

构造-冰川驱动的早中二叠世之交华北盆地 海退与沉积环境变化^{*}

刘昊青¹ 孟 晶² 程 敏^{1,3} 周 俊⁴ 宋德邻²
王 野⁵ 周 凯¹ 杨敏芳⁶ 邵龙义¹ 鲁 静¹

- 1 中国矿业大学(北京)煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083
2 河北柳江盆地地质遗迹国家级自然保护区管理中心, 河北秦皇岛 066000
3 河北省地质矿产勘查开发局第三地质大队, 河北张家口 075000
4 北京中海沃邦能源投资有限公司, 北京 100032
5 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁沈阳 110168
6 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 早、中二叠世之交(山西组与下石盒子组沉积过渡期)华北盆地经历了一次盆地范围的海退, 并伴随着沉积环境由过渡相(三角洲、潮坪和潟湖等)向陆相(河流—湖泊)的演变, 以及聚煤作用向南华北迁移。为了揭示该次海退和沉积环境变化的驱动机制, 以华北盆地东北缘柳江煤田山西组—下石盒子组为对象, 利用构造指数(L/Q 值和 TiO₂ 含量)和气候指标(CIA)研究该段地层沉积期物源区(内蒙古隆起)构造活动、古气候变化与海退(沉积环境变化)之间的关系。结果表明: (1) 早、中二叠世之交, 柳江煤田山西组—下石盒子组物源区构造活动经历了稳定→活动→稳定 3 个阶段, 该结果与前人利用构造变形数据与碎屑锆石年龄恢复的古亚洲洋向南俯冲历史相吻合; (2) 古气候经历了相对暖干与热湿交替的 3 个阶段, 与同时期高纬度地区的冰期—间冰期旋回有较好的对应关系; (3) 柳江煤田早中二叠世之交的海退(沉积环境变化)与物源区构造活动增强、间冰期水循环加强和全球海平面(基准面)开始下降相伴生, 说明该海退为强制性海退, 是盆地增强的沉积物供应速率与下降的全球海平面共同驱动的结果, 且增强的源区构造活动和加强的间冰期水循环是沉积物供应速率(产生和搬运速率)增加的主控因素。

关键词 华北 柳江煤田 二叠纪 沉积环境 冰期 构造活动 驱动机制

第一作者简介 刘昊青, 男, 2001 年生, 博士研究生, 主要从事沉积学与古环境古气候重建等方面研究。
E-mail: BQT2300201002T@student.cumtb.edu.cn。

通讯作者简介 鲁静, 男, 1976 年生, 博士, 教授, 主要从事沉积学、煤系矿产资源评价与开发等方面教学和科学研究。E-mail: lujing@cumtb.edu.cn。

中图分类号: P531 **文献标志码:** A

Tectonic-glacially driven regression and sedimentary environment changes at the transition of Early and Middle Permian in North China Basin

^{*} 国家重点研发计划(编号: 2022YFF0800200)、国家自然科学基金项目(编号: 42172196, 42472227, 42402179)和柳江盆地地质遗迹保护项目(编号: Z1303002403442001)联合资助。[Co-funded by National Key Research and Development Program (No. 2022YFF0800200), National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172196, 42472227, 42402179), and Liujiang Basin Geological Relics Protection Project (No. Z1303002403442001)]

收稿日期: 2025-04-08 改回日期: 2025-05-07

LIU Haoqing¹ MENG Jing² CHENG Min^{1,3} ZHOU Jun⁴ SONG Delin²
WANG Ye⁵ ZHOU Kai¹ YANG Minfang⁶ SHAO Longyi¹ LU Jing¹

¹ State Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

² National Nature Reserve for Natural Monument Management Center of Liujiang Basin in Hebei, Hebei Qinhuangdao 066000, China

³ The Third Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Hebei Zhangjiakou 075000, China

⁴ Beijing Zhonghai Wobang Energy Investment Co., Ltd., Beijing 100032, China

⁵ College of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China

⁶ Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract During the transition from the Early to Middle Permian (corresponding to the depositional shift between Shanxi and Lower Shihhotse Formations), the North China Basin underwent a basin-scale regression, characterized by a change in depositional environments from transitional facies (such as deltas, tidal flats, and lagoon) to terrestrial facies (fluvial-lacustrine systems), along with a southward migration of coal accumulation zones. In order to reveal the driving mechanisms behind this regression and associated changes in depositional environment, this paper focuses on the Shanxi and Lower Shihhotse Formation (referred to as the study stratum) in the Liujiang Coalfield, located at the northeastern margin of the North China Basin by using tectonic proxies (L/Q and TiO_2) and climatic indicators (CIA). The results show that: (1) The source area during the depositional period of the study stratum experienced three tectonic stages of stability-activity-stability. It is consistent with the history of southward subduction of the Paleo-Asian Ocean, which was recovered by the previous researchers using the tectonic deformation data and detrital zircon ages. (2) The palaeoclimate experienced three stages of alternating relatively warm-dry and hot-wet, which correspond well with the glacial-interglacial cycles at high latitudes in the same period. (3) The regression at the transition of Early and Middle Permian (change in depositional environment) in the study area was accompanied by enhanced tectonic activity in source area, intensified water circulation in interglacier, and the onset of declining global relative sea level (datum), suggesting that it was a forced regression driven by the enhanced sediment supply rate of the basin and declining global relative sea level. The enhanced tectonic activity and the intensified water circulation were the dominant controlling factors for the increase in sediment supply rates (production and transport rates).

Key words North China, Liujiang Coalfield, Permian, sedimentary environment, glacier, tectonic activity, driving mechanism

About the first author LIU Haoqing, born in 2001, Ph.D. candidate, is mainly engaged in researches on sedimentology and reconstruction of ancient environment and climate. E-mail: BQT2300201002T@student.cumtb.edu.cn.

About the corresponding author LU Jing, born in 1976, is a professor and Ph.D. supervisor at China University of Mining & Technology (Beijing). He is mainly engaged in researches on sedimentology, evaluation and development of coal-bearing mineral resources. E-mail: lujing@cumtb.edu.cn

0 引言

全球变化正在以前所未有的速度重塑地球表层系统, 迫使人亟须从地质历史中探寻环境演化对生态系统的影响 (仲钰天等, 2023)。二叠纪具有

大气二氧化碳浓度低、全球海平面高度与新近纪相似以及陆地主要环境为森林等特征, 是揭示盆地内环境转化的最好时期 (Frank *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2021a, 2022)。

二叠纪发生了显生宙最极端的气候转变。早二叠世全球海平面持续上升，早二叠世晚期之后海平面开始下降，发生一次较大的海退事件（Haq and Schutter, 2008）。该时期联合古陆面积增大，揭开了北美、欧洲及冈瓦纳大陆晚古生代二级周期海退历程的序幕，华南川滇、江南与云开古陆等构造活动导致的古地理格局巨变都对其产生贡献。早二叠世华北盆地发育平缓、宽广的陆表海，微小的海平面起伏可导致大范围的暴露与淹没（陈洪德等，2011），致使海相与陆相地层互为夹层，并且海相夹层较薄且缺乏明显的环境指标。海侵—海退频率不一、生物演化不连续和古盐度环境指标灵敏度下降（范炳恒等，2000），导致对早中二叠世海平面变化的研究十分困难。同时，早、中二叠世之交，华北多地发现了由含煤砂岩向厚层砾岩再向大陆红层的岩性转变（尚冠雄，1997；Song *et al.*, 2023），华北盆地整体由过渡相（三角洲、潮坪和潟湖等）向陆相（河流—湖泊）环境转化，聚煤中心向盆地南部（如两淮、平顶山等地区）迁移（尚冠雄，1997；邵龙义等，2014）。因此，对早、中二叠世之交华北盆地海退（沉积环境变化）的研究，不仅对揭示环境变化有重要意义（Zhang *et al.*, 2022），还能为山西组煤层发育的终结以及晚二叠世—早三叠世红层的出现提供重要资料（Zhang *et al.*, 2023）。

