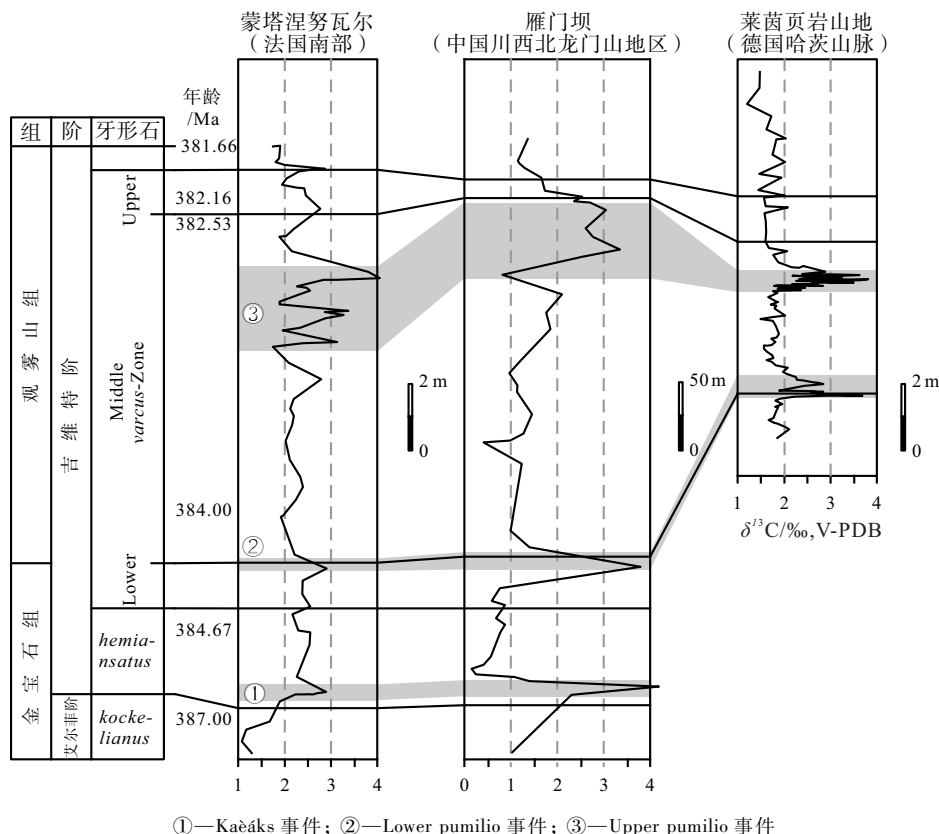


图 9 中泥盆统全球剖面碳同位素对比 (据 Buggisch and Joachimski, 2006)

Fig. 9 Comparison of carbon isotopes among global profiles during the Middle Devonian (after Buggisch and Joachimski, 2006)

和 Upper pumilio 正漂移事件(图 9), 马角坝和何家梁剖面仅可识别出 Lower pumilio 和 Upper pumilio 正漂移事件 (Buggisch and Joachimski, 2006) (图 10)。Kaëaks 正漂移事件为全球海平面上升, 欧洲地区多数野外剖面在该时期发育黑色页岩, $\delta^{13}\text{C}$ 值漂移幅度为 2‰ ; Lower pumilio 与 Upper pumilio 正漂移事件为海退, 风化作用增强, 使得有机碳含量变高, 以暗色灰岩和页岩层为标志, 碳同位素漂移幅度为 2‰ 。Lower pumilio 事件在部分深水环境的剖面中识别较差 (Buggisch and Joachimski,

2006) (图 9; 图 10)。值得注意的是, Upper pumilio 正漂移事件对应的牙形石带和海平面变化特征与 Taghanic 正漂移事件相同, 可能为同一事件 (郗文昆等, 2019)。

马角坝、雁门坝和何家梁剖面吉维特阶 $\delta^{13}\text{C}$ 主要分布在 $-2\text{‰} \sim 4\text{‰}$ 之间(图 9; 图 10), 整体呈现先递增后减小的特征, 这与中泥盆统标准无机碳同位素曲线变化趋势一致, 说明本次实测剖面具有区域及全球对比性, 记录了该时期全球碳循环变化特征。该特征在四川龙门山 (崔秉荃等, 1993)、横

