



移动阅读

杜伟东, 张欣松, 尹家一, 等, 2025. 西准噶尔沙尔布尔提山地区志留纪普里道利世—早泥盆世盆地充填序列及其沉积大地构造意义[J]. 沉积与特提斯地质, 45(1): 48–68. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.02001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.02001)

DU W D, ZHANG X S, YIN J Y, et al., 2025. Sedimentary-tectonic significance of the Silurian–Devonian basin filling sequence in the Shaerbuerti Mountain area, western Junggar[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(1): 48–68. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.02001](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.02001)

西准噶尔沙尔布尔提山地区志留纪普里道利世—早泥盆世盆地充填序列及其沉积大地构造意义

杜伟东^{1,2}, 张欣松^{2*}, 尹家一³, 纵瑞文³

(1. 天津华北地质勘查局核工业二四七大队, 天津 410083; 2. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108; 3. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 新疆西准噶尔北部谢米斯台山—沙尔布尔提山地区是中亚造山带的重要组成部分。志留纪普里道利世—早泥盆世期间, 该地区沉积了一套由海相复理石到陆棚碳酸盐岩转变的盆地充填序列, 其沉积体系的时空展布、岩相变化以及物源分析可为重建西准噶尔北部古地理格局以及古亚洲洋演化提供证据。本文对沙尔布尔提山地区的芒克鲁 II 剖面进行了详细的岩相分析、砂岩碎屑统计、主、微量元素分析, 来探讨沉积盆地的演化过程、构造背景和物源属性。芒克鲁 II 剖面出露乌吐布拉克组与曼格尔组, 剖面由底到顶依次出现盆地—斜坡背景层沉积、盆地浊积岩、陆棚边缘的异重流扇、陆棚、浅水颗粒滩的相序列, 表现为向上变浅的盆地充填序列。沉积物以砂岩、砾岩和生物碎屑颗粒灰岩为主。砂岩成分以长石、岩屑为主, 成分变异指数 $ICV=1.37$, 值大于 1, 指示了碎屑岩成熟度低。砂岩样品富集大离子亲石元素 (LILEs), 亏损高场强元素 (HFSEs), 轻稀土与重稀土元素比值 (LREEs/HREEs) 在 2.89~7.41, 均值 6.15。物源判别及构造判别图解综合显示其物源主要来自长英质火山岩及安山岩的混合源区, 物源区以大陆岛弧与大洋岛弧环境为主。研究表明, 谢米斯台山—沙尔布尔提山岛弧火山岩可能为盆地充填过程提供了丰富的物源, 盆地浊积岩向陆棚异重岩沉积的转变不仅代表了盆地充填的暂时性终止, 也有可能代表了沙尔布尔提山地区在这一时期的俯冲碰撞活动基本结束。

关键词: 西准噶尔; 志留纪普里道利世—早泥盆世; 复理石; 岩相; 物源; 岛弧

中图分类号: P534.3

文献标识码: A

Sedimentary-tectonic significance of the Silurian–Devonian basin filling sequence in the Shaerbuerti Mountain area, western Junggar

DU Weidong^{1,2}, ZHANG Xinsong^{2*}, YIN Jiayi³, ZONG Ruiwen³

(1. Tianjin North China Geological Exploration Bureau of Nuclear Industry 247 Brigade, Tianjin 301800, China; 2. Zijin Mining College, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Xiemisitai-Shaerbuerti Mountain region, located in West Junggar, Xinjiang, China, represents an important part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB). From the Silurian Pridoli epoch to early Devonian, a set of basin filling sequence

收稿日期: 2023-11-20; 改回日期: 2024-02-23; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 杜伟东 (1998—), 男, 助理工程师, 主要从事地质勘查、沉积学方面的研究。E-mail: 369063190@qq.com

通信作者: 张欣松 (1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事微体古生物学, 地层学, 沉积学方面的研究。E-mail: zxs19464@gmail.com

资助项目: 国家自然科学基金 (42002017, 42072041)

transitioning from marine flysch to shelf carbonate is deposited in this region. The spatial-temporal distribution of the sedimentary system and analyses of lithofacies and sources can provide evidence for reconstructing the paleogeographic configuration of western Junggar and the evolution of the Paleo-Asian Ocean. This study conducted a detailed analysis of lithofacies, sandstone clasts, as well as major and trace elements in the Mangkelu II section of the Shaerbuerti Mountain area to explore the sedimentary basin's evolution, tectonic background, and provenance attributes. The Mangkelu II section consists of the Wutubulake Formation at the bottom and the Manger Formation at the top. The facies successions from bottom to top includes slope–basin background deposits, basin turbidites, hyperpycnal flow fans at the shelf margin, shelf, and shallow sea grain shoal, representing an upward-shallowing basin-fill sequence. The main sediments are sandstone, conglomerate, and bioclastic limestone. The sandstone is mainly composed of feldspar and lithics, with an index of compositional variability (ICV) of 1.37, which is greater than 1, indicating low maturity. The sandstone samples are enriched in large ion lithophile elements (LILEs) and depleted in high field strength elements (HFSEs), with a ratio of light rare earth elements to heavy rare earth elements (LREEs/HREEs) ranging from 2.89 to 7.41, averaging 6.15. The provenance and tectonic discrimination diagrams show a mixed source of intermediate-felsic volcanic rocks and andesites, derived mainly from continental and oceanic island arcs. Volcanic rocks from the Xiemisitai-Shaerbuerti Mountain island arc provided abundant material for the basin fill. The transformation of sedimentary facies from turbidites to hyperpycnites in the continental shelf may represent a temporary termination of basin filling and the end of subduction and collision during this period in the Shaerbuerti Mountains.

Key words: western Junggar; Silurian Pridoli epoch to early Devonian; flysch; lithofacies; provenance; island arc

0 引言

中亚造山带(CAOB)是西伯利亚古陆与中朝、塔里木板块之间的古亚洲洋消减而形成的巨型造山带(图 1a),由系列俯冲–增生作用形成(Xiao et al., 2004; Xiao and Kusky, 2009; Windley and Xiao, 2018)。CAOB 记录了从新元古代到中生代漫长的增生造山作用史(Şengör et al., 1993; Şengör and Natal'in, 1996; Windley et al., 2007)。最近几年的研究发现中亚造山带西南段的早古生代博什库尔–成吉斯岩浆弧延伸到西准噶尔谢米斯台山—沙尔布尔提山地区(Ping et al., 2012; Chen et al., 2015)。

西准噶尔地区位于中亚造山带腹地。由于其特殊的地质背景及富含多金属矿产与油气资源,近几十年来一直备受地质学家们的关注。古生代阶段,西准噶尔洋内俯冲增生作用非常广泛,从寒武纪至石炭纪均有俯冲–增生过程的地质记录(Shen et al., 2014; Chen et al., 2015; Ren et al., 2017; Zhang et al., 2021)。在志留纪普里道利世—早泥盆世,准噶尔—巴尔喀什洋的双向俯冲促进了西准噶尔地区弧前盆地中复理石、河流磨拉石和岛屿碳酸盐岩的沉积(Xiao et al., 2010; Choulet et al., 2013)。西准噶尔古生代的地层沉积序列,尤其是其中的复理石沉积建造,记录了岛弧盆地之中“碰撞–抬升–剥蚀–搬运”的沉积历史,是探讨岛弧碰撞过程

中弧前盆地时空演化的有利介质,更是研究准噶尔洋俯冲和碰撞过程的重要载体(Choulet et al., 2013)。

西准噶尔北部的谢米斯台—沙尔布尔提山地区分布着大量的滨浅海相、半深海—深海相地层。该地区已开展的古生代沉积学的工作主要集中在生物地层及年代学的研究,比如笔石,牙形石,三叶虫,海百合浮孢等(Cai et al., 1993; Ni et al., 1998; 王志宏等, 2014, 2015; Fan and Gong, 2016; 纵瑞文等, 2020; Zong and Gong, 2020; Ma et al., 2023)以及碎屑岩地球化学特征的分析(Liang et al., 2020),然而有关志留纪—泥盆纪之交的地层学尤其是沉积相和沉积地球化学的研究资料较少(卫巍等, 2009),现有研究地层分辨率较低,无法两方面解释该区域志留系—泥盆系的沉积大地构造意义:其一是该地区和岛弧碰撞过程有关的复理石盆地充填过程是怎样的,产生的碎屑岩有怎样的沉积学和地球化学特征;其二是该套地层能否为该地区志留纪—泥盆纪之交的岛弧俯冲过程提供地层学约束,因为西准噶尔地区古亚洲洋的闭合时间长期存在争议(纵瑞文, 2016)。