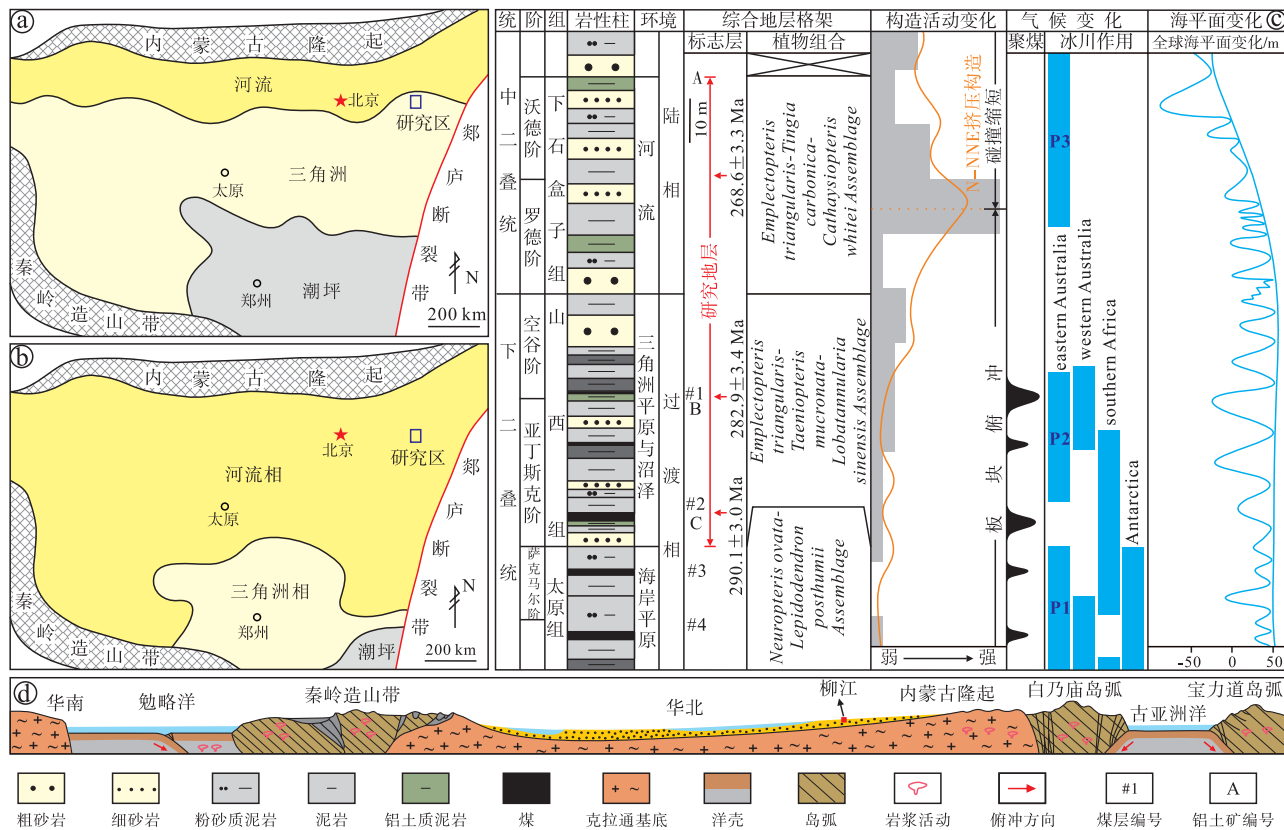
关于早、中二叠世之交海退事件的驱动机制，目前存在很多观点。传统观点认为，高纬度冰川生长与消融导致的海平面降低与升高，对低纬度陆地沉积环境造成了显著的影响（Montañez and Poulsen, 2013），即在晚古生代冰期，冈瓦纳大陆冰川起始、进退和消融引起的冰川性全球海平面变化，在低纬度地区很多海相、海陆交互相沉积序列中均有响应。也有学者进一步提出，海相和陆相交替出现的沉积序列是由米兰科维奇天文旋回引发的冰川进退所导致的全球海平面变化形成的（Ross and Ross, 1985；仲钰天等，2023）。但是冰川运动是否能直接控制海平面变化，目前仍存在一些争议。前人依据澳大利亚东部地层的一系列地球化学和沉积学指标对早中二叠世冰川活动进行了较为完整的恢复，认为 P2 冰期指示广泛但不太强烈的冰川事件，P3 冰期冰川发育程度更弱，可能指示高山冰川（Frank *et al.*, 2015）。澳大利亚东部地层数据

特征明显、连续性好，对冈瓦纳冰川活动有良好的响应，选用该地层数据恢复的冰川活动时间进一步指向早中二叠世。晚古生代的冰川型沉积记录显示，该时期高纬度冰川活动以多中心、多期次、不连续为特征，基本没有形成统一的冰盖，冰川总量相对较小，可能不足以造成超过 50 m 的海平面波动（Montañez and Poulsen, 2013）。也有学者认为，晚古生代的一些旋回和海退事件受区域构造运动影响，并非由冰川引起的全球海平面控制（Saltzman *et al.*, 2000；仲钰天等，2023）。根据对二叠纪华北盆地物源的研究，有学者提出晚古生代华北盆地北缘沉积环境受古亚洲洋向南俯冲引起的内蒙古隆起影响强烈（张拴宏等，2007），其中早二叠世内蒙古隆升幅度较小，中晚二叠世发生了强烈隆升并伴随火山活动，使得物源供给量增加（马收先等，2014）。也有区域构造与气候（冰川活动）共同影响海平面变化的观点被提出，如有学者发现阿拉伯半岛近海地区环境受被动大陆边缘沉降与南半球冰川作用共同影响，使得早、中二叠世之交海平面呈现下降的趋势（Haq and Al-Qahtani, 2005）。因此，冰盖的增减不能被认为是古生代海平面波动的唯一原因，海平面短期变化可能还存在其他非气候因素控制（Haq and Schutter, 2008）。

针对早、中二叠世之交海退（沉积环境变化）与同时代高纬度冰期—间冰期旋回和古亚洲洋向南俯冲引起的盆地物源区隆升关系尚不清楚。本次研究以华北盆地柳江煤田山西组—下石盒子组为研究对象，根据前人建立的生物地层与年代地层格架，利用碎屑颗粒含量计算构造活动指数表征构造活动变化，使用化学风化指数恢复气候演化过程，建立和恢复山西组—下石盒子组沉积时期构造强弱与气候变化曲线。通过研究区构造、气候变化曲线与沉积环境的对比，揭示物源区构造作用和高纬度冰川活动对研究区沉积环境演化的影响。

1 地质背景

柳江煤田位于华北板块东北缘，晚石炭世—中二叠世（320—260 Ma）沉积物来自于北部的内蒙古隆起（张拴宏等，2007）。华北盆地山西组主要为海陆过渡相沉积，煤层普遍发育，其中柳江煤田主要发育三角洲沉积（图 1-a；尚冠雄，1997）；下石盒子组沉积期海域基本退出华北（图 1-b；李维



a—华北盆地山西组沉积环境 (据尚冠雄, 1997; 有修改); b—华北盆地地下石盒子组沉积环境 (据尚冠雄, 1997; 有修改); c—中下二叠统综合柱状图, 沉积环境和聚煤作用据尚冠雄 (1997), 锆石年龄来自 Wang 等 (2023), 植物组合来自 Wang (2010), 邻区地层锆石年龄直方图与构造事件相关性图来自 Yang 等 (2024), 冰川作用资料来自 Fielding 等 (2023), 全球海平面变化资料来自 Haq 和 Schutter (2008); d—二叠纪华北盆地及其物源区构造关系示意图 (据 Zhu *et al.*, 2014; 赵越等, 2017; 有修改)

