第 28 卷 第 1 期
2026 年 2 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 28 No. 1
Feb. 2026

文章编号：1671-1505(2026)01-0304-14 **DOI**:10.7605/gdlxb.2026.029

晚石炭世冰期—间冰期旋回控制的华北盆地海平面变化与沉积矿产聚集*

孟 晶[1] 刘昊青[2] 杨敏芳[3] 王 雷[4] 胡晓玉[2]
王 野[5] 周 凯[2] 邵龙义[2] 鲁 静[2]

1 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
2 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室，中国矿业大学（北京）
地球科学与测绘工程学院，北京 100083
3 中国石油勘探开发研究院，北京 100083
4 中石油煤层气有限责任公司，北京 100028
5 沈阳建筑大学土木工程学院，辽宁沈阳 110168

摘 要 为了揭示华北盆地晚石炭世冰室期海平面变化的驱动机制，以盆地东北缘的柳江煤田本溪组—太原组为对象，进行了海平面变化恢复及其与同时代高纬度冈瓦纳大陆冰期—间冰期（冰川）旋回联系的研究。结果表明：(1) 研究区目标地层发育海岸平原河流—湖泊、滨海和浅海 3 种相组合，沉积环境变化记录了 2 个二级海侵—海退旋回（巴什基尔—中莫斯科期和晚莫斯科—早阿瑟尔期）和 4 个三级海侵—海退旋回（早巴什基尔期、中巴什基尔—早莫斯科期、晚莫斯科期、晚莫斯科—阿瑟尔期）。(2) 冰室期的冰期和间冰期分别与研究区二级相对高海平面和低海平面时期的良好对应关系说明，高纬度冰川旋回是晚石炭世华北盆地二级海平面变化的主控因素。(3) 煤—富有机质泥岩和铝土岩在冰期发育，指示冰期下降的海平面和降低的温度，有利于陆表海盆地沉积界面暴露、沼泽化，以及有机质的产生和保存。同时，冰期海平面下降还引起干湿交替的泛滥平原环境的盛行。在该环境中，陆源碎屑沉积物经过再风化和淋滤，促进了铝土质泥岩或铝土矿的形成。本次研究深化了对晚石炭世华北盆地海平面变化驱动机制、煤和铝土矿等沉积矿产聚集规律的认识。

关键词 晚石炭世 华北盆地 海平面变化 冰川旋回 煤和铝土矿

第一作者简介 孟晶，女，1969 年生，主要从事地质遗迹开发与保护方面的科研和管理工作。E-mail：ljmj2024@163.com。

通讯作者简介 鲁静，男，1976 年生，教授、博导，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：P512.2； P612 **文献标志码**： A

Sea level changes and sedimentary minerals accumulation in the North China Basin controlled by the Late Carboniferous glacial-interglacial cycles

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

收稿日期：2024-09-29 改回日期：2025-06-01

MENG Jing[1]　LIU Haoqing[2]　YANG Minfang[3]　WANG Lei[4]　HU Xiaoyu[2]
WANG Ye[5]　ZHOU Kai[2]　SHAO Longyi[2]　LU Jing[2]

1 *Management Center of Liujiang Basin Geological Relics National Nature Reserve*, *Hebei Qinhuangdao* 066000, *China*
2 *National Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources*, *College of Geoscience and Surveying Engineering*, *China University of Mining and Technology-Beijing*, *Beijing* 100083, *China*
3 *Petroleum Exploration and Development Research Institute*, *PetroChina*, *Beijing* 100083, *China*
4 *PetroChina Coalbed Methane Company Limited*, *Beijing* 100028, *China*
5 *College of Civil Engineering*, *Shenyang Jianzhu University*, *Shenyang* 110168, *China*

Abstract　In order to reveal the driving mechanism of sea level changes in the North China Basin in the low latitudes of the Late Carboniferous. Taking Benxi-Taiyuan Formations in Liujiang Coalfield of North China Basin as an example, the restoration of sea level change in low latitude area and its relationship with glacier cycle in high latitude area are studied. The results show that: (1) Three sedimentary systems of coastal plain river-lake, littoral zone and shallow sea are identified in the target strata of the study area. The changes of sedimentary environment record two secondorder transgression-regression cycles (Bashkir-Middle Moscow period and Late Moscow-Early Assel period) and four third-order transgression-regression cycles (Early Bashkir period, Middle Bashkir－Early Moscow period, Late Moscow period and Late Moscow-Assel period). (2) The highlatitude glacial and interglacial periods correspond to the second-order relative high sea level and low sea level periods in the study area, respectively, indicating that the high-latitude glacial cycle is the main controlling factor of the second-order sea level change in the late Carboniferous low-latitude North China Basin. (3) The coal-organic-rich mudstone and bauxite developed during the glacial period, indicating the falling sea level and temperature during the glacial period, which is conducive to the exposure of sedimentary interfaces, swamping, and the generation and preservation of organicmatter in the epicontinental sea basin. At the same time, the decline of sea level during the glacial period also caused the prevalence of dry-wet alternate flood plain environment. In this environment, terrigenous clastic sediments are reweathered and leached, which promotes the formation of bauxite mudstone or bauxite. This study deepens our understanding of the driving mechanism of sea level change and the accumulation of sedimentary minerals such as coal and bauxite in the late Carboniferous North China Basin.

Key words　Late Carboniferous, North China Basin, sea level change, glacier cycle, coal and bauxite

About the first author　MENG Jing, born in 1969, is mainly engaged in scientific research and management work in the development and protection of geological relics. E-mail: ljmj2024@163.com.

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

晚古生代冰室期是地球上持续时间最长的冰室期（Lu *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023），记录了维管植物登陆以来唯一一次表层地球冰室气候的“深时”变化过程和模式，并以南半球冈瓦纳大陆冰原广泛发育为特征。当前，该冰室期气候变化特征和模式被认为与人类生活的第四纪冰室期具有一

定的相似性（Lu *et al.*，2021a；Zhang *et al.*，2022），并表现在气候变化模式（冰期—间冰期旋回）、气候变化直接驱动机制（温室气体浓度）、表层地球有植被覆盖、与造山带隆升伴生（冈瓦纳和劳亚大陆汇聚拼合形成的海西中央造山带与印度和欧亚大陆汇聚拼合引起的喜马拉雅造山带）、与火山活动伴生等方面（Torsvik *et al.*，2008；Lu *et al.*，2021b）。并且，晚古生代冰室期并非单一寒冷气候，而是由多个持续时间约为 1~8 Ma 的寒冷冰期和几乎等时的较温暖的间冰期构成（Xiang *et al.*，2015；杜远生和余文超，2020）。

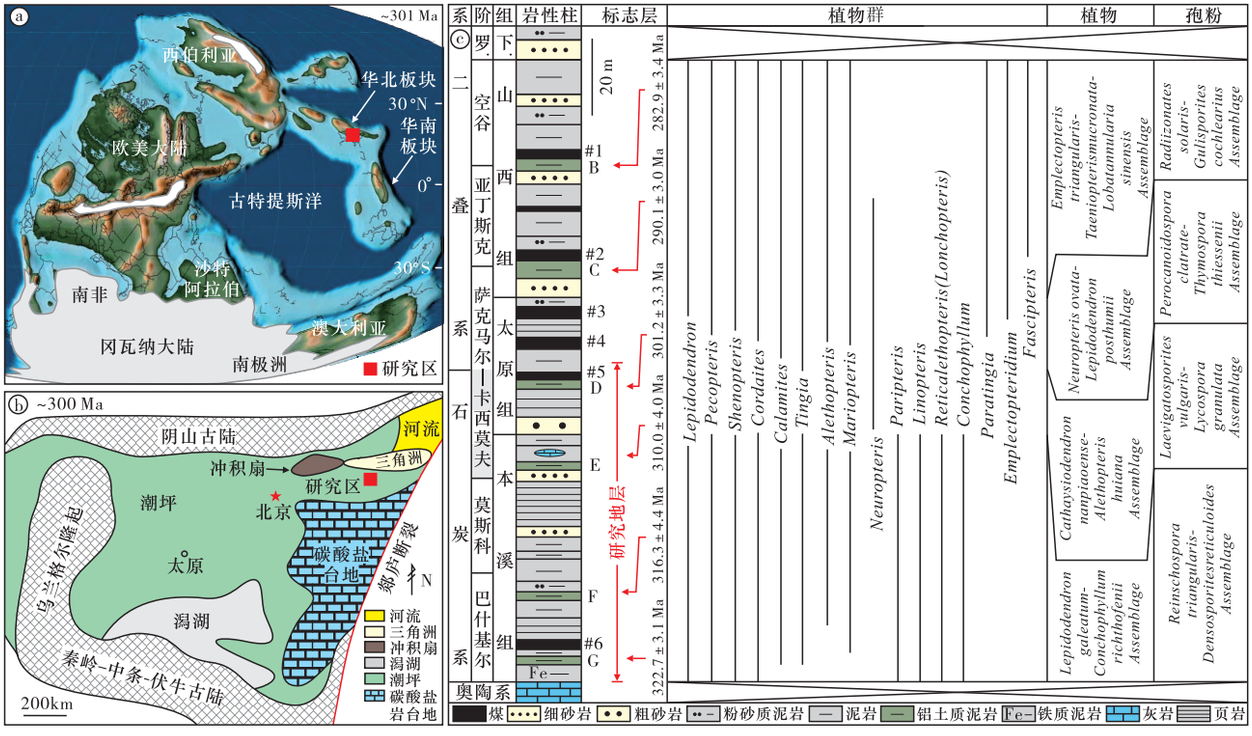
当前，这些高纬度冰川记录在新南威尔士、昆士兰及东澳大利亚等地区最为详细。从晚石炭世至早二叠世早期，冰积物共记录了 4 次寒冷的冰期（C3：317.0—315.0 Ma；C4：313.5—308.0 Ma；P1：299.0—290.0 Ma；P2：287—280 Ma）和 3 次相对温暖的间冰期，而在南极洲和阿拉伯地区仅有 1~2 个冰期记录（Fielding *et al.*，2023）。当前，多种指标（如$\delta^{18}O$，$\delta^{13}C$和 CIA 等）指示，高纬度地区这些冰期—间冰期旋回引起了全球气候的显著波动（Veevers and Powell，1987；Frakes and Francis，1988；Isbell *et al.*，2003；Fielding *et al.*，2008；Fielding *et al.*，2023；Zhang *et al.*，2023）。但关于这些冰原生长（冰期）和消融（间冰期）吸收和排放的水量是否会引起全球海平面的变化，目前存在较大的争议。传统观念认为冈瓦纳冰原的生长和消融是晚古生代海平面变化的主要驱动机制，并引起了 60~200 m 之间的高频海平面升降（40~412 kyr），而与冈瓦纳冰期—间冰期旋回联系的海平面升降被认为是晚古生代美国内陆盆地沉积物分配、形成旋回层的主要控制因素（Wanless and Shepard，1936；Veevers and Powell，1987；Fielding *et al.*，2020）。然而，一些学者通过冈瓦纳大陆冰川记录的重新评价及冰川体积的模拟计算（Isbell *et al.*，2003），认为石炭纪冈瓦纳大陆主要发育范围有限的高山冰川，其质量平衡变化产生的海平面升降幅度显著小于通过旋回层推断的规模，只有石炭纪末至二叠纪初的大陆冰原（P1 冰期）的生长和消融可以产生被旋回地层记录的海平面变化。