为了解决这一问题、探讨西准噶尔在志留纪—泥盆纪之交的盆地演化历史以及为 CAO B 的演化提供区域地质证据,本研究选取西准噶尔沙尔布尔提山地区志留系—泥盆系之交的盆地充填序列

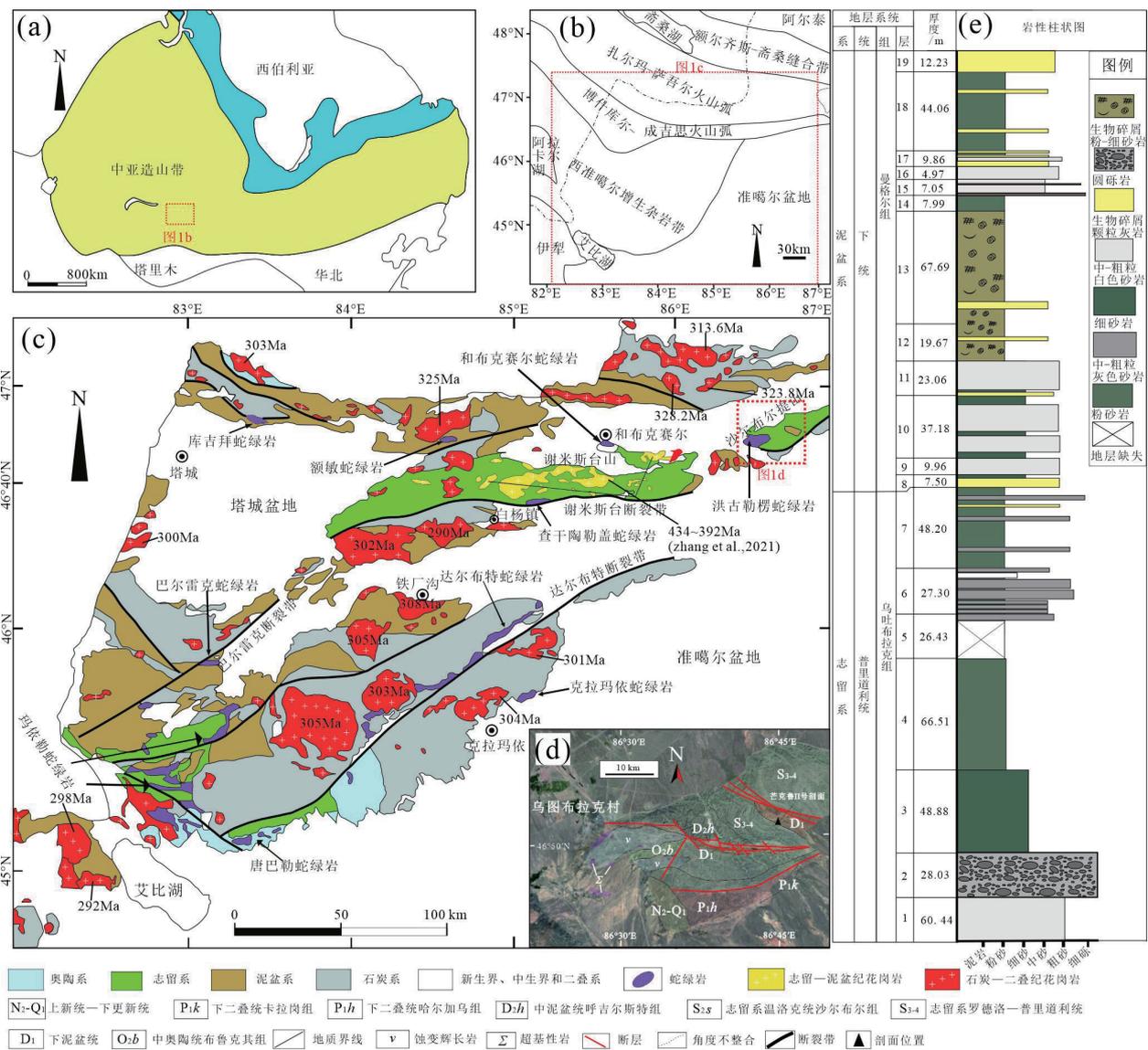


图 1 a. 中亚造山带构造格架图 (据杨高等, 2023; Jahn et al., 2000); b. 西准噶尔地区岛弧环境示意图 (据 Chen et al., 2015); c. 西准噶尔地质简图 (据杨高等, 2023; Ren et al., 2017); d. 沙尔布尔提山西南侧地层划分图; e. 芒克鲁 II 剖面地层柱状图 (图例参考后文)

Fig. 1 a. Structural framework map of the CAOB (modified from Yang et al., 2023; Jahn et al., 2000); b. Island arc environmental map of western Junggar (modified from Chen et al., 2015); c. Geological map of western Junggar (modified from Yang et al., 2023; Ren et al., 2017); d. Geological map of Shaerbuerti Mountain's southwest side; e. Brief lithological column of the Mangkelu II section

为研究对象,开展系统的沉积学工作。该序列包含下部复理石建造的乌吐布拉克组和上部浅海陆棚碳酸盐岩的曼格尔组,岩相变化剧烈,能较完整地揭露不同类型的沉积地层单元在岛弧构造-沉积体系的特征,以及它们对岛弧盆地“碰撞-剥蚀-充填”历史的响应。本文通过对芒克鲁 II 剖面开展岩相、碎屑岩组分和沉积地球化学的研究,分析该地区盆地充填序列的岩相变化、物源和构造背景,进一步

探讨该地区弧前盆地的沉积-构造演化过程及所指示的构造意义,为古亚洲洋的演化过程提供沉积学上的资料。

1 区域地质背景

西准噶尔是中亚造山带的重要组成部分(图 1a),由一系列岩浆弧、增生杂岩带组成(图 1b; Windley et al., 2007; Xu et al., 2013; Ren et al., 2014;

Chen et al., 2015), 其岛弧岩浆体系从奥陶纪一直持续到石炭纪, 反映了洋盆从开始俯冲收缩到闭合的过程(李锦轶, 2004; 徐学义等, 2014), 其特点表现为多岛洋和软碰撞(龚一鸣等, 2013)。

本文研究区位于沙尔布尔提山地区, 构造上位于西准噶尔北部的谢米斯台山—沙尔布尔提山一带, 谢米斯台—沙尔布尔提岛弧被认为是博什库尔—成吉斯岩浆弧东延, 岛弧火山岩形成于志留纪到早泥盆世。博什库尔—成吉斯岩浆弧成因主要有两种, 即准噶尔—巴尔喀什洋岩石圈向北俯冲(Choulet et al., 2013; Chen et al., 2015), 或北部斋桑洋壳向南俯冲(Ping et al., 2012)。地层分区上, 研究区属于北疆—兴安岭地层大区、北疆地层区、北准噶尔地层分区、沙尔布尔提山地层小区。区内志留系—泥盆系分布最为广泛(图 1c)。出露地层(图 1d)自下而上依次为中奥陶统布鲁克其组(O_2b)、温洛克统沙尔布尔组(S_2s)、普里道利统乌吐布拉克组(S_4w)、下泥盆统曼格尔组(D_1m)、中泥盆统呼吉尔斯特组(D_2h)、下二叠统哈尔加乌组(P_1h)和卡拉岗组(P_1k)。其中乌吐布拉克组为一套富含火山物质的复理石沉积组合, 岩性为火山碎屑岩夹少量碳酸盐岩, 含珊瑚、腕足类等化石。曼格尔组与下部乌吐布拉克组整合接触, 岩性为钙质碎屑岩、碎屑岩及碳酸盐岩。

本文研究的芒克鲁 II 剖面位于新疆和布克赛尔蒙古自治县和什托洛盖镇(为蒙语, 意思是“双山包”), 在 G217 高速公路伊克乌图布拉克村以东 15 km 处。该剖面由下至上主要出露志留纪—泥盆纪地层, 是一套板块俯冲环境下的盆地填充序列, 剖面底部乌吐布拉克组是一套盆地内部的复理石沉积, 向上逐渐变为曼格尔组的夹有碎屑岩的浅海陆棚碳酸盐岩沉积。