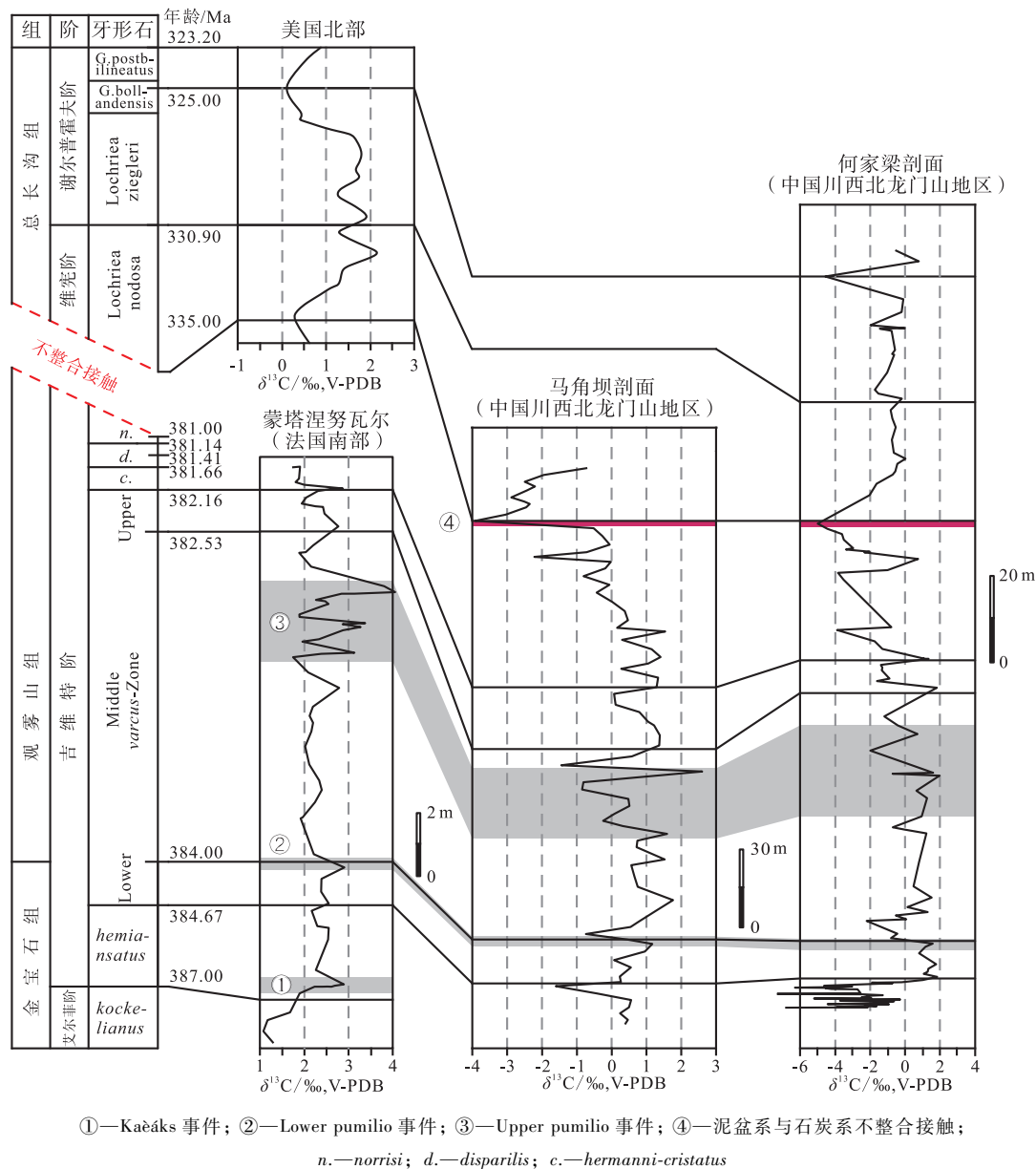


图 10 中泥盆统与下石炭统全球剖面碳同位素对比 (据 Buggisch and Joachimski, 2006; Chen *et al.*, 2022)

Fig. 10 Carbon isotope comparison among global profiles during the Devonian and Lower Carboniferous (after Buggisch and Joachimski, 2006; Chen *et al.*, 2022)

县六景(刘疆和白志强, 2009)、象州马鞍山、象州巴漆(王大锐和白志强, 2002)、德国哈茨山脉及法国南部(Buggisch and Joachimski, 2006)等地均可识别。虽然研究区内中泥盆统吉维特阶碳同位素与法国和德国地区碳同位素曲线在碳同位素漂移时间、次数与幅度等方面存在略微偏差,但在曲线总体变化趋势上具有一致性,故其可有效用于泥盆系地层的对比与划分。

马角坝和何家梁剖面在吉维特阶顶部发育明显的不整合界面,上覆地层为下石炭统总长沟组,下伏地层为中泥盆统观雾山组,缺失上泥盆统(图 10)。北美地区碳同位素在牙形石带 *G. bollandensis* 内发生 1 次明显负漂移(Chen *et al.*, 2022), $\delta^{13}\text{C}$ 由 1.5‰ 迅速降低至 0,在何家梁剖面碳同位素曲线上也可识别到这一变化(图 10),但目前并未证实该现象为全球性事件。马角坝和何家梁剖面下石炭统碳同位素分布在 -4‰ ~ 1‰ 之间,略低于全球下石炭统碳同位素,但其曲线变化趋势在华南(Buggisch *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2015; Qie *et al.*, 2016)与欧洲(Buggisch *et al.*, 2008)可得到较好识别,这表明马角坝和何家梁剖面下石炭统碳同位素曲线可有效用于泥盆系地层的对比与划分,也为完善全球泥盆系—石炭系碳同位素地层格架提供了资料补充。

6 结论

1) 四川盆地西北部观雾山组上覆地层为沙窝子组,下伏地层为金宝石组,表现为整合接触。该地区泥盆系与石炭系之间表现为区域性不整合,不整合面之下为中泥盆统观雾山组,不整合面之上为下石炭统总长沟组,缺失上泥盆统。

2) 泥盆系观雾山组 105 件有效样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -3.72‰ ~ 3.19‰,平均为 0.61‰, $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 -7.30‰ ~ -1.11‰,平均为 -4.49‰;下石炭统总长沟组 24 件有效样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.47‰ ~ 2.08‰,平均为 -0.92‰, $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 -5.83‰ ~ -0.64‰ 之间,平均为 -3.52‰。对观雾山组与总长沟组样品碳、氧同位素分析发现,观雾山组与总长沟组为海相沉积,观雾山组中部沉积时期海水盐度较高,水体较浅,为白云岩发育的有利阶段,顶部混杂少量陆源碎屑,偶见淡水沉积;总长沟组水体盐度稳定维持在 120 ~ 130 之间,相比观雾山组盐度更高,

