



移动阅读

张予杰, 翟庆国, 张以春, 等, 2024. 藏北日土地区南羌塘地块晚石炭—早二叠世海相裂谷盆地沉积序列: 冈瓦纳大陆北缘初始裂解的沉积响应[J]. 沉积与特提斯地质, 44(4): 773–795. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05007

ZHANG Y J, ZHAI Q G, ZHANG Y C, et al., 2024. The marine rifted successions of the Late Carboniferous–Early Permian deposits from the South Qiangtang Block in the Rutog area, Northern Xizang: Sedimentary records of a rifting process on the northern Gondwana margin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(4): 773–795. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.05007

藏北日土地区南羌塘地块晚石炭—早二叠世海相裂谷盆地沉积序列: 冈瓦纳大陆北缘初始裂解的沉积响应

张予杰^{1,2}, 翟庆国³, 张以春^{4,5}, 刘一鸣³, 曾孝文^{1,2}, 安显银^{1,2}, 刘石磊^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 中国地质调查局青藏高原地质研究中心, 四川 成都 610218; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 4. 中国科学院南京地质古生物研究所 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 5. 中国科学院大学南京学院, 江苏 南京 210049)

摘要: 南羌塘地块被广泛认为是晚古生代亲冈瓦纳的基梅里大陆的一部分, 其构造演化历史与冈瓦纳北缘裂解及班公湖–怒江中特提斯洋的打开关系密切。虽然众多研究成果显示, 南羌塘地块在早二叠世从冈瓦纳大陆北缘裂解而来, 但这在盆地沉积响应上却没有得到确切的证实。本文通过研究藏北日土地区晚石炭—早二叠世受冰期影响的4类16个岩相、6类沉积环境特征和不同沉积作用演化阶段, 划分出受盆地基底构造沉降控制和气候影响的5个沉积充填序列, 并分析其所反映的沉积物供应与可容空间变化, 揭示沉积充填序列形成过程中的构造–气候控制因素。研究表明, 序列I在晚石炭世—早二叠世阿舍尔期沉积, 表现为冰川沉积物补偿了盆地基底沉降形成的沉积可容空间, 是同裂谷早期阶段构造活动与气候共同作用的结果; 在萨克马尔期至亚丁斯克早期, 以展金组为代表的冰海相海侵退积序列(序列II)和以曲地组为代表的海退进积–加积序列(序列III), 分别反映同裂谷活动第一幕高峰期和停滞期; 亚丁斯克晚期至空谷期, 以吞龙共巴组下段为代表的海侵加积–退积序列(序列IV)和以吞龙共巴组上段为代表的加积–进积序列(序列V)则分别指向同裂谷活动第二幕高峰期和减弱期。因此, 藏北日土地区南羌塘地块晚石炭—早二叠世沉积充填序列是冈瓦纳大陆北缘裂解过程的沉积响应, 早二叠世是班公湖–怒江中特提斯洋初始打开的关键时期。

关键词: 南羌塘地块; 晚石炭—早二叠世; 沉积充填序列; 冈瓦纳北缘裂解; 日土地区

中图分类号: P534.4

文献标识码: A

The marine rifted successions of the Late Carboniferous–Early Permian deposits from the South Qiangtang Block in the Rutog area, Northern Xizang: Sedimentary records of a rifting process on the northern Gondwana margin

ZHANG Yujie^{1,2}, ZHAI Qingguo³, ZHANG Yichun^{4,5}, LIU Yiming³, ZENG Xiaowen^{1,2},

收稿日期: 2023-04-23; 改回日期: 2024-05-24; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 万友利

作者简介: 张予杰(1978—), 男, 正高级工程师, 从事青藏高原晚古生代地层划分与沉积演化研究。E-mail: zhangyujie@mail.cgs.gov.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目(42241205); 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0706); 中国地质调查局地质调查项目(DD20240026)

AN Xianyin^{1,2}, LIU Shilei^{1,2}

(1. *Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China*; 2. *Research Center for Tibetan Plateau Geology, China Geological Survey, Chengdu 610218, China*; 3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 4. *State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 5. *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210049, China*)

Abstract: The South Qiangtang Block (SQB) is widely acknowledged as part of the Cimmerian Continent, which rifted away from the northern Gondwana margin during the Early Permian, marking the initial opening of the Bangong-Nujiang Meso-Tethys Ocean. However, the sedimentary response to this rifting event remains unconfirmed, leaving the event ambiguous. In this study, five sedimentary successions are identified in the Rutog area, Northern Xizang, each characterized by distinct facies that record different stages in the tectonic evolution and climatic influences on the basin, along with associated changes in the rates of basin subsidence and sediment accommodation. Succession I, formed in the Late Carboniferous to Asselian age, shows that glaciomarine sediments compensated for the sediment accommodation generated by the basin subsidence, resulting from tectonic activities and climatic factors in the early stage of the syn-rift. During the Sakmarian to early Artinskian age, the glaciomarine retrogradational sequence represented by the Zhanjin Formation (Succession II) and the following progradational-aggradational sequences represented by the Qudi Formation (Succession III) mark the climax and standstill stages of the first episode of the syn-rift tectonic activities, respectively. In the late Artinskian to Kungurian age, the second episode of syn-rift is manifested by the Succession IV and V. And the former retrogradational sequence (Succession IV), reflected in the lower part of the Tunlonggongba Formation, indicates a climax stage of syn-rift tectonic activity, while the latter aggradational-progradational sequences (Succession V), represented by the upper part of the Tunlonggongba Formation, mark a stage of tectonic quiescence. Therefore, these Early Permian sedimentary successions in the SQB are best explained by the tectonic subsidence resulting from the rifting of the SQB from the Gondwana margin, suggesting an early Permian timeline for the initial opening of the Bangong-Nujiang Meso-Tethys Ocean.

Key words: South Qiangtang Block; Late Carboniferous–Early Permian; sedimentary filling sequences; rifting on the north Gondwana; Rutog area

0 引言

青藏高原作为特提斯构造域最具代表性的区域, 历经原特提斯洋、古特提斯洋和新特提斯洋持续的构造演化过程(许志琴等, 2016; 吴福元等, 2020)。一般认为, 晚古生代至中生代期间, 从冈瓦纳大陆裂解出来的基梅里陆块群分隔了古特提斯洋和新特提斯洋(Şengör, 1984; Yin and Harrison, 2000; Zanchi et al., 2015; 朱日祥等, 2022)。Metcalf 提出分隔拉萨地块与南羌塘地块的班公湖–怒江洋为中特提斯洋(Metcalf, 1996, 2013)。南羌塘地块由于广泛发育早二叠世冰海相沉积和冷水动物群, 被普遍认为是亲冈瓦纳的基梅里陆块群的一部分(Zhang et al., 2013; Metcalfe, 2021), 其沉积演化历史与班公湖–怒江特提斯洋的形成与演化过程紧密相关(Hu et al., 2022)。

根据班公湖–怒江缝合带两侧地块(南羌塘、

拉萨)的二叠纪古生物地理(张以春等, 2019; Xu et al., 2022; 沈树忠等, 2024)和三叠纪古地磁(宋春彦等, 2012; Zhou et al., 2016)具有的显著差异, 结合南羌塘地块普遍发育与 Panjal Traps 玄武岩(Shellnutt et al., 2014)类似的 290 Ma 的基性岩墙群(Zhai et al., 2013; Xu et al., 2016; Wang et al., 2019; Dan et al., 2021)和南羌塘地块上二叠统吉普日阿组与下二叠统砂岩具有不同物源(Fan et al., 2021)等现象, 以及在班公湖–怒江缝合带内发现原岩时代为 260 Ma 的高压变质岩(其原岩可能为 N-MORB 型岩石, Zhang et al., 2016), 推测班公湖–怒江特提斯洋的打开时间不是以往认为的中生代, 而很可能是在二叠纪时期。

区域上, 冈瓦纳大陆周缘形成了众多受冰期影响的石炭–二叠纪(夭折)裂谷盆地(Eyles, 1993; Veevers, 2006), 其中发现与冰海相沉积有关的优质储层(砂岩)和封盖层(冰碛岩)(Levell et al., 1988;

Iasky et al., 1998; Eyles et al., 2001; Neves et al., 2019) 具有重要的油气勘探前景(Potter et al., 1995)。南羌塘地块石炭—二叠系成烃潜力显示,地表出露的擦蒙组泥质岩有机碳含量平均为 1.05%(陈文彬等, 2013), 钻井中展金组泥质岩类有机碳含量平均为 1.15%~1.52%, 具备良好的生烃潜力(曹竣锋等, 2015; Wang et al., 2022)。因此, 深入研究南羌塘地块石炭—二叠纪沉积充填序列和构造属性, 对羌塘盆地油气勘探工作具有积极意义。

本文在先前研究的基础上(Zhang et al., 2023), 通过新资料进一步完善藏北日土地区南羌塘晚石炭—早二叠世沉积充填序列, 从沉积响应的视角反映构造与气候等控制因素, 从而揭示了晚古生代南羌塘地块自冈瓦纳北缘的裂解过程, 并约束了班公湖—怒江洋初始开启的时间上限。

1 地质背景

夹持在金沙江缝合带和班公湖—怒江缝合带之间的羌塘地体是青藏高原的核心(丁林等, 2017), 构造上可分为南羌塘地块、中央隆起带和北羌塘地块(图 1A; 黄继钧, 2000; 李才等, 2016)。中央隆起带也被称为羌塘中央变质带(central Qiangtang metamorphic belt), 关于其来源, 长期以来有两种观点, 一种观点认为, 高压变质带来源于金沙江洋壳向南俯冲于统一的羌塘地体之下, 从盆地中央隆升并伸展剥离而形成(Kapp et al., 2003; Pullen et al., 2011); 另一种观点认为, 羌塘中部高压变质带代表了龙木错—双湖古特提斯洋闭合而形成的缝合带(李才, 1987; 李才等, 2016)。

相对于北羌塘地块, 石炭—二叠系含有丰富的暖水生物群(程立人等, 2006; 武桂春等, 2009), 并且与华南地块具有基本相同的运移轨迹(Ma et al., 2019); 南羌塘地块则以发育石炭—二叠纪冰海相沉积、典型的冷温型动物群(Zhang et al., 2013; Zhang et al., 2016; Shen et al., 2016; Yuan et al., 2022; 沈树忠等, 2024)、广泛分布的早二叠世基性岩墙群(Zhai et al., 2013; Xu et al., 2016; Chen et al., 2017; Wang et al., 2019; Dan et al., 2021; Zhang et al., 2017)、环冈瓦纳大陆早古生代岩浆作用(吴福元等, 2020)以及有表征冈瓦纳物源的 2500Ma 和 900Ma 的碎屑锆石年龄峰值(Zhu et al., 2013; Fan et al., 2015)为特征, 具明显的冈瓦纳亲缘性, 因此在

很大程度上表明, 古生代时期南羌塘和北羌塘是两个独立演化的构造块体(沈树忠等, 2024)。

2 晚石炭世—二叠纪地层格架

南羌塘地块的石炭—二叠系主要出露在龙木错—双湖缝合带南侧的羌塘中央变质带以及南羌塘地块中西部, 地层依次为擦蒙组、展金组、曲地组、吞龙共巴组、龙格组和吉普日阿组(图 1B; 梁定益等, 1983; Zhang et al., 2013; 张予杰等, 2021; 沈树忠等, 2024)。受冈瓦纳晚古生代冰期影响的地层大面积分布在南羌塘地块西部日土地区, 主要由杂砾岩、浊积岩、滑塌体、砂岩、页岩以及灰岩组成, 地层出露厚度超过 5 000 米, 各组特征简述如下。

擦蒙组为一套发育正粒序和毫米级纹层的粉砂岩或页岩, 间夹典型的透镜状或毯状含砾板岩或含砾粉砂岩等冰筏碎屑, 地层中未发现化石, 与上覆展金组连续沉积, 时代被置于晚石炭世—早二叠世早期(梁定益等, 1983)。

展金组在其命名剖面上以深色细粒的粉砂岩、页岩、砂岩、板岩为主, 亦含大量的杂砾岩(冰碛岩), 相对于擦蒙组, 其特点是地层中发育软沉积变形和滑塌构造, 并被同时期基性岩墙侵入(Zhai et al., 2013)。地层中发育冈瓦纳型 *Eurydesma* 双壳动物群、腕足类 *Martinia chamongensis*, *Anidanthus fusiformis* 以及单体珊瑚 *Cyathaxonia*, *Lophophyllidium*, 时代为早二叠世萨克马尔期(梁定益等, 1983; 刘本培和崔新省, 1983)。

在日土县多玛层型剖面上, 曲地组整合覆于展金组之上, 以三角洲环境的长石石英砂岩及含砾粗砂岩为主, 偶夹含粉砂岩或泥质岩薄层(梁定益等, 1983), 砂岩中发育早二叠世孢粉组合 *Leiotrilets-Cordaitina* (未刊资料), 其时代相当于早二叠世亚丁斯克早期(梁定益等, 1983; 聂泽同和宋志敏, 1983a)。本次研究区范围内, 曲地组在多玛乡南东的扎普村一带相变为陆棚相的粉砂岩、页岩。而在双湖地区, 与曲地组层位相当的可能是一套深水斜坡相或盆地相的碎屑流、浊流为代表的重力流沉积(陈耀飞等, 2016; 焦鹏伟等, 2017), 含有蠕类 *Pseudofusulina*, *Chalaroschwagerina* 等(Zhang et al., 2012)。