晚石炭华北陆表海盆地位于赤道低纬度地区，盆地构造（基底沉降均匀、缓慢和稳定）和沉积物供应稳定，主要为 1 套非海相碎屑岩、煤、铝土岩夹海相灰岩和钙质泥岩的海陆交互相沉积。该时期是中国最重要的 5 大聚煤期之一，同时也是煤系黑色页岩重要发育时期。前人在华北石炭纪—二叠纪岩矿、沉积、地层和构造等方面的研究基础较好（Xiang *et al.*，2015），是开展晚古生代高纬度冰川旋回与低纬度地区海平面变化关系，以及沉积矿产（如煤、铝土矿）聚集规律研究的理想场所。本次研究以华北盆地东北部河北省秦皇岛市柳江煤田本溪组—太原组下段为研究对象，根据前人建立的年代地层格架，利用相和相组合特征确定沉积环境，使用沉积期水体古盐度、氧化—还原性等数据辅助论证和识别沉积环境，建立和恢复本溪组—太原组下段沉积期的沉积模式和海平面变化曲线。通过研究区海平面曲线与冈瓦纳大陆冰川旋回的对比，揭示高纬度冈瓦纳大陆冰川旋回与华北盆地晚石炭世海平面变化之间的关系。

1 地质背景

晚石炭世华北盆地位于北纬 10°~20°、古特提斯洋的东北缘，其北面和南面分别为内蒙古隆起和北秦岭造山带（或伏牛古陆），如图 1-a 所示。该时期沉积物主要来自北面的阴山古陆（尚冠雄，1997；Frisch *et al.*，2012；Zhang *et al.*，2014；Dong and Santosh，2016）。

柳江煤田位于华北盆地的东北部区域（图 1-b），本溪组、太原组和山西组的地层格架、岩石类型、植物化石（含孢粉）和标志层如图 1-c 所示。本溪组平行不整合覆盖在奥陶系马家沟组灰岩之上，本溪组之上连续了沉积了太原组和山西组。目标地层自下而上分别发育了 6 层煤（#6-#1）和 6 层黏土岩（G-B 层，图 1-c）。本溪组由黄灰—灰绿色粉砂质页岩、灰黑色碳质页岩、黄绿色钙质页岩夹石英细砂岩、铝土质页岩及泥灰岩组成。太原组底部为灰色中粗粒石英砂岩，具球形风化外貌。下部为灰色薄—中厚层中细粒石英砂岩、碳质页岩和煤层；中上部为灰黄色薄层铁质粉砂岩、灰黑色碳质页岩夹薄层细砂岩和煤层，局部夹灰岩透镜体。研究区 G 至 B 层黏土岩在野外呈块状或粉末状，层理和化石不发育，含大量分选好、自形和环带结构发育、火山来源的锆石颗粒，指示该时期有部分火山灰物质（Yang *et al.*，2020）和



a—宾夕法尼亚纪全球古地理重建（~301 Ma；Scotese，2014）；b—晚石炭世华北板块沉积环境（~300 Ma；修自尚冠雄，1997）；c—植物区系组成及植物宏体化石和孢状体组合（Wang，2010）

图 1　华北盆地东北部地区位置和地质背景

Fig. 1　Location and geological background of northeastern North China Basin

其他黏土矿物一起，被沉积在海岸平原河道间暴露或静水环境（如覆水沼泽等）。因此，它们也被称为含凝灰质黏土岩。根据从这些黏土岩中获得的锆石年龄（G：322.7±3.1 Ma；F：316.3±4.4 Ma；E：310.0±4.0 Ma；D：301.2±3.3 Ma；C：290.1±3.0 Ma；B：282.9±3.4 Ma；）（Lu *et al.*，2021c），结合植物孢粉化石（王自强，1989），可以将研究区本溪组和太原组分别约束为巴什基尔—莫斯科期和卡西莫夫—萨克马尔期（图 1-c）。

2　研究材料与方法

本次研究从柳江煤田石门寨剖面（40.1°N，119.6°E）本溪组和太原组下段，共采集新鲜泥岩样品 59 件、砂岩样品 15 件和灰岩样品 3 件。砂岩和灰岩样品进行岩石薄片制作和岩矿鉴定。泥岩样品破碎至 200 目并缩分为 2 份，在煤炭精细勘探与智能开采全家重点实验室分别进行总有机碳（TOC）和微量元素分析。对于 TOC 测试，首先用磷酸处理泥岩样品以去除无机碳，然后使用碳—硫分析仪（型号 CS580、最低检测限 100 mg/g 和绝对分析误差±0.2%）、根据国标（GB/T-19145-2003）进行 TOC 含量测量。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（型号 Finmigan-MAT，相对分析误差±5%）测量。

本次研究利用锶元素与钡元素的比值（后文中使用 Sr/Ba 表示）识别古水体盐度。水体盐度和氧化—还原性是划分潮湿气候背景下沉积环境的重要依据之一，从陆相到过渡相和海相，水体盐度一般呈淡水到半咸水和咸水的变化趋势。当淡水与海水混合时，淡水中的 Ba 与海水中的 SO_4^{2+} 结合成 $BaSO_4$ 沉淀下来，而 $SrSO_4$ 的溶解度很大，可以继续向远海迁移。因此，由陆到海 Sr/Ba 值一般呈升高趋势。但不同地区和时代各种水体盐度的 Sr/Ba 比值界限存在差异（刘宝珺，1985）。如在西伯利亚西北部侏罗纪—白垩纪地层，淡水、半咸水和咸水的 Sr/Ba 值平均值分别为 0.148、0.462 和

0.575，而在同时代沿里海凹陷，相应的数值分别为 0.35、0.714 和 0.818（刘宝珺，1985）。在石炭纪—二叠纪的鄂尔多斯盆地，淡水、半咸水和咸水的界线被确定分别为 0.2 和 0.5（Wei and Algeo，2020）。此外，对于海（湖）平面或潜水面以上沉积的碎屑沉积物，潜流带和渗流带交替控制区域（干湿交替环境）沉积物，由于它们在埋藏进入潜水面以下之前的淋滤作用，会使沉积物中 Sr、Ba 元素再次差异迁移，故而该环境沉积物不适合用 Sr/Ba 值指示水体盐度（吕荐阔等，2021；Wang *et al.*，2021）。

本次研究利用钒元素与镍元素比值（后文中使用 V/(V+Ni) 表示）来指示沉积水介质氧化还原性。在氧化水介质（O_2 >2.0 mL/L，H_2S = 0 mL/L），V 主要呈溶解离子态存在；在缺氧水介质（O_2 <0.2 mL/L，H_2S = 0 mL/L），V 被还原为 VO_2^{2+}，与有机制络合发生沉淀；在硫化水介质（O_2 =0.0 mL/L，H_2S>0 mL/L），V 被进一步还原为难溶的 V_2O_3 和 $V(OH)_3$ 而进一步沉淀。与 V 相似，Ni 在氧化水介质以离子形式存在（Ni^{2+}）或以碳酸盐（$NiCO_3$）形式被有机质吸附；在硫化水介质，Ni 形成不溶性硫化物（NiS），可以在固溶态被自生黄铁矿缓慢吸收。与 Ni 相比，从氧化到硫化水介质，V 会优先沉淀，故前人研究发现 V/(V+Ni) 值可以指示水介质氧的相对含量，并将正常、氧化、次氧化、缺氧和缺氧硫化水介质的划分界线确定为 0.45、0.6、0.82 和 0.84（吕荐阔等，2021）。本次沉积环境分析中，相、相组合、海岸平原、滨海、浅海等概念以及沉积相描述和解释方法等均来自前人研究（Li *et al.*，2021；Fielding *et al.*，2022；Morales，2022）。