图 1 华北地区柳江煤田位置和地质背景

Fig. 1 Location and geological context for Liujiang Coalfield in North China

波等, 2015; 李文厚等, 2021), 发育陆相沉积, 研究区为河流沉积环境 (尚冠雄, 1997)。目标地层山西组一下石盒子组自下而上共发育 2 层煤 (#2、#1) 和 3 层黏土岩 (#C, #B, #A)。山西组由黄褐色细砂岩、灰绿色粉砂质泥岩、绿色泥岩及碳质泥岩夹煤线组成, 为三角洲与沼泽沉积, 与下伏和上覆地层均呈整合接触。下石盒子组由中一粗石英砂岩、黄白色细砂岩和粉砂岩、紫色泥岩、黄绿色钙质泥岩及杂色泥岩夹铝土质泥岩组成, 为河流沉积, 与下伏和上覆地层呈整合接触。

依据锆石颗粒定年结果及其孢粉组合特征 (图 1-c; Wang, 2010; 王 野, 2023; Wang *et al.*, 2023; C: 290.1 ± 3.0 Ma; B: 282.9 ± 3.4 Ma; A: 268.6 ± 3.3 Ma), 山西组大致对应于萨克马尔晚期—空谷期, 下石盒子组大致对应于罗德期—卡匹敦早期。依据赤峰及其周边地区二叠纪锆石 U-Pb 年

龄与构造变形数据恢复的区域构造演化历史, 山西组一下石盒子组沉积期经历了板块俯冲和碰撞缩短 2 期构造活动 (图 1-c; Yang *et al.*, 2024)。结合华北和邻区构造演化特征, 对二叠纪华北盆地构造格局进行了恢复 (图 1-d; Zhu *et al.*, 2014; 赵越等, 2017)。新南威尔士、昆士兰及东澳大利亚等地区发现的冰碛物限定了高纬度冰川主要持续时间, 其在早中二叠世共记录了 3 次冰期 (图 1-c; P1: 295—289 Ma; P2: 288—275 Ma; P3: 270—266 Ma) 和 2 次相对温暖的间冰期 (Fielding *et al.*, 2023)。另外, 全球海平面持续上升到宾夕法尼亚末期, 早二叠世早期 (阿瑟尔期) 略有下降, 之后变得稳定; 而海平面急剧下降的趋势始于二叠纪中期 (罗德期), 在晚二叠世早期 (吴家坪期) 达到古生代海平面的最低点 (图 1-c; Haq and Schutter, 2008)。

2 材料及方法

从柳江煤田石门寨剖面及周边钻孔共采集山西组和下石盒子组新鲜砂岩样品 56 件、砾石样品 40 件和泥质岩样品 35 件，采样位置如图 2 所示（红色代表砂岩与砾岩，黑色代表泥质岩）。针对砂岩和砾岩样品进行了岩石薄片制作和岩矿鉴定，选取其中 23 件砂岩样品进行了粒度统计分析；针对泥质岩样品，先将其破碎至 200 目并缩分为 2 份，再在煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室进行常量元素分析。碎屑岩样品制作参照行业标准（SY/T 5368-2003，SY/T 5368-2016）。在显微镜下对砂岩样品进行碎屑颗粒组成鉴定并统计相对含量（仪器型号 LEICA DM4500P LED），根据行业标准（SY/T 5434-2018）采用薄片粒度图像分析法对其进行统计，即选取 300 个最大视直径大于 30 μm 的颗粒进行测量，通过计算得到其伍登-温特华斯粒级值，对颗粒粒径进行筛析校正并计算平均粒径。常量元素使用熔片 X 射线荧光光谱法（荧光光谱仪型号为 PW2404）依照国家标准（GB/T 14506.14-2010 和 GB/T 14506.28-2010）进行测试。微量元素分析时，首先将泥岩样品用酸溶解，然后使用电感耦合等离子体质谱仪测量（型号 Finnigan-MAT，相对分析误差 $\pm 5\%$ ）。

本次研究利用构造活动指数（L/Q 值，岩屑与石英的比值）恢复物源区的构造活动变化趋势（曹珂等，2008；Lu *et al.*, 2020），并使用 TiO_2 含量作为陆源碎屑输入速率的指标（Zhao *et al.*, 2016）。在陆源碎屑输入稳定、沉积速率较为平缓的条件下，对粒径不同的砂岩进行碎屑颗粒分级统计，从而排除水动力差异与搬运过程对其造成的影响。对不同层位相似粒径的岩石 L/Q 值进行对比，由于构造活动增强会导致搬运距离缩短、岩屑含量损失减少，而石英抗风化能力强，因此岩屑含量高表明构造活动强烈，岩屑含量低表明构造活动相对稳定，即 L/Q 值越大构造活动越强烈，L/Q 值越小则构造活动越弱（Lu *et al.*, 2020）。 TiO_2 主要来源于黏土矿物，风化、成岩作用期间化学性质稳定，因而被广泛用作陆源碎屑输入的指标（Tribouillard *et al.*, 2006），一般来说，高 TiO_2 含量表明陆源碎屑的输入更多、沉积速率更快（Ma *et al.*, 2022）。

此外，依据化学蚀变指数（CIA）判断物源区

的风化程度，恢复源区古气候变化（McLennan, 1993）。利用 $\text{Th}/\text{U} < 6$ 排除再旋回作用的影响（Bhatia and Taylor, 1981），依据 A-CN-K 三角图判断是否受到钾交代作用的影响，并通过 CIA_{corr} 计算公式校正得到最终 CIA 值（黄云飞等，2017；徐小涛等，2018）。CIA 值为 50~65，表示弱化学风化作用，气候寒冷干燥；CIA 值为 65~85，指示中等化学风化作用，气候温暖湿润；CIA 值为 85~100，表示强烈化学风化作用，气候炎热潮湿（Nesbitt and Young, 1989）。针对所有泥岩样品进行了校正， CIA_{corr} 值的校正公式为：

$$\text{CIA}_{\text{corr}} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}_{\text{corr}}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{K}_2\text{O}_{\text{corr}} = m\text{Al}_2\text{O}_3 + \frac{m}{1-m} \times (\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) \quad (2)$$