吞龙共巴组整合在曲地组之上, 在日土多玛一带, 分为两段: 下段以中粒钙质长石石英砂岩(或钙

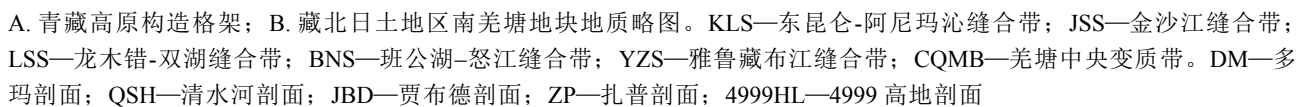


Fig. 1 The brief geological and tectonic map of the study area

gerina 等指示早二叠世亚丁斯克晚期(梁定益等, 1983; 聂泽同和宋志敏, 1983a); 上段底部为鲕粒生屑灰岩, 含丰富的蠕类、珊瑚及腕足类化石(梁定

益等, 1983), 其上为生屑泥晶灰岩, 普遍发育燧石结核或条带, 局部地区向上偶夹粉砂岩等细碎屑岩, 根据蠕类 *Monodiexodina*, 判定其时代相当于早二叠世空谷期(聂泽同和宋志敏, 1983b)。

龙格组整合在吞龙共巴组之上, 大面积分布得多玛—东汝乡以东地区, 以生屑灰岩、砂屑灰岩为主, 向东部过渡为藻灰岩、白云质灰岩、白云岩, 沉积厚度亦向东部增厚, 含丰富的蠕类、珊瑚、有孔虫、腹足、腕足、海百合茎化石, 其中蠕类 *Neoschwagerina-Yabeina* 和有孔虫类 *Shanita-Hemigordiopsis* 组合显示其时代为中二叠世罗德期至沃德期(沈树忠等, 2024)。

吉普日阿组主要出露在南羌塘地块西部多玛一带, 平行不整合覆于龙格组或吞龙共巴组之上(梁定益等, 1983), 以底部不整合面之上发育底砾岩为显著特征, 其砾石均来自下部的吞龙共巴组(张以春等, 2019), 上部主要是白云质灰岩。蠕类动物群 *Codonofusiella*, *Palaeofusulina* 显示其时代

属于晚二叠世吴家坪期至长兴期(吴瑞忠和蓝伯龙, 1990)。

3 沉积岩相与沉积环境分析

本次在藏北日土多玛晚石炭—早二叠世地层剖面(图 1B 中的多玛剖面, Zhang et al., 2023)的基础上, 新增加东汝乡清水河等 4 条剖面的相关认识, 将日土地区南羌塘晚石炭—早二叠世受冰川影响的大陆边缘沉积岩相划分为 4 类 16 种(表 1)。利用牟传龙关于相的分类建议(牟传龙, 2022), 根据岩相特征识别出浅海相和过渡相及陆棚、三角洲、潮坪、碳酸盐岩台地等若干次环境(表 2)。简述如下。

3.1 岩相描述及成因解释

3.1.1 杂砾岩相 (Dm)

杂砾岩相(Dm)表现为颗粒分选极差, 成分复杂, 通常由砾石、砂、粉砂级颗粒以及泥质基底组成, 通常以含有冰筏碎屑为标志。参考 Eyles et al.

表 1 研究区晚石炭—早二叠世地层岩相、代号、特征及成因解释
Table 1 The facies, codes, description, and origin of the Late Carboniferous–Early Permian strata in the study area

岩相及代号		特征	成因	层位
杂砾岩相 Dm	块状杂砾岩相 Dmm	泥、砂、砾等颗粒混杂堆积, 碎屑成分复杂, 基底支撑, 砾石表面常见擦痕、压坑等冰碛特征, 无沉积构造、颗粒排列无定向	冰盖、冰棚、冰筏等冰川成因	擦蒙组、展金组
	微层状杂砾岩相 Dms	砂、砾以及冰碛物混杂, 碎屑成分复杂, 层理化或弱层理化, 偶见粒序层	冰舌或冰筏碎屑被重力流改造	擦蒙组、展金组
砂岩相 S	块状砂岩相 Sm	细粒至中粒净砂岩或杂砂岩, 几无内部沉积构造	浊流或重力流沉积	擦蒙组、展金组、曲地组、吞龙共巴组
	粒序层理砂岩相 Sg	细粒至粗粒砂岩的净砂岩或杂砂岩, 具正粒序	悬浮沉降作用或浊流	展金组、曲地组
	软变形砂岩相 Sd	软变形的砂岩或粉砂岩, 具包卷层理、槽模、滑塌–滑移等层内或层面沉积构造	重力滑塌滑移、泄水作用	展金组、曲地组
	具冲刷构造砂岩相 Ss	中粒至粗粒砂或细砾, 发育低角度交错层理以及冲刷构造, 可见滞留泥砾层和生物扰动构造	波浪牵引作用, 水道流	曲地组、吞龙共巴组
	具板状交错层理砂岩相 Sp	中粒至粗粒砂或含细砾, 发育单向或双向板状交错层理, 底面平直或微冲刷, 可见生物扰动构造	波浪或潮汐牵引作用, 水道流	曲地组、吞龙共巴组
	具槽状交错层理砂岩相 Sr	中粒至粗粒砂或含砾, 发育槽状交错层理, 层间通常具冲刷面	辫状水道流	曲地组
	具小型波纹层理砂岩相 Sr	粉砂或细砂, 具小型波纹层理的净砂岩或杂砂岩, 通常层面发育小型浪成波痕	波浪或潮汐牵引流、底流或层间流	展金组、曲地组
	高成熟钙质砂岩相 Sc	中粒至粗粒砂, 极好的分选和磨圆, 石英颗粒含量高, 钙质胶结, 常见生物扰动构造	波浪或潮汐牵引作用, 沿岸流或强风暴潮, 再沉积作用	曲地组、吞龙共巴组, 展金组

续表 1
Continued table 1

岩相及代号		特征	成因	层位
细碎屑岩相 F	块状细碎屑岩相Fm	深色泥或细粉砂，数厘米至数米厚，几无内部沉积构造	悬浮沉降作用，洪积、浊流	擦蒙组、展金组、曲地组、吞龙共巴组
	具水平层理细碎屑岩Fl	深色泥或细粉砂，毫米或厘米级粒序层堆积，可见水平层理	悬浮沉降作用，浊流	擦蒙组、展金组、曲地组、吞龙共巴组
	含杂砾岩具水平层理的细碎屑岩相Fld	粉砂或泥质基底支撑，可见水平层理，冰筏碎屑零散分布，常见坠石构造	浊流、冰筏倾泄	展金组
	泥灰岩相marl	黑色极薄层状或透镜状，常见粉砂级陆源碎屑	化学沉淀-机械沉积作用	展金组、曲地组、吞龙共巴组
灰岩相 L	砂质灰岩相Ms	含砂级陆源碎屑的泥晶灰岩，局部见双壳类壳体碎片定向排列，呈长透镜状产出	化学-机械沉积作用，潮汐风暴，滞留沉积	吞龙共巴组
	粒泥灰岩相Mb	生屑泥晶灰岩，中-厚层状，含少量有孔虫、介壳、藻类生物碎屑	化学沉淀	吞龙共巴组
	颗粒灰岩相Gs	颗粒灰岩，亮晶胶结，含大量分选良好的有孔虫、苔藓虫等生物碎屑颗粒	机械筛洗作用	吞龙共巴组

表 2 研究区晚石炭世—早二叠世沉积环境划分
Table 2 Classification of sedimentary environments from the Late Carboniferous to Early Permian of the study area

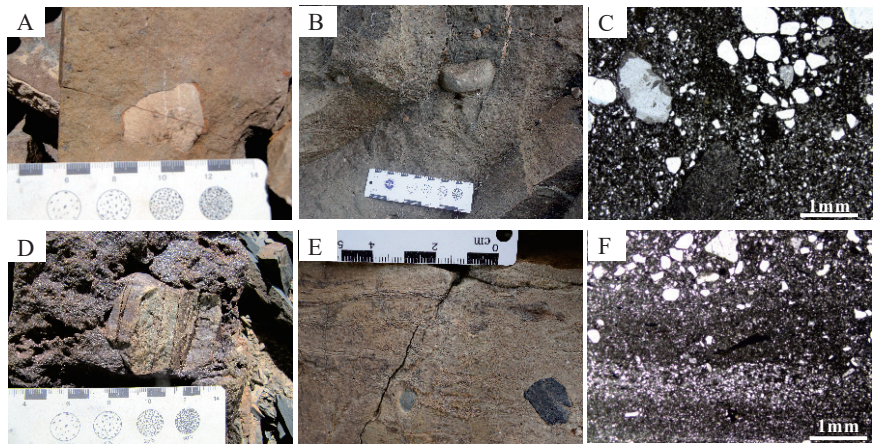
	沉积环境	亚环境	次环境	岩相组合
海洋环境	受冰川影响碎屑岩浅海	陆棚	浅水陆棚/深水陆棚	<i>Dmm, Dms, Sm, Fm, Fl</i>
		陆棚边缘	陆棚边缘盆地	<i>Dmm, Dms, Fm</i>
			陆棚边缘斜坡	<i>Dms, Sc, Sg, Sd, Sr, Fm, Fl, Fld, marl</i>
	正常碎屑岩浅海	陆棚边缘	陆棚边缘盆地	<i>Sm, Fm, marl</i>
	正常碳酸盐岩浅海	碳酸盐岩台地	局限台地	<i>Mb, Ms</i>
			台地边缘	<i>Gs, Ms</i>
开阔台地			<i>Mb</i>	
过渡环境	三角洲	前三角洲	远滨	<i>Sd, Sg, Ss, Sr, Sm, Fl</i>
		三角洲前缘	水下分流河道	<i>Ss, St, Sr</i>
			水下天然堤	<i>Sm, Fm, Fl, marl</i>
			远砂坝	<i>Sp, Sm</i>
		三角洲平原	分流河道	<i>Sp, St, Ss</i>
	分流间洼地		<i>Sr, Sm, Fm, Fl</i>	
	河口湾	潮坪	潮间带	<i>Sp, Sc, Ss, Sm, Fm, Fl</i>
			潮下带	<i>Sm, Sc, Fm, Fl, Ms, marl</i>
	海岸	障壁海岸	障壁岛	<i>Mb, Gs</i>
潟湖			<i>Mb, Fm</i>	
潮坪			<i>Sm, Sp, Sr, Fl, Ms</i>	

(1983) 可进一步识别出块状杂砾岩相(Dmm, 图 2A-C)与微层状杂砾岩相(Dms, 图 2D-F)。二者的区别在于,前者几无内部构造,呈透镜状、指状或毯状产出,其形成与处于融化状态下的海冰倾泄大量冰碛物以及细颗粒的悬浮沉降有关(Eyles C H and Eyles N, 2010)。相对而言,后者受到重力作用或底流改造,可具层理构造,反映冰筏碎屑在一定坡

度下的再搬运沉积过程(Eyles et al., 1985; Eyles, 1993)

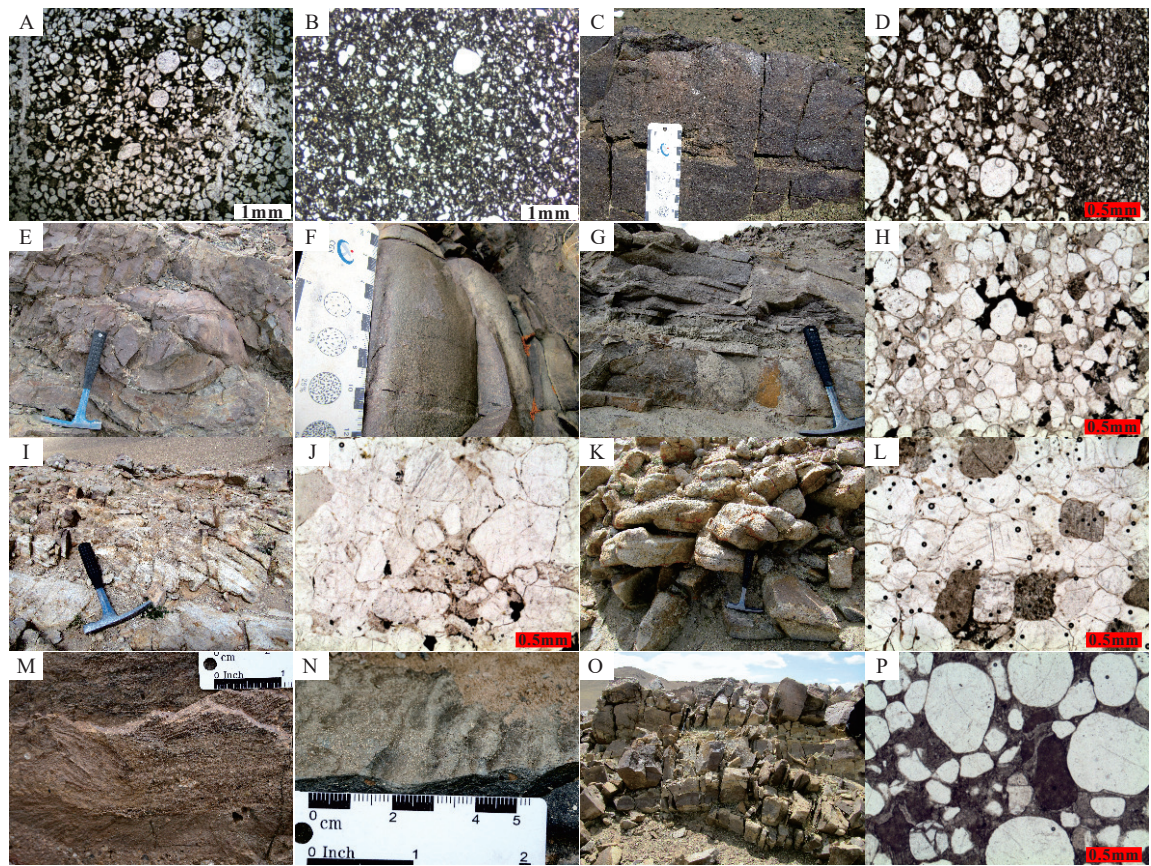
3.1.2 砂岩相 (S)