3 研究结果与分析

3.1 古盐度

研究地层 Sr 和 Ba 浓度、以及 Sr/Ba 值如图 2 所示。Sr 浓度值为 34.4 ~ 215.0 μg/g（平均 81.3 μg/g），其中 4 层黏土岩样品值为 34.4 ~ 215.0 μg/g（平均 124.5 μg/g），其他样品值为 45.8 ~ 127.0 μg/g（平均 71.1 μg/g）。垂向上 Sr 的浓度在 C1-4（G 层黏土岩）、C5、C15 和 C18 层出现 4 个相对高值区。Ba 元素浓度值为 210.0 ~ 782.0 μg/g（平均 401.33 μg/g），其中 4 层黏土岩样品值为 210.00 ~ 215.00 μg/g（平均 328.00 μg/g），其他样品浓度值为 216.0 ~ 782.0 μg/g（平均 421.9 μg/g）。Ba 的浓度在剖面中下部波动变化，但总体较稳定，在 C5、C10、C15 和 C18 层出现 4 个峰值；在剖面上部，Ba 的浓度总体呈升高趋势。

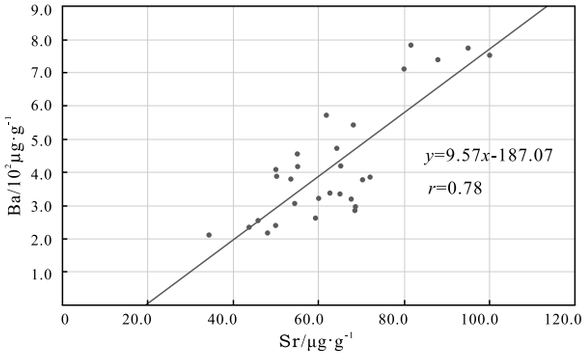


图 2 柳江煤田石门寨剖面 Sr 与 Ba 元素含量相关性

Fig. 2 Correlation diagram of Sr and Ba element content in Shimenzhai section, Liujiang coal field

除了 G 层黏土岩，Sr 与 Ba 元素垂向上浓度变化趋势相似（去除 3 个异常点后相关系数 r=0.78，n=29），说明两者具有相似的赋存状态和来源（图 2）。G 层黏土岩 Sr/Ba 值为 0.12~1.00（平均 0.46），根据前人确定的不同盐度水体 Sr/Ba 值范围，推断 G 层黏土岩沉积水介质为淡水—半咸水。同时考虑到 G 层黏土岩对应于华北盆地广泛存在的本溪组底部的 G 层铝土矿，其成因被认为是碎屑沉积物在风化壳长期风化淋滤形成，因此，本次研究认为 G 层黏土岩为淡水介质环境。其他样品 Sr/Ba 值为 0.10~0.33（平均 0.18），指示淡水—半咸水沉积环境。垂向上在 C15、C16 和 C23 层出现 2 个 Sr/Ba 值大于 0.2 的相对高值区，指示存在 2 个半咸水环境（Wei and Algeo，2020）。同时，C23 层为灰白色钙质页岩夹灰岩透镜体的浅海相沉积（见 3.3 小节），这进一步证实了研究区 Sr/Ba 值 0.2 作为淡水和半咸水界线的可靠性(图 3)。

3.2 氧化—还原性

研究地层泥岩 V/(V+Ni) 值为 0.34 ~ 0.93（平均 0.79，图 3）。其中，G 层黏土岩为 0.34 ~ 0.75（平均 0.79），指示氧化—次氧化的环境，这

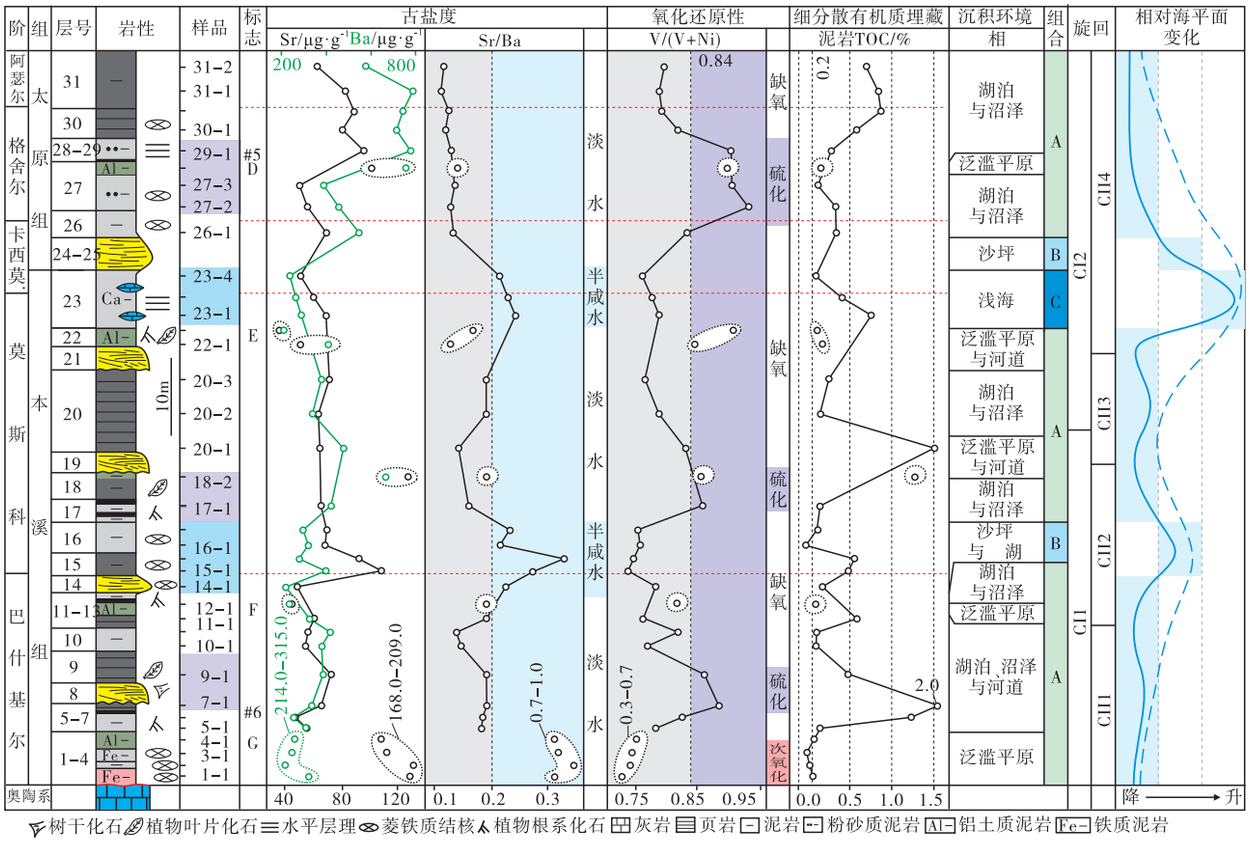


图 3　柳江煤田石门寨剖面古盐度、氧化还原性、有机质、沉积环境与海平面变化综合柱状图

Fig. 3　Comprehensive histogram of palaeosalinity, redox, organic matter, sedimentary environment and sea level change in Shimenzhai section, Liujiang coal field

与G 层黏土岩的成因一致，即碎屑沉积物在风化壳长期风化淋滤形成。其他样品值为 0.74～0.93（平均 0.81），指示缺氧—缺氧硫化的环境。垂向上在 C7-C9、C18、C26-C27 层出现 3 个 V/(V+Ni) >0.84 的相对高值区，指示存在 3 个缺氧硫化环境。水体深度是水介质氧化—还原性重要控制因素之一，随着水体加深、水体能量减弱、溶解氧浓度降低、还原性增强。从研究剖面缺氧硫化环境分布看，它们大部分位于相对海平面较低的时期（图 3），说明水体深度不是研究区沉积水介质氧化还原性主控因素。另一个控制氧化还原性的因素是有机质含量，在富有机质的水介质中，由于有机质氧化对溶解氧的消耗，即使在很浅、甚至暴露的环境，水介质也呈还原性（如沼泽环境）。研究剖面下部 1 个硫化环境（C7-9）与相对高的 TOC 含量对应区域一致，说明还原性的水介质是 TOC 富集主控因素。而 C18-C20 和 C27-C29 层硫化环境对应于相对低的 TOC 含量，说明 TOC 含量的升高，除了受还原的水介质影响外，还与其他因素有关（如高的有机质的供给速率和低的陆源碎屑供给速率）。

3.3　泥质岩总有机碳

研究地层泥岩总有机碳（TOC）数值如图 3所示。TOC 含量为 0.08%～2.00%（平均 0.5%），其中 4 层黏土岩样品含量较低，为 0.10%～0.26%（平均 0.19%），其他样品为 0.08%～2.00%（平均 0.60%）。垂向上 TOC 含量在 C6-C7、C18-C20 层出现 3 个相对高值区，其 TOC 含量平均值分别为 1.63、1.41 和 0.80，分别对应巴什基尔晚期、莫斯科晚期和阿瑟尔早期。