顶部发育铝土质泥岩,表明其曾短暂暴露地表。观雾山组沉积时期水体温度分布在 15 ~ 40 °C 之间,平均值为 25.32 °C,属亚热带—热带气候,总长沟组水体温度为 15 ~ 34 °C,平均值为 23.71 °C,这也揭示从泥盆纪到石炭纪存在降温事件,显示了特提斯东缘对全球环境演化响应的一致性。

3) 川西北地区马角坝、雁门坝和何家梁(不整合面之下)3 条实测剖面的观雾山组与法国、德国等地区碳同位素曲线变化趋势一致,由下至上可识别出 Kačák, Lower pumilio 和 Upper pumilio 正漂移事件地层。马角坝和何家梁剖面不整合面之上的总长沟组碳同位素与同时期北美地区曲线变化特征基本相同,在顶部还可识别出 1 次区域性负漂移事件。这显示了全球性碳同位素事件响应的一致性,也为全球泥盆系—石炭系碳同位素地层格架提供了资料补充。此外,3 条实测剖面均发育 1~2 次负漂移,但漂移时间、幅度等方面有所偏差,可能与区域地质事件影响有关。

参考文献 (References)

- 陈竹新,李本亮,贾东,雷永良. 2008. 龙门山冲断带北段前缘带新生代构造变形. 地质学报, 82(9): 1178-1185. [Chen Z X, Li B L, Jia D, Lei Y L. 2008. The Cenozoic structural deformation in the northern Longmenshan front belt. Acta Geologica Sinica, 82(9): 1178-1185]
- 陈竹新,李伟,王丽宁,雷永良,杨光,张本健,尹宏,苑保国. 2019. 川西北地区构造地质结构与深层勘探系分区. 石油勘探与开发, 46(2): 397-408. [Chen Z X, Li W, Wang L N, Lei Y L, Yang G, Zhang B J, Yin H, Yuan B G. 2019. Structural geology and favorable exploration prospect belts in northwestern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 46(2): 397-408]
- 程红光,李心清,袁洪林,王克卓. 2009. 泥盆纪海水的碳、氧同位素变化: 来自腕足化石的同位素记录. 地球学报, 30(1): 79-88. [Cheng H G, Li X Q, Yuan H L, Wang K Z. 2009. Carbon and oxygen isotope variations of Devonian seawater: isotopic records from brachiopod shell. Acta Geoscientia Sinica, 30(1): 79-88]
- 成晓雨,李凤杰,荆锡贵,沈凡,张昊. 2018. 四川龙门山区中泥盆统金宝石组核形石岩石学特征及其成因. 古地理学报, 20(2): 207-218. [Cheng X Y, Li F J, Jing X G, Shen F, Zhang H. 2018. Petrologic characteristics and genesis analysis of oncolites from the Middle Devonian Jinbaoshi Formation in Longmenshan area, Sichuan Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(2): 207-218]
- 崔秉荃,卢武长,杨绍全. 1993. 龙门山地区泥盆纪锶、碳同位素与海平面变化. 成都地质学院学报, 20(2): 1-8. [Cui B Q, Lu W C, Yang S Q. 1993. Strontium and carbon isotopes and sea level fluctuation of Devonian in Longmen mountain region. Journal of Chengdu University of