砂岩相(S)是研究区分布最广的岩相单元,在晚石炭—早二叠世沉积地层中均有发育。在擦蒙组—展金组中,多以块状、正粒序和软沉积变形等重力流沉积为特征。在曲地组—吞龙共巴组中,多



A. 块状杂砾岩相 (Dmm) (擦蒙组) ; B-C. 块状杂砾岩相 (Dmm) (展金组) ; D-F. 微层状杂砾岩相 (Dms) (展金组)

图 2 杂砾岩相 (Dm)
Fig. 2 Diamictite facies (Dm)



A. 块状砂岩相 (Sm) (展金组) ; B. 块状砂岩相 (Sm) (曲地组) ; C. 正粒序层理砂岩相 (Sg) (曲地组底部) ; D. 正粒序层理砂岩相 (Sg) (展金组) ; E. 软变形层理砂岩相 (Sd) (展金组) ; F. 软变形层理砂岩相 (Sd) (曲地组底部) ; G-H. 具冲刷构造砂岩相 (Ss) (曲地组下部) ; I-J. 板状交错层理砂岩相 (Sp) (曲地组下部) ; K-L. 槽状交错层理砂岩相 (St) (曲地组下部) ; M-N. 具小型波纹层理砂岩相 (Sr) (展金组) ; O. 钙质砂岩相 (Sc), 发育潮汐层理 (吞龙共巴组下段) ; P. 钙质砂岩相 (Sc) (展金组)

图 3 砂岩相 (S)
Fig. 3 Sandstone facies (S)

见冲刷侵蚀构造、板状交错层理、槽状交错层理等牵引流成因的沉积构造。

块状砂岩相(*Sm*, 图 3A-B), 通常由细粒至中粒砂岩组成, 层理不发育, 呈块状构造, 颗粒多呈棱角状至次棱角状。该岩相可形成于多种环境, 在与发育水平层理的粉砂岩或页岩伴生时, 可能指示低水位阶段的深水环境的浊流或重力流成因 (Shanmugam, 2002)。

粒序层理砂岩相(*Sg*, 图 3C-D), 多表现为向上粒度变细的砂岩, 粒径变化范围大, 厚度通常小于 0.5 m, 单层底部常出现页岩、石英岩或砂岩岩屑, 可能是悬浮沉降作用叠加底流改造而成 (Shanmugam, 2002)。

软沉积变形层理砂岩相(*Sd*, 图 3E-F), 以块状砂岩、正粒序砂岩或粉砂岩中发育包卷层理等软沉积变形层理为特征, 结合展金组上部发育大型沉积滑塌构造, 指示其成因为陆棚边缘斜坡或前三三角洲等高起伏地形环境中的水下沉积物重力流作用 (Postma, 1986)。

具冲刷构造砂岩相(*Ss*, 图 3G-H), 通常为中粒至粗粒岩屑石英砂岩或含砾砂岩, 发育低角度楔状交错层理, 单层厚度从数十厘米至几米不等。单个层理多呈块状, 底面多发育冲刷面构造和滞留砾石。粗颗粒沉积物和低角度楔状交错层理指示略微向海倾斜的三角洲前缘环境, 为主要受渠道流或潮汐流控制的水下分流河道或水下天然堤、远砂坝等次相 (Postma, 1990; Bhattacharya, 2010; 牟传龙, 2022)。

板状交错层理砂岩相(*Sp*, 图 3I-J), 为粗粒长石石英砂岩或含砾粗砂岩, 颗粒成熟度高, 石英颗粒含量超过 90%。板状交错层理具有尖锐平直的顶底面, 单个层理厚度超过 1 m, 横向延伸超过 20 m。高成熟度和板状交错层理的发育指示在高水位阶段的三角洲前缘远砂坝或前滨环境 (Posamentier and Vail, 1988; Bhattacharya, 2010)。

槽状交错层理砂岩相(*St*, 图 3K-L), 表现为粗粒岩屑石英砂岩、含砾粗砂岩或砾质粗砂岩, 主要由石英和含量超过 5% 的岩屑组成。前积层厚度通常为数十厘米。发育典型的相互交切并具侵蚀面的交错层理, 结合砾质粗砂岩的发育, 指示了在高水位阶段末期三角洲平原上的分流河道环境 (Posamentier and Vail, 1988; 牟传龙, 2022)。

具小型波纹层理砂岩相(*Sr*, 图 3M-N), 表现为

粗粉砂—中细砂, 具小型波纹层理的净砂岩或杂砂岩, 层面常见小型浪成波痕, 通常为波浪或潮汐等牵引流作用所形成。在展金组中与冰筏碎屑和具水平层理细碎屑岩伴生, 表明杂砂岩或杂砾岩堆积后又受到内波内潮汐等底流或层间流改造 (Shanmugam, 2002)。

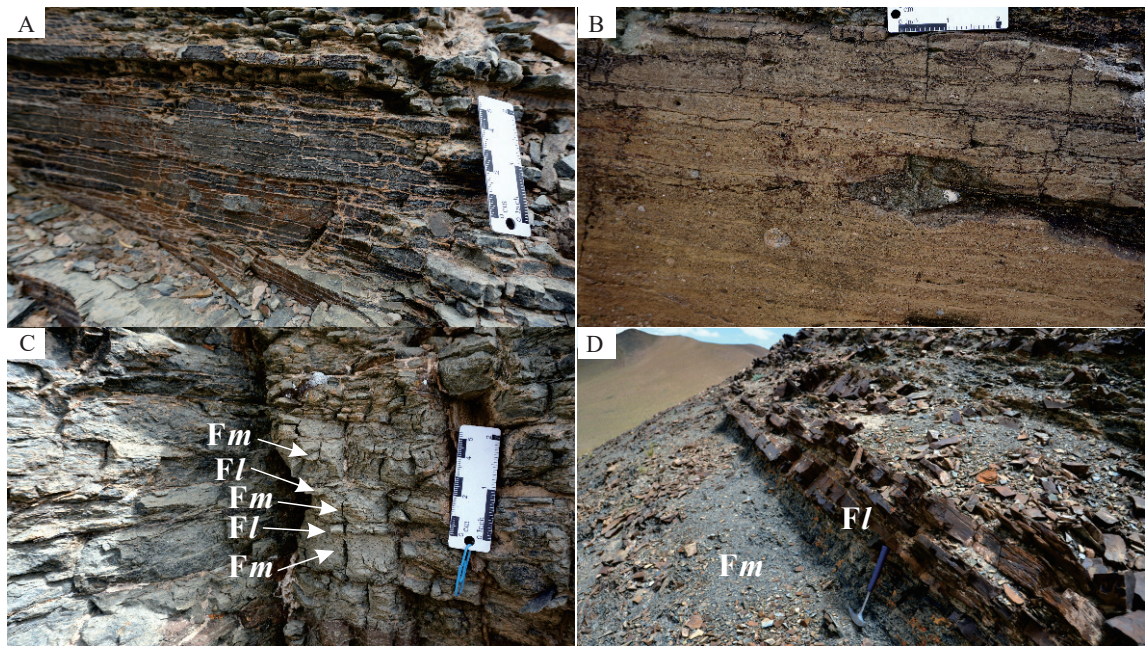
钙质砂岩相(*Sc*, 图 3O-P), 颗粒主要为中粒、浑圆状石英颗粒, 钙质胶结, 结构和组分成熟度高, 可见高含量生物碎屑(主要为苔藓虫和棘皮类)。曲地组钙质砂岩中发育典型的人字形双向交错层理, 指示了由潮汐流控制的复合砂丘 (Van Wagoner et al., 1990; Dalrymple, 2010)。在展金组深水环境中出现的钙质砂岩相, 呈枝状、透镜状分布, 含相当数量无序排列的腕足壳体碎片以及苔藓虫化石, 与围岩凹凸接触, 呈现出潮道沉积物的特征, 可能经历了潮汐风暴或海啸等强牵引流作用的再次搬运或改造 (Zhang et al., 2023)。

3.1.3 细碎屑岩相 (F)

细碎屑岩相包括块状或薄层状的粉砂岩或页岩 (图 4)。块状细碎屑岩相(*Fm*, 图 4C-D) 沉积厚度一般在数厘米至数米不等, 不发育层理构造。水平层理细碎屑岩相(*Fl*, 图 4A) 通常由毫米至厘米级的粉砂或泥质层堆积而成, 累积厚度通常为数米。该岩相在多个层位发育, 大多数被当成在深水环境中的悬浮沉积或浊流体系 (Allen P A and Allen J R, 2013), 但也常出现在潮坪环境中 (Dalrymple, 2010), 需要结合其伴生的岩相成因综合分析。另外一种细碎屑岩含冰筏碎屑具水平层理的页岩或细粉砂岩(*Fld*, 图 4B), 为泥岩或细粉砂岩背景下, 在一定水深条件下, 零星的冰筏碎屑倾泄就位所形成 (Eyles C H et al., 1985; Eyles N, 1993)。

3.1.4 灰岩相 (L)

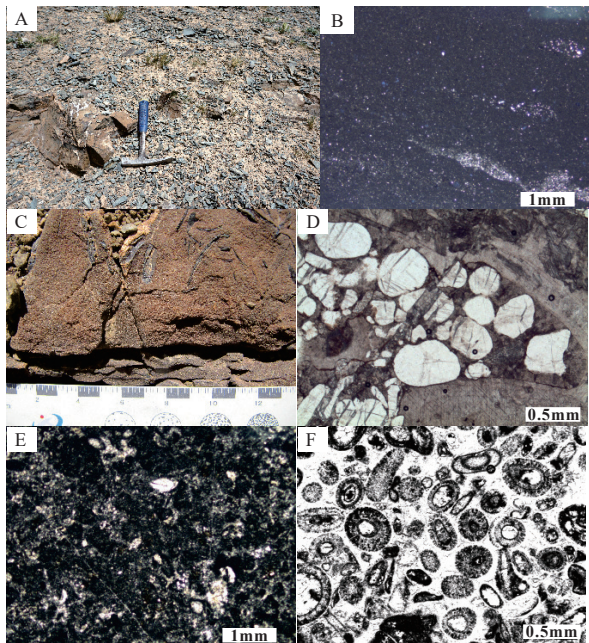
包括泥灰岩相(*marl*)、砂质灰岩相(*Ms*)、粒泥灰岩相(*Mb*)和颗粒灰岩相(*Gs*, 图 5)。泥灰岩相(*marl*, 图 5A-B)呈透镜状或薄层状产出, 常含 10% 左右的粉砂级陆源碎屑, 其成因一般可归结为富含碳酸钙水体被下沉的陆源碎屑稀释过程中的化学沉淀和机械沉积混合作用。砂质灰岩相(*Ls*, 图 5C-D)多呈薄层或长透镜状产出, 与周围粉砂岩的产出比例大于 1 : 5, 灰岩含大量陆源石英颗粒, 单层厚度不足 0.5 m。岩层中含有大量不规则排列的双壳类或腕足类碎片, 表明了其再搬运的特点。这些岩性和沉积特点说明砂质灰岩相受强潮汐流作用



A. 水平层理细碎屑岩相 (Fl) (展金组); B. 含冰筏碎屑具水平层理细碎屑岩相 (Fld) (展金组); C. 块状细碎屑岩相 (Fm) 与水平层理细碎屑岩相 (Fl) 构成沉积韵律 (展金组); D. 块状细碎屑岩相 (Fm) 与水平层理细碎屑岩相 (Fl) 构成岩相组合 (吞龙共巴组底部)

图 4 细碎屑岩相 (F)

Fig. 4 Fine-grained facies (F)



A-B. 泥灰岩相 (marl) (展金组顶部); C-D 砂质灰岩相 (Ls), 含有大量不规则排列的壳体碎片 (吞龙共巴组下部); E. 粒泥灰岩相 (Mb) (吞龙共巴组下部); F. 颗粒灰岩相 (Gs) (吞龙共巴组上部)

图 5 灰岩相 (L)

Fig. 5 Limestone facies (L)

控制, 为沉积在潮间带或潮下带的潮汐韵律岩。粒泥灰岩相 (Mb, 图 5E) 与 Dunham 碳酸盐岩分类中的 wackstone 类似, 含约 10% 的生物碎屑, 以有孔虫、介形石、藻类等为主, 由于重结晶作用, 颗粒边界模糊不清。颗粒灰岩相 (Gs, 图 5F) 具有典型的亮晶方解石胶结特征, 颗粒中含有大量有孔虫化石 (含量超过 50%), 指示了一个温暖的台地边缘浅滩筛洗环境 (Wilson, 1975; Sarg, 1988)。

3.2 沉积环境

根据岩相及其组合, 研究区晚石炭世—早二叠世沉积环境主要为海相环境和过渡环境两大类 (表 2)。

3.2.1 海相环境

海相环境主要为受冰川影响碎屑岩浅海、正常碎屑岩浅海和正常碳酸盐岩浅海等 3 种类型。

受晚古生代冈瓦纳冰期及冰川消融影响, 研究区以发育冰海杂砾岩的陆棚环境为主要特征 (以多玛剖面的擦蒙组—展金组为代表), 从沉积的时间顺序上可进一步划分为陆棚和陆棚边缘等亚环境。陆棚环境主要以晚石炭世—早二叠世早期沉积的擦蒙组为代表, 由冰棚、冰舌和冰筏等沉积组成浅