3.4　沉积相与沉积特征

本次研究中，识别出砂岩、泥质岩、铝土岩、泥灰岩和煤等 5 种岩石类型，以及河道、泛滥平

原、沼泽、湖泊、沙坪、潟湖、碎屑岩浅海和碳酸盐浅海等 8 种相，将它们归纳为海岸平原河流—湖泊（A）、滨海（B）和浅海（C）等 3 种相组合。

识别的基本依据包括岩性、厚度、垂向粒度变化、物理和生物沉积构造等(表 1)。每种相组合都被确定为代表一个明确且有成因联系的沉积背景，这些沉积背景从海岸平原河流—湖泊到滨海和浅海。

3.4.1 相组合 A：海岸平原河流—湖泊

相组合 A 包括河道（A_1）、泛滥平原（A_2）、沼泽（A_3）和湖泊（A_4）等 4 种相，是研究剖面最主要的相类型。相 A_1 为 2~3 m 厚、底部发育冲刷面、向上粒度变细的灰白色中—细粒（杂）砂岩，含少量灰色薄层波状层理粉砂岩。砂岩杂基含量较高（一般在 10%~25%），骨架颗粒分选性和磨圆性较差，含植物树干化石、发育交错层理和侧向迁移层理(图 4-a 至 4-d)。相 A_2 主要为白色—灰色铝土岩、铁铝质泥岩和泥岩，水平层理、波状层理或块状构造发育，根化石常见，在铝土岩(泥岩）中常见包粒结构(图 4-g)。相 A_3 为黑色薄层碳质泥岩（页岩）和煤。碳质泥（页）岩发育水平层理、波状层理或块状构造，含丰富完整的叶、茎和根化石。相 A_4 为浅灰—灰色富有机质页岩、黏土岩和粉砂岩，发育水平—波状层理，含少量碎屑状叶片化石（无根化石）。

根据研究剖面识别出的 4 种相、泥页岩沉积（Sr/Ba<0.2）淡水的古盐度特征，结合前人对华北晚石炭世陆表海盆地沉积的研究成果（李增学等，2003），相组合 A 被解释为海岸平原河流—湖泊沉积。

由于河道化的砂体形态，相 A_1 被解释为海岸平原河道沉积。由于河道内没有发现双（单）黏土层、海相化石，但常与古土壤（如包粒结构发育的铝土质泥岩氧化土、有机土煤等）相邻或伴生(图 4-f，4-g)，指示相 A_1 为发育在最大高潮面以上、没有受到海水影响的海岸平原环境。

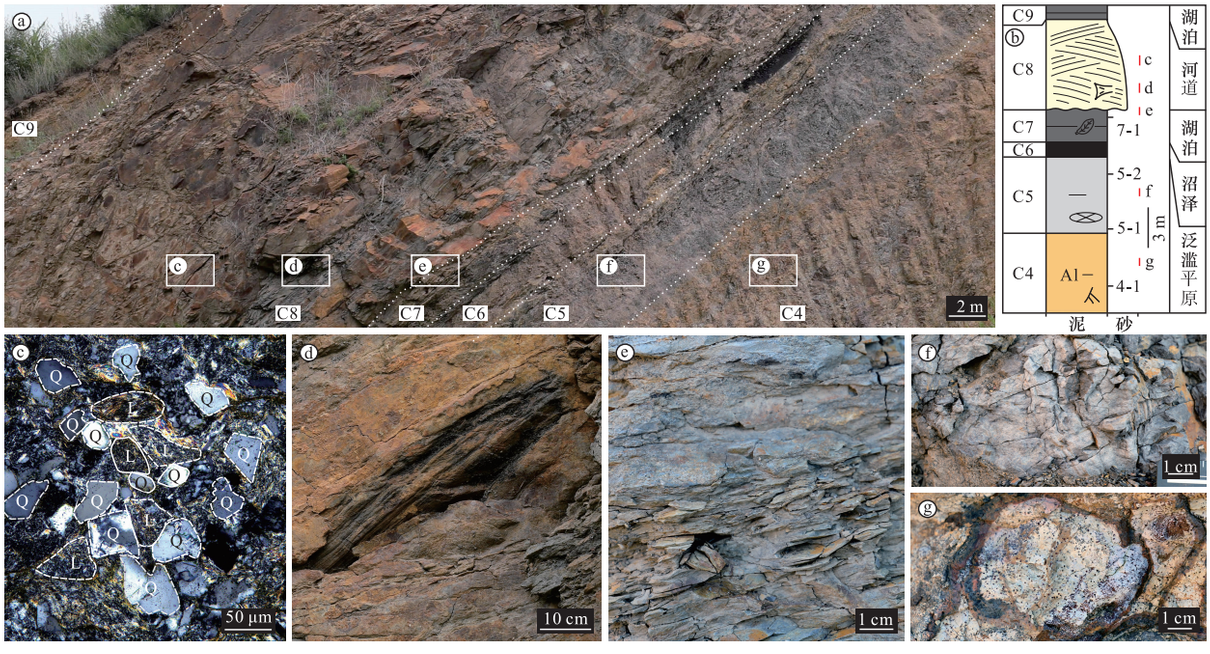
相 A2 古土壤广泛发育，其中铝土质泥岩、铝土岩和铁质泥岩中的包粒结构，被认为是湿热气候条件下、海（湖）平面以上潜流带和渗流带交替控制区的产物（杜远生等，2014；成龙等，2024），指示碎屑沉积物经历了强烈风化和淋滤作用。因此，相 A2 被解释为泛滥平原环境，它位于海岸平原泛滥盆地中地势稍高的位置，且只在洪水期接受沉积物（陈钟惠，1988）。

相 A_3 被解释为海岸平原泛滥盆地支流河道间、低洼的沼泽环境（有植被生长和有机质积累的湿地）。其中碳质泥页岩为受陆源碎屑显著影响

表 1 柳江煤田石门寨剖面相、相组合类型及其沉积特征

Table 1 Facies, facies combination types and sedimentary characteristics of Shimenzhai section, Liujiang coal field

相组合	相	环境解释	岩性特征	盐度 Sr/Ba	沉积构造/化石	层号
A 海岸平原河流—湖泊	A1	河道	2~3 m 厚、河道化形态的中—细粒(杂)砂岩和泥质砂岩,含少量粉砂岩夹层,通常向上粒度变细	/	底部发育冲刷面,含树干化石,发育交错层理和侧向迁移层理,未见双黏土层和海相化石	8,19,21
	A2	泛滥平原	白色—灰色铝土岩、铁铝质泥岩和泥岩	淡水,<0.2	水平层理、波状层理或块状构造,常见根化石和包粒结构	1-4,12,18 顶,22,27 顶
	A3	沼泽	黑色薄层碳质泥岩、碳质页岩和煤		水平层理,丰富的植物叶片,常见根化石和丰富的菱铁质结核或条带	5,6,13,17,28
	A4	湖泊	浅灰色—灰色富有机质页岩、黏土岩和粉砂岩		水平层理,菱铁质结核,少量的碎屑状叶片化石,无根化石	7,9-11,18 底,20,26,27 底,29-31
B 滨海	B1	沙坪	灰白色中厚层状—块状中—细粒砂岩	/	条带状形态,发育低角度交错层理,向上粒度变粗,底部渐变接触	14,24-25
	B2	潟湖	深灰色—黑色薄层(碳质)泥岩和页岩、粉砂岩	半咸—咸水,≥0.2	水平层理,大量菱铁质结核和中等的植物叶片化石,无根化石	15-16
C 浅海	C1	碎屑岩浅海	灰色—土黄色薄层(钙质)页岩		水平层理,海相化石	23
	C2	碳酸盐浅海	青灰色透镜状石灰岩		块状,海相化石	



a—剖面全景图；b—剖面柱状图；c—镜下矿物碎屑颗粒（Q-石英；L-岩屑）；d—树干化石；e—底部冲刷面；f—砂岩底古土壤；g—包粒结构铝土岩

图 4　柳江煤田石门寨剖面海岸平原河流—湖泊环境相、相组合特征

Fig. 4　Characteristics of facies and facies combination in coastal plain river-lake environment of Shimenzhai section, Liujiang coal field