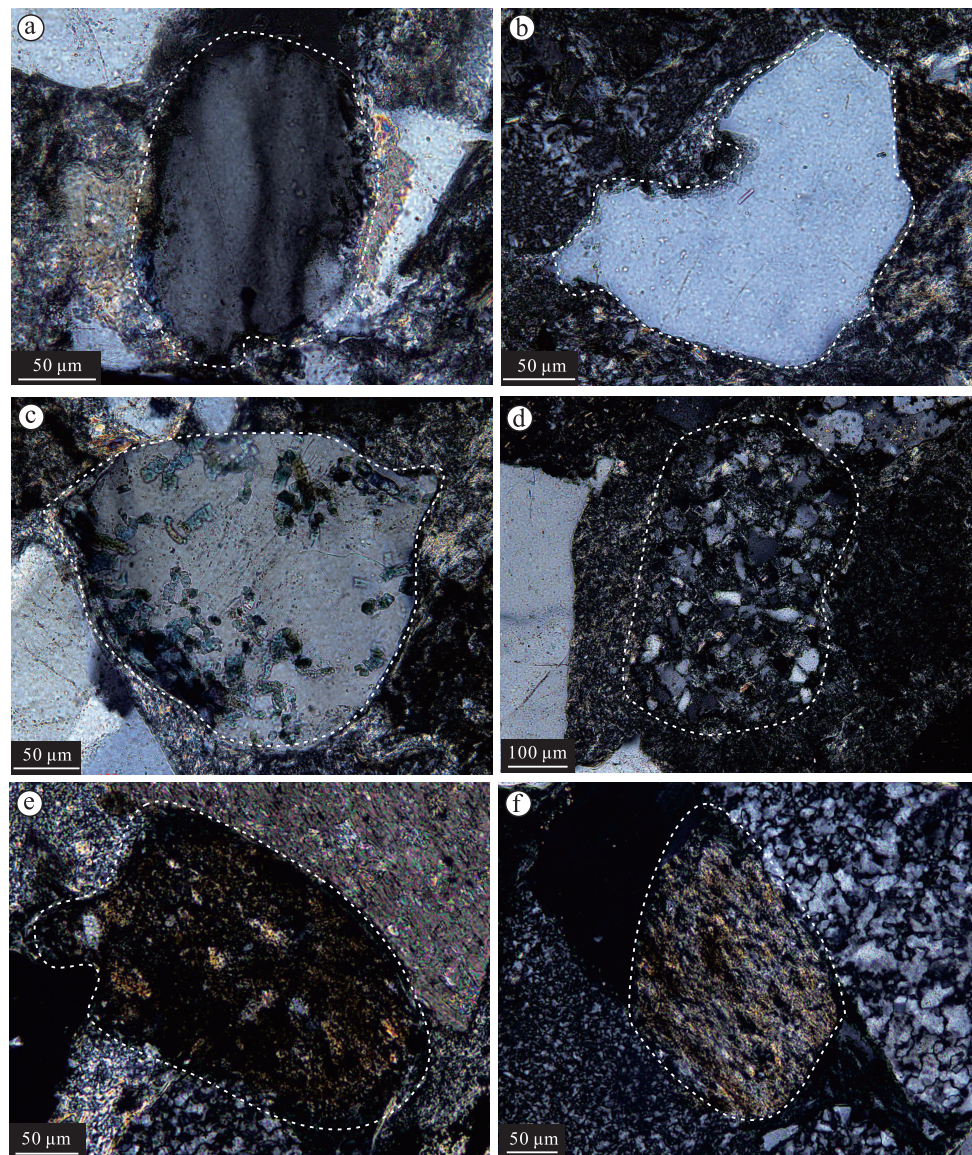
$$m = \frac{\text{K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}} \quad (3)$$

3 结果与分析

3.1 物源区构造活动

砂岩样品骨架颗粒成分主要为石英、长石和岩屑（图 2），各成分相对含量如图 3 所示。在研究区目标地层中，石英含量最高，为 79.7%~98.4%，包括单晶石英、多晶石英和燧石，母岩主要来自于变质岩与火成岩（图 2-a, 2-b, 2-c）。岩屑含量在 0.3%~19.6% 之间，主要为砂岩、泥岩与千枚岩岩屑（图 2-d, 2-e, 2-f）。

22 个砂岩样品粒径统计表明，其粒径在 0.13~0.33 mm 之间变化，平均 0.21 mm，以跳跃方式进行搬运，属于细砂岩与中砂岩，仅有 3 个样品为中砂岩，分别对应罗德早期与沃德早期。岩屑含量可能受到碎屑颗粒大小的影响（Lu *et al.*, 2020），本次研究将平均粒径与 L/Q 值进行对比（图 3），发现两者之间不存在明显的线性相关，说明 L/Q 值不受粒径大小的控制。选取 6 个粒径平均值为 0.24 mm 的样品代表粒径较大的碎屑颗粒（图 3 颗粒大小一粒径列中的红色圆圈），选取 7 个粒径平均值为 0.19 mm 的样品代表粒径较小的碎屑颗粒（图 3 颗粒大小一粒径列中的绿色圆圈），以表征不同水动力条件下样品 L/Q 值的变化趋势。结果表明，大颗粒 L/Q 值呈增加→平缓→增加→减弱



a—单晶石英，波状消光，样品 LJ257；b—单晶石英，可见溶蚀港湾与针状包裹体，样品 LJ242；c—单晶石英，可见蠕虫状包裹体，样品 LJ257；d—粉砂岩岩屑，具碎屑结构，碎屑成分可见石英与云母，LJ257；e—泥岩岩屑，主要为黏土矿物，含少量石英，样品 LJ245；f—千枚岩岩屑，千枚状构造，云母含量较高、呈定向排列，样品 LJ245。所有照片均为正交偏光

图 2 华北地区柳江煤田山西组与下石盒子组骨架颗粒特征

Fig. 2 Characteristics of framework grains of the Shanxi and Lower Shihhotse Formations in Liujiang Coalfield, North China

趋势，小颗粒 L/Q 值呈持续增加→减弱→平缓趋势，说明两者的 L/Q 值在亚丁斯克期—罗德晚期呈持续增加的趋势，在罗德晚期—沃德期呈下降趋势，水动力作用在搬运碎屑物质的过程中没有对数据结果产生过强的干扰。陆源碎屑输入速率整体与 L/Q 值变化趋势相似，说明 L/Q 值可以表征物源构造活动对沉积环境变化的影响 (Lu *et al.*, 2020)。

构造活动指数 L/Q 值整体在 0.3%~24.4%之

间变化，平均 9.2%； TiO_2 含量整体为 0.8%~6.1%，平均 1.8% (图 3)。萨克马尔—亚丁斯克期， L/Q 值为 1.3%~11.5%，平均 6.1%，大、小粒径砂岩 L/Q 值均呈增加趋势； TiO_2 含量为 1.3%~1.8%，平均 1.4%，大、小粒径砂岩均呈小幅波动，具平缓→增加→下降→增加的趋势； L/Q 值升高， TiO_2 含量先增加后减少，仅在亚丁斯克晚期出现小幅升高，说明亚丁斯克期物源区构造活动整体有增强趋势，陆源碎屑输入速率不稳定。空谷