2 样品采集和分析方法

本次研究主要有三种研究方法: 其一, 对芒克鲁 II 剖面进行实测, 乌吐布拉克组和曼格尔组划分为 19 层, 共计测量真厚度 557.01 m 的地层, 采集 24 件样品, 并且对其岩相变化进行了细致的野外观察和记录(图 1e)。其二, Gazzi-Dickinson 碎屑统计法是定量研究陆源碎屑沉积物常用的手段, 是研究砂岩物源的重要方法之一(Dickinson, 1979, 1985, 1988; McLennan et al., 1993)。Dickinson 等通过对世界上近百个构造环境的现代海、陆相碎屑岩组

分的统计、对比, 提出了 $Qt-F-L$ 和 $Qm-F-Lt$ 判别图解, 来判断碎屑岩源区的构造环境(Dickinson and Valloni, 1980; Dickinson, 1979)。本研究在芒克鲁 II 剖面不同层位采集了 15 件新鲜砂岩样品, 利用 Gazzi-Dickinson 计数法在偏光显微镜下对薄片碎屑进行了分类统计。其三, 沉积岩全岩的主、微量元素地球化学研究也是判断沉积大地构造背景的重要手段(Bhatia, 1985; Bhatia and Crook, 1986; McLennan et al., 1993; Gu et al., 2002; Yang et al., 2019)。本文对芒克鲁 II 剖面不同层位的 18 件砂岩样品进行了分析, 测试均由武汉上谱分析科技有限责任公司 Consultation Planning 进行, 全岩主量元素利用日本理学 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)分析, 全岩微量元素测定采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS), 仪器为 Agilent 7700e。

3 岩相分析

在复理石建造的研究中, 基于露头尺度的岩相分析以及基于砂岩薄片尺度的碎屑分析, 对于恢复研究区物源信息、沉积环境演化过程有着重要的指示作用(Dickinson et al., 1983; 李忠, 2013; 蔚远江等, 2020; 牟传龙, 2022)。本文根据露头剖面的岩性变化、粒度、沉积构造特征, 将类似沉积环境下形成的岩相进行划分。本剖面共识别出 6 个岩相, 即递变的大型砾岩(盆地—斜坡粗粒浊积岩)、重复堆叠的中厚层板状砂岩(盆地中粒浊积岩)、厚层无结构粉砂岩(盆地平原背景层)、巨型的块状无结构砂岩(陆棚—斜坡异重岩)、含生物碎屑钙质粉砂岩(浅海陆棚沉积)、交错层理发育的中—粗粒砂屑灰岩(浅水颗粒滩沉积), 反映了沉积环境从深海到浅海转变的过程。图 2 为剖面的 6~12 层远景。

3.1 岩相 1——递变的大型砾岩(盆地粗粒浊积岩)

岩相 1 描述: 岩相 1 主要出现在剖面的第 2 层, 该层总厚度 30 m, 发育多个冲刷旋回。每个旋回层厚度在 1 m 到 8 m 之间, 下部以巨厚层的圆砾岩为主, 上部为中—粗粒砂岩(图 3a-b)。圆砾岩中砾石磨圆度较好, 呈椭球状, 分选一般, 砾石的长轴长 5~50 cm 左右, 有定向排列的趋势。砾石主要成分为花岗岩、灰岩等, 物源复杂。砾石之间的填隙物则是分选和磨圆度极差的长石、岩屑等物质。