- Technology (Science & Technology Edition), 20(2): 1-8]
- 邓成龙,郝青振,郭正堂,朱日祥. 2019. 中国第四纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 330-352. [Deng C L, Hao Q Z, Guo Z T, Zhu R X. 2019. Quaternary integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(1): 330-352]
- 邓涛,侯素宽,王世骥. 2019. 中国新近纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 315-329. [Deng T, Hou S K, Wang S Q. 2019. Neogene integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(1): 315-329]
- 范影年. 1980. 四川西北部早石炭世地层及珊瑚化石. 地层古生物论文集, (2): 1-47, 172-188. [Fan Y N. 1980. Early Carboniferous strata and corals of Northwestern Szechuan. *Professional Papers in Stratigraphy and Paleontology*, (2): 1-47, 172-188]
- 方少仙,侯方浩,李凌,王兴志,罗玉宏,王安平,李俊良,白洋. 2000. 四川华蓥山以西石炭系黄龙组沉积环境的再认识. 海相油气地质, 5(S1): 158-166. [Fang S X, Hou F H, Li L, Wang X Z, Luo Y H, Wang A P, Li J L, Bai Y. 2000. Reunderstanding of the sedimentary environment of the Carboniferous Huanglong Formation in the west of Huaying Mountain, Sichuan. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(S1): 158-166]
- 高万里,张琴,房强,赵惊涛,刘雯,孔维亮,李文煜,彭弘杰,曲天泉,蔡光银,鲁静,邱振. 2024. 石炭纪一二叠纪转折期重大地质事件与鄂尔多斯盆地东缘页岩气富集主控因素探讨. 地球科学, 49(12): 4501-4517. [Gao W L, Zhang Q, Fang Q, Zhao J T, Liu W, Kong W L, Li W Y, Peng H J, Qu T Q, Cai G Y, Lu J, Qiu Z. 2024. Discussion on significant geological events during Carboniferous-Permian transition and main controlling factors of shale gas enrichment in eastern margin of Ordos Basin. *Earth Science*, 49(12): 4501-4517]
- 黄程,周小靖,沈宇葳,文馨,翟梅琳,谭秀成. 2022. 龙门山北段观雾山组地层时代分布、沉积充填及其古地理意义. 地质学报, 96(7): 2255-2271. [Huang C, Zhou X J, Shen Y W, Wen X, Zhai M L, Tan X C. 2022. Stratigraphic age distribution and sedimentary filling of the Guanwushan Formation in the northern segment of Longmenshan Mountains, and its palaeogeographic significance. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2255-2271]
- 惠博,伊海生,陈三运,时志强. 2009. 龙门山马角坝地区石炭纪沉积相和层序地层研究. 断块油气田, 16(6): 10-12. [Hui B, Yi H S, Chen S Y, Shi Z Q. 2009. Carboniferous sedimentary facies and sequence stratigraphy in Majiaoba District of Longmen Mountains, Sichuan. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 16(6): 10-12]
- 姬国锋,范鸿,时志强,杜怡星. 2016. 川西北汉旺地区卡尼期鲕粒灰岩特征及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(1): 68-76. [Ji G F, Fan H, Shi Z Q, Du Y X. 2016. Characteristics and geological significance of the Late Triassic Carnian oolitic limestone in Hanwang area, northwest Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(1): 68-76]
- 贾东,陈竹新,贾承造,魏国齐,李本亮,张愷,魏东涛,沈扬. 2003. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. 高校地质学报, (3): 402-410. [Jia D, Chen Z X, Jia C Z, Wei G Q, Li B L, Zhang Q, Wei D T, Shen Y. 2003. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, Central China. *Geological Journal of China Universities*, (3): 402-410]
- 金文正,汤良杰,杨克明,万桂梅,吕志洲,余一欣. 2007. 川西龙门山褶皱冲断带分带性变形特征. 地质学报, 81(8): 1072-1080. [Jin W Z, Tang L J, Yang K M, Wan G M, Lyu Z Z, Yu Y X. 2007. Deformation and zonation of the Longmenshan fold and thrust zone in the western Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1072-1080]
- 孔为伦,李双应,万秋,杜叶龙,王松. 2011. 镇安西口地区二叠纪碳氧同位素特征及意义. 合肥工业大学学报(自然科学版), 34(7): 1058-1065. [Kong W L, Li S Y, Wan Q, Du Y L, Wang S. 2011. C, O isotope composition from Permian in Xikou region, Zhen'an County and its implications. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 34(7): 1058-1065]
- 李凤杰,屈雪林,杜凌春,荆锡贵,成晓雨. 2015. 龙门山甘溪土桥子组碳酸盐岩沉积相及其演化. 岩性油气藏, 27(5): 6-12. [Li F J, Qu X L, Du L C, Jing X G, Cheng X Y. 2015. Carbonate facies and sedimentary evolution of Upper Devonian Tuqiaozi Formation in Ganxi section of Longmen Mountain. *Lithologic Reservoirs*, 27(5): 6-12]
- 李凤杰,荆锡贵,张昊,徐文礼. 2017. 龙门山甘溪泥盆系生物骨架富集层成因机制. 地学前缘, 24(6): 322-332. [Li F J, Jing X G, Zhang H, Xu W L. 2017. Genetic mechanism of Devonian skeletal concentrations in Longmenshan area, Sichuan, China. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 322-332]
- 李凤杰,王佳,马小康,赖雪莲,张鹏飞,任树莹,陈政安. 2023. 四川龙门山地区中泥盆统金宝石组混合沉积特征. 古地理学报, 25(2): 294-307. [Li F J, Wang J, Ma X K, Lai X L, Zhang P F, Ren X Y, Chen Z A. 2023. Mixed sedimentation of the Middle Devonian Jinbaoshi Formation in Longmen Mountain area, Sichuan Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(2): 294-307]
- 李启来,伊海生,夏国清,季长军,金峰. 2017. 广西东平富 Ga 含锰岩系碳、氧同位素特征及意义. 地球科学, 42(9): 1508-1518. [Li Q L, Yi H S, Xia G Q, Ji C J, Jin F. 2017. Characteristics and implication of carbon and oxygen isotopes in Ga-rich manganese-bearing rock series in Dongping, Guangxi. *Earth Science*, 42(9): 1508-1518]
- 李倩文,金振奎,姜福杰. 2014. 白云岩成因碳氧同位素分析方法初探: 以北京燕山地区元古界白云岩为例. 岩性油气藏, 26(4): 117-122. [Li Q W, Jin Z K, Jiang F J. 2014. Carbon and oxygen isotope analysis method for dolomite formation mechanism: a case study from Proterozoic dolomite in Yanshan area. *Lithologic Reservoirs*, 26(4): 117-122]
- 李文渊. 2024. 古特提斯构造演化及其成矿作用. 地质学报, 98(11): 3255-3273. [Li W Y. 2024. The Paleo-Tethys tectonic evolution and corresponding metallogenesis. *Acta Geologica Sinica*, 98(11): 3255-3273]
- 李文正,张建勇,郝毅,倪超,田瀚,曾乙洋,姚倩颖,山述娇,曹脊翔,邹倩. 2019. 川东南地区洗象池组碳氧同位素特征、古海洋环境及其与储集层的关系. 地质学报, 93(2): 487-500. [Li W Z, Zhang J Y, Hao Y, Ni C, Tian H, Zeng Y Y, Yao Q Y, Shan S J, Cao J X, Zou Q. 2019. Characteristics of carbon and oxygen isotopic, paleoceanographic environment and their relationship with reservoirs of