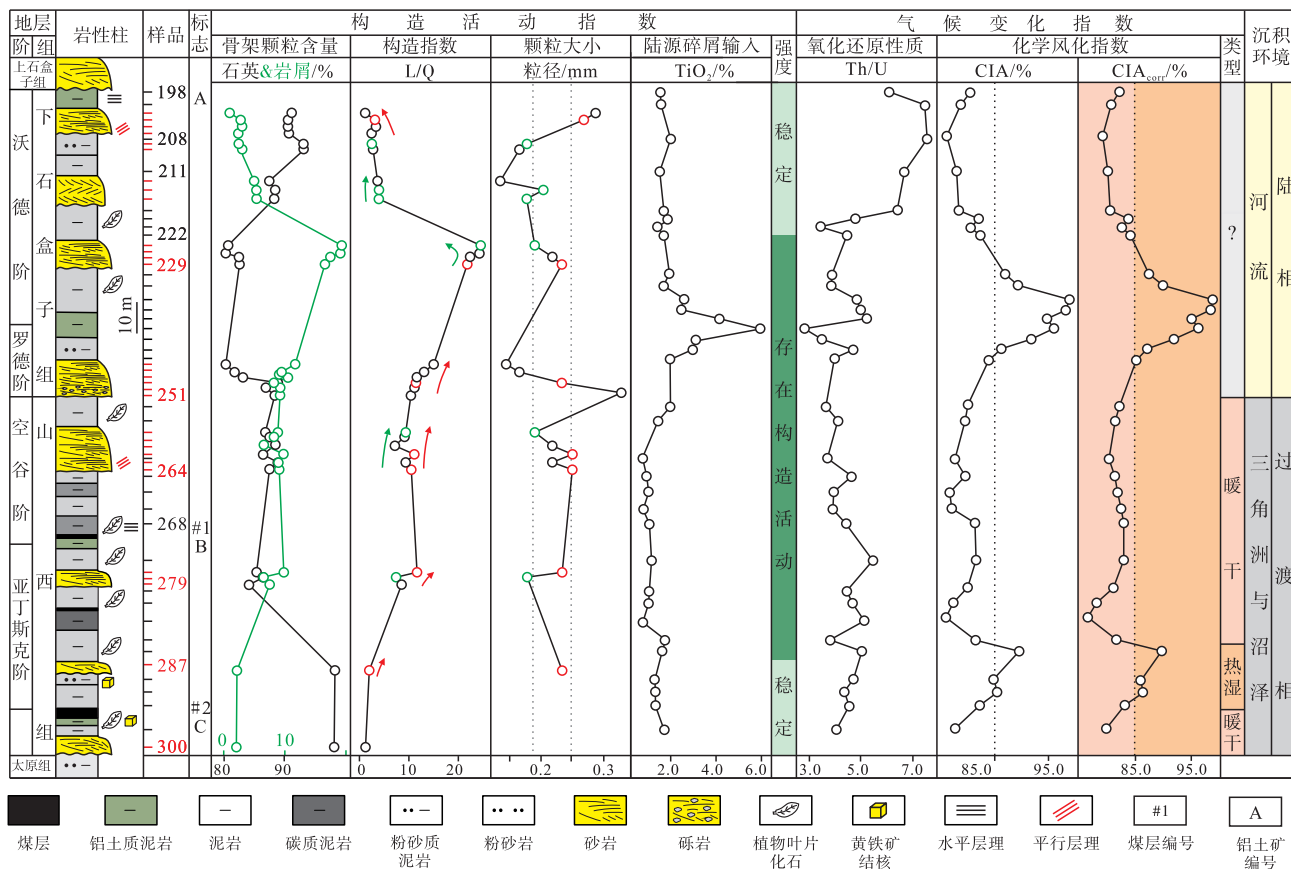


图 3 华北地区柳江煤田山西组与下石盒子组构造活动指数 (石英与岩屑含量、L/Q 值、粒径与 TiO_2 含量) 与气候变化指标 (CIA 、 CIA_{corr})

Fig. 3 Tectonic activity indexes (content of quartz and debris, L/Q, particle size, content of TiO_2) and climate change indicators (CIA , CIA_{corr}) from the Shanxi and Lower Shihhotse Formations in Liujiang Coalfield, North China

期, L/Q 值为 7.0%~11.3%, 平均 9.6%, 大、小粒径砂岩 L/Q 值呈小幅增加的趋势; TiO_2 含量为 0.8%~2.0%, 平均 1.1%, 整体呈平缓变化; L/Q 值持续小幅变大, 同时 TiO_2 含量整体呈低值, 表明相较亚丁斯克期, 空谷期物源区构造活动进一步增强, 但整体构造活动强度水平较弱且变化不大, 陆源碎屑输入速率一直处于低值。罗德期, L/Q 值为 10.3%~14.4%, 平均 11.6%, 大、小粒径砂岩 L/Q 值仍呈小幅增加趋势; TiO_2 含量为 2.0%~6.1%, 平均 3.6%, 整体呈上升趋势; L/Q 值逐渐增加, 陆源碎屑输入速率快速上升, 说明构造活动与陆源碎屑输入速率持续加强。沃德期, L/Q 值为 0.3%~24.4%, 平均 9.2%, 大、小粒径砂岩 L/Q 值呈先缓慢增加后迅速下降趋势; TiO_2 含量为 1.3%~1.8%, 平均 1.4%, 整体呈下降→平缓→上升趋势; L/Q 值持续上升后突然变低,

TiO_2 含量先下降后增加, 说明沃德期物源区构造活动由剧烈变得相对稳定。

综上, 柳江煤田山西组一下石盒子组物源区构造发展过程可分为 3 个阶段: 晚萨克马尔—中亚丁斯克期为构造稳定阶段; 晚亚丁斯克—中沃德期为构造活动阶段; 中晚沃德期为稳定阶段。

3.2 化学蚀变指数 CIA 和气候变化

根据微量元素测试与计算, 研究区早中二叠世泥质岩样品中仅 LJ198、LJ199、LJ208、LJ211、LJ219 这 5 个样品的 Th/U 值大于 6, 推测其可能受到再旋回作用的影响 (Bhatia and Taylor, 1981), CIA 值相对较大。依据 A-CN-K 三角图 (图 4), 研究地层均有部分样品存在钾交代作用, 故需要对 CIA 数据进行校正。

根据校正后的结果并去除黏土岩样品数据后,

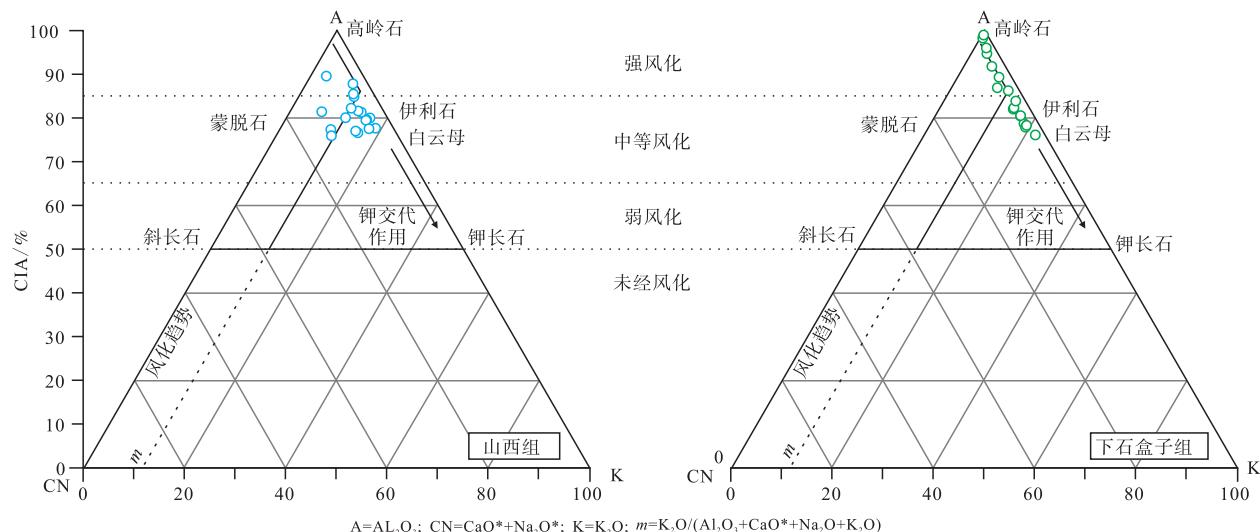


图 4 华北地区柳江煤田山西组与下石盒子组泥质岩 A-CN-K 三角图

Fig. 4 A-CN-K diagram for pelite of the Shanxi and Lower Shihhotse Formations in Liujiang Coalfield, North China

发现研究地层 CIA_{corr} 值在 76.7%~98.9% 之间变化, 平均 85.0% (图 3)。总体上, 校正后的 CIA_{corr} 值相较于原始 CIA 值的趋势无明显变化, 呈现出 2 次显著的波动。第 1 次波动出现在亚丁斯克—晚期, CIA_{corr} 值从 83.3% 增加到 89.6%, 随后下降到 81.7%, 第 2 次波动出现在罗德中期, CIA_{corr} 值从 92.1% 增加到 98.9%, 随后降低到 81.2%, 说明亚丁斯克—晚期和罗德中期化学风化强度出现 2 次明显的增强。萨克马尔—亚丁斯克期, CIA_{corr} 值为 76.7%~88.5%, 平均 82.5%, 整体呈现先上升后下降最后再增加的变化趋势, 表明气候由相对暖干转变为相对热湿后又转变回来。空谷期, CIA_{corr} 值为 80.4%~82.9%, 平均 81.8%, 整体变化幅度较小, 呈现先下降后上升的变化趋势, 处于持续低值, 说明气候持续处于相对暖干的状态。罗德期—中沃德期, CIA_{corr} 值为 81.2%~98.9%, 平均 89.4%, 整体呈现先上升后下降的趋势, 出现第 2 次 CIA_{corr} 值显著升高。中晚沃德期, CIA_{corr} 值为 79.9%~82.7%, 平均 81.2%, 整体变化不大。中罗德期—中沃德期, 构造活动比较强烈, 而影响 CIA_{corr} 的因素不只是单一的气候, 虽然也可以认为与冰期—间冰期旋回无直接关系或存在间接关系, 但气候变化与构造活动对 CIA_{corr} 值影响的程度目前无法定量分析, 因此认为该时期 CIA_{corr} 值不能直接表征气候的变化。中晚沃德期, 泥岩样品 Th/U 值均大于 6, 推测其可能受沉积再旋回影响, 故也无