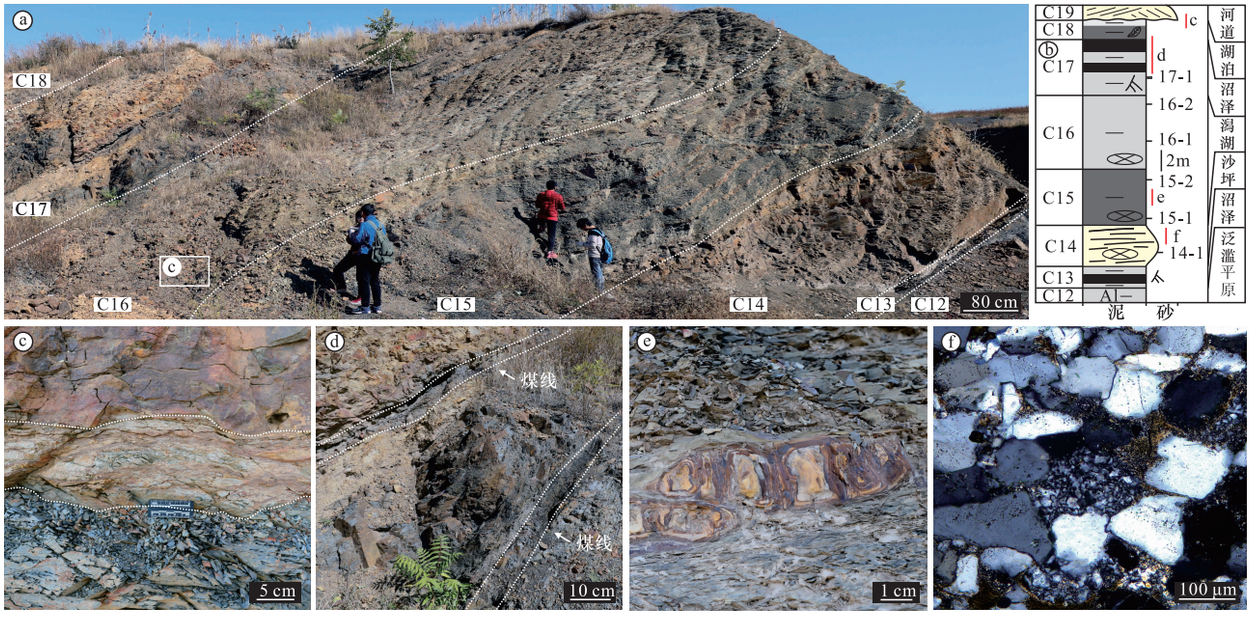
的矿物沼泽环境，煤为轻微受陆源碎屑影响的泥炭沼泽环境。相 A_4 普遍发育的水平层理指示悬浮载荷的细碎屑沉积物在重力作用下的垂向加积，再加上缺少植物根和完整的植物叶片化石，相 A_4 被解释为海岸平原浅水湖泊沉积。这些湖泊通常为浅水、小面积湖泊，容易淤浅沼泽化，并与泛滥盆地沼泽一起，形成区域广泛分布的泥炭沼泽（煤）。随着气候变湿，湖泊环境盛行并淹没沼泽，使湖相沉积成为煤层顶板。

3.4.2　相组合 B：滨海

识别出沙坪（B_1）和潟湖（B_2）2 种相（图 5），它们是研究剖面比较次要的相，仅分布在第 11、12 层与第 24、25 层。相 B_1 为灰白色中—厚层状—块状中—细砂岩，砂岩骨架颗粒分选性和磨圆性较好。砂体呈带状、发育低角度交错层理，底部与下伏地层渐变接触，向上粒度变粗。相 B_2 为深灰—黑色薄层（碳质）泥岩和页岩、粉砂岩，发育水平层理，含丰富的完整植物叶片化石和菱铁质结核，无植物根系化石。根据相组合 B 中相 B_2 泥页岩半咸水—咸水的古盐度（Sr/Ba>0.2）沉积特征，以及缺乏实体海相化石和古土壤不发育等系列证据，将相组合 B 解释为介于最大高潮面和正常天气浪基面的滨海沉积。因为条带状砂体形态、底部渐变接触、向上粒度变细、良好的砂岩骨架颗粒分选和磨圆性等特征，相 B_1 被解释为潮间与潮下带过渡区的沙坪沉积。

3.4.3　相组合 C：浅海（远滨—陆棚）

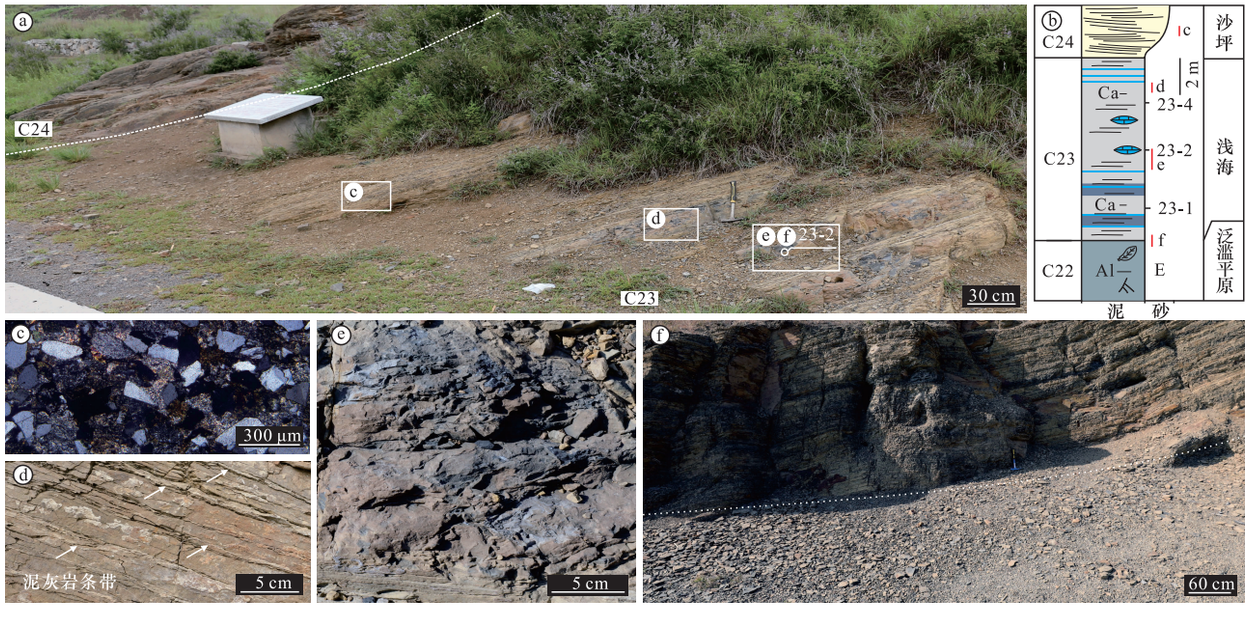
识别出碎屑岩浅海（C1）和碳酸盐浅海（C2）2 种相（图 6），它们仅分布在第 C23 层。相 C1 为灰色—土黄色（钙质）页岩，发育水平层理，含腕足（如网格长身贝）、*Chonetes* sp.）和双壳类（如古尼罗蛤、裂齿蛤、隔板几束蛤）等海相实体化石（河北省地质矿产局区调大队，1987）。相 C2 为青灰色透镜状石灰岩，块状构造，含与相 C1 类似的海相实体动物化石。由于半咸水—咸水的沉积水体性质、发育海相腕足和双壳类实体化石、悬浮载荷垂向加积形成的水平层理、以及不存在指示陆相环境的相标志（如根土岩、古土壤等），相组合 C 被解释为浪基面以下的浅海（远滨—陆棚）沉积。其中 C1 为碎屑岩浅海，C2 为碳酸盐浅海。



a—剖面全景图；b—剖面柱状图；c—河道底部古土壤；d—煤线；e—菱铁质结核；f—镜下矿物碎屑颗粒

图 5 柳江煤田石门寨剖面滨海环境相、相组合特征

Fig. 5 Characteristics of facies and facies combination in littoral zone environment of Shimenzhai section, Liujiang coal field



a—剖面全景图；b—剖面柱状图；c—砂岩镜下矿物碎屑颗粒；d—泥灰岩条带；e—灰岩透镜体；f—C22、C23 层间接触关系

图 6 柳江煤田石门寨剖面浅海环境相、相组合特征

Fig. 6 Characteristics of facies and facies combination in shallow sea environment of Shimenzhai section, Liujiang coal field

3.5 沉积模式与相对海平面变化

根据研究剖面相、相组合类型及其特征，在前人对华北晚石炭世陆表海沉积环境分析工作基础上（尚冠雄，1997；河北省地质矿产局区调大队，1987；陈世悦，2000；邵龙义等，2006），根据关键沉积界面（最大高潮面、平均高潮面、平均低潮面和浪基面等）重建的研究剖面沉积模式如图 7 所示。

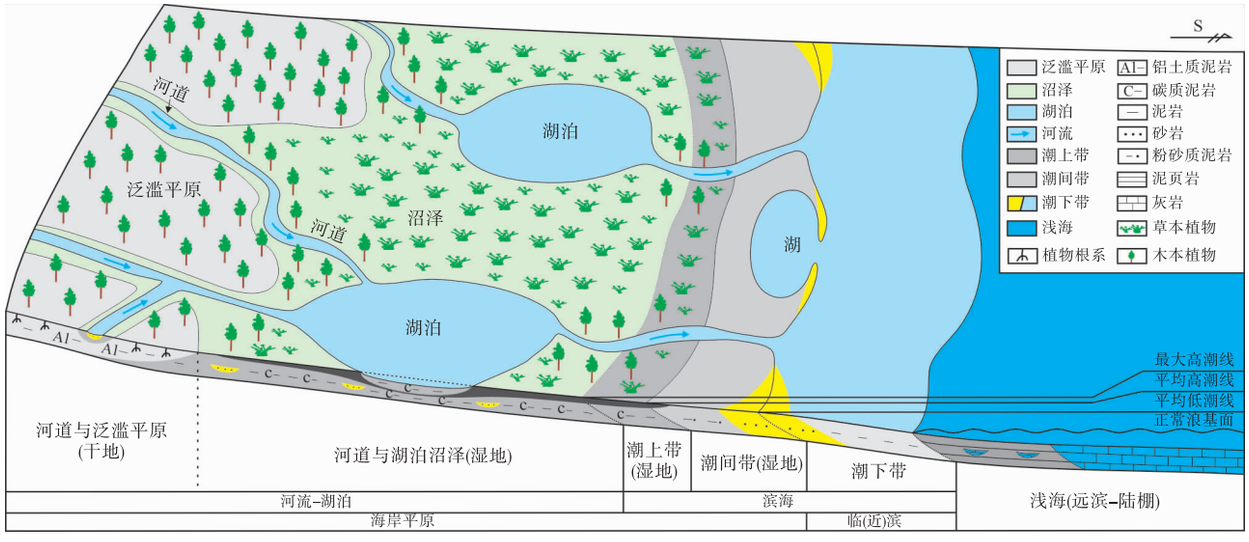


图 7　晚石炭世华北盆地沉积模式示意图

Fig. 7　Sedimentary model diagram of the Late Carboniferous of North China Basin

根据前人恢复的晚石炭世华北盆地古地理，该时期盆地北边的阴山古陆和南边的伏牛—秦岭古陆分别为主要和次要物源区，西部的乌兰格尔隆起不提供物源（尚冠雄，1997；Frisch *et al.*，2012；Zhang *et al.*，2014；Dong and Santosh，2016）。