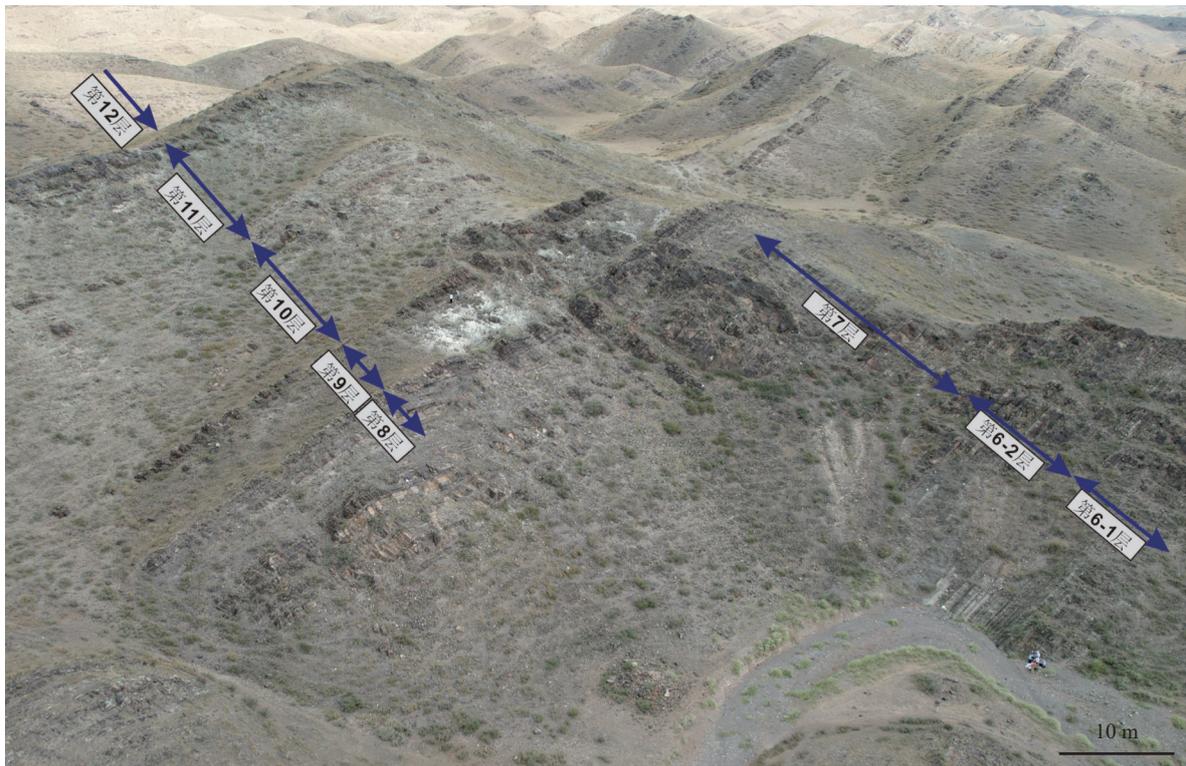


图2 芒克鲁 II 剖面 6~12 层远景图

Fig. 2 Overview of units 6-12 of the Mangkelu II section

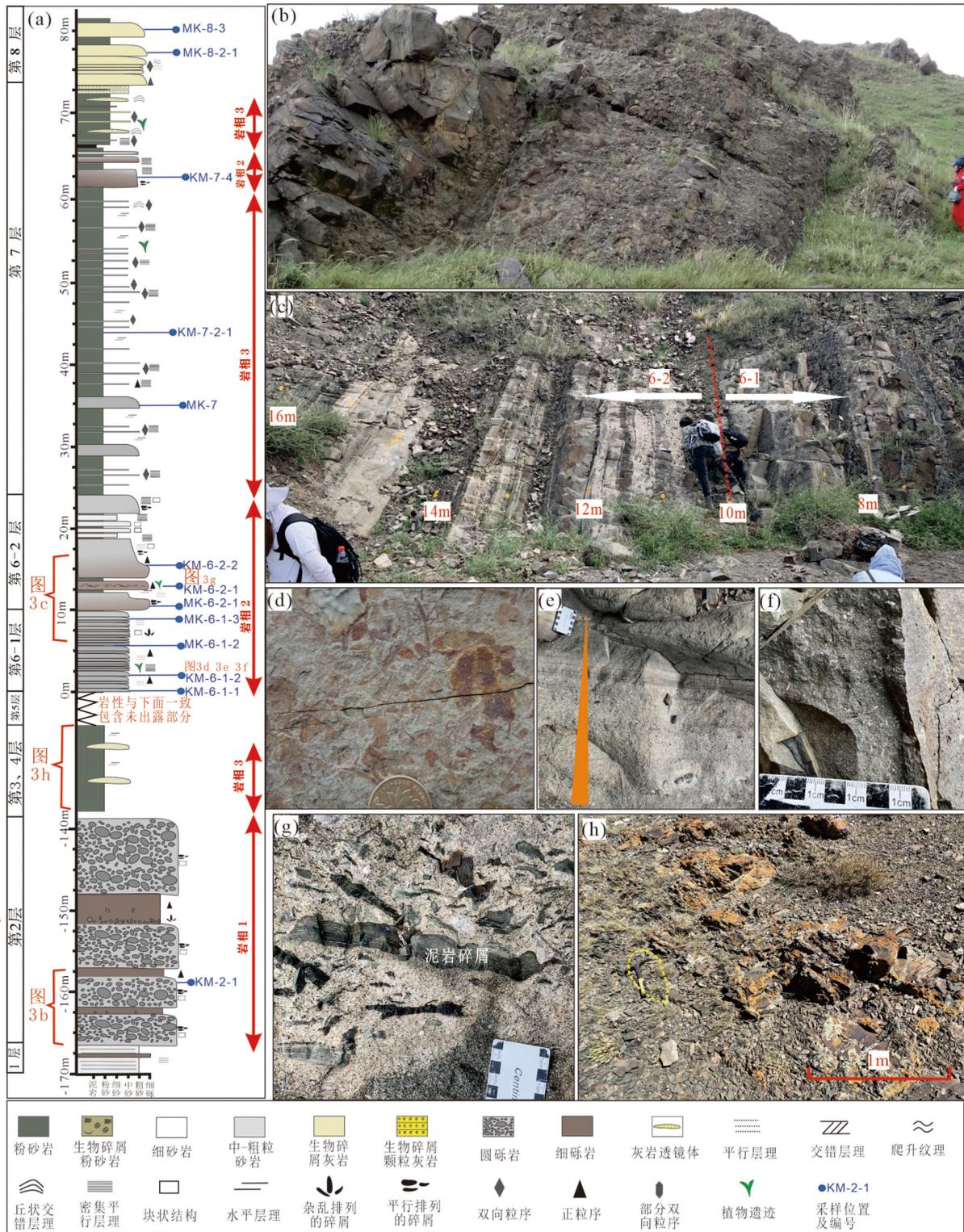
岩相 1 解析: 本岩相代表了盆地海底扇-水道系统中的粗粒浊积岩, 其极粗的粒度(巨砾级别)和低比例的细粒沉积物表明其可能处于高能、侵蚀的河道环境(Dykstra and Kneller, 2009; Li et al., 2018), 但是典型的河道标志如下部明显的侵蚀面和带状的几何形态(较低的宽厚比)并未识别出来。本岩相中砾石的搬运方式可能以高密度浊流为主, 因为其内部层序高度混乱, 但是叠瓦状排列的砾石反映了持续的水流对沉积下来的砾石施加了剪切作用力。砾石总体面貌与河流砾石极为接近, 其在海相地层产出一般被认为是上游三角洲垮塌, 然后通过海底水道搬运到沉积盆地。

3.2 岩相 2——重复堆叠的中厚层板状砂岩(盆地中粒浊积岩)

岩相 2 描述: 岩相 2 主要出现在剖面第 6 层以及第 7 层粉砂岩所夹的个别厚层中—粗粒砂岩层。野外剖面特征是板状砂岩重复堆叠, 侧向连续性较好。板状砂岩和其内部所夹的细粒沉积物构成多个沉积旋回。单层板状砂岩厚度 0.2 m 到 1.2 m 不等, 其中第 6 层下部(第 6-1 层)板状砂岩堆叠较为规律, 而第 6 层上部(第 6-2 层)板状砂岩层序内部堆叠较为复杂, 且粒度更粗, 单层厚度更厚(图 3a,

3c)。每个单层板状砂岩虽然内部结构复杂, 但是总体吻合不完整的鲍玛序列, 即下部粒度较粗, 上部粒度较细的特征, 且内部牵引构造高度发育(图 3e)。砂岩组分镜下观察其主要由大量岩屑、长石以及少量棘皮动物碎片、植物碎片、不透明重矿物组成(图 6a-b)。砂岩中偶见漂浮的泥岩粗砾, 部分层段的粉砂层面有大量保存较好的植物化石和生物碎屑(图 3f-g)。

岩相 2 解析: 第 6 层板状砂岩侧向连续性较好, 大量的平行层理发育, 部分层段正粒序较为发育, 也是海相复理石建造中浊积岩的典型特征。在大多数海底扇模式中, 板状砂岩的重复堆叠反映多期次浊流的冲刷(Walker, 1978; Hein and Walker, 1982)。岩相 2 在本文被解释为盆地中粒浊积岩, 考虑到砂岩层下凹的侵蚀面不发育, 并且侧向连续性较好, 可能对应了大多数海底扇相模式中扇—外扇的沉积, 但是具体沉积相类型(辫状水道、辫状水道间、中扇前沿)因为露头出露受限难以识别。并且第 6 层从下到上粒度、厚度逐渐变大, 代表典型进积型海底扇的充填序列, 反映了陆源输入持续增加、盆地持续充填的过程(Walker, 1978)。此外岩相 2 砂岩中丰富的长石、植物碎片、浅水生物碎



a. 岩相 1~3 详细岩性柱状图； b. 岩相 1 粗粒浊积岩（剖面 -160~-150 m 处）； c-g. 岩相 2 堆叠的板状砂岩（复理石建造，剖面 6~16 m 处）； d. 植物化石（剖面 5 m 处）； e. 单层砂岩中的正粒序和牵引构造（层理）（剖面 15 m 处）； f. 生物碎屑砂岩（6-1 层）； g. 6-2 层砂岩中的泥岩碎屑（剖面 11 m 处）； h. 岩相 3 厚层无结构粉砂岩（剖面 -80 m 处）

图 3 岩相 1、岩相 2、岩相 3 露头特征和典型沉积构造

Fig. 3 Outcrop features and typical sedimentary structures for lithofacies 1, 2, and 3

屑指示了砂岩物源与陆源输入联系密切。

3.3 岩相 3——厚层无结构粉砂岩（斜坡—盆地平原背景层）

岩相 3 描述: 岩相 3 主要出现在第 3、4、7 层, 以厚层的粉砂岩为主(图 3a, 3h)。层厚从 10 cm 到几十米不等, 偶尔夹有薄层的中—粗粒砂岩层, 以及灰岩透镜体, 明显的沉积结构少。粉砂岩内部多见纹层, 但是浅水生物化石和生物扰动均较少。薄层的中—粗粒砂岩夹层在第 7 层偶见, 平行层理高度发育, 且含有生物碎屑, 其厚度在 5 cm 到 15 cm 不等。其中第 7 层顶部厚层粉砂岩所夹的粗砂岩或者砂屑灰岩往往发育有丘状交错层理(HCS)。

岩相 3 解析: 对于第 3 层和第 7 层的厚层粉砂岩而言, 岩相 3 内部化石稀少, 粒度较细(粉砂级别), 且没有典型的风暴、潮汐扰动相标志(如丘状交错层理), 说明了沉积时期水动力条件较低, 因此岩相 3 可能属于斜坡或者盆地平原处垂向加积的背景层产物(Stow, 1985; Stow and Smillie, 2020)。前人也报道过第 4 层粉砂岩中的笔石等深水指示物(Cai et al., 1993), 这也吻合于本岩相的解释。值得注意的是, 第 7 层中偶见双向粒序且平行层理发育的薄层砂岩夹层, 这些夹层总体而言层数较少可能是个别浊流事件层(如异重流)的产物, 因为其增强再减弱的流速变化是异重流的典型特征, 反映了河水流动速度随着时间的长期变化(Mulder et al., 2003)。丘状交错层理在第 7 层上部相对较发育, 可能说明了水体向上变浅, 到达了陆棚的水深, 因此会受到风暴的影响。

3.4 岩相 4——巨型的块状无结构砂岩（陆棚—斜坡异重岩）

岩相 4 描述: 岩相 4 主要出现在剖面第 9~11 层(图 4a), 以巨厚层板状中—粗粒砂岩为主, 偶夹一些 1 m 或者更薄层的粉—细砂岩(图 4d-e)。岩相 4 中的中—粗粒砂岩层厚极厚, 从 2 m 到 10 m 不等, 主要呈现块状构造, 粒度变化不明显, 其间往往可见发育不完全的亚平行层理、交错层理、小规模爬升纹理等。第 9 层砂岩层面可见大量的陆生植物碎片(图 4b-c), 第 10 层和 11 层巨厚层白色中—粗砂岩与其间穿插的大量的灰绿色的粉砂岩呈渐变过渡关系, 解释为多次双向粒序模式(图 4d-e)。镜下观察可知砂岩主要是颗粒支撑结构, 由大量分选较好、磨圆一般的长石、岩屑以及一些石英、棘皮动物碎片、植物碎片组成(图 6c-d)。第 10 层