法直接准确表征气候的变化。

综上, 柳江煤田山西组—下石盒子组沉积期古气候经历了相对暖干 (晚萨克马尔期—早亚丁斯克期)、相对热湿 (早中亚丁斯克期)、相对暖干 (晚亚丁斯克期—晚空谷期) 与无法表征 (中罗德期—沃德期) 4 个阶段。

4 讨论

柳江煤田构造活动指数和 TiO_2 含量记录了华北盆地物源区 (内蒙古隆起) 先增强后减弱的构造活动历史, 且构造活动增强时期和早、中二叠世之交的海退时间吻合, 说明物源区增强的构造活动是沉积环境变化的驱动力之一。从亚丁斯克中期到罗德中期研究区构造活动整体加强, 与 Yang 等 (2024) 所恢复的赤峰及其邻区的锆石年龄分布与构造事件 (古亚洲洋俯冲过程) 有较好的对应。与前人恢复的由过渡相 (滨岸—远滨和三角洲) 向陆相 (河流相) 转变相似, 研究地层垂向上为进积序列, 物源供给量增加, 表明物源区内蒙古隆起发生了隆升 (马收先等, 2014)。同时, 山西组的三角洲前缘—平原沉积旋回序列, 指示古亚洲洋闭合期间的复杂构造阶段; 下石盒子沉积期进入陆—陆碰撞阶段, 构造活动逐渐加剧, 海侵范围逐渐萎缩, 形成自北向南推进的河流沉积体系 (马帅等, 2023)。物源快速隆升、盆地沉降幅度加大导致的陆源碎屑供给充足, 迫使海岸线向东南方向迁

移,从而引发了早二叠世末的海退。剧烈隆升造成的愈发倾斜的地势增强了海退的趋势(尚冠雄, 1997),这一变化与前人恢复的华北与全球海平面变化(图 5,覃建雄等, 1998; Boulila *et al.*, 2021)相一致。海平面急剧下降始于二叠纪中期(罗德期),最终在晚二叠世早期(吴家坪期)达到晚古生代海平面的最低点(Haq and Schutter, 2008),因此研究区山西组沉积期向下石盒子组沉积期的沉积环境变化是由物源区构造活动所驱动的。

研究区气候指标(CIA)记录了早亚丁斯克期华北盆地气候向相对热湿的转变,并且此次气候变热与间冰期有较好的对应(图 5, Frank *et al.*, 2015; Garbelli *et al.*, 2019; Fielding *et al.*, 2023)。前人根据陕西镇安西口高岭石含量变化对该时期气候进行了恢复(曹婷丽等, 2017),罗德期气候变得湿热与 Garbelli 等(2019)恢复的间冰期对应性较好,但与研究区CIA_{corr}值恢复的气候变化趋势出现偏差,进一步说明构造活动对环境变化产生了一定影响,即早中二叠世内蒙古隆升引发了雨影效应,导致华北气候变暖(Tao *et al.*, 2025),且不同区域气候变化同步,但与全球气候对应性相对较差。同时,亚丁斯克晚期一空谷早期,松柏类植物丰度出现的明显波动(Montañez *et al.*, 2007)与

P2 冰期对应性较好,但之后植物丰度逐渐稳定并保持高值,与 P3 冰期对应性较差,也说明其他地区也存在对 P3 冰期响应较差的现象。综上,研究区恢复的气候变化可能受区域构造运动影响,与全球气候变化存在不一致。

综合分析华北盆地整体的构造与气候背景,研究区海退前的沉积环境主要受全球气候控制与影响,而海退后的沉积环境主要受区域构造运动控制。首先, P3 冰期相比 P2 冰期程度更弱,可能代表高山冰川(Frank *et al.*, 2015),而当冰川局限于极地圈时,海平面变化和天文轨道周期为控制热带区域降雨的主要因素,且大气温室气体浓度上升导致全球降雨量整体增加(Schneider *et al.*, 2014; 仲钰天等, 2023),这使得 P3 冰期对华北的整体影响比 P2 冰期更弱。同时,受天文轨道周期、板块漂移导致气候带迁移等多因素控制,晚古生代热带地区降雨特征可能因冰期-间冰期转变而造成水循环增强(Lu *et al.*, 2021b; Gao *et al.*, 2022; 仲钰天等, 2023)。苏维等(2007)通过识别济宁大庆源-汇系统中锆石年龄的比例呈下降趋势而卵石的平均粒径则增加的现象,推测古亚洲洋的俯冲诱发华北不断隆升,形成类似安第斯高原的山地高原,使得海退后进入物源区抬升(沉积物供给增

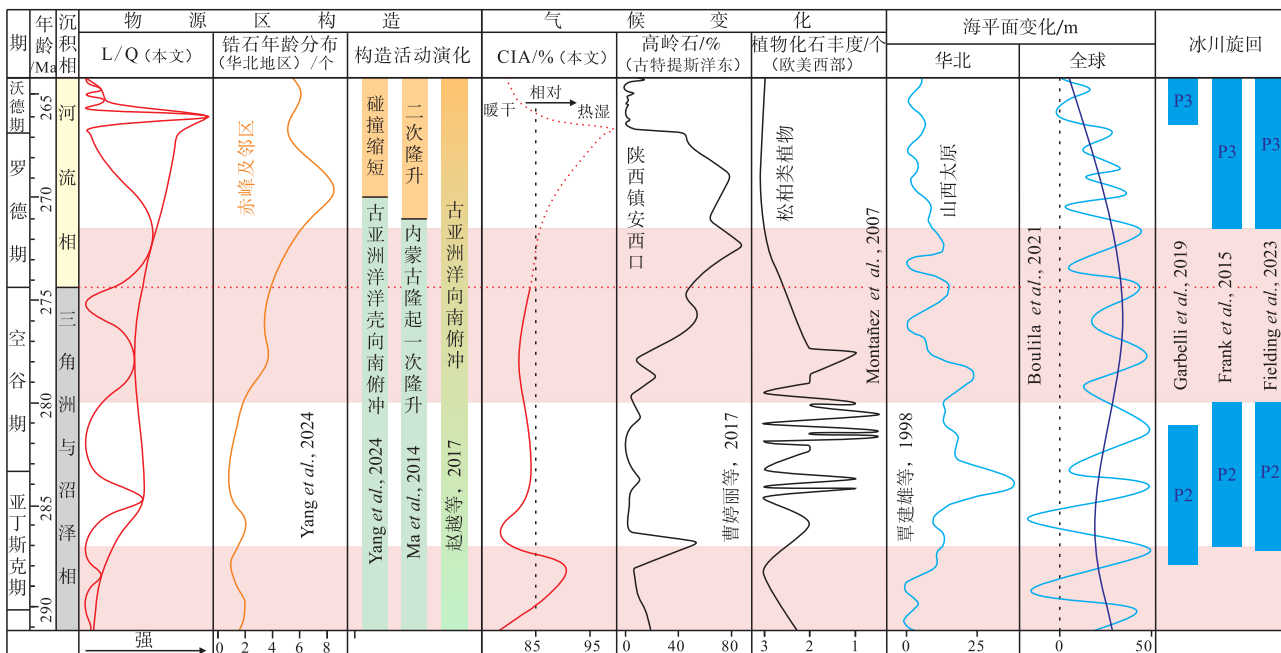


图 5 华北地区柳江煤田山西组一下石盒子组沉积期物源区构造、气候变化、海平面变化与冰川旋回对比
Fig. 5 Comparison of tectonic activities, climate change, sea level fluctuations and glacial cycles in source area during the deposition period of Shanxi and Lower Shihhotse Formations in Liujiang Coalfield, North China