该时期盆地整体为一向东倾斜的陆表海盆地。研究剖面所处位置整体沉积倾向为北北西—南南东向。由于研究剖面泥页岩主要为淡水环境沉积，再加上河道和古土壤（如铝土岩、煤）的广泛发育，指示研究剖面主要为海岸平原的中上部沉积（河流—湖泊）。根据地下水位与沉积界面关系，河流湖泊环境可以进一步划分为地势相对较高的河道与泛滥平原（向北）和地势相对较低的河道与湖泊沼泽亚环境（向南）（陈钟惠，1988）。前者位于潜水面以上或附近（干地或干湿交替），属于大气降水渗流带或渗流带—潜流带过渡区。后者为排水条件差的湿地沼泽和浅水湖泊环境，煤、富有机质泥页岩广泛发育。再向南为半咸水—咸水的滨海和浅海环境，但两者是研究剖面次要沉积，厚度约占地层厚度 20%。从垂向上沉积环境变化看，第 22 和第 23 层间存在明显的“跳相”（图 6-f），即由海岸平原河道—泛滥平原相突变为浅海相。两者之间为沉积突变接触，中间缺少过渡相沉积记录，这与陆表海盆地海陆交互相沉积和海侵的突发性特征一致（何起祥等，1991）。此外，本次在研究剖面没有发现典型的三角洲沉积（如向上变粗、变浅的沉积序列），再加上河道经常与古土壤（铝土岩等氧化土）伴生，这进一步支持研究剖面沉积背景是海岸平原而不是三角洲平原。

根据相和相组合的垂向变化，研究剖面识别出 CI 和 CII 2 个级别的相对海平面变化（图 8），前者 CI 包括 4 个完整的海侵—海退旋回（CI1 早巴什基尔期、CI2 中巴什基尔—早莫斯科期、CI3 晚莫斯科期、CI4 晚莫斯科—阿瑟尔期），后者为由 4 个 CI 级别旋回叠置而成的 2 个海侵—海退旋回（CII1 巴什基尔—中莫斯科期、CII2 晚莫斯科—阿瑟尔期）。

由于研究剖面晚石炭世持续了约 20 Ma，则 CI 和 CII 级别海平面变化持续时间分别为 5.0 Ma 和 10.0 Ma，大致对应于三级和二级相对海平面变化。由于研究剖面识别出的不同级别旋回中的标志层（如 G-D 层铝土（质泥岩）矿、煤层）都是区域性广泛分布（陈钟惠等，1988），并且横跨不同沉积体系，说明这些旋回的成因主要受控于外部因素，属于异旋回而非自旋回成因。

4　讨论

本次恢复晚石炭世相对海平面变化曲线，与前人对华北盆地恢复结果具有良好的相似性。如在鄂尔多斯盆地，类似的 4 个三级海平面旋回和 2 个二级海平面旋回被识别出，并且 2 次二级海平面高位

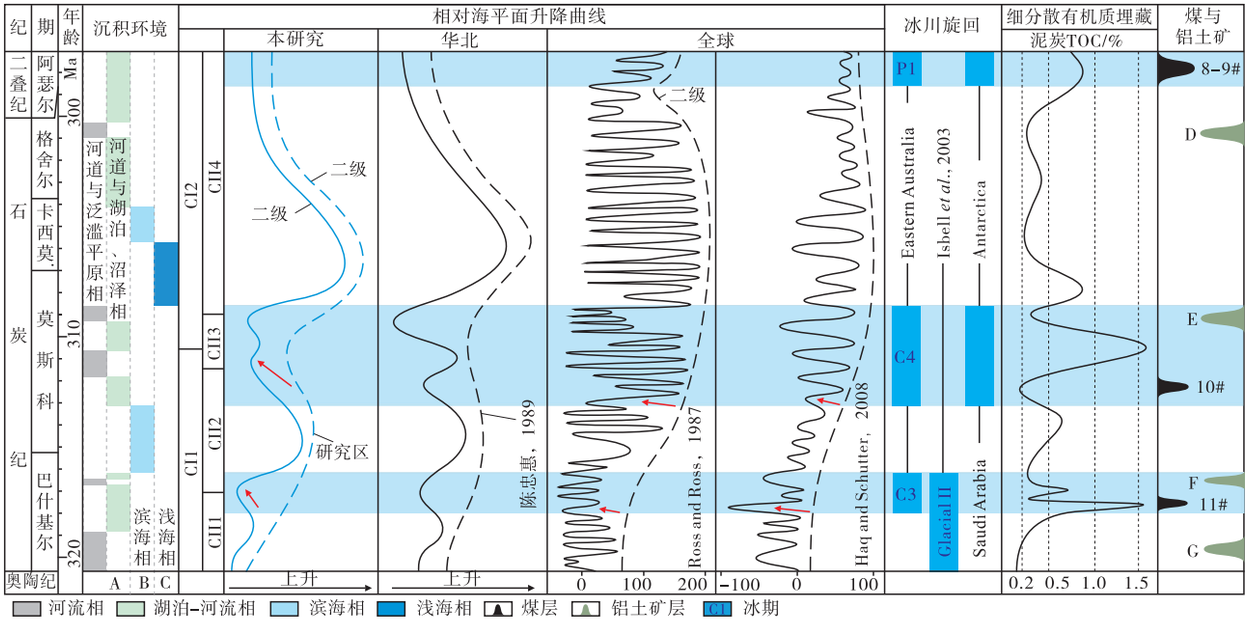


图 8 华北盆地石炭纪沉积环境、海平面升降曲线与沉积矿产对比

Fig. 8 Correlation of the Carboniferous sedimentary environment, sea level curves and sedimentary minerals in North China Basin

期也分别位于早莫斯科期和莫斯科—卡西莫夫过渡期（陈钟惠，1989）。这也进一步支持了本次研究中相对海平面变化恢复结果的可靠性和代表性。在美国，Ross 和 Ross（1905）恢复的三级海平面变化曲线与华北的差异显著，但在晚巴什基尔期、晚莫斯科期也出现 2 次与华北类似的相对海平面下降。其二级海平面曲线表现为上升（巴什基尔期—莫斯科期）、下降（卡西莫夫期—格舍尔期）和上升（阿瑟尔期）的变化模式，与华北盆地类似，其最高海平面时期出现在莫斯科—卡西莫夫过渡期（CII2 海泛期）。Haq 和 Schutter（2008）恢复的二级海平面曲线在巴什基尔期—早卡西莫夫期呈上升趋势，之后（晚卡西莫夫期—阿瑟尔期）呈下降趋势，整体与研究区恢复的相对海平面曲线变化规律相似。全球海平面变化、盆地基底沉降和沉积物供给速率是控制陆表海盆地海平面变化主要因素。晚石炭世古亚洲洋向南部华北板块的俯冲，引起华北盆地北缘阴山古陆缓慢隆生，并成为主要物源区（尚冠雄，1997；李增学等，2003）。

现有许多证据表明，晚石炭华北盆地具有基底沉降和陆源碎屑供应相对均匀和稳定的特征，尤其是该时期华北盆地宽阔的海岸平原与临滨—浅海的泥质岩、碳酸盐岩夹煤层沉积盛行的特征（吕大炜等，2009；Allen *et al.*，2014）。因此，全球（绝对）海平面变化是引起华北陆表海盆地海平面变化的主控因素。冰室期两极冰原（川）消融和增长是引起大洋盆地水体积变化的重要因素，也是引起全球（绝对）海平面变化的主要原因，即间冰期全球变暖，冈瓦纳冰原融化，造成海水体积增加，海平面上升；在冰期，气候变冷、冈瓦纳冰原生长，海水体积减小，引起海平面下降。

研究剖面海平面变化曲线与同时期前人通过冰积物建立的高纬度冰期—间冰期旋回的对比如图 8 所示。海平面变化曲线在巴什基尔晚期、莫斯科期早期和阿瑟尔期的 3 次海平面的下降分别与冈瓦纳大陆记录的 3 次冰期（C3、C4 和 P1）具有良好的对应关系，说明高纬度冰川旋回是低纬度华北盆地海平面变化的主控因素。