水或深水陆棚,为处在盛冰期阶段的远端冰海相环境(Eyles C H et al., 1985; Eyles N, 1993; Eyles C H and Eyles N, 2010)。受冰川影响的陆棚边缘环境以早二叠世萨克马尔期展金组沉积为主要代表。其中,陆棚边缘盆地由 *Dmm*, *Dms*, *Fm* 等韵律性沉积组成;而陆棚边缘斜坡组成岩相极为多样,由 *Dms*, *Sc*, *Sg*, *Sd*, *Sr*, *Fm*, *Fl*, *Fld*, *marl*, *Mb* 等岩相组成,主要在冰筏碎屑倾泄的背景下,叠加重力滑移滑塌、底流或层流改造以及强牵引流等事件沉积,反映出在水体加深过程中,盆地沉积作用的多样性增加(Zhang et al., 2023)。

正常碎屑岩浅海环境主要是以研究区贾布德剖面 and 扎普剖面上的曲地组为代表,与同期西北侧多玛剖面 and 清水河剖面^①的曲地组为沉积相变关系,在早二叠世亚丁斯克早期表现为陆棚边缘盆地的沉积特点,以 *Sm*, *Fm*, *marl* 等需要一定水深的岩相组合为特征。

正常的碳酸盐岩浅海主要发育在以吞龙共巴组上段为代表的早二叠世末的空谷期,以研究区东南侧的扎普剖面 and 4999 高地剖面^②为代表,主要为生物碎屑灰岩相(*Mb*)和亮晶颗粒灰岩相(*Gs*)组成,受陆源碎屑影响小,丰富的有孔虫颗粒和亮晶方解石指示其为台地边缘浅滩,形成了由气候条件主控下的碳酸盐岩台地沉积环境(Wilson, 1975; Sarg, 1988)。

3.2.2 过渡环境

伴随晚古生代冈瓦纳大冰期消退,冰海杂砾岩不再成为本区的主要岩相类型,取而代之的是以三角洲、河口湾以及海岸环境的硅质碎屑岩为主体、向上碳酸盐岩逐渐增多的岩相组合。

三角洲环境表现为整体向上变粗的硅质碎屑岩,以多玛剖面 and 清水剖面的曲地组为代表,可识别出较完整的前三角洲、三角洲前缘和三角洲平原等亚环境。其中,前三角洲的岩相组合为 *Sd*, *Sg*, *Ss*, *Sr*, *Sm*, *Fl*, 反映以重力流、悬浮沉积等作用为主的远滨环境。在三角洲前缘中,可进一步识别出以 *Ss*, *St*, *Sr* 组合为主的水下分流河道、以 *Sm*, *Fm*, *Fl*, *marl* 组合为特征的水下天然堤以及以 *Sp*, *Sm* 组合为主的远砂坝等次环境,反映出以渠道化的牵引流和波浪等面状流体为主的沉积作用(Postma, 1990; Bhattacharya, 2010)。在三角洲平原中,可识别出以 *Sp*, *St*, *Ss* 等组合为主的分流河道、以 *Sr*, *Sm*, *Fm*, *Fl* 等组合为主的分流间洼地等次环境,反

映出以水道化的牵引流为主的沉积作用(Miall, 1977)。

河口湾环境主要发育在多玛剖面、清水河剖面以及 4999 高地的吞龙共巴组下段,受波浪-潮流沉积作用控制,由 *Sp*, *Sc*, *Ss*, *Sm*, *Fm*, *Fl* 等岩相组合反映的潮间带和 *Sm*, *Sc*, *Fm*, *Fl*, *Ms*, *marl* 等反映的潮下带组成。最底部的薄层深色细碎屑岩相组合直接沉积于曲地组最顶部的槽状交错层理砂岩相(*St*)之上,可能指示在低沉积物供应速率条件下的缓慢海侵(Catuneanu, 2006)。

障壁海岸环境见于清水河剖面吞龙共巴组上段沉积物中, *Sm*, *Sp*, *Sr*, *Fl*, *Ms*, *Mb*, *Gs* 等岩相或其组合可识别为一套障壁岛-潟湖-潮坪的海岸复合体系。该剖面上,垂向沉积建造反映出障壁岛-碳酸盐岩台地或潟湖环境等明显受到陆源碎屑供给程度的影响,或建设,或被破坏。

4 沉积充填序列与沉积作用过程

研究区晚石炭—早二叠世沉积序列总体呈现出三阶段的盆地充填过程。第一阶段,以晚石炭世至早二叠世萨克马尔期受冈瓦纳冰川作用影响的陆缘沉积为代表,充填了以擦蒙组沉积为主的海相加积序列 I 和以展金组为代表的海侵退积序列 II;第二阶段,在早二叠世亚丁斯克早期冈瓦纳冰川消融背景下,陆源碎屑供给量增大,在向陆的北东侧形成三角洲相的海退进积序列 III-1,在向海的南东侧形成海相加积序列 III-2;第三阶段,总体表现为新一轮的海侵,由吞龙共巴组下段碎屑岩夹碳酸盐岩所代表的早二叠世亚丁斯克晚期海侵加积-退积沉积序列 IV 和由吞龙共巴组上段所代表的早二叠世空谷期缓慢加积序列 V 组成,后者又表现为陆侧碳酸盐岩夹碎屑岩的沉积序列 V-1 以及向海一侧的碳酸盐岩沉积序列 V-2。每个沉积序列的特点和主要沉积作用分述如下。

4.1 沉积序列 I

由擦蒙组沉积构成,岩相组合端元主要为 *Dmm*, *Dms*, *Sm*, *Fm*, *Fl*, 块状杂砾岩呈透镜状,其下部砾径大,向上变小,呈正粒序特点,杂砾岩间可见冲刷构造,细碎屑岩相与杂砾岩相层间接触面平直,呈韵律性沉积。块状杂砾岩相指示以细颗粒悬浮沉积作用及粗颗粒冰筏碎屑倾泄作用为主导,微层状杂砾岩相可能是杂砾岩在起伏基底面上经碎屑重力流改造的再沉积作用所形成(Eyles et al.,

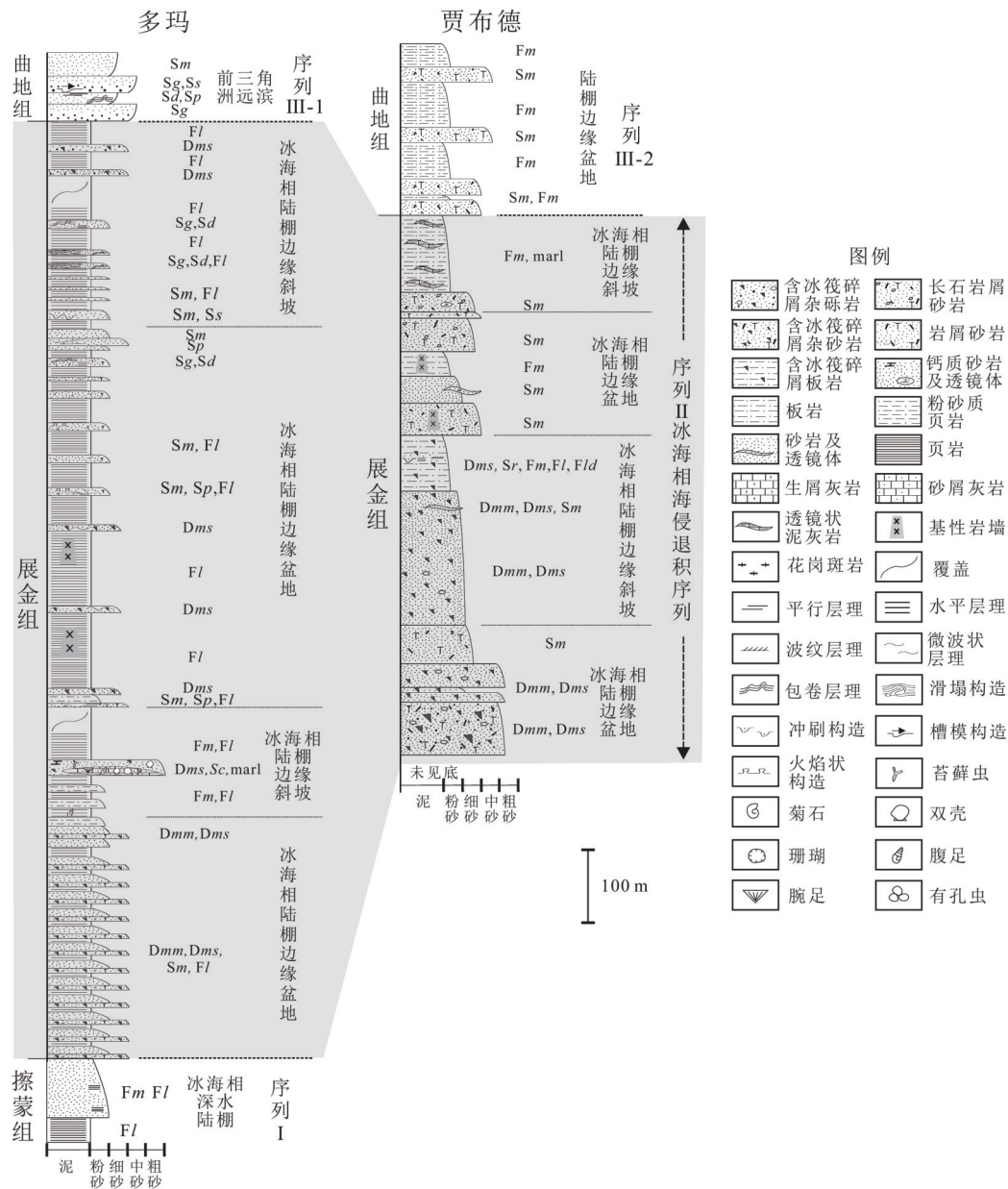


图8 研究区早二叠世萨克马尔期冰海相退积序列(II), 指示主要由重力流沉积作用控制下的海侵事件

Fig. 8 The glaciomarine retrogradational sequence (Succession II) during the Sakmarian ice age in the study area, indicating the transgression events predominated by sediment gravity flow process

2010)。中部的具冲刷构造砂岩相(Ss)和板状交错层理砂岩相(Sp), 因其发育低角度的楔状交错层理、小型冲刷面及滞留砾石, 反映波浪-潮汐等牵引流作用, 砂岩中还发育淡水孢粉化石(*Leiotriletes-Cordaitina* 组合, 作者未发表数据), 指示了三角洲前缘水下分流水道及远砂坝环境(Postma, 1990; Bhattacharya, 2010)。多玛剖面最上部的槽状交错层理砂岩相(St)和板状交错层理砂岩相(Sp), 反映水道牵引流作用, 指示三角洲平原上的分流河道环境(Miall,

1977)。该序列中反映的沉积作用由早期的沉积物重力流作用, 转向中期的波浪-潮汐等滨-浅海沉积过程, 再至晚期的辫状水道牵引流作用, 明显指示了一个海退过程中的沉积物进积序列, 在沉积环境上表现为一个完整的三角洲相沉积建造过程。

在贾布德和扎普剖面上, 整合在展金组之上的曲地组是一套以块状砂岩相和细碎屑岩相韵律性互层为主的海相加积序列(沉积序列III-2, 图10), 对比北西方向上的清水河剖面及多玛剖面的同期

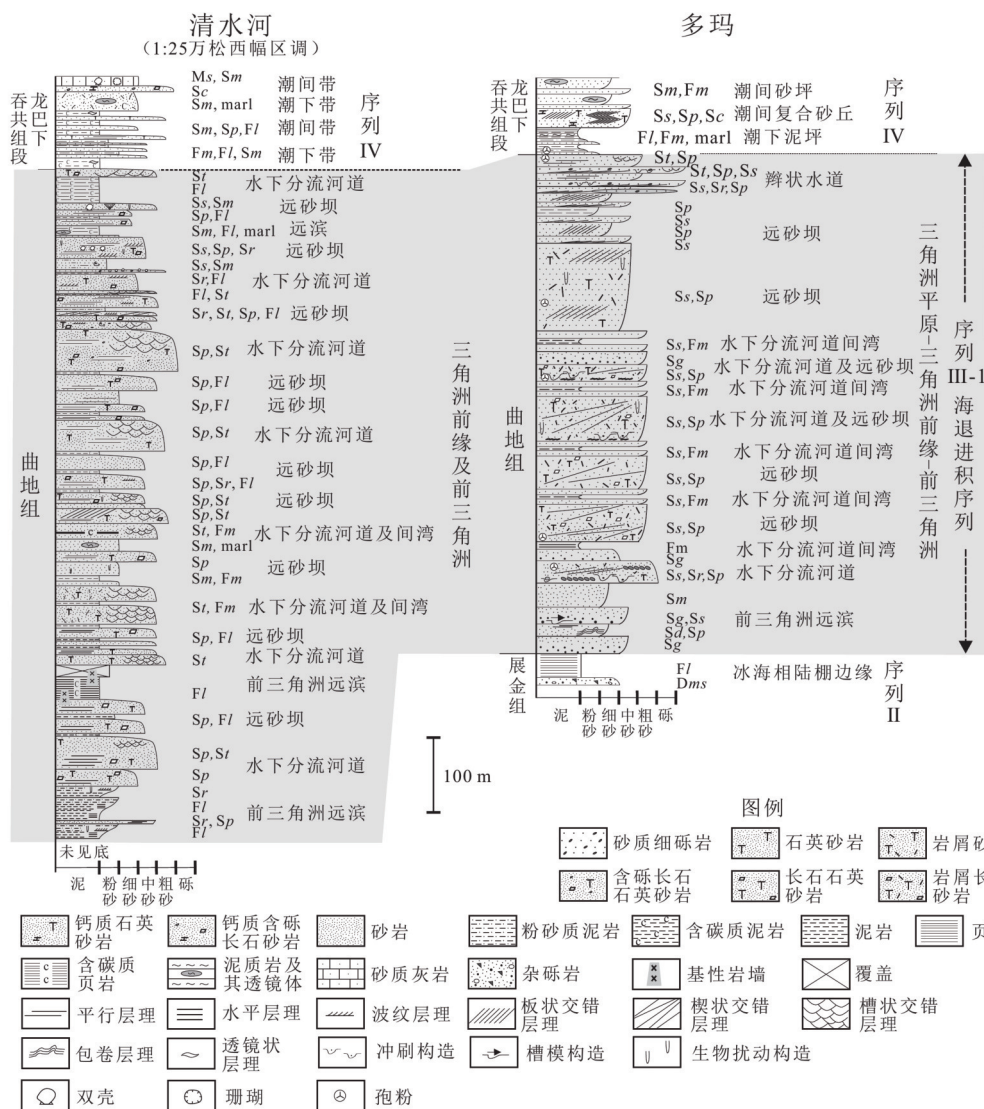


图9 研究区早二叠世亚丁斯克早期海退进序列 (III-1), 指示一个完整的三角洲相沉积建造过程

Fig. 9 The regressive progradational sequence (Succession III-1) during the early Artinskian age in the study area, indicating the construction process of delta settings