加)与水循环增强(沉积物搬运加强)的构造活动主导时期。这与华夏植物群由发生、发展到繁盛再到衰退的过程也有较好的对应,对比早二叠聚煤作用发展时期与晚二叠红层的逐渐发育(尚冠雄,1997),也有较好的对应性,并且促进了沉积物从过渡相向陆相的转变(Song *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024)。

综上所述,柳江煤田早二叠世末的海退(沉积环境变化)与增强的物源区构造活动、间冰期降雨加强和开始下降的全球海平面(基准面)伴生,说明该海退为强制性海退。其是盆地中增强的沉积物供应速率与下降的全球海平面共同驱动的结果,而增强的源区构造活动和间冰期水循环加强是沉积物供应速率(产生和搬运速率)增加的主控因素。

5 结论

1) 柳江煤田山西组一下石盒子组沉积期物源区(内蒙古隆起)经历了稳定(晚萨克马尔—中亚丁斯克期)→活动(晚亚丁斯克—中沃德期)→稳定(中晚沃德期)3个阶段,该结果与前人利用构造变形数据与锆石年龄恢复的古亚洲洋向南俯冲历史相吻合,说明研究区构造活动指数(L/Q值)和TiO₂含量较好记录了物源区构造隆升历史。

2) 柳江煤田山西组一下石盒子组沉积期古气候经历了相对暖干(晚萨克马尔期—早亚丁斯克期)、相对热湿(早中亚丁斯克期)、相对暖干(晚亚丁斯克—晚空谷期)与无法表征(罗德—沃德期)4个阶段,该结果与前人恢复的同时期高纬度地区的冰期—间冰期旋回有较好的对应,说明研究区构造活动相对稳定时期的气候指标(CIA)较好地记录了盆地气候变化特征。

3) 柳江煤田早二叠世末的海退为强制性海退,受盆地中增强的沉积物供应速率与下降的全球海平面双重控制,而物源区构造活动增强和间冰期水循环加强是沉积物供应速率(产生和搬运速率)增加的主控因素。

参考文献 (References)

曹珂,李祥辉,王成善. 2008. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨. 地质学报, 82(1): 115–123. [Cao K, Li X H, Wang C S. 2008. The Cretaceous clay minerals and paleoclimate in Sichuan Ba-

sin. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 115–123]

曹婷丽,程成,李双应,庞长兴,魏星. 2017. 陕西镇安二叠系碳酸盐岩粘土矿物特征及其对古气候的指示. 地质论评, 63(2): 363–374. [Cao T L, Cheng C, Li S Y, Pang C X, Wei X. 2017. Clay mineral characteristics of Permian carbonate rocks in Zhen'an area, Shaanxi Province and its paleoclimate significance. *Geological Review*, 63(2): 363–374]

陈洪德,李洁,张成弓,程立雪,程礼军. 2011. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示. 岩石学报, 27(8): 2213–2229. [Chen H D, Li J, Zhang C G, Cheng L X, Cheng L J. 2011. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2213–2229]

范炳恒,何锡麟,张华. 2000. 华北地台石炭二叠纪腕足动物群及生物地理研究. 古地理学报, 2(2): 46–53. [Fan B H, He X L, Zhang H. 2000. Research on Permo-Carboniferous brachiopods and their biogeography in North China Platform. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 2(2): 46–53]

黄云飞,张昌民,朱锐,易雪斐,瞿建华,唐勇. 2017. 准噶尔盆地玛湖凹陷晚二叠世至中三叠世古气候、物源及构造背景. 地球科学, 42(10): 1736–1749. [Huang Y F, Zhang C M, Zhu R, Yi X F, Qu J H, Tang Y. 2017. Palaeoclimatology, provenance and tectonic setting during Late Permian to Middle Triassic in Mahu Sag, Junggar Basin, China. *Earth Science*, 42(10): 1736–1749]

李维波,李江海,王洪浩,傅臣建,毛翔. 2015. 欧亚大陆中部盆地群大剖面的编制及其构造意义. 地质学报, 89(12): 2225–2235. [Li W B, Li J H, Wang H H, Fu C J, Mao X. 2015. Characteristics of the basins from the E-W inter-continent profile in central Eurasia. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2225–2235]

李文厚,张倩,李克永,陈强,郭艳琴,马瑶,冯娟萍,张道锋. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化. 古地理学报, 23(1): 39–52. [Li W H, Zhang Q, Li K Y, Chen Q, Guo Y Q, Ma Y, Feng J P, Zhang D F. 2021. Sedimentary evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 23(1): 39–52]

马收先,孟庆任,武国利,段亮. 2014. 内蒙古隆起晚古生代构造隆升的沉积记录. 地质学报, 88(10): 1771–1789. [Ma S X, Meng Q R, Wu G L, Duan L. 2014. Late Paleozoic exhumation of the Inner Mongolia paleo-uplift: evidences from sedimentary records. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1771–1789]

马帅,王永诗,王学军,陈世悦,景安语,田雯,信延芳. 2023. 华北东部石炭纪—二叠纪沉积充填过程及其对物源区构造演化的响应. 油气地质与采收率, 30(4): 1–20. [Ma S, Wang Y S, Wang X J, Chen S Y, Jing A Y, Tian W, Xin Y F. 2023. Carboniferous-Permian sedimentary filling process in eastern North China and its response to tectonic evolution of provenance area. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 30(4): 1–20]

覃建雄,陈洪德,田景春. 1998. 二叠纪海平面变化研究. 岩相古地理, 18(6): 40–47. [Qin J X, Chen H D, Tian J C. 1998. The global sea-level changes during the Permian. *Sedimentary Facies and*