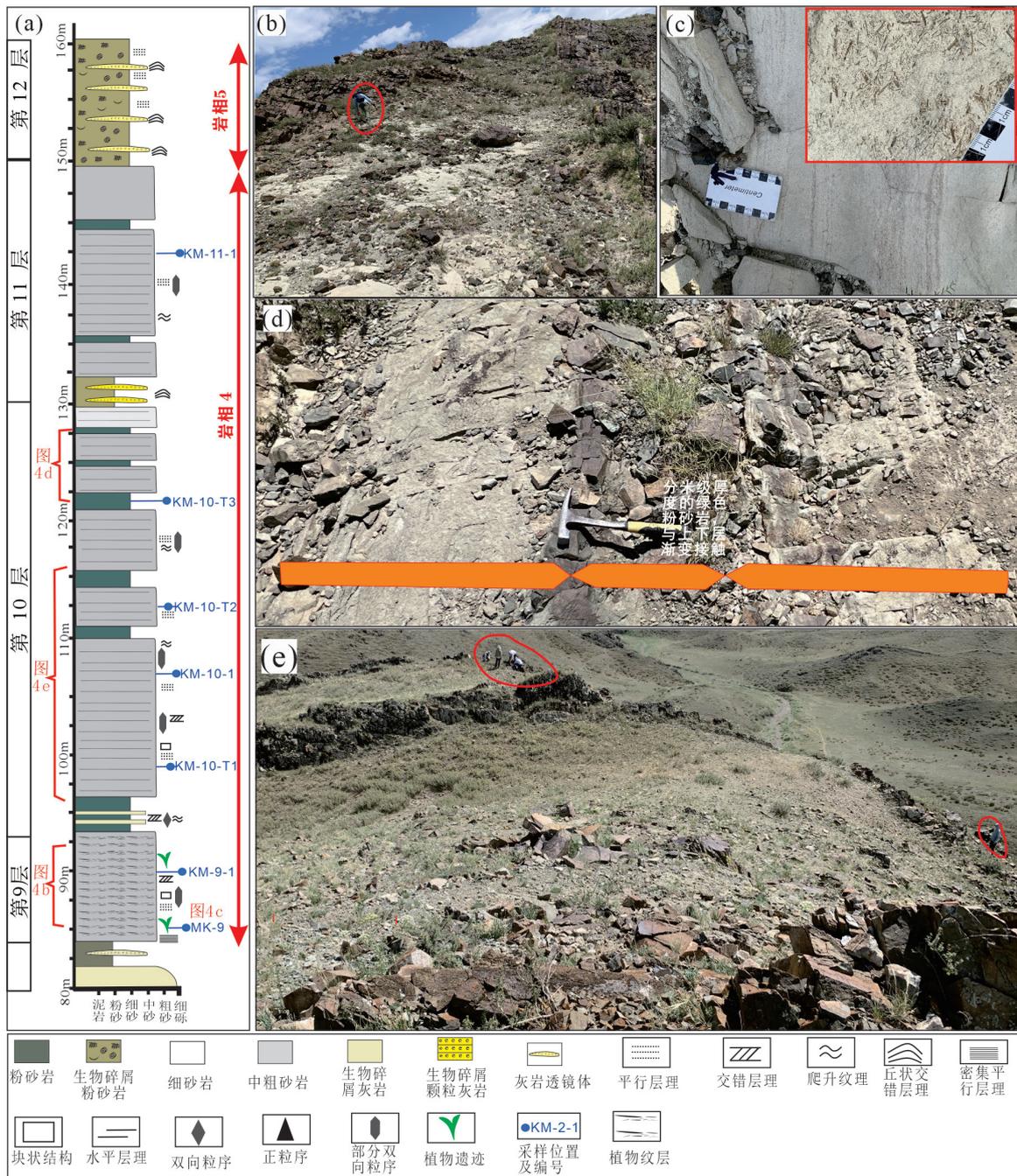
顶部夹有少量富含浅水生物碎屑的颗粒灰岩, 其呈现透镜状产出, 偶见丘状交错层理。

岩相 4 解析: 岩相 4 以巨厚层砂岩为主, 变化比较单一, 推测为持续型异重流的产物。即携带砂体的河水注入海洋形成异重流, 砂体在陆棚地区卸载产生的异重流扇。这一概念与三角洲前缘较为接近, 但是与后者的区别在于缺乏典型三角洲前缘的相标志如大型板状槽状交错层理, 这可能与异重流本身性质为重力流有关(Zavala et al., 2024)。洪水异重流是一种洪水期河口注入、密度由于携带砂体而大于盆地内水体密度, 沿水体底部分层流动的持续型浊流(孙福宁等, 2016)。因为河流输入时间较长且持续, 其产生的异重流持续时间也较长, 且随着上游河水流量变化而波动(Zavala et al., 2006, 2011)。岩相 4 中异重岩识别的关键标准在于三点: 其一, 第 9 层到第 11 层多为巨厚层块状砂岩, 并且具有牵引流的特征(如非常粗略的层理), 表明其形成于持续的(准稳定)和脉动的浊流, 这与前人研究的异重岩极为类似(Plink-Björklund and Steel, 2004; Zavala et al., 2006, 2011)。其二, 砂岩内部存在一系列成对出现的由洪水增强—减弱所形成的逆粒序—正粒序层理(Mulder et al., 2003), 这一点在第 10 层较为常见。其三, 第 9 层砂岩中有大量植物碎片, 直接指示了河流的输入, 植物碎屑被认为是识别异重岩最重要的标志之一(Mulder et al., 2003; Mulder and Alexander, 2010; Johnson et al., 2001)。考虑到第 9~11 层与代表陆棚的第 12 层直接整合接触, 以及第 7 层上部到第 12 层内部出现的风暴沉积物(丘状交错层理), 说明了第 9~11 层沉积于相对较浅的陆棚水深。

3.5 岩相 5——含生物碎屑钙质粉砂岩（浅海陆棚沉积）

岩相 5 描述: 岩相 5 主要出现在剖面的第 12、13、17 层及以后。该岩相以厚层含生物碎屑的粉砂岩为主(图 5b-c), 其层厚较大, 偶夹一些厘米级别厚度的生物碎屑颗粒灰岩透镜体(图 5b)。部分层段生物潜穴和扰动构造非常发育。化石保存从好到差, 比如有些呈现碎屑, 如高度富集的海百合茎碎片(5d), 个别层段化石保存较好, 比如分枝状的苔藓虫, 丛状的珊瑚等生物化石(图 5e)。生物碎屑颗粒夹层常常发育丘状交错层理, 但是化石保存相对较差。

岩相 5 解析: 该岩相代表了典型的浅海陆棚相。



a. 岩相 4 详细岩性柱状图； b. 岩相 4 中含大量植物碎片的白色粗砂岩层（剖面 90 m 处）； c. 岩相 4 中极薄层的陆地植物碎片层，红色框内为其层面（剖面 90 m 处）； d. 岩相 4 双向粒序层（剖面 125 m 处）； e. 岩相 4 双向粒序层（剖面 110 m 处）