建造,说明研究区早二叠世亚丁斯克早期开始出现沉积相变,该现象暗示控制该时期盆地沉积的构造格局在北西—南东方向上具有一定差异性。

4.4 沉积序列IV

该序列由清水河、多玛以及4999高地剖面的吞龙共巴组下段所代表,主要由钙质砂岩相(*Sc*)、块状细碎屑岩相(*Fm*)、层状细碎屑岩相(*Fl*)以及砂质灰岩相(*Ms*)和泥灰岩相(*marl*)组成,指示河口湾体系下的潮坪环境(图11,沉积序列IV)。最底部的薄层深色细碎屑岩相组合(*Sm*, *Fl*, *marl*)直接沉积于序列III-1顶部的槽状交错层理砂岩相(*St*)

之上,可能指示在低沉积物供应速率条件下的缓慢海侵(Catuneanu, 2006)。中部的钙质砂岩相(*Sc*),发育双向“人字形”交错层理和孢粉化石,是潮间带复合砂丘的典型特点(图12A),主要反映波浪—潮汐流的沉积作用过程(Van Wagoner et al., 1990; Dalrymple, 2010)。而上部的块状砂岩相(*Sm*)、块状细碎屑岩相(*Fm*)和透镜状砂质灰岩相(*Ms*)呈韵律状产出,其比例为 $Sm : Fm \approx 1 : 3$, $Fm : Ms \approx 1 : 1$ (图12B),是比较典型的潮下环境的潮汐韵律岩,说明潮汐流是主要的沉积控制因素(Dalrymple, 2010)。与沉积序列III-1 相较,沉积序列IV在垂向

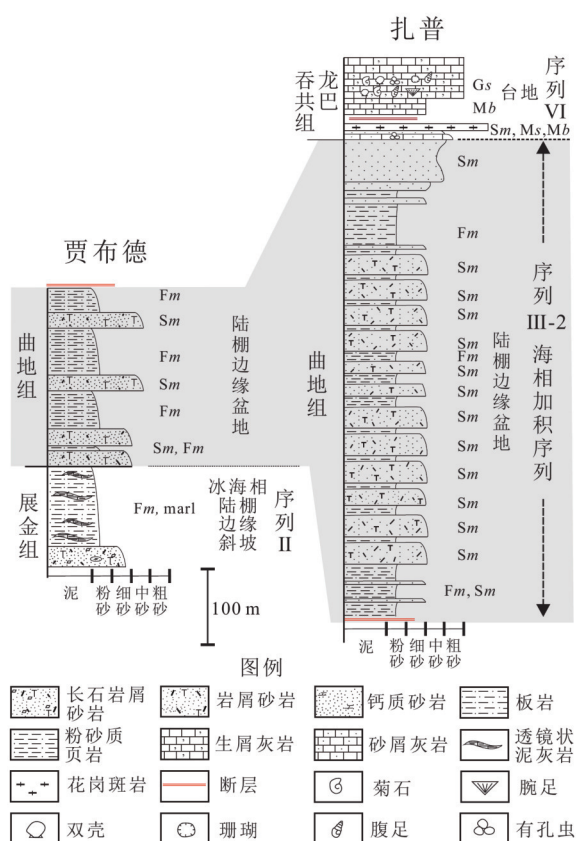


图 10 研究区早二叠世亚丁斯克早期海相加积序列 (III-2)

Fig. 10 The aggradational sequence (Succession III-2) during the early Artinskian age in the study area

上表现为加积-退积的层序特点, 研究区盆地沉积呈现出河控三角洲转换到由潮汐流控制的河口湾的特点, 碳酸盐岩含量向上增多, 同时双壳、珊瑚化石向上也频繁出现, 海洋影响因素大幅增加, 指示了亚丁斯克晚期新一轮的海侵事件。

4.5 沉积序列 V

该序列由清水河、多玛以及 4999 高地剖面的吞龙共巴组上段所代表, 可进一步划分障壁海岸沉积序列 V-1 和主要为碳酸盐岩台地的沉积序列 V-2 (图 11, 沉积序列 V)。前者(沉积序列 V-1)出现在清水河和多玛剖面, 由 Sm, Sp, Sr, Fl, Ms, Mb, Gs 等岩相组成, 垂向剖面上表现为碳酸盐岩夹硅质碎屑的旋回沉积特点, 指示障壁-潟湖-潮坪等环境成因类型; 后者(沉积序列 V-2)出现在扎普和 4999 高地剖面, 以 Mb, Gs 等不含或仅含极少量陆源碎屑的碳酸盐岩岩相为主, 表现出局限台地、台地边缘等环境特点。早二叠世空谷期, 这两类沉积序列也为相变特征, 沉积序列 V-1 受到陆源碎屑输入的

影响, 更靠近岸线, 因此障壁-潟湖体系呈现出反复加积-进积等变化规律, 而沉积序列 V-2 可能位于障壁-潟湖体系外侧, 在温暖气候环境下, 形成碳酸盐岩台地的加积序列 (Wilson, 1975)。

5 讨论

从目前的研究来看, 南羌塘地块石炭—二叠纪地层可能存在 3 种类型, 一种以日土地区“多玛型”为代表, 另一种是以“双湖型”为代表, 第三种是以分布在羌塘中央变质带的变质变形的石炭—二叠系为代表 (Ju et al., 2022)。“双湖型”的特点是在早二叠世冰海相地层之上发育含鲕灰岩与玄武岩互层的鲁谷组 (Yuan et al., 2022), 其同样出露在羌塘中央变质带内 (Zhang et al., 2012)。根据作者在多玛地区的观察, 在“多玛型”层序和“双湖型”层序之间, 还存在另外一层序类型, 其主要特点是在冰海相地层之上为碎屑岩、灰岩夹少量火山岩夹层, 海相特征明显, 不发育“多玛型”的三角洲相建造, 是代表海岸线附近沉积建造的“多玛型”层序和代表深水环境的“双湖型”层序之间的过渡类型, 本文称为“扎普型”。研究区内, 无论是“多玛型”还是“扎普型”, 其沉积充填序列所反映出的沉积可容空间变化以及盆地沉积主控因素都与冈瓦纳北缘晚古生代构造格局、构造活动阶段以及气候因素密切相关, 是晚古生代冈瓦纳最北缘裂解事件的直接响应。

5.1 沉积序列与沉积可容空间变化

影响盆地层序结构最重要的控制因素是沉积可容空间的生成和沉积物供应变化, 沉积可容空间的生成与海平面升降和盆地边缘沉降速率相关, 可由沉积物供应变化来反映, 是构造和气候变化的直接反映 (Allen P A and Allen J R, 2013; Miall, 2022)。尤其就海相硅质碎屑岩沉积序列而言, 无论是浅水还是深水环境, 沉积物供应均可以分为过度充填 (sediment-overfilled)、平衡充填 (sediment-balanced)、欠充填 (sediment-underfilled)、饥饿 (sediment-starved) 等类型, 这些不同类型反映了沉积可容空间被消耗的程度以及构造作用发展阶段 (Ravnås and Steel, 1998; Martins-Neto and Catuneanu, 2010)。研究区晚石炭—早二叠世沉积充填序列中, 序列 I、序列 II 和序列 III 是典型的硅质碎屑岩序列, 分别反映沉积可容空间平衡充填、欠充填以及平衡充填—过度充填阶段; 硅质碎屑岩夹少量碳酸盐岩的沉积序

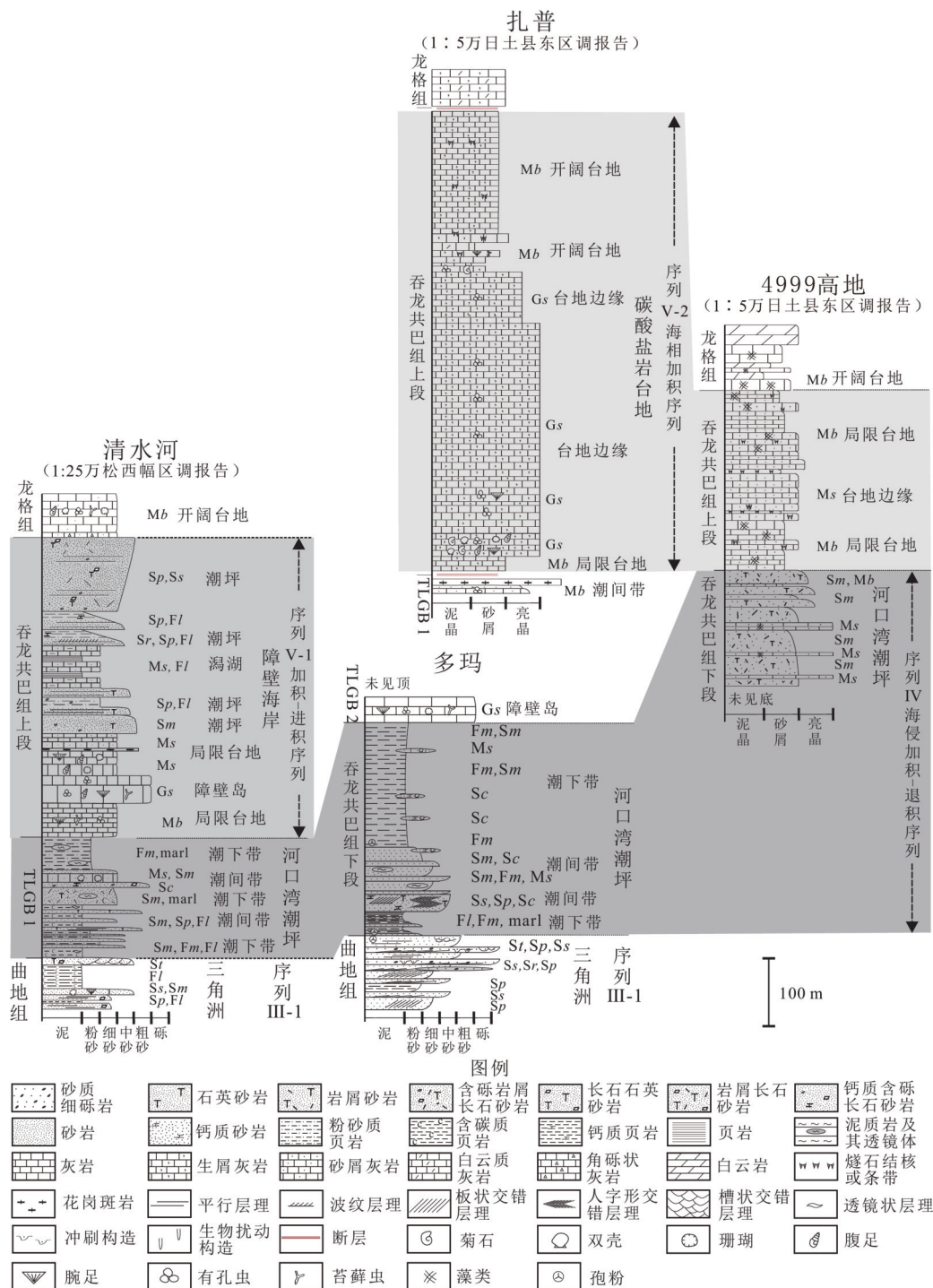


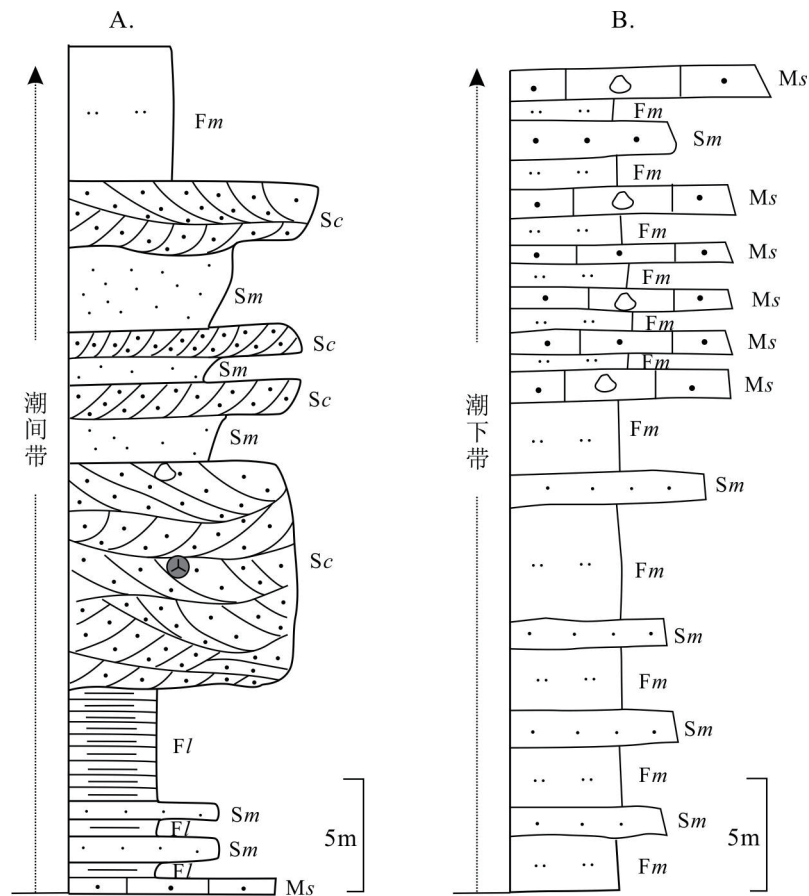
图 11 研究区吞龙共巴组所反映的沉积序列 IV 与沉积序列 V, 指示亚丁斯克晚期开始的新一轮海侵