- the Xixiangchi Formation, southeastern Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 487–500]
- 李佐强, 李凤杰, 赖雪莲, 陈政安, 倪子尧. 2020. 龙门山区中泥盆统养马坝组混积相与混积层序及其控制因素分析. *科学技术与工程*, 20(26): 10580–10591. [Li Z Q, Li F J, Lai X L, Chen Z A, Ni Z Y. 2020. Analysis of hybrid facies, hybrid sequence and its controlling factors of the Middle Devonian Yangmaba Formation in Longmenshan area. *Science Technology and Engineering*, 20(26): 10580–10591]
- 梁瀚, 文龙, 冉崎, 韩嵩, 刘冉, 陈康, 狄贵东, 陈骁, 裴仰文. 2022. 四川盆地龙门山前北段构造演化特征及其油气地质意义. *石油勘探与开发*, 49(3): 478–490. [Liang H, Wen L, Ran Q, Han S, Liu R, Chen K, Di G D, Chen X, Pei Y W. 2022. Structural characteristics and implications on oil/gas accumulation in north segment of the Longmenshan piedmont, northwestern Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 49(3): 478–490]
- 廖卓庭, 王向东, 王伟, 祁玉平, 陈波, 张懿强, 张峰, 林巍, 冯卓. 2010. 龙门山的石炭系. *地层学杂志*, 34(4): 349–362. [Liao Z T, Wang X D, Wang W, Qi Y P, Chen B, Zhang Y Q, Zhang F, Lin W, Feng Z. 2010. The Carboniferous strata in Mt. Longmen. *Journal of Stratigraphy*, 34(4): 349–362]
- 刘安, 陈林, 陈孝红, 田巍, 李海, 郅文昆, 周鹏. 2021. 湘中坳陷泥盆系碳氧同位素特征及其古环境意义. *地球科学*, 46(4): 1269–1281. [Liu A, Chen L, Chen X H, Tian W, Li H, Qie W K, Zhou P. 2021. Carbon and oxygen isotopic characteristics of Devonian in central Hunan depression and its paleoenvironmental significance. *Earth Science*, 46(4): 1269–1281]
- 刘疆, 白志强. 2009. 广西横县六景中泥盆统 Mg、Ca、Na、Sr、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 化学地层学特征. *物探与化探*, 33(4): 417–423. [Liu J, Bai Z Q. 2009. Chemostratigraphy of Mg, Ca, Na, Sr, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ in Middle Devonian strata of Liujing section, Guangxi. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 33(4): 417–423]
- 刘殊, 王浩, 吕其彪, 董霞, 刘红爱, 孙玮. 2020. 川西地区中部存在泥盆系—石炭系吗? 一个不整合面的地质属性推论. *天然气工业*, 40(9): 1–10. [Liu S, Wang H, Lü Q B, Dong X, Liu H A, Sun W. 2020. Is there Carboniferous-Devonian strata in the central area of western Sichuan Basin: inference on the geological properties of an unconformity. *Natural Gas Industry*, 40(9): 1–10]
- 卢武长, 崔秉荃, 杨绍全, 张平. 1994. 甘溪剖面泥盆纪海相碳酸盐岩的同位素地层曲线. *沉积学报*, 12(3): 12–20. [Lu W C, Cui B Q, Yang S Q, Zhang P. 1994. Isotope stratigraphic curves of Devonian marine carbonates in Ganxi profile. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(3): 12–20]
- 孟昊, 任影, 钟大康, 高崇龙, 高宙, 王点, 姜杨锦丰, 李谨杰. 2016. 四川盆地东部寒武系龙王庙组地球化学特征及其古环境意义. *天然气地球科学*, 27(7): 1299–1311. [Meng H, Ren Y, Zhong D K, Gao C L, Gao Z, Wang D, Jiang Y J F, Li J J. 2016. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Cambrian Longwangmiao Formation in eastern Sichuan Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 27(7): 1299–1311]