相似的，从泥岩 TOC 含量、煤层和铝土矿分布与高纬度冰期—间冰期旋回对比看，它们均倾向于在冰期或冰期—间冰期过渡期聚集。说明冰期下降的海平面和降低的温度，有利于陆表海盆地沉积界面暴露、沼泽化，以及有机质的产生和保存（尚冠雄，1997；Cleal and Thomas，2005；付秀清和王正东，2009；Li *et al.*，2021；Wu *et al.*，2021；Flores and Moore，2024）。同时，冰期海平面下降还引起干湿交替的海岸泛滥平原环境的盛行，在该环境陆源碎屑沉积物经过再风化

和淋滤，促进了铝土质泥岩或铝土矿的形成。

5　结论与认识

1）利用古盐度（Sr/Ba 值）和水介质氧化—还原性（V/（V+Ni）值）数据以及岩相识别结果将华北盆地晚石炭世地层划分为 8 种相和海岸平原河流湖泊、滨海和浅海 3 种相组合，恢复了研究剖面 2 个二级海侵—海退旋回和 4 个三级海侵—海退旋回。

2）研究发现高纬度冰期和间冰期分别大致与研究区二级相对高海平面时期和低海平面时期相对应，说明高纬度冈瓦纳大陆冰川旋回是华北盆地晚石炭世二级海平面变化的主控因素。

3）煤、富有机质泥岩和铝土岩在冰期发育的特征，指示冰期下降的海平面和较低的温度，有利于陆表海盆地沉积界面暴露、沼泽化，以及有机质的产生和保存。同时，冰期海平面下降还引起干湿交替的海岸泛滥平原环境的盛行，在该环境陆源碎屑沉积物经过再风化和淋滤，促进了铝土质泥岩或铝土矿的形成。

致谢　审稿专家及编辑老师对稿件提出了宝贵的意见和建议，在此表示感谢。

参考文献（References）

陈世悦. 2000. 华北石炭二叠纪海平面变化对聚煤作用的控制. 煤田地质与勘探,28(5)：8-11.［Chen S Y. 2000. Control of sea-level change to coal accumulation in Carboniferous-Permian, North China. Coal Geology & Exploration,28(5)：8-11］

陈钟惠. 1988. 煤和含煤岩系的沉积环境. 湖北武汉：中国地质大学出版社.［Chen Z H. 1988. Sedimentary environment of coal and coal-bearing rock series. Hubei Wuhan：China University of Geosciences Press］

陈钟惠. 1989. 鄂尔多斯盆地东缘晚古生代含煤岩系的沉积环境和聚煤规律：兼论山西境内晚古生代含煤岩系的沉积环境. 湖北武汉：中国地质大学出版社.［Chen Z H. 1989. Sedimentary Environment and Coal Accumulation Law of Late Paleozoic Coal-bearing Measures in the Eastern Margin of Ordos basin：Also on the Sedimentary Environment of Late Paleozoic Coal-bearing Measures in Shanxi Province. Hubei Wuhan：China University of Geosciences Press］

成龙,余文超,杜远生,周锦涛,熊国林,翁申富,郭尚宇. 2024. 黔北旦坪铝土矿床胶体包粒成因及其形成时间估算. 古地理学报,26(5)：1167-1184.［Cheng L, Yu W C, Du Y S, Zhou J T, Xiong G L, Weng S F, Guo S Y. 2024. Genesis of colloidal pellets of Danping bauxite deposit in northern Guizhou Province and estimation of their mineralization duration. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),26(5)：1167-1184］

杜远生,余文超. 2020. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用：兼论铝土矿床的成因分类. 古地理学报,22(5)：812-826.［Du Y S, Yu W C. 2020. Subaerial leaching process of sedimentary bauxite and the discussion on classifications of bauxite deposits. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),22(5)：812-826］

杜远生,周琦,金中国,凌文黎,汪小妹,余文超,崔滔,雷志远,翁申富,吴波,覃永军,曹建州,彭先红,张震,邓虎. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式. 古地理学报,16(1)：1-8.［Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, Ling W L, Wang X M, Yu W C, Cui T, Lei Z Y, Weng S F, Wu B, Qin Y J, Cao J Z, Peng X H, Zhang Z, Deng H. 2014. Mineralization model for the Early Permian bauxite deposits in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),16(1)：1-8］

付秀清,王正东. 2009. 石油地质学. 北京：石油工业出版社.［Fu X Q, Wang Z D. 2009. Petroleum Geology. Beijing：Petroleum Industry Press,1-33］

何起祥,业治铮,张明书,李浩. 1991. 受限陆表海的海侵模式. 沉积学报,9(1)：1-10.［He Q X, Ye Y Z, Zhang M S, Li H. 1991. Transgression model of restricted epicontinental sea. Acta Sedimentologica Sinica,9(1)：1-10］

河北省地质矿产局区调大队. 1987. 秦皇岛市测区 1∶5 万区域地质调查报告. 河北省地质矿产局,1-265.［HPBGMR. 1987. 1∶50000 Regional Geological Survey Report of Qinhuangdao City Survey Area. Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources,1-265］

李增学,余继峰,郭建斌,韩美莲. 2003. 陆表海盆地海侵事件成煤作用机制分析. 沉积学报,21(2)：288-296,306.［Li Z X, Yu J F, Guo J B, Han M L. 2003. Analysis on coal formation under transgression events and its mechanism in epicontinental sea basin. Acta Sedimentologica Sinica,21(2)：288-296,306］

刘宝珺. 1985. 岩相古地理基础和工作方法. 北京：地质出版社,1-440.［Liu B J. 1985. Lithofacies Palaeogeography：Principle and Methods. Beijing：Geological Publishing House,1-440］

吕大炜,李增学,刘海燕. 2009. 华北板块晚古生代海侵事件古地理研究. 湖南科技大学学报(自然科学版),24(3)：16-22.［Lü D W, Li Z X, Liu H Y. 2009. The study of transgressive 'event' paleogeography about the Late Paleozoic of North China. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition),24(3)：16-22］

吕荐阔,翟世奎,于增慧,刘晓锋,王轲. 2021. 氧化还原敏感性元素在沉积环境判别中的应用研究进展. 海洋科学,45(12)：108-124.［Lü J K, Zhai S K, Yu Z H, Liu X F, Wang K. 2021. Application and influence factors of redox-sensitive elements in a sedimentary environment. Marine Sciences,45(12)：108-124］

尚冠雄. 1997. 华北地台晚古生代煤地质学研究. 山西太原：山西科学技术出版社.［Shang G X. 1997. Late Paleozoic Coal Geology of North China Platform. Shanxi Taiyuan：Shanxi Science and Technology Press］

邵龙义,肖正辉,何志平,刘永福,尚潞君,张鹏飞. 2006. 晋东南沁水盆地石炭二叠纪含煤岩系古地理及聚煤作用研究. 古地理学报,8(1)：43-52.［Shao L Y, Xiao Z H, He Z P, Liu Y F, Shang L J, Zhang P F. 2006. Palaeogeography and coal accumulation for coal measures of the Carboniferous-Permian in Qinshui Basin, southeastern Shanxi Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),

8(1): 43-52]

王自强. 1989. 华北二叠纪大型古植物事件. 古生物学报,28(3): 314-343. [Wang Z Q. 1989. Permian gigantic palaeobotanical events in North China. Acta Palaeontologica Sinica, 28(3): 314-343]

Allen J P, Fielding C R, Gibling M R, Rygel M C. 2014. Recognizing products of Palaeoclimate fluctuation in the fluvial stratigraphic record: an example from the Pennsylvanian to Lower Permian of Cape Breton Island, Nova *Scotia*. Sedimentology, 61(5): 1332-1381.

Cleal C J, Thomas B A. 2005. Palaeozoic tropical rainforests and their effect on global climates: Is the past the key to the present? Geobiology, 3(1): 13-31.

Dong Y P, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. Gondwana Research, 29(1): 1-40.

Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P, Rygel M C, Jones A T, Roberts J. 2008. Stratigraphic imprint of the late Palaeozoic ice age in eastern Australia: a record of alternating glacial and nonglacial climate regime. Journal of the Geological Society, 165(1): 129-140.

Fielding C R, Nelson W J, Elrick S D. 2020. Sequence stratigraphy of the late Desmoinesian to early Missourian (Pennsylvanian) succession of southern Illinois: insights into controls on stratal architecture in an icehouse period of Earth history. Journal of Sedimentary Research, 90(2): 200-227.

Fielding C R, Frank T D, Savatic K, Mays C, McLoughlin S, Vajda V, Nicoll R S. 2022. Environmental change in the Late Permian of Queensland, NE Australia: the warmup to the end-Permian extinction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 594: 110936.

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.

Flores R M, Moore T A. 2024. Coal and Coalbed Gas Future Directions and Opportunities. Elsevier: 177-255.

Frakes L A, Francis J E. 1988. A guide to Phanerozoic cold polar climates from high-latitude ice-rafting in the Cretaceous. Nature, 333(6173): 547-549.

Frisch W, Meschede M, Blakey R C. 2012. Plate Tectonics and Mountain Building. Springer Berlin Heidelberg: 149-158.

Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. Science, 322(5859): 64-68.

Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, Lenaker P A. 2003. Timing of Late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of Northern Hemisphere cyclothems? Special Paper of the Geological Society of America, 370: 5-24.