Fig. 11 The Succession IV and V, reflected in the Tunlonggongba Formation in the study area, indicating the onset of a new transgression in the late Artinskian age

列 IV 反映沉积可容空间的饥饿—欠充填阶段; 碳酸盐岩夹硅质碎屑岩的沉积序列 V-1 及碳酸盐岩沉积序列 V-2 则反映沉积可容空间的平衡充填—过

度充填阶段(图 13)。

在晚石炭世末至早二叠世阿舍尔期, 冰期环境中寒冷气候和低风化速率条件造成的低沉积物供



A. Sm, Sc, Fm 构成岩相组合指示潮间带环境; B. 岩相 Sm, Fm, Ms 构成的韵律岩指示潮下带环境

图 12 沉积序列Ⅳ由钙质砂岩相 (Sc)、块状细碎屑岩相 (Fm)、层状细碎屑岩相 (Fl) 以及砂质灰岩相 (Ms) 构成

Fig. 12 The Succession Ⅳ is comprised of carbonaceous sandstone facies (Sc), massive fine-grained facies (Fm), laminated fine-grained facies (Fl), and sandy limestone facies (Ms)

应速率(Zhang et al., 2013; Hou et al., 2021), 导致海岸线后退, 新的沉积可容空间生成, 在盆地沉积厚度巨大的深水页岩, 但大量杂砾岩的出现说明盆地基底沉降形成的沉积空间被冰筏碎屑沉积平衡补偿, 可以解释以细碎屑岩相和块状杂砾岩为优势相的擦蒙组冰海相加积序列(序列Ⅰ)的形成过程(Allen P A and Allen J R, 2013; Eyles C H and Eyles N, 2010)。

进入早二叠世萨克马尔期(展金组沉积期), 盆地沉积充填物仍以深水细碎屑岩相为主, 间夹再搬运的冰碛岩、冰筏碎屑以及大型滑塌岩块为显著特征, 同时还出现了碳酸盐补偿深度附近泥灰岩透镜体。一方面表明, 新的沉积可容空间持续生成, 盆地保持海侵过程中的退积序列; 另一方面表明, 沉积作用从由重力悬浮为主, 转向由盆地基底地形控制的滑塌-滑移沉积等碎屑重力流作用为主导,

甚至出现海啸等强牵引流作用控制下的深水水道沉积物, 指示此时海底地貌可能由平原向海底高地、水道、斜坡等起伏地貌进行分化(Eyles, 1993)。联系到同时期基性岩墙群大规模侵入(Zhai et al., 2013; Wang et al., 2019), 沉积作用的显著变化可能是萨克马尔期活跃构造环境的表现之一。该阶段, 相对海平面持续上升, 表明沉积可容空间生成速率大于沉积物供应速率, 盆地基底快速沉降, 沉积序列Ⅱ处于沉积物欠充填阶段。

从早二叠世亚丁斯克早期开始, 在大陆边缘不同沉积部位, 盆地沉积充填物表现出不同的样式。在海岸线向陆一侧, 沉积序列Ⅲ-1 由底部发育正粒序及软变形层理的岩屑砂岩, 迅速过渡为中部具低角度板状交错层理的中粗粒长石石英砂岩, 直至顶部为发育槽状交错层理、冲刷构造的含砾砂岩等粗碎屑沉积物的演化, 这清楚地指示了一个由前三

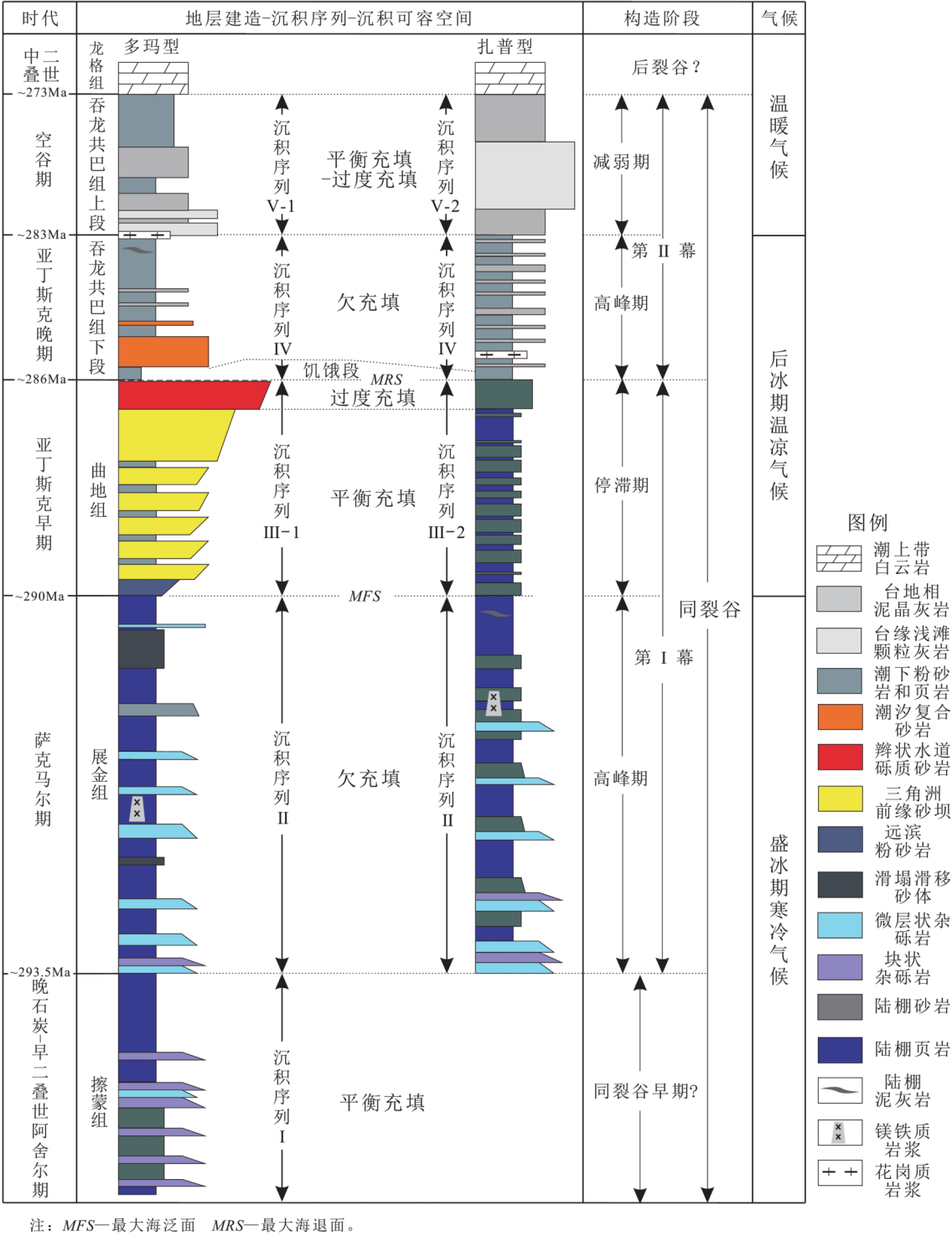


图 13 研究区南羌塘地块晚石炭—早二叠世盆地沉积序列、沉积可容空间变化与构造、气候演化阶段

Fig. 13 Changes in sedimentary successions and sediment accommodation, along with the evolution stages of tectonic and climate, from the Late Carboniferous to Kungurian age in the SQB of the study area

角洲、三角洲前缘至三角洲平原组成的三角洲相快速建造过程(Bhattacharya, 2010)。主控沉积作用由沉积重力流转化为波浪—潮汐流—水道流等牵引流作用。该阶段反映正常海退—强制海退过程,海岸线迅速向盆地方向迁移,盆地保存一套完整的向上粗化的海退进积序列,说明沉积可容空间生成速

率小于沉积物供应速率,盆地基底沉降速率明显减缓。随着该序列最顶部的辫状河道砾质砂岩的出现,标志着强制海退的最末期(即高位体系最晚期),新形成的沉积可容空间被完全消耗,呈现过度充填状态(Van Wagoner et al., 1990; Allen P A and Allen J R, 2013; Miall, 2022)。在靠海的一侧,沉积序列Ⅲ-2 始终表现为海相环境,由陆棚边缘盆地过渡为浅水陆棚,但其主控沉积作用也由沉积重力流或重力悬浮沉积主导转变为波浪-潮汐流等牵引流,同样表现为一套向上粗化的进积序列,沉积可容空间变化趋势与序列Ⅲ-1 所体现的一致,由平衡充填逐渐转变为过度充填状态。

随着高位体系的结束,从亚丁期克晚期(约 286Ma)开始,沉积序列Ⅳ最底部出现的薄层状细碎屑岩、水平层理细碎屑岩以及极薄层状泥灰岩的组合(图 4D),标志着新一轮、低沉积物供应速率条件下的缓慢海侵,沉积盆地处于饥饿状态(Catuneanu, 2006)。随后块状或钙质砂岩相、块状及水平层理细碎屑岩相和长透镜状砂质灰岩相的韵律层,则反映盆地沉积一直受波浪-潮汐作用控制,向上变细的总体特征则表明盆地沉积可容空间保持在欠充填或平衡充填状态。

吞龙共巴组上段沉积的空谷期,盆地沉积发生明显改变,由之前以硅质碎屑岩为主转向以碳酸盐岩为主,沉积序列Ⅴ-1 和Ⅴ-2 均表现为温暖气候状态下碳酸盐岩快速生长的特点。正如前所述,二者的区别是沉积部位的不同,前者更靠近陆侧,受陆源碎屑输入影响大,形成碳酸盐岩夹碎屑岩的加积-进积序列,沉积可容空间处于平衡充填至过度充填状态。而后者位于障壁外侧,很少受到陆源碎屑影响,形成碳酸盐岩台地向上生长的有利环境(Wilson, 1975)。

5.2 沉积充填序列与构造、气候的控制关系

晚石炭—早二叠世沉积充填序列是形成在数个百年万以内的构造地层单元(tectonostratigraphic units),其通常能够反映重要构造活动阶段,尤其是在大陆边缘等对构造活动敏感的部位(Allen P A and Allen J R, 2013; Miall, 2022)。同时,晚古生代冰期(LPIA)是显生宙历史上持续时间最长、分布范围最广、环境最严苛的冰期事件(Fielding et al., 2008),对南羌塘晚古生代沉积序列的影响和控制作用也不容忽视。

Hu et al.(2015)和 Li et al.(2022)分别对位于羌

塘中央变质带内钻孔中的“展金组”开展沉积地球化学研究,却得出了不同的构造背景认识,前者认为其具有岛弧的构造环境,后者认为具有裂谷的构造背景。广泛侵入到南羌塘地块早二叠世冰海相地层(展金组)中约 290 Ma 的镁铁质岩脉,被普遍认为与早二叠世冈瓦纳大陆北缘地幔柱上涌有关,造成了冈瓦纳大陆北缘裂解和新特提斯洋开启(Zhai et al., 2013; Xu et al., 2016; Zhang Y X and Zhang K J, 2017; Wang et al., 2019; Dan et al., 2021)。