- 孟勇, 张欣, 陈奋宁, 李佐臣, 冯益民, 祁尧刚, 郑若蕾. 2025. 古亚洲洋构造域中西段新元古代晚期至晚泥盆世的构造运动. *地质学报*, 99(1): 58–77. [Meng Y, Zhang X, Chen F N, Li Z C, Feng Y M, Qi Y G, Zheng R L. 2025. Tectonic movements from the late Neoproterozoic to the Late Devonian in the central-western segment of the Paleo-Asian Ocean tectonic domain. *Acta Geologica Sinica*, 99(1): 58–77]
- 郅文昆, 马学平, 徐洪河, 乔丽, 梁昆, 郭文, 宋俊俊, 陈波, 卢建峰. 2019. 中国泥盆纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 115–138. [Qie W K, Ma X P, Xu H H, Qiao L, Liang K, Guo W, Song J J, Chen B, Lu J F. 2019. Devonian integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(1): 115–138]
- 郅文昆, 梁昆, 郭文, 高彪, 宋俊俊, 陈波, 黄璞, 乔丽, 徐洪河, 陈吉涛, 孙语聪, 张以春. 2024. 青藏高原及其周边泥盆纪综合地层、生物群与古地理演化. *中国科学: 地球科学*, 54(4): 1058–1090. [Qie W K, Liang K, Guo W, Gao B, Song J J, Chen B, Huang P, Qiao L, Xu H H, Chen J T, Sun Y C, Zhang Y C. 2024. Devonian integrative stratigraphy, biotas, and paleogeographical evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Science China Earth Sciences*, 54(4): 1058–1090]
- 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞. 1996. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义. *地球化学*, 25(6): 575–581. [Shao L Y, Dou J W, Zhang P F. 1996. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in Late Permian rocks of Southwest China. *Geochimica*, 25(6): 575–581]
- 申博恒, 沈树忠, 吴琼, 张水昌, 张斌, 王向东, 侯章帅, 袁东勋, 张以春, 刘锋, 刘俊, 张华, 史宇坤, 王军, 冯卓. 2022. 华北板块石炭纪—二叠纪地层时间框架. *中国科学: 地球科学*, 52(7): 1181–1212. [Shen B H, Shen S Z, Wu Q, Zhang S C, Zhang B, Wang X D, Hou Z S, Yuan D X, Zhang Y C, Liu F, Liu J, Zhang H, Shi Y K, Wang J, Feng Z. 2022. Carboniferous and Permian integrative stratigraphy and timescale of North China Block. *Scientia Sinica (Terrae)*, 52(7): 1181–1212]
- 汤良杰, 杨克明, 金文正, 吕志洲, 余一欣. 2008. 龙门山冲断带多层次滑脱带与滑脱构造变形. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 38(S1): 30–40. [Tang L J, Yang K M, Jin W Z, Lü Z Z, Yu Y X. 2008. Multilevel detachment zones and detachment structural deformation in the Longmenshan thrust belt. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 38(S1): 30–40]
- 王大锐, 白志强. 2002. 广西中—上泥盆统界线附近的化学地层学特征. *地层学杂志*, 26(1): 50–54. [Wang D R, Bai Z Q. 2002. Chemostratigraphic characters of the Middle–Upper Devonian boundary in Guangxi, South China. *Journal of Stratigraphy*, 26(1): 50–54]
- 王丽宁, 陈竹新, 李本亮, 雷永良, 闫淑玉. 2014. 龙门山冲断带北段构造解析及有利区带预测. *石油勘探与开发*, 41(5): 539–545. [Wang L N, Chen Z X, Li B L, Lei Y L, Yan S Y. 2014. Structural characteristics of the northern Longmenshan fold-thrust belt and the favorable exploration areas, Sichuan Basin, Southwest China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(5): 539–545]
- 王向东, 胡科毅, 郅文昆, 盛青怡, 陈波, 林巍, 要乐, 王秋来, 祁玉平, 陈吉涛, 廖卓庭, 宋俊俊. 2019. 中国石炭纪综合地层和时间框架. *中国科学: 地球科学*, 49(1): 139–159. [Wang X D, Hu K Y, Qie W K, Sheng Q Y, Chen B, Lin W, Yao L, Wang Q L, Qi Y P, Chen J T, Liao Z T, Song J J. 2019. Carboniferous integrative stratigraphy and timescale of China. *Science China Earth Sciences*,