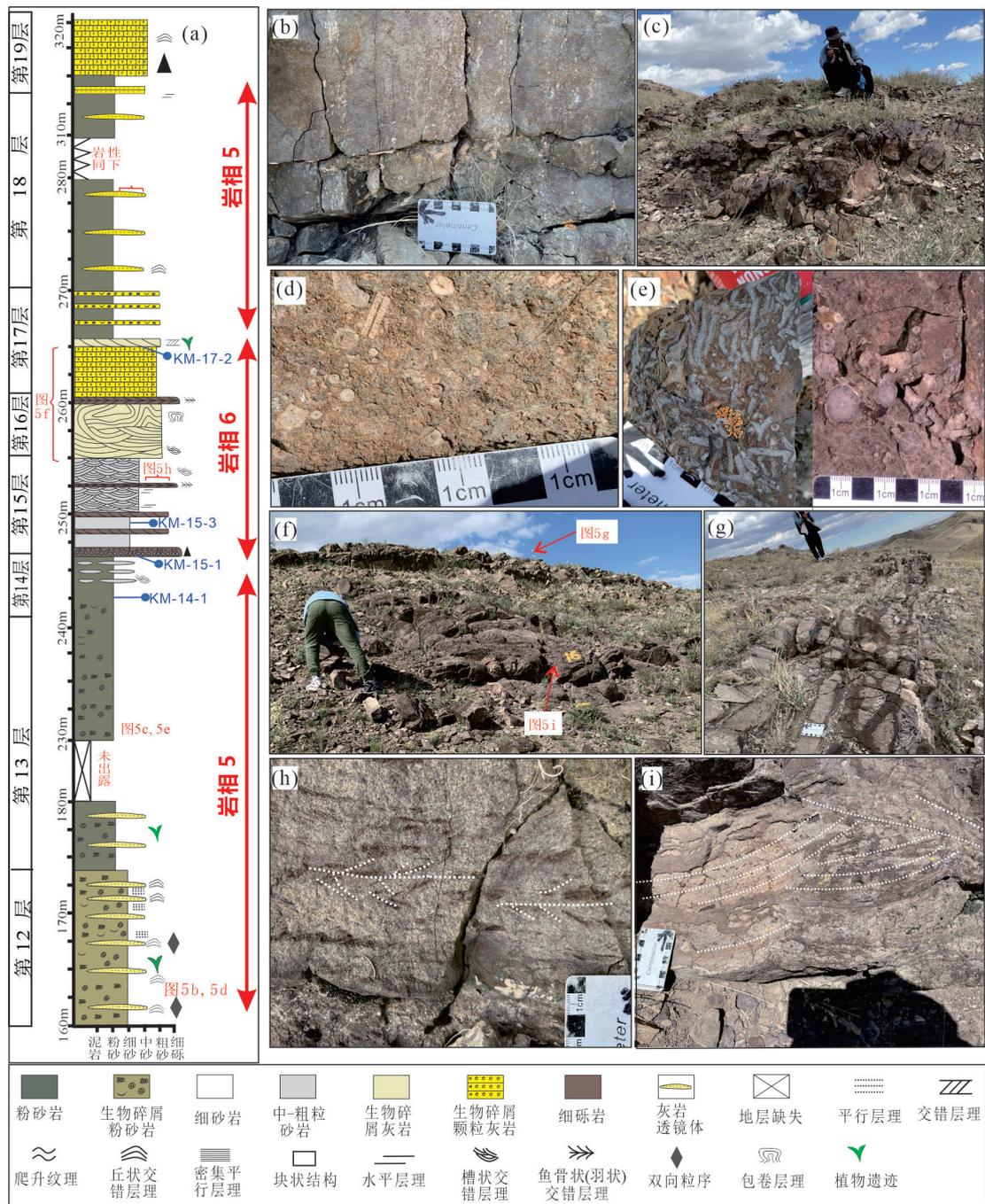
图 4 岩相 4 露头特征和典型沉积构造

Fig. 4 Outcrop features and typical sedimentary structures for lithofacies 4

主要证据在于相对丰富的浅水生物化石以及大量的粗粒生物碎屑夹层。这些夹层由于其侧向连续性差，且发育丘状交错层理，说明了可能是风暴事件改造的产物。部分化石(如珊瑚、苔藓虫)保存较好，代表了该环境存在大量原位底栖动物群。

3.6 岩相 6——交错层理发育的中—粗粒砂屑灰岩（浅水颗粒滩沉积）

岩相 6 描述: 岩相 6 主要出现在第 14~16 层 (图 5a, 5h-i), 主体上是一套向上变粗序列, 由底部钙质粉砂岩逐渐变成上部粗粒砂屑灰岩(图 5a)。



a. 岩相 5、6 详细岩性柱状图；b-d. 岩相 5：含生物碎屑的钙质粉砂岩，其中夹少量钙质生物碎屑灰岩条带或者透镜体，化石保存多为碎片（12 层，160 m 处）；c-e. 岩相 5：生物碎屑的钙质粉砂岩，注意原位保存的苔藓虫和珊瑚（13 层，230 m 处）；f. 岩相 6：交错层理发育的中-粗粒砂屑灰岩（16 层—17 层，260 m 处）；g. 砂屑灰岩交错层理发育（17 层）；h. 鱼骨（羽）状交错层理；i. 槽状交错层理

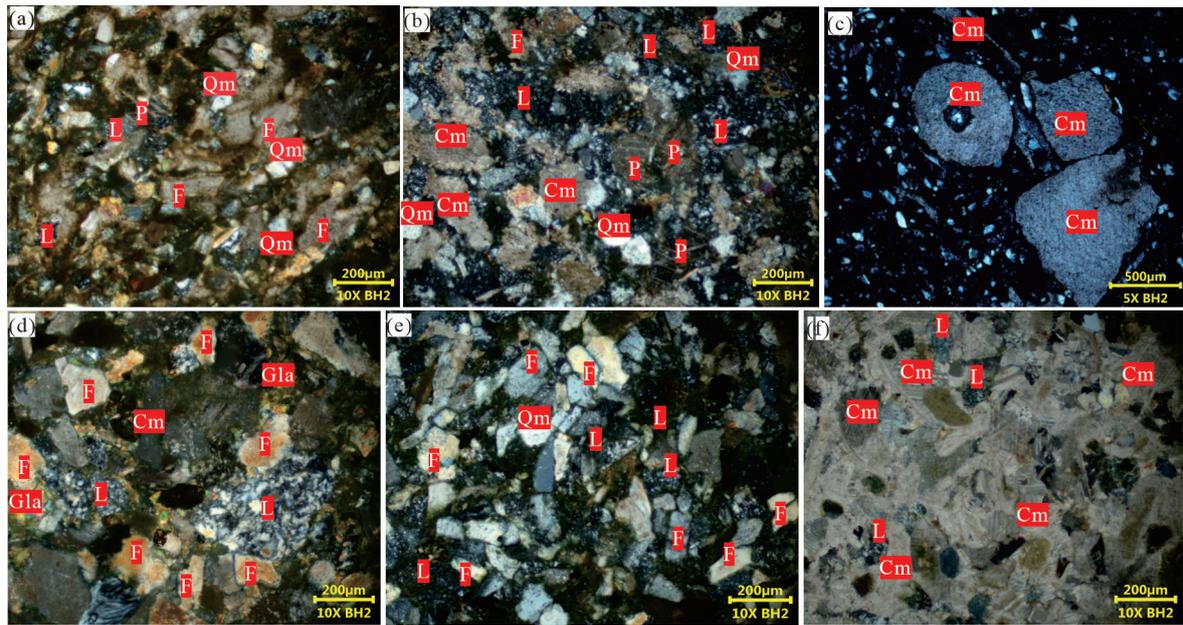
图 5 岩相 5、岩相 6 露头特征和典型沉积构造

Fig. 5 Outcrop features and typical sedimentary structures for lithofacies 5 and 6

砂屑灰岩上部的交错层理高度发育，常见鱼骨状交错层理(图 5h)、槽状交错层理(图 5i)、板状交错层理等。镜下观察砂岩可知，它们岩性上主要为钙质砂岩到颗粒灰岩，粒度较粗，分选性较好，富含大量

陆源碎屑如长石、岩屑，以及大量浅水生物碎屑，比如棘皮动物、腕足、三叶虫(图 6f)。

岩相 6 解析：第 14~16 层代表了正常浪基面之上的浅水颗粒滩。其较粗的碎屑粒度，较好的分



a. 长石岩屑杂砂岩 (KM-6-1-2, 剖面 4 m 处); b. 长石岩屑杂砂岩 (KM-6-2-1, 剖面 13 m 处); c. 黑云母岩屑砂岩 (MK-9, 剖面 90 m 处); d. 海绿石长石岩屑杂砂岩 (KM-10-2, 剖面 96 m 处); e. 钙质粉砂岩 (MK-13-2, 剖面 200 m 处); f. 长石岩屑杂砂岩 (KM-16-2, 剖面 250 m 处)。Qm—单晶石英; F—长石; L—岩屑; Cm—生物碎屑; Gla—海绿石; Cht—燧石

图 6 砂岩薄片镜下特征

Fig. 6 Sandstone thin-section features under the polarizing microscope

选性是典型浅水颗粒滩的特征。此外颗粒灰岩中存在丰富的潮汐、波浪改造的沉积构造,比如多种槽状和板状交错层理,指示了当时水深较浅且水动力较强,波浪、潮汐作用频繁,砂体被来回冲刷改造。出现的鱼骨状交错层理也是潮汐沉积的标志之一,主要是由于涨潮和落潮周期性变化形成的(阮伟和黄洁, 2010)。但是由于第 14~16 层缺乏典型的暴露标志,因此解释为浅水颗粒滩。陆源碎屑和生物碎屑由于风暴以及波浪作用在此处富集。