Li Y N, Shao L Y, Fielding C R, Wang D W, Mu G Y. 2021. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation in a lowland alluvial plain, coastal plain, and shallow-marine setting: Upper Carboniferous-Permian of the Anyang-Hebi coalfield, Henan Province, North China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 567: 110287.

Lu J, Zhou K, Yang M F, Zhang P X, Shao L Y, Hilton J. 2021a. Records of organic carbon isotopic composition (δ^{13}C org) and volcanism linked to changes in atmospheric pCO_2 and climate during the Late Paleozoic Icehouse. Global and Planetary Change, 207: 103654.

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 of Sciences of the United States of America, 118: e2109895118.

Lu J, Wang Y, Yang M F, Shao L Y, Hilton J. 2021c. Records of volcanism and organic carbon isotopic composition (δ^{13}C org) linked to changes in atmospheric pCO_2 and climate during the Pennsylvanian icehouse interval. Chemical Geology, 570: 120168.

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.

Morales J A. 2022. Defining Concepts of Coastal Geology. Springer Nature Switzerland: 13-23.

Ross C A, Ross J R P. 1905. Late Paleozoic sea levels and depositional sequences. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, 24: 137-149.

Scotese C R. 2014. Atlas of Permo-Carboniferous Paleogeographic Maps. PALEOMAP Project, 4: 53-64.

Torsvik T H, Smethurst M A, Burke K, Steinberger B. 2008. Long term stability in deep mantle structure: evidence from the ~300 Ma Skagerrak-Centered Large Igneous Province (the SCLIP). Earth and Planetary Science Letters, 267(3-4): 444-452.

Veevers J J, Powell C M. 1987. Late Paleozoic glacial episodes in Gondwanaland reflected in transgressive-regressive depositional sequences in Euramerica. Geological Society of America Bulletin, 98(4): 475.

Wang A H, Wang Z H, Liu J K, Xu N C, Li H L. 2021. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta. Chemical Geology, 559: 119923.

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.

Wanless H R, Shepard F P. 1936. Sea level and climatic changes related to Late Paleozoic cycles. Geological Society of America Bulletin, 47(8): 1177-1206.

Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 287: 341-366.

Wu Q, Ramezani J, Zhang H, Wang J, Zeng F G, Zhang Y C, Liu F, Chen J, Cai Y F, Hou Z S, Liu C, Yang W, Henderson C M, Shen S-Z. 2021. High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China block. Geology, 49(6): 677-681.

Xiang F, Zhang D Y, Chen K, Feng Q. 2015. Early Cretaceous paleoclimate characteristics of China: clues from continental climate-indicative sediments. Acta Geologica Sinica-English Edition, 89(4): 1307-1318.

Yang J H, Cawood P A, Montañez I P, Condon D J, Du Y S, Yan J X, Yan S Q, Yuan D X. 2020. Enhanced continental weathering and large igneous province induced climate warming at the Permo-Carboniferous transition. Earth and Planetary Science Letters, 534: 116074.

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 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.

Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, Ye H, Wu F. 2014. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: implications for lithospheric thinning and decratonization. Earth-Science Reviews, 131: 49-87.

（责任编辑　李新坡）

《古地理学报》2025 年度审稿人

2025 年度，共计有 281 位来自高等院校、科研院所和生产单位的专家学者给《古地理学报》评审稿件，有力保障了期刊的高水平创新发展。现将这些专家学者的名字列出（括号内的数字是有效审稿次数），并致以诚挚的感谢！祝愿各位专家学者在新的一年里身体健康！阖家幸福！再创佳绩！

谭秀成（10）　吴亚生（9）　梁　超（8）　施振生（8）　简　星（6）　李顺利（6）　邵龙义（6）　汤冬杰（6）　徐振华（6）
张昌民（6）　张立军（6）　范若颖（5）　纪友亮（5）　李　攀（5）　李凤杰（5）　孟庆涛（5）　庞军刚（5）　宋金民（5）
孙海涛（5）　包洪平（4）　单　新（4）　冯文杰（4）　关旭同（4）　郭艳琴（4）　侯海海（4）　李向东（4）　鲁　静（4）
马义权（4）　薛进庄（4）　闫建平（4）　杨瑞东（4）　杨　田（4）　赵俊峰（4）　鲍志东（3）　陈世悦（3）　崔　航（3）
封从军（3）　冯学谦（3）　高振中（3）　葛家旺（3）　李　华（3）　李　琦（3）　李三忠（3）　李元昊（3）　李增学（3）
林承焰（3）　刘　豪（3）　刘可禹（3）　刘自亮（3）　牛永斌（3）　沈玉林（3）　孙　雨（3）　魏　巍（3）　吴朝东（3）
吴靖宇（3）　吴胜和（3）　吴因业（3）　谢晓军（3）　尹艳树（3）　于　洲（3）　于兴河（3）　张柏林（3）　钟大康（3）
朱世发（3）　曹养同（2）　曾　晗（2）　陈贺贺（2）　陈　兰（2）　陈　雷（2）　陈宇航（2）　杜远生（2）　方修琦（2）
傅东静（2）　高志勇（2）　龚承林（2）　郭　佩（2）　何登发（2）　胡　斌（2）　黄可可（2）　金思丁（2）　孔祥鑫（2）
旷红伟（2）　赖　锦（2）　李　涤（2）　李　飞（2）　李胜利（2）　李文厚（2）　林畅松（2）　刘静江（2）　刘强虎（2）
刘圣乾（2）　刘树根（2）　吕大炜（2）　吕奇奇（2）　齐永安（2）　任　影（2）　桑树勋（2）　邵　磊（2）　时志强（2）
史燕青（2）　宋　宇（2）　孙平昌（2）　谈明轩（2）　王俊辉（2）　王濡岳（2）　王兴志（2）　王　怿（2）　王永栋（2）
王友伟（2）　王张华（2）　文华国（2）　夏国清（2）　肖传桃（2）　肖　笛（2）　徐　杰（2）　鄢继华（2）　杨　浩（2）
杨仁超（2）　杨振京（2）　余文超（2）　余一欣（2）　喻建新（2）　张　进（2）　张廷山（2）　郑孟林（2）　周传明（2）
周进高（2）　周明忠（2）　朱如凯（2）　朱筱敏（2）　安成邦（1）　包书景（1）　蔡东梅（1）　曹高社（1）　曹红霞（1）
陈洪德（1）　陈吉涛（1）　陈　强（1）　陈孝红（1）　崔国栋（1）　戴　霜（1）　单长安（1）　邓昌州（1）　邓秀芹（1）
丁　一（1）　董进国（1）　董艳蕾（1）　段太忠（1）　付修根（1）　付　勇（1）　高　抒（1）　高　远（1）　葛新民（1）
龚一鸣（1）　巩恩普（1）　管后春（1）　郭雪莲（1）　郭　芸（1）　侯读杰（1）　侯光良（1）　胡明毅（1）　胡作维（1）
黄　冰（1）　黄　虎（1）　黄　雷（1）　黄永江（1）　季汉成（1）　季军良（1）　贾建亮（1）　贾进华（1）　江青春（1）
姜福杰（1）　金振奎（1）　靳　军（1）　景秀春（1）　客伟利（1）　赖富强（1）　李　罡（1）　李国彪（1）　李国欣（1）
李江海（1）　李　猛（1）　李　宁（1）　李　庆（1）　李秋根（1）　李素萍（1）　李相博（1）　李相传（1）　李　扬（1）
李元吉（1）　刘帮军（1）　刘大卫（1）　刘国强（1）　刘景彦（1）　刘　乐（1）　刘少锋（1）　刘喜停（1）　刘学飞（1）
刘亚雷（1）　刘勇胜（1）　刘志臣（1）　柳永清（1）　鲁银涛（1）　陆扬博（1）　罗传秀（1）　罗情勇（1）　毛龙江（1）
毛小平（1）　莫多闻（1）　彭　旸（1）　蒲秀刚（1）　乔　丽（1）　乔占峰（1）　曲希玉（1）　饶　松（1）　阮　壮（1）
沈安江（1）　时　国（1）　孙娇鹏（1）　谭茂金（1）　汪新伟（1）　王爱华（1）　王　博（1）　王海雷（1）　王建强（1）
王　剑（1）　王　健（1）　王启宇（1）　王　帅（1）　王文峰（1）　王夏斌（1）　王香增（1）　王艳忠（1）　王玉满（1）
韦恒叶（1）　文　龙（1）　吴东旭（1）　吴　靖（1）　吴晓智（1）　吴　悦（1）　夏文谦（1）　肖安成（1）　肖佃师（1）
肖　亮（1）　谢庆宾（1）　许　冰（1）　许淑梅（1）　薛欣宇（1）　颜佳新（1）　杨爱华（1）　杨　帆（1）　杨海英（1）
杨文涛（1）　杨勇强（1）　杨煜达（1）　殷树铮（1）　尹太举（1）　尤东华（1）　于福生（1）　余　瑜（1）　袁海锋（1）
岳大力（1）　张春生（1）　张国印（1）　张水昌（1）　张　坦（1）　张兴亮（1）　张志杰（1）　赵迪斐（1）　赵红格（1）
赵文金（1）　赵晓明（1）　赵彦彦（1）　郑剑锋（1）　郑永飞（1）　周文浩（1）　朱　碧（1）　朱光有（1）　朱红涛（1）
朱晓军（1）　邹妞妞（1）