- 62(1): 135–153]
- 王元青,李茜,白滨,金迅,毛方园,孟津. 2019. 中国古近纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 289–314. [Wang Y Q, Li Q, Bai B, Jin X, Mao F Y, Meng J. 2019. Paleogene integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 49(1): 289–314]
- 鲜思远,陈继荣,万正权. 1995. 四川龙门山甘溪泥盆纪生态地层、层序地层与海平面变化. 岩相古地理, 15(6): 1–47. [Xian S Y, Chen J R, Wan Z Q. 1995. Devonian ecostratigraphy, sequence stratigraphy and sea-level changes in Ganxi, Longmen mountain area, Sichuan. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 15(6): 1–47]
- 熊连桥,姚根顺,沈安江,陈剑,熊绍云,郝毅. 2017. 川西北部泥盆系观雾山组沉积相新认识: 以大木垭剖面与何家梁剖面为例. 海相油气地质, 22(3): 1–11. [Xiong L Q, Yao G S, Shen A J, Chen J, Xiong S Y, Hao Y. 2017. A view of the sedimentary facies of Middle Devonian Guanwushan Formation in northwestern Sichuan Basin, China: a case study of Damuya & Hejialiang sections. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22(3): 1–11]
- 熊绍云,郝毅,熊连桥,周刚,李文正,姚倩颖,张建勇. 2020. 川西中泥盆统观雾山组沉积演化及其对储层发育的控制作用. 海相油气地质, 25(2): 181–192. [Xiong S Y, Hao Y, Xiong L Q, Zhou G, Li W Z, Yao Q Y, Zhang J Y. 2020. Sedimentary evolution of the Middle Devonian Guanwushan Formation and its control on reservoir development in Western Sichuan. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(2): 181–192]
- 熊绍云,周刚,郝毅,熊连桥,李文正,姚倩颖,张建勇. 2021. 川西中泥盆统观雾山组白云岩储层储集空间类型、成因及演化. 地质学报, 95(12): 3899–3914. [Xiong S Y, Zhou G, Hao Y, Xiong L Q, Li W Z, Yao Q Y, Zhang J Y. 2021. Reservoir space type, genesis and evolution of dolomite reservoir in the Guanwushan Formation of Middle Devonian, western Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 95(12): 3899–3914]
- 许安涛,李凤杰,刘奎,向鹏飞,赵晨圆,胡鹏. 2018. 北川甘溪下泥盆统风暴岩沉积特征及其沉积模式. 中国地质, 45(5): 1049–1062. [Xu A T, Li F J, Liu K, Xiang P F, Zhao C Y, Hu P. 2018. The characteristics and sedimentary model of Storm deposits in the Lower Devonian strata of Beichuan. *Geology in China*, 45(5): 1049–1062]
- 徐锦龙,洪天求,贾志海,王伟,罗雷. 2013. 四川江油马角坝地区船山组核形石基本特征及其环境意义. 沉积学报, 31(1): 1–9. [Xu J L, Hong T Q, Jia Z H, Wang W, Luo L. 2013. Characteristics and environmental significance of the Chuanshan Formation oncoids in the Majiaoba area, northwestern Sichuan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 1–9]
- 杨雪琪,钟大康,任影,谢瑞,姜杨锦丰,蒲强,钟泞聪,唐自成. 2017. 重庆东部地区寒武系龙王庙组碳、氧同位素特征及其意义. 古地理学报, 19(5): 865–878. [Yang X Q, Zhong D K, Ren Y, Xie R, Jiang Y F, Pu Q, Zhong N C, Tang Z C. 2017. Characteristics and significance of carbon and oxygen isotopes of the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Chongqing, *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5): 865–878]
- 张秀莲. 1985. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系. 沉积学报, 3(4): 17–30. [Zhang X L. 1985. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater. *Acta Sedimentologica Sinica*, 3(4): 17–30]
- 张竹桐,曾敏. 2020. 重庆綦江中一晚奥陶世稳定碳同位素地层学研究及其意义. 地层学杂志, 44(4): 373–385. [Zhang Z T, Zeng M. 2020. Carbon isotope chemostratigraphy of the Middle–Late Ordovician in Qijiang, Chongqing municipality, China. *Journal of Stratigraphy*, 44(4): 373–385]
- 赵文智,汪泽成,胡素云,潘文庆,杨雨,包洪平,王红军. 2012. 中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征. 石油学报, 33(S2): 1–10. [Zhao W Z, Wang Z C, Hu S Y, Pan W Q, Yang Y, Bao H P, Wang H J. 2012. Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China. *Acta Petroleologica Sinica*, 33(S2): 1–10]
- 郑荣才,刘文均,李祥辉,王洪峰,陈源仁. 1997. 龙门山平驿铺组沉积体系及旋回层序研究. 沉积学报, 15(3): 3–9. [Zheng R C, Liu W J, Li X H, Wang H F, Chen Y R. 1997. Depositional systems and cyclic sequences of Ping Yipu Formation Longmenshan area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 3–9]
- 朱茂炎,杨爱华,袁金良,李国祥,张俊明,赵方臣, Soo-Yeun A H N, 苗兰云. 2019. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49(1): 26–65. [Zhu M Y, Yang A H, Yuan J L, Li G X, Zhang J M, Zhao F C, S-Y A H N, Miao L Y. 2019. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China. *Scientia Sinica(Terrae)*, 49(1): 26–65]
- Bai S L, Bai Z Q, Ma X P, Wang D R, Sun Y L. 1994. Devonian Events and Biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press, 303.
- Buggisch W, Joachimski M M. 2006. Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of central and southern Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240: 68–88.
- Buggisch W, Joachimski M M, Sevastopulo G, Morrow J R. 2008. Mississippian $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and conodont apatite $\delta^{18}\text{O}$ records: their relation to the Late Palaeozoic Glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268(3–4): 273–292.
- Buggisch W, Wang X D, Alekseev A S, Joachimski M M. 2011. Carboniferous–Permian carbon isotope stratigraphy of successions from China (Yangtze platform), USA (Kansas) and Russia (Moscow Basin and Urals). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 301(1–4): 18–38.
- Cannell A, Blamey N, Brand U, Escapa I, Large R. 2022. A revised sedimentary pyrite proxy for atmospheric oxygen in the Paleozoic: evaluation for the Silurian–Devonian–Carboniferous period and the relationship of the results to the observed biosphere record. *Earth-Science Reviews*, 231: 104062.
- Chen B, Zhang M Q, Qie W K, Liang K, Lu J F, Joachimski M M, Ma X P. 2024. Carbon and conodont apatite oxygen isotope records from the Alengchu section in western Yunnan and their paleoclimatic and paleogeographic implications. *Palaeoworld*, 33(3): 559–569.
- Chen J, Chen B, Montañez I P. 2022. Carboniferous isotope stratigraphy. *Geological Society, London, Special Publications*, 512(1): 197–211.