4 芒克鲁砂岩的颗粒碎屑组成和主、微量元素特征

4.1 砂岩碎屑组分

砂岩主要由大量的长石、岩屑和少量的石英、燧石、重矿物、生物碎屑组成(附表 1^{*}), 填隙物主要是灰泥质或者粉砂质成分。多数长石颗粒呈棱角状一次棱角状, 岩屑主要为火成岩屑和少量的沉积岩屑、变质岩屑, 另外第 9 层含有大量的植物碎屑。

4.2 主、微量元素特征

主、微量元素分析被广泛应用于古环境和古气候的重建(赵恒等, 2016; 唐华等, 2020; 马安林和胡修棉, 2021; 包万铖等, 2023)。本文对芒克鲁剖面的 18 个样品进行主、微量元素分析来探究其物源和源区的构造背景, 参数见附表 2^{*}—附表 4^{*}。

主量元素: 砂岩中石英或富含 SiO₂ 的矿物含量为 22.30%~72.48%, 且多数样品介于 40%~60%(平均 49.62%), 低于 Rudnick and Shan(2014) 中的上地壳(UCC)标准值(SiO₂ 为 66.6%)。Al₂O₃、TFe₂O₃、MnO、MgO、Na₂O、K₂O 和 P₂O₅ 含量的平均值均低于 Rudnick and Shan(2014) 上地壳(UCC)标准值。CaO 的含量高于上地壳(UCC), 富含 CaO 说明了沉积岩含有大量碳酸盐沉积物。TiO₂ 的含量与上地壳标准值相等。

微量元素(包含稀土元素): 图 7a 为微量元素原始地幔标准化蛛网图, 显示了砂岩样品中富集大离子亲石元素(LILE)如 Ba、Rb、Sr、Cs 等, 强烈亏损高场强元素(HFSE)如 Nb、P、Ti, 指示其源岩可能跟板块俯冲环境中的岛弧火山岩有关(欧阳京等,

*数据资料请联系编辑部或登录期刊官网 <https://www.cjyttsdz.com.cn/> 获取。

2010; Perfit et al., 1980)。其中,富集的 LILE 主要由于俯冲流体的存在,强烈亏损 Ti、Nb、Ta,则是由于这些元素保留在俯冲板片的残留矿物中(如金红石、钛铁矿等)。轻稀土与重稀土元素比值(LREEs/HREEs)介于2.89~7.41,均值6.15。 $(La/Yb)_N$ 值介于2.22~7.94,均值为6.06。REE球粒陨石标准化模式图中(图7b),砂岩样品表现为轻稀土富集、重稀土相对平坦、Eu异常不明显。

5 讨论

5.1 芒克鲁 II 剖面的沉积相模式及沉积环境演化

Zong and Gong(2020)的研究把 S-D 界限定在芒克鲁 II 剖面第 8 层。根据该剖面的岩相分布、岩性特征、接触关系、垂向序列并结合西准噶尔的地质背景等,本文认为芒克鲁 II 剖面代表了一个连续的盆地充填序列,由半深海的复理石建造逐渐变到浅海碎屑岩—碳酸盐岩(图8)。

在乌吐布拉克组的中下部,岩相 1、2、3 说明了复理石建造中包含大量陆源物质,如河道砾石、砂体中的长石碎屑、少部分的植物碎屑,还包括浅海陆棚上的生物碎屑。多期次的浊流携带着它们向盆地内部充填,形成典型的复理石建造(图8)。7 层顶部(岩相 3),粉砂岩中的中—粗粒砂岩夹层逐渐增多,并且夹层中偶尔出现的丘状交错层理代表了斜坡沉积,水深可能接近陆棚水深。到了曼格尔组下部,沉积环境从较深水的盆地变为浅水陆棚边缘地区。剖面第 9~11 层所代表的岩相 4 是一

套洪水相关的异重流相沉积体系,水深相对于岩相 1、2 较浅,此时陆地河流带来的大量的陆源碎屑在陆棚—陆棚边缘处沉积卸载(图8)。

到了剖面第 12 层及以后,地层中出现了大量的浅海陆棚相的碎屑—碳酸盐沉积物,意味陆源输入减缓,沉积环境趋于稳定。第 12~13 层出现大量的厚层含生物碎屑粉砂岩,并夹一些生物碎屑颗粒灰岩透镜体,代表了浅海陆棚相的沉积环境(岩相 5;图8)。再向上到第 14~16 层变为浅水颗粒滩相(岩相 6),此时波浪、潮汐以及风暴作用强烈,出现了大量的羽状、槽状交错层理,且发育向上变浅的进积型沉积序列。

5.2 芒克鲁 II 剖面的沉积大地构造背景和物源分析

5.2.1 沉积物成熟度以及化学风化程度

芒克鲁 II 剖面的砂岩样品 SiO_2/Al_2O_3 值介于 2.99~5.99(平均 3.94),其碎屑成分表现出较低的成熟度,表明研究区沉积物离物源区较近(Roser and Korsch, 1986; 王俊等, 2023)。成分变异指数(ICV)也可用于指示碎屑岩的成熟度(Cox et al., 1995; Van and Leake, 1985),其值越大指示碎屑岩成熟度越低、构造环境越活跃。砂岩样品 ICV 均值为 1.37,大于 1(附表 2^{*}),指示了活跃的构造背景下的沉积,受源区岩石控制明显,未经历强烈的风化作用。样品的化学蚀变指数(CIA)可以确定源区的化学风化程度(Nesbitt and Young, 1982; Fedo et al., 1995)。本研究的样品 CIA 值大多分布

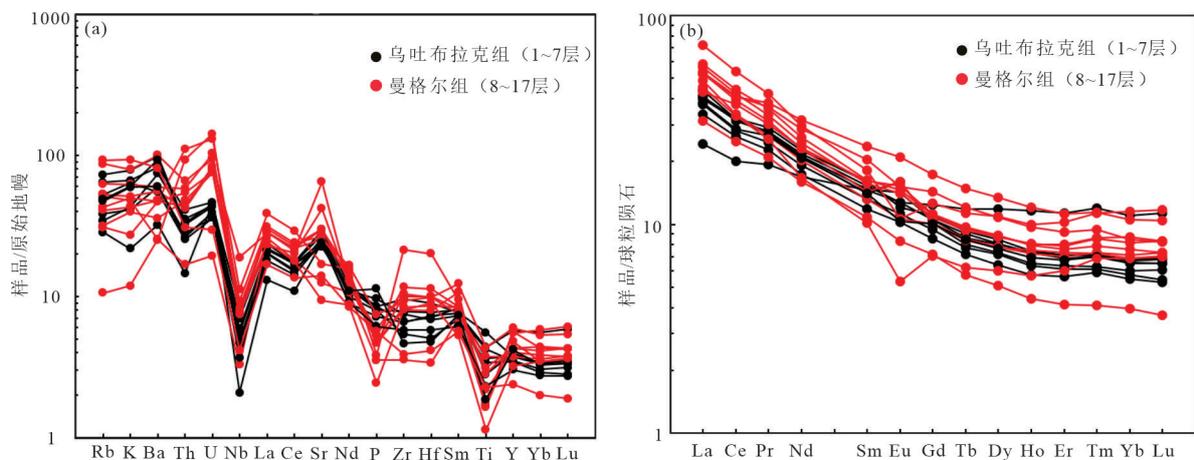


图7 a. 芒克鲁 II 剖面砂岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(数据来自 Sun and McDonough, 1989); b. 稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(数据来自 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 7 a. Primitive mantle-normalized spider diagram (data from Sun and McDonough, 1989); b. Chondrite-normalized REE patterns of the Mangkelu II section (data from Taylor and McLennan, 1985)