从沉积充填的角度看,晚石炭—早二叠世受冰川影响的沉积充填序列表明:(1)盛冰期内,全球冰川海平面下降期间,沉积可容空间生成率或保持稳定或持续扩大(相对海平面上升);(2)冰期后,冰川消融海平面上升时期,沉积可容空间反被消耗(相对海平面下降)。该现象在冈瓦纳大陆其他受冰川影响的沉积盆地中同样存在(如, Eyles, 1993; Eyles et al., 2002; Angiolini et al., 2003)。这说明,该阶段冰川活动(气候因素)增减引发的海平面变化不是盆地沉积充填过程的主控因素,而盆地基底构造沉降的加速与停滞主导了这个过程(Isbell et al., 2003)。沉积可容空间发展过程和幕式构造活动密切相关,盆地基底快速沉降后,通常伴随着较长的构造静止期,沉积物表现为总体向上粗化的结构,沉积序列上表现为明显的海侵序列和随后的海退序列,这是大陆边缘海相裂谷盆地的重要识别特征(Gawthorpe and Leeder, 2000; Martins-Neto and Catuneanu, 2010)。擦蒙组冰海相加积序列(序列Ⅰ)是在冰期海平面下降期间,冰川沉积物补偿了盆地基底沉降形成的沉积可容空间,可能是同裂谷早期阶段构造活动与气候共同作用的结果。展金组海侵退积序列(序列Ⅱ),是盆地基底沉降速率远超冰期海平面下降幅度的结果,此时冰川沉积物不足以补偿新产生的可容空间,结合同期大量镁铁质岩浆的侵位,表明展金组沉积期(萨克马尔期)活跃的构造环境可能对应同裂谷高峰期,指示了“主动型”裂谷的发育(active rifting; Merle, 2011)。而随后亚丁斯克早期曲地组海退进积序列,是构造静止期盆地基底沉降停滞的结果,其影响远远大于可能产生于冰期后的冰川消融所带来的海平面上升效应,因此,沉积序列Ⅲ是同裂谷构造活动停滞期的沉积响应。

从亚丁期克晚期(约 286 Ma)开始,研究区冰川作用完全消退,沉积序列Ⅳ所反映的盆地饥饿—欠充填状态可能是海平面上升和盆地基底沉降共

同作用的结果。从现有信息看,该沉积序列形成的时间间隔与区域上“双湖型”层序一致(Yuan et al., 2022)。如前所述,“双湖型”层序的特点是含鲕灰岩与玄武岩互层,其代表地层称为鲁谷组,根据该套“火山+沉积”建造特点,王成善等(1987)提出了“二叠纪查桑-茶布裂谷”的概念,而赖绍聪和秦江锋(2009)在双湖地区对该套玄武岩进行了研究,认为其属于陆间裂谷玄武岩类型(OIB型)。在研究区内,笔者在沉积序列Ⅳ中发现时代约283Ma左右的伸展型花岗质岩浆活动(笔者未刊资料),这与区域上玄武质岩浆活动一致,可能是同裂谷构造活动的重要识别标志。随后形成于空谷期的沉积序列Ⅴ,反映盆地处于平衡充填—过度充填的状态,亮晶颗粒灰岩的出现说明研究区处于温暖海洋环境中,加积或退积的碳酸盐岩台地沉积序列暗示构造活动减弱,该时期沉积主要由温暖气候条件主导。

因此,研究区晚石炭—早二叠世沉积充填序列与其所反映的沉积物供应与可容空间变化关系都清楚地指向了构造控制和气候参与过程(图13),以擦蒙组为代表的冰海相加积序列(序列Ⅰ)反映了同裂谷活动早期阶段。而展金组代表的冰海相海侵退积序列(序列Ⅱ)、曲地组代表的海退进积序列(序列Ⅲ-1)和加积序列(序列Ⅲ-2)则分别反映同裂谷活动第一幕的高峰期和停滞期。同裂谷活动第二幕的高峰期和减弱期,则分别为吞龙共巴组下段海侵加积—退积序列(序列Ⅳ)、吞龙共巴组上段加积—进积序列(序列Ⅴ-1)和加积序列(序列Ⅴ-2)所指示。随后,在温暖海洋性气候控制下,龙格组沉积时期形成的大套碳酸盐岩建造,可能指示构造活动进入后裂谷阶段。研究区晚石炭世—早二叠世历经20Ma的海相裂谷沉积充填序列的识别,为晚古生代冈瓦纳大陆北缘初始裂解过程提供了直接证据,同时也印证早二叠世是班公湖—怒江中特提斯洋初始打开的关键时期(张以春等, 2019; Wang et al., 2019; Dan et al., 2021; 沈树忠等, 2024)。

6 结论

(1)藏北日土地区南羌塘地块上石炭—下二叠统可识别出杂砾岩相、砂岩相、细碎屑岩相和灰岩相4类16种沉积岩相,据此识别出受冰川影响

碎屑岩、正常碎屑岩、正常碳酸盐岩等浅海环境以及三角洲、河口湾、障壁海岸等过渡环境。

(2)根据岩相和沉积环境,将研究区晚石炭世—早二叠世划分为5个沉积充填序列。其中,沉积序列Ⅰ为以擦蒙组为代表的冰海相加积序列、沉积序列Ⅱ为以展金组为代表的冰海相海侵退积序列、沉积序列Ⅲ为以曲地组为代表的三角洲相海退进积序列和加积序列、沉积序列Ⅳ为以吞龙共巴组下段为代表的河口湾潮坪相加积—退积序列、沉积序列Ⅴ为以吞龙共巴组上段为代表的障壁—潟湖相加积—进积或碳酸盐岩台地相加积序列。

(3)研究区晚石炭—早二叠世沉积充填序列及其反映的沉积可容空间变化清楚地表明构造控制和气候参与过程。晚石炭世—早二叠世阿舍尔期沉积序列表现为冰川沉积物补偿了盆地基底沉降形成的沉积可容空间,是同裂谷早期阶段构造活动与气候共同作用的结果;早二叠世萨克马尔期至亚丁斯克早期,以展金组为代表的冰海相海侵退积序列和以曲地组为代表的海退进积—加积序列分别反映同裂谷活动第一幕的高峰期和停滞期;早二叠世亚丁斯克晚期至空谷期,以吞龙共巴组下段为代表的海侵加积—退积序列和以吞龙共巴组上段为代表的加积—进积序列则分别指向同裂谷活动第二幕的高峰期和减弱期。

(4)藏北日土地区南羌塘地块早二叠世海相裂谷沉积充填序列是冈瓦纳大陆北缘裂解过程的沉积响应,早二叠世可能是班公湖—怒江特提斯洋的初始打开时间。

致谢: 本次研究工作,潘桂棠研究员、牟传龙研究员、朱同兴研究员对有关问题提出了宝贵的意见和建议,张磊参加了野外工作,对此表示衷心感谢!感谢3位审稿人对本文提出的宝贵建议!

① 钟华明, 鲁如魁等, 2005. 中华人民共和国松西幅 1:25 万区域地质调查报告[R].

② 李广栋, 孙肖等, 2015. 中华人民共和国埃永错、炯仓幅、巴庆错幅、扎普村幅 1:5 万区域地质调查报告[R].

References

Allen P A, Allen J R, 2013. Basin analysis: Principles and application to petroleum play assessment[M]. John Wiley & Sons: 619.

- Angiolini L, Balini M, Garzanti E, et al., 2003. Gondwanan deglaciation and opening of Neotethys: The Al Khlat and Saiwan Formations of Interior Oman[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196 (1-2): 99–123.
- Bhattacharya J, 2010. *Deltas*[M]//James N P, Dalrymple R W. *Facies Models 4: GEOText 6*. St. John's, Newfoundland: Geological Association of Canada: 233–264.
- Cao J F, Song C Y, Fu X G, et al., 2015. Basic characteristics of Permian Zhanjin source rock in Well Qiangzi-5 in Qiangtang Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20 (2): 15–20 (in Chinese with English abstract).
- Catuneanu O, 2006. *Principles of sequence stratigraphy*[M]. 1st ed. Amsterdam: Elsevier: 375.
- Chen S S, Shi R D, Fan W M, et al., 2017. Early Permian mafic dikes in the Nagqu area, central Tibet, China, associated with embryonic oceanic crust of the Meso-Tethys Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (6): 4172–4190.
- Chen W B, Fu X G, Tan F W, et al., 2013. The discovery of the Carboniferous source rock in Qiangtang Basin of Tibet and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32 (7): 1105–1112 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y F, Gao J H, Wang G H, et al., 2016. Sedimentary characteristics of the Lower Permian Qudi Formation of Ni'ema Mountain in Rongma area, Tibet [J]. *Journal of Palaeogeography*, 18 (1): 49–63 (in Chinese with English abstract).
- Cheng L R, Chen S M, Zhang Y C, et al., 2006. Discovery of Carboniferous strata in northern Qiangtang basin, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 13 (4): 240–243 (in Chinese with English abstract).
- Dalrymple R W, 2010. *Tidal depositional systems*[M]//James N P, Dalrymple R W. *Facies Models 4: GEOText 6*. St. John's, Newfoundland: Geological Association of Canada: 201–231.
- Dan W, Wang Q, Murphy J B, et al., 2021. Short duration of Early Permian Qiangtang-Panjal large igneous province: Implications for origin of the Neo-Tethys Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 568: 117054.
- Ding L, Li Z Y, Song P P, 2017. Core fragments of Tibetan Plateau from Gondwanaland united in Northern Hemisphere[J]. *China Academic Journal*, 32 (9): 945–950 (in Chinese with English abstract).
- Eyles C H, Eyles N, Miall A D, 1985. Models of glaciomarine sedimentation and their application to the interpretation of ancient glacial sequences[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 51 (1): 15–84.
- Eyles C H, Eyles N, 2010. *Glacial deposits*[M]//James N P, Dalrymple R W. *Facies Models 4: GEOText 6*. St. John's, Newfoundland: Geological Association of Canada: 73–104.
- Eyles N, 1993. Earth's Glacial Record and Its Tectonic Setting[J]. *Earth-Science Reviews*, 35 (1-2): 1–248.
- Eyles N, Eyles C H, Apak S N, et al., 2001. Permian-Carboniferous tectono-stratigraphic evolution and petroleum potential of the northern Canning Basin, Western Australia[J]. *AAPG Bulletin*, 85 (6): 989–1006.
- Eyles N, Eyles C H, Miall A D, 1983. Lithofacies types and vertical profile models: An alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences[J]. *Sedimentology*, 30: 393–410.
- Eyles N, Mory A J, Backhouse J, 2002. Carboniferous-Permian palynostratigraphy of west Australian marine rift basins: resolving tectonic and eustatic controls during Gondwanan glaciations[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 184 (3-4): 305–319.
- Fan J J, Niu Y L, Luo A B, et al., 2021. Timing of the Meso-Tethys Ocean opening: Evidence from Permian sedimentary provenance changes in the South Qiangtang Terrane, Tibetan Plateau[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 567: 110265.
- Fan J J, Li C, Wang M, et al., 2015. Features, provenance, and tectonic significance of Carboniferous-Permian glacial marine diamictites in the Southern Qiangtang-Baoshan block, Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 28 (4): 1530–1542.
- Fielding C R, Frank T D, Isbell J L, 2008. The late Paleozoic ice age—A review of current understanding and synthesis of global climate patterns[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 441: 343–354.
- Gawthorpe R L, Leeder M R, 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins[J]. *Basin Research*, 12: 195–218.
- Hou Q, Han Z Z, Mou C L, et al., 2021. Petrography and geochemistry of Upper Carboniferous-Early Permian sandstones from Zhanjin Formation in Qiwu area, South Qiangtang Basin, Tibet: Implications for provenance, source weathering and tectonic setting[J]. *Geochemistry International*, 59 (13): 1274–1292.
- Hu J J, Li Q, Fang N Q, et al., 2015. Geochemistry characteristics of the Low Permian sedimentary rocks from central uplift zone, Qiangtang Basin, Tibet: Insights into source-area weathering, provenance, recycling, and tectonic setting[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (8): 5373–5388.
- Hu X M, Ma A L, Xue W W, et al., 2022. Exploring a lost ocean in the Tibetan Plateau: Birth, growth, and demise of the Bangong-Nujiang Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 229: 104031.
- Huang J J, 2000. Nature of the Qiangtang basin and its tectonic evolution[J]. *Journal of Geomechanics*, 6 (4): 58–66 (in Chinese with English abstract).
- Iasky R P, Mory A J, Ghorri K A R, et al., 1998. Structure and petroleum potential of the southern Merlino Sub-basin, Carnarvon Basin, Western Australia[Z]. Perth: Geological Survey of Western Australia: 61.
- Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, et al., 2003. Timing of late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of Northern Hemisphere cyclothems?[J]. *Geological Society of America Special papers*, 370: 5–24.
- Jiao P W, Liang X, Wang G H, et al., 2017. Redefinition of the Lower Permian Qudi Formation in Yadan area, Rongma Town, northern Tibet, and its tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*,