- Clayton R N, Degens E T. 1959. Use of carbon isotope analyses for differentiating fresh water and marine sediments. *AAPG Bulletin*, 13(4): 890–897.
- De Keyser T, Ruebsam W, Al-Husseini M, de Cabrera S C, Al-Sahlan G. 2025. Carbon-isotope stratigraphy of the Toarcian in Kuwait. *Gondwana Research*, 137: 209–226.
- Heath M N, Cramer B D, Stolfus B M, Barnes G L, Clark R J, Day J E, Barnett B A, Witzke B J, Hogancamp N J, Tassier-Surine S. 2021. Chemoautotrophy as the driver of decoupled organic and carbonate carbon isotope records at the onset of the Hangenberg (Devonian-Carboniferous Boundary) Oceanic Anoxic Event. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110540.
- Hu D P, Zhang X L, Li M H, Xu Y L, Shen Y N. 2021. Carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$) stratigraphy of the Lower-Upper Ordovician of the Yangtze Platform, South China: implications for global correlation and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE). *Global and Planetary Change*, 203: 103546.
- Huang Y Z, Guo W, Lin W, Zhaxi P C, Yao L, Hu K Y, Wang Q L, Qi Y P. 2024. First record of the late Famennian conodonts in Qamdo, Tibet and their biostratigraphic implications. *Palaeoworld*, 33(3): 624–635.
- Jamart V, Pas D, Adatte T, Spangenberg J E, Laibl L, Daley A C. 2025. The Cambrian ROECE and DICE carbon isotope excursions in western Gondwana (Montagne Noire, southern France): implications for regional and global correlations of the Miaolingian Series. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 670: 112951.
- Kabanov P, Hauck T E, Gouwy S A, Grasby S E, van der Boon A. 2023. Oceanic anoxic events, photic-zone *Euxinia*, and controversy of sea-level fluctuations during the Middle–Late Devonian. *Earth-Science Reviews*, 241: 104415.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73(1): 27–49.
- Keith M L, Weber J N. 1964. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28: 1786–1816.
- Liu C, Jarochovska E, Du Y S, Vachard D, Munnecke A. 2015. Microfacies and carbon isotope records of Mississippian carbonates from the isolated Bama Platform of Youjiang Basin, South China: Possible responses to climate-driven upwelling. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438: 96–112.
- Lu J F, Guo W, Wang Y, Xu H H. 2023. The first discovery of Lochkovian (Lower Devonian) conodonts in central Guangxi, South China and its geological implications. *Journal of Paleontology*, 97(2): 421–433.
- Ma X P, Wang H H, Zhang M Q. 2017. Devonian event succession and sea level change in South China: with Early and Middle Devonian carbon and oxygen isotopic data. *Subcomm Devonian Stratigr Newsl*, 32: 17–24.
- Mitchell R N, Feng L J, Zhang Z Y, Peng A P. 2023. Carbonate-organic decoupling during the first Neoproterozoic carbon isotope excursion. *The Innovation Geoscience*, 1(3): 100046.
- Qie W K, Liu J S, Chen J T, Wang X D, Mii H S, Zhang X H, Huang X, Yao L, Algeo T J, Luo G M. 2015. Local overprints on the global carbonate $\delta^{13}\text{C}$ signal in Devonian-Carboniferous boundary successions of South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 418: 290–303.
- Qie W K, Wang X D, Zhang X H, Ji W T, Grossman E L, Huang X, Liu J S, Luo G M. 2016. Latest Devonian to earliest Carboniferous conodont and carbon isotope stratigraphy of a shallow-water sequence in South China. *Geological Journal*, 51(6): 915–935.
- Qie W K, Zhang J P, Luo G M, Algeo T J, Chen B, Xiang L, Liang K, Liu X Y, Pogge von Strandmann P A E, Chen J T, Wang X D. 2023. Enhanced continental weathering as a trigger for the end-Devonian hangenberg crisis. *Geophysical Research Letters*, 50(11): e2022GL102640.
- Sahoo S K, Gilleaudeau G J, Wilson K, Hart B, Barnes B D, Faison T, Bowman A R, Larson T E, Kaufman A J. 2023. Basin-scale reconstruction of *Euxinia* and Late Devonian mass extinctions. *Nature*, 615(7953): 640–645.
- Shen B H, Hou Z S, Wang X D, Wu Q, Zhang H, Chen J T, Yuan D X, Hu B, Sun B L, Shen S Z. 2024. Quantitative palaeogeographical reconstruction of the North China Block during the Carboniferous and Permian transition: implications for coal accumulation and source rock development. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 640: 112102.
- Sheng Q Y, Wang X D, Brenckle P, Huber B T. 2018. Serpukhovian (Mississippian) foraminiferal zones from the Fenghuangshan section, Anhui Province, South China: implications for biostratigraphic correlations. *Geological Journal*, 53(1): 45–57.
- Shi S Y, Ren C, Yan G Z, Xiong S Y, Shang W L, Gu Z D, Zhang S, Wu J B. 2026. Late Paleozoic stratigraphic hiatuses and carbon isotope chemostratigraphy in the northwestern Sichuan Basin: implications for the tectono-sedimentary evolution of the eastern Tethyan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 691: 113762.
- Wang X D, Grasby S E, Cawood P A, Zhao H, Chen Z Q, Hedhli M, Lyu Z Y, Sun G Y, Hao F. 2025. Photic-zone *Euxinia* had a major role in the Devonian-Carboniferous boundary mass extinction. *Communications Earth & Environment*, 6(1): 283.
- Wang Y, Yang J H, Henderson C M, Yuan D X, Ma R, Liu J. 2023. Carboniferous-Permian high-resolution conodont biostratigraphy and paleoclimate change in North China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 629: 111782.
- Yang S, Lu X Z, Chen X M, Zheng W, Owens J D, Young S A, Kendall B. 2023. Uranium and molybdenum isotope evidence for globally extensive marine *Euxinia* on continental margins and in epicontinental seas during the Devonian-Carboniferous Hangenberg crisis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 352: 133–156.
- Yin J Y, Slavík L, Wang Z H, Shen Z, Zhang X S, Liu Y L, Ma J, Gong Y M, Zong R W. 2024. The Silurian-Devonian boundary of China: review and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 254: 104805.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. *Earth-Science Reviews*, 186: 262–286.

(责任编辑 张西娟)