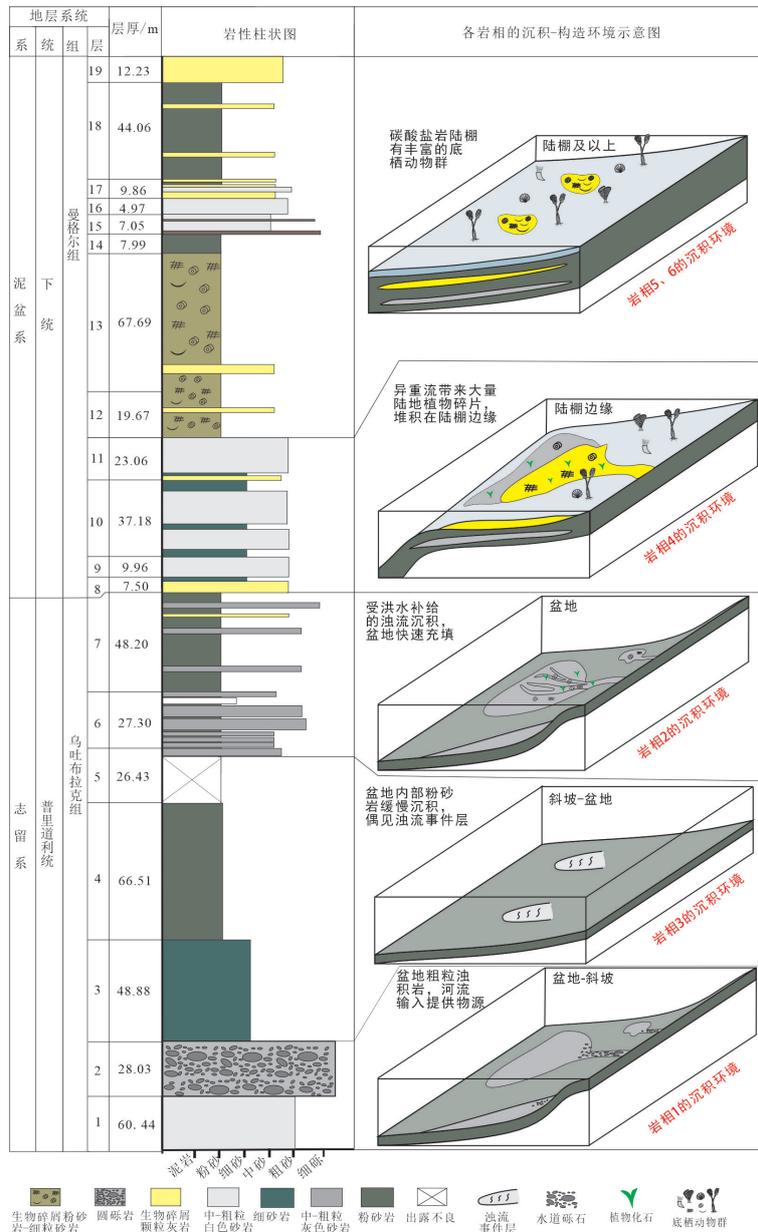


图 8 芒克鲁 II 剖面盆地充填序列中各岩相的沉积-构造环境示意图
 Fig. 8 Sedimentary evolution of basin filling sequence at the Mangkelu II section

在 55.19~64.84 之间(图 9;附表 2*),说明源区的气候较为寒冷、干燥,化学风化程度低(ICV 与 CIA 计算方法见附表 2*尾注)。

5.2.2 砂岩物源分析

在 Dickinson 等人提出的砂岩碎屑组分与物源区类型图解 Qt-F-L(图 10a)和 Qm-F-Lt(图 10b)中,芒克鲁 II 剖面砂岩绝大多数投点落在了过渡弧与未切割弧区(统计数据见附表 1*),这与西准噶尔地区岛弧体系的沉积构造背景一致。

另外, Sc、Th、Zr、Co 等微量元素(包括稀土元

素)化学性质稳定,能够很好地保存在沉积物中,因此可以作为判定物源以及源区构造背景的一种有效手段(Taylor and McLennan, 1985)。Floyd and Leveridge(1987)提出的 La/Th-Hf 图解,以及 Gu et al.(2002)的 Co/Th-La/Sc 图解,可以很好地判断样品的物源属性。在 La/Th-Hf 图解中,芒克鲁砂岩样品投点主要落于长英质-基性岩混合源区,极少数样品落在安山岩岛弧源区,显示为从安山岩岛弧源区向着长英质基性岩的混合物源区过渡变化(图 11a)。在 Co/Th-La/Sc 图解中(图 11b): Co/Th

为 0.44~16.76, 平均值为 4.63, 变化较大; La/Sc 值介于 0.25~3.03, 平均值为 1.33, 样品投点主要集中于长英质火山岩—安山岩之间, 少数落于花岗闪长岩与长英质火山岩之间, 指示砂岩主要来源于长英质火山岩及安山岩的混合源区。并且盆地与斜坡环境中的样品投点更加倾向来源于中性安山质岛弧区, 而陆棚环境下的异重岩和浅水颗粒滩沉积的长英质物源明显增多。

5.2.3 地球化学源区构造环境分析

Bhatia(1983)和 Bhatia and Crook(1986)将大

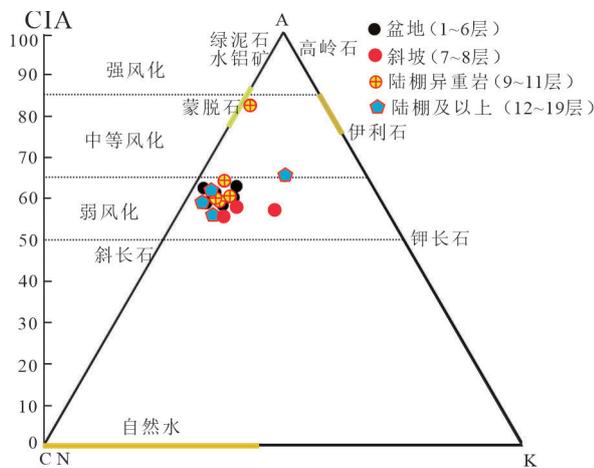


图9 芒克鲁II剖面砂岩 A-CN-K (Al₂O₃-CaO⁺+Na₂O-K₂O) 图解

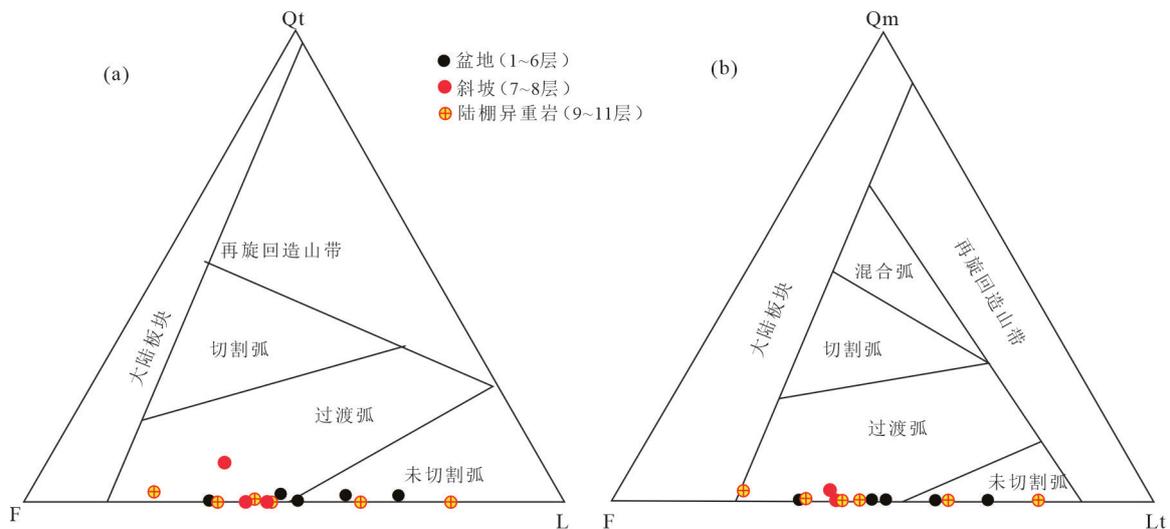
Fig. 9 A-CN-K (Al₂O₃-CaO⁺+Na₂O-K₂O) diagram for sandstones at the Mangkelu II section

陆边缘和大洋盆地划分为大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘 4 种构造类型, 建立了多种主、微量元素判别图, 如 TiO₂-TFe₂O₃+MgO、La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10。在 TiO₂-TFe₂O₃+MgO 图解中, 砂岩样点较为分散, 主要分布于大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘之中(图 12a)。在 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解中, 样品主要分布在大陆岛弧与大洋岛弧环境中(图 12b-c), 并且盆地、斜坡环境下样品的分布更加倾向于大洋岛弧, 而陆棚环境下的异重岩和陆棚之上的浅水颗粒滩相则分布在大陆岛弧。

Bhatia(1985)还提出源区岩石的稀土元素(REE)稳定, 可以很好地用来解释源区的构造环境。如表 1, 芒克鲁砂岩的 LREEs/HREEs、La/Yb、(La