- 36 (2-3): 181–189 (in Chinese with English abstract).
- Ju Q, Zhang Y C, Yuan D X, et al., 2022. Permian foraminifers from the exotic limestone blocks within the central Qiangtang Metamorphic Belt, Tibet and their geological implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 239: 105426.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, et al., 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. *Tectonics*, 22 (4): 17.
- Lai S C, Qin J F, 2009. Geochemistry and Tectonic significance of the Permian basalt in Shuanghu area, Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 16 (2): 70–78 (in Chinese with English abstract).
- Levell B K, Braakman J H, Rutten K W, 1988. Oil-bearing sediments of Gondwana glaciation in Oman[J]. *AAPG Bulletin*, 72 (7): 775–796.
- Li C, Xie C M, Wang M, et al., 2016. Geology of the Qiangtang Region[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–681 (in Chinese with English abstract).
- Li C, 1987. The Longmucuo-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permo-Carboniferous system in Northern Xizang, China[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, (2): 155–166 (in Chinese with English abstract).
- Li W P, Wang Z W, Wang J, et al., 2022. Depositional age, provenance, and palaeoenvironment of the Lower Permian mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Geological Journal*, 57 (4): 1709–1723.
- Liang D Y, Nie Z T, Guo T Y, et al., 1983. Permo-Carboniferous Gondwana-Tethys facies in Southern Karakoran, Ali, Xizang (Tibet) [J]. *Earth Science*, 19 (1): 9–27 (in Chinese with English abstract).
- Liu B P, Cui X S, 1983. Discovery of *Eurydesma* fauna from Rutog, northwest Xizang (Tibet), and its biogeographic significance[J]. *Earth Science*, 19 (1): 79–92 (in Chinese with English abstract).
- Ma Y M, Wang Q, Wang J, et al., 2019. Paleomagnetic constraints on the origin and drift history of the North Qiangtang terrane in the Late Paleozoic[J]. *Geophysical Research Letters*, 46 (2): 689–697.
- Martins-Neto M A, Catuneanu O, 2010. Rift sequence stratigraphy[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 27 (1): 247–253.
- Merle O, 2011. A simple continental rift classification[J]. *Tectonophysics*, 513 (1-4): 88–95.
- Metcalf I, 1996. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 106 (1): 97–122.
- Metcalf I, 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1–33.
- Metcalf I, 2021. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia[J]. *Gondwana Research*, 100: 87–130.
- Miall A D, 1977. A review of the braided-river depositional environment[J]. *Earth-Science Reviews*, 13 (1): 1–62.
- Miall A D, 2022. Stratigraphy: The modern synthesis[M]. Springer: 341–417.
- Mou C L, 2022. Suggested naming and classification of the word facies[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (3): 331–339 (in Chinese with English abstract).
- Neves L F, Guedes C C F, Vesely F F, 2019. Facies, petrophysical and geochemical properties of gravity-flow deposits in reservoir analogs from the Itararé Group (late Carboniferous), Paraná Basin, Brazil[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 110: 717–736.
- Nie Z T, Song Z M, 1983a. Fusulinids of Lower Permian Qudi Formation from Rutog of Xizang (Tibet), China[J]. *Earth Science*, 19 (1): 29–42 (in Chinese with English abstract).
- Nie Z T, Song Z M, 1983b. Fusulinids of Lower Permian Tunlonggongba Formation from Rutog of Xizang[J]. *Earth Science*, 19: 43–55 (in Chinese with English abstract).
- Posamentier H W, Vail P R, 1988. Eustatic controls on clastic deposition II - sequence and systems tract models[C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St. C et al., eds. *Sea level changes: an integrated approach*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication, 42: 124-154.
- Postma G, 1986. Classification for sediment gravity flow deposits based on flow conditions during sedimentation[J]. *Geology*, 14: 291–294.
- Postma G, 1990. An analysis of the variation in delta architecture[J]. *Terra Nova*, 2 (2): 124–130.
- Potter P E, Franca A B, Spencer C W, et al., 1995. Petroleum in glacially-related sandstones of Gondwana: A review[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 18 (4): 397–420.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al., 2011. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variations and implications for crustal structure[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123 (3-4): 585–600.
- Ravnås R, Steel R J, 1998. Architecture of marine rift-basin successions[J]. *AAPG Bulletin*, 82 (1): 110–146.
- Sarg J F, 1988. Carbonate sequence stratigraphy[C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St. C et al., eds. *Sea level changes: an integrated approach*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Special Publication 42: 154-181.
- Şengör A M C, 1984. The Cimmeride orogenic system and the tectonics of Eurasia[J]. *GSA Special Paper*, 195: 1–74.
- Shanmugam G, 2002. Ten turbidite myths[J]. *Earth-Science Reviews*, 58 (3-4): 311–341.
- Shanmugam G, 2016. The seismite problem[J]. *Journal of Palaeogeography*, 5 (4): 318–362.
- Shanmugam G, 2006. The tsunamite problem[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 76 (5): 718–730.
- Shellnutt J G, Bhat G M, Wang K, et al., 2014. Petrogenesis of the flood basalts from the Early Permian Panjal Traps, Kashmir, India: Geochemical evidence for shallow melting of the mantle[J]. *Lithos*, 204: 159–171.
- Shen S, Sun T, Zhang Y, et al., 2016. An upper Kungurian/lower Guadalupian (Permian) brachiopod fauna from the South Qiangtang Block in Tibet and its palaeobiogeographical implications[J]. *Palaeoworld*, 25 (4): 519–538.

- Shen S Z, Zhang Y C, Yuan D X, et al., 2024. Permian integrative stratigraphy, biotas, paleogeographical and paleoclimatic evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 67 (4): 1107–1151.
- Song C Y, Wang J, Fu X G, et al., 2012. Late Triassic Paleomagnetic data from the Qiangtang terrane of Tibetan Plateau and their tectonic significances[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (2): 526–535 (in Chinese with English abstract).
- Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa, Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists.
- Veevers J J, 2006. Updated Gondwana (Permian–Cretaceous) earth history of Australia[J]. *Gondwana Research*, 9 (3): 231–260.
- Wang C S, Hu C Z, Wu R Z, et al., 1987. Significance of the discovery of Chasang-Chabu rift in Northern Xizang (Tibet) [J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 14 (2): 33–46 (in Chinese with English abstract).
- Wang M, Li C, Zeng X W, et al., 2019. Petrogenesis of the southern Qiangtang mafic dykes, Tibet: Link to a late Paleozoic mantle plume on the northern margin of Gondwana?[J]. *GSA Bulletin*, 131 (11–12): 1907–1919.
- Wang Z W, Li W P, Wang J, et al., 2022. Controls on organic matter accumulation in marine mudstones from the Lower Permian Zhanjin Formation of the Qiangtang Basin (Tibet), eastern Tethys[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 138: 105556.
- Wilson J L, 1975. Carbonate facies in geologic history[M]. New York: Springer-Verlag.
- Wu F Y, Wan B, Zhao L, et al., 2020. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica* 36, 1627–1674 (in Chinese with English abstract).
- Wu G Z, Yao J X, Ji Z S, 2009. The Late Carboniferous Fusulinids in the central part of northern Qiangtang, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28 (9): 1276–1280 (in Chinese with English abstract).
- Wu R Z, Lan B L, 1990. Recent information on the Upper Permian rocks of Northwest Xizang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 14 (3): 216–221 (in Chinese with English abstract).
- Xu H P, Zhang Y, Yuan D, et al., 2022. Quantitative palaeobiogeography of the Kungurian–Roadian brachiopod faunas in the Tethys: Implications of allometric drifting of Cimmerian blocks and opening of the Meso-Tethys Ocean[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111078.
- Xu W, Dong Y S, Zhang X Z, et al., 2016. Petrogenesis of high-Ti mafic dykes from Southern Qiangtang, Tibet: Implications for a ca. 290 Ma large igneous province related to the early Permian rifting of Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 36: 410–422.
- Xu Z Q, Yang J S, Hou Z Q, et al., 2016. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 43 (1): 1–42 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of The Himalayan-Tibetan Orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280.
- Yuan D X, Zhang Y C, Qiao F, et al., 2022. A new late Kungurian (Cisuralian, Permian) conodont and fusuline fauna from the South Qiangtang Block in Tibet and their implications for correlation and paleobiogeography[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 589: 110822.
- Zanchi A, Fürsich F T, Santosh M, 2015. Cimmerian terranes: Preface[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 102: 1–3.
- Zhai Q G, Jahn B M, Su L, et al., 2013. SHRIMP zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of a mafic dyke swarm in the Qiangtang terrane, northern Tibet and geodynamic implications[J]. *Lithos*, 174: 28–43.
- Zhang Y J, An X Y, Liu S L, et al., 2023. The sedimentary facies and tectono-stratigraphic successions of the Carboniferous–Lower Permian deposits in western South Qiangtang Block: Implication for a rifting process on the Gondwana margin[J]. *Palaeoworld*, 33(3): 706–723. doi:10.1016/j.palwor.2023.07.002
- Zhang Y C, Shen S Z, Shi G R, et al., 2012. Tectonic evolution of the Qiangtang Block, northern Tibet during the Late Cisuralian (Late Early Permian): Evidence from fusuline fossil records[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 350–352: 139–148.
- Zhang Y X, Zhang K J, 2017. Early Permian Qiangtang flood basalts, northern Tibet, China: A mantle plume that disintegrated northern Gondwana?[J]. *Gondwana Research*, 44: 96–108.
- Zhang Y C, Shi G R, Shen S Z, 2013. A review of Permian stratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeography of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Gondwana Research*, 24 (1): 55–76.
- Zhang Y C, Shen S Z, Zhai Q G, et al., 2016. Discovery of a Sphaeroschwagerina fusuline fauna from the Raggyorcaka Lake area, northern Tibet: implications for the origin of the Qiangtang Metamorphic Belt[J]. *Geological Magazine*, 153 (3): 537–543.
- Zhang Y C, Zhang Y J, Yuan D X, et al., 2019. Stratigraphic and paleontological constraints on the opening time of the Bangong-Nujiang Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35 (10): 3080–3096 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y J, Zhang Y C, Wang D B, et al., 2021. Precambrian–Paleozoic strata and their ages in the central and southern Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 40 (11): 1814–1835 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Li Z W, Zhu L D, et al., 2016. Newly discovered eclogites from the Bangong Meso–Tethyan suture zone (Gaize, central Tibet, western China): mineralogy, geochemistry, geochronology, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 58 (5): 574–587.
- Zhou Y N, Cheng X, Yu L, et al., 2016. Paleomagnetic study on the Triassic rocks from the Lhasa Terrane, Tibet, and its paleogeographic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 108–119.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23 (4): 1429–1454.

Zhu R X, Zhao P, Zhao L, 2022. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean[J]. Scientia Sinica (Terrae), 65 (1): 1–24.

附中文参考文献

曹竣锋, 宋春彦, 付修根, 等, 2015. 羌塘盆地羌资 5 井二叠系展金组烃源岩基本特征[J]. 海相油气地质, 20 (2): 15–20.

陈文彬, 付修根, 谭富文, 等, 2013. 藏北羌塘盆地石炭系烃源岩的发现及其油气地质意义[J]. 地质通报, 32 (7): 1105–1112.

陈耀飞, 高金汉, 王根厚, 等, 2016. 西藏荣玛地区尼俄玛山下二叠统曲地组沉积特征[J]. 古地理学报, 18 (1): 49–63.

程立人, 陈寿铭, 张以春, 等, 2006. 西藏羌北地区石炭纪地层的发现[J]. 地学前缘, 13 (4): 240–243.

丁林, 李震宇, 宋培平, 2017. 青藏高原的核心来自南半球冈瓦纳大陆[J]. 中国科学院院刊, 32 (9): 945–950.

黄继钧, 2000. 羌塘盆地性质及构造演化[J]. 地质力学学报, 6 (4): 58–66.

焦鹏伟, 梁晓, 王根厚, 等, 2017. 藏北荣玛乡亚丹地区下二叠统曲地组的厘定及大地构造意义[J]. 地质通报, 36 (2-3): 181–189.

赖绍聪, 秦江锋, 2009. 青藏高原双湖地区二叠系玄武岩地球化学及其大地构造意义[J]. 地学前缘, 16 (2): 70–78.

李才, 解超明, 王明, 等, 2016. 羌塘地质[M]. 北京: 地质出版社: 1–681.

李才, 1987. 龙木错–双湖–澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界[J]. 长春地质学院学报, (2): 155–166.

梁定益, 聂泽同, 郭铁鹰, 等, 1983. 西藏阿里喀喇昆仑南部的冈瓦纳–特提斯相石炭二叠系[J]. 地球科学, 19 (1): 9–27.

刘本培, 崔新省, 1983. 西藏阿里日土县宽铰蛤 (*Eurydesma*) 动物

群的发现及其生物地理区系意义[J]. 地球科学, 19 (1): 79–92.

牟传龙, 2022. 关于相的命名及其分类的建议[J]. 沉积与特提斯地质, 42 (3): 331–339.

聂泽同, 宋志敏, 1983a. 西藏阿里地区日土县下二叠统曲地组的蜓类[J]. 地球科学, 19 (1): 29–42.

聂泽同, 宋志敏, 1983b. 西藏阿里地区日土县下二叠统吞龙共巴组的蜓类[J]. 地球科学, 19 (1): 43–55.

沈树忠, 张以春, 袁东勋, 等, 2024. 青藏高原及其周边二叠纪综合地层、生物群以及古地理和古气候演化[J]. 中国科学: 地球科学, 54 (4): 1125–1170.

宋春彦, 王剑, 付修根, 等, 2012. 青藏高原羌塘盆地晚三叠世古地磁数据及其构造意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42 (2): 526–535.

王成善, 胡承祖, 吴瑞忠, 等, 1987. 西藏北部查桑–茶布裂谷的发现及其地质意义[J]. 成都地质学院学报, 14 (2): 33–46.

吴福元, 万博, 赵亮, 等, 2020. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 36 (6): 1627–1674.

武桂春, 姚建新, 纪占胜, 2009. 西藏北羌塘中部地区晚石炭的蜓类动物群[J]. 地质通报, 28 (9): 1276–1280.

吴瑞忠, 蓝伯龙, 1990. 西藏西北部晚二叠世地层新资料[J]. 地层学杂志, 14 (3): 216–221.

许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等, 2016. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 43 (1): 1–42.

张以春, 张予杰, 袁东勋, 等, 2019. 班公湖–怒江洋打开时间的地层古生物约束[J]. 岩石学报, 35 (10): 3083–3096.

张予杰, 张以春, 王冬兵, 等, 2021. 青藏高原中南部前寒武系及古生界岩石地层组成和时代特征[J]. 地质通报, 40 (11): 1814–1835.

朱日祥, 赵盼, 赵亮, 2022. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 52 (1): 1–25.