- Palaeogeography, 18(6): 40–47]
- 尚冠雄. 1997. 华北地台晚古生代煤地质学研究. 太原: 山西科学技术出版社, 13–72. [Shang G X. 1997. Late Paleozoic Coal Geology of North China Platform. Taiyuan: Shanxi Scientific & Technical Publishers, 13–72]
- 邵龙义, 董大啸, 李明培, 王海生, 王东东, 鲁静, 郑明泉, 程爱国. 2014. 华北石炭—二叠纪层序—古地理及聚煤规律. 煤炭学报, 39(8): 1725–1734. [Shao L Y, Dong D X, Li M P, Wang H S, Wang D D, Lu J, Zheng M Q, Cheng A G. 2014. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous Permian in the North China Basin. Journal of China Coal Society, 39(8): 1725–1734]
- 苏维, 黄兴龙, 王明镇, 张锡麒. 2007. 山东滕县煤田石炭纪、二叠纪孢粉植物群及古气候. 微体古生物学报, 24(1): 98–104. [Su W, Huang X L, Wang M Z, Zhang X Q. 2007. Carboniferous-Permian palynoflora and paleoclimate of the Tengxian Coalfield, Shandong. Acta Micropalaeontologica Sinica, 24(1): 98–104]
- 王野. 2023. 晚古生代冰室期低纬度地区环境变化与火山活动的联系. 中国矿业大学(北京)博士学位论文. [Wang Y. 2023. Low-latitude environmental changes linked to the volcanism during the Late Paleozoic icehouse period. Doctoral dissertation of China University of Mining & Technology(Beijing)]
- 徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素. 古地理论, 20(3): 515–522. [Xu X T, Shao L Y. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(3): 515–522]
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 胡健民, 陈正乐, 李森, 裴军令, 陈振宇, 周剑雄. 2007. 华北地块北缘晚古生代—中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义. 岩石学报, 23(3): 625–638. [Zhang S H, Zhao Y, Liu J, Hu J M, Chen Z L, Li M, Pei J L, Chen Z Y, Zhou J X. 2007. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 625–638]
- 赵越, 翟明国, 陈虹, 张拴宏. 2017. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化. 中国地质, 44(1): 44–60. [Zhao Y, Zhai M G, Chen H, Zhang S H. 2017. Paleozoic-Early Jurassic tectonic evolution of North China Craton and its adjacent orogenic belts. Geology in China, 44(1): 44–60]
- 仲钰天, 陈吉涛, 高彪, 杨文莉, 岳超盛, 王向东, 沈树忠. 2023. 晚古生代大冰期碳—水循环回顾与展望. 科学通报, 68(12): 1544–1556. [Zhong Y T, Chen J T, Gao B, Yang W L, Yue C S, Wang X D, Shen S Z. 2023. Carbon-water cycles during the Late Paleozoic ice age: reviews and prospects. Chinese Science Bulletin, 68(12): 1544–1556]
- Bhatia M R, Taylor S R. 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman Geosyncline, Australia. Chemical Geology, 33(1–4): 115–125.
- Boulila S, Haq B U, Hara N, Müller R D, Galbrun B, Charbonnier G. 2021. Potential encoding of coupling between Milankovitch forcing and Earth's interior processes in the Phanerozoic eustatic sea-level record. Earth-Science Reviews, 220: 103727.
- Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P. 2023. A revised, Late Palaeozoic glacial time-space framework for eastern Australia, and comparisons with other regions and events. Earth-Science Reviews, 236: 104263.
- Frank T D, Shultis A I, Fielding C R. 2015. Acme and demise of the Late Palaeozoic ice age: a view from the southeastern margin of Gondwana. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 418: 176–192.
- Gao B, Xin H, Huang X, Hu K Y, Zheng Q F, Chen J T. 2022. A record of enhanced water cycle in the Late Paleozoic icehouse. Global and Planetary Change, 218: 103957.
- Garbelli C, Shen S Z, Immenhauser A, Brand U, Buhl D, Wang W Q, Zhang H, Shi G R. 2019. Timing of Early and Middle Permian deglaciation of the southern hemisphere: brachiopod-based $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ calibration. Earth and Planetary Science Letters, 516: 122–135.
- Haq B U, Al-Qahtani A M. 2005. Phanerozoic cycles of sea-level change on the Arabian Platform. GeoArabia, 10(2): 127–160.
- Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. Science, 322(5898): 64–68.
- Lu J, Zhou K, Yang M F, Shao L Y. 2020. Jurassic continental coal accumulation linked to changes in palaeoclimate and tectonics in a fault-depression superimposed basin, Qaidam Basin, NW China. Geological Journal, 55(12): 7998–8016.
- Lu J, Wang Y, Yang M F, Shao L Y, Hilton J. 2021a. Records of volcanism and organic carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) linked to changes in atmospheric $p\text{CO}_2$ and climate during the Pennsylvanian icehouse interval. Chemical Geology, 570: 120168.
- Lu J, Zhang P X, Dal Corso J, Yang M F, Wignall P B, Greene S E, Shao L Y, Lyu D, Hilton J. 2021b. Volcanically driven lacustrine ecosystem changes during the Carnian Pluvial Episode (Late Triassic). Proceedings of the National Academy Sciences of the United States of America, 118: e2109895118.
- Lu J, Wang Y, Yang M F, Zhang P X, Bond D P G, Shao L Y, Hilton J. 2022. Diachronous end-Permian terrestrial ecosystem collapse with its origin in wildfires. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 594: 110960.
- Ma B, Ji L M, Jin P H, Zhang M Z, Yuan B C, Long L W. 2022. Geochemical characteristics and depositional paleoenvironment of source rocks from the Lower Cretaceous Chijinbao Formation in Jiuxi Basin, China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210: 109968.
- Ma S X, Meng Q R, Duan L, Wu G L. 2014. Reconstructing Late Paleozoic exhumation history of the Inner Mongolia Highland along the northern edge of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 87: 89–101.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. The Journal of Geology, 101(2): 295–303.
- Montañez I P, Poulsen C J. 2013. The Late Paleozoic ice age: an evolving

- paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 629–656.
- Montañez I P, Tabor N J, Niemeier D, DiMichele W A, Frank T D, Fielding C R, Isbell J L, Birgenheier L P, Rygel M C. 2007. CO₂-forced climate and vegetation instability during Late Paleozoic deglaciation. *Science*, 315(5808): 87–91.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2): 129–147.
- Ross C A, Ross J R P. 1985. Late Paleozoic depositional sequences are synchronous and worldwide. *Geology*, 13(3): 194–197.
- Saltzman M R, González L A, Lohmann K C. 2000. Earliest Carboniferous cooling step triggered by the Antler orogeny? *Geology*, 28(4): 347–350.
- Schneider T, Bischoff T, Haug G H. 2014. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature*, 513(7516): 45–53.
- Song D F, Mitchell R N, Xiao W J, Mao Q G, Wan B, Ao S J. 2023. Andean-type orogenic plateau as a trigger for aridification in the arcs of northeast Pangaea. *Communications Earth & Environment*, 4(1): 306.
- Tao H, Cui J P, Sun J P, Ren Z L, Zhao F F, Su S H, Guo W, Song H Y. 2025. Late Carboniferous to Permian paleoclimatic and tectono-sedimentary evolution of the central Ordos Basin, western North China Block. *Marine and Petroleum Geology*, 173: 107287.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32.
- Wang J. 2010. Late Paleozoic macrofloral assemblages from Weibei Coalfield, with reference to vegetational change through the Late Paleozoic ice-age in the North China Block. *International Journal of Coal Geology*, 83(2–3): 292–317.
- Wang Y, Lu J, Yang M F, Yager J A, Greene S E, Sun R Y, Mu X M, Bian X, Zhang P X, Shao L Y, Hilton J. 2023. Volcanism and wildfire associated with deep-time deglaciation during the Artinskian (Early Permian). *Global and Planetary Change*, 225: 104126.
- Wang Z W, Liu L, Hu J L, Li D, Chen H D, Zhu S Y, Zhang C G, Zhao J X. 2024. Spatiotemporal evolution of the Early Permian multi-source-to-sink system in the northwestern margin of the North China Block: implications for the paleogeographic reconstruction along the southern margin of the Paleo-Asian Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 655: 112500.
- Yang Q, Shi W, Li X G, Wang T Y, Lin M. 2024. Structural patterns and ages of Permian-Triassic multistage strike-slip faulting in the Chifeng area, southeastern Inner Mongolia, China: implications for the final closure of the Paleo-Asian Ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, 263: 106006.
- Zhang P X, Yang M F, Lu J, Shao L Y, Wang Z W, Hilton J. 2022. Low-latitude climate change linked to high-latitude glaciation during the Late Paleozoic ice age: evidence from the terrigenous detrital kaolinite. *Frontiers in Earth Science*, 10: 956861.
- Zhang P X, Yang M F, Lu J, Bond D P G, Zhou K, Xu X T, Wang Y, He Z, Bian X, Shao L Y, Hilton J. 2023. End-Permian terrestrial ecosystem collapse in North China: evidence from palynology and geochemistry. *Global and Planetary Change*, 222: 104070.
- Zhao J H, Jin Z J, Jin Z K, Geng Y K, Wen X, Yan C N. 2016. Applying sedimentary geochemical proxies for paleoenvironment interpretation of organic-rich shale deposition in the Sichuan Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 163: 52–71.
- Zhu X Q, Zhu W B, Ge R F, Wang X. 2014. Late Paleozoic provenance shift in the south-central North China Craton: implications for tectonic evolution and crustal growth. *Gondwana Research*, 25(1): 383–400.

(责任编辑 张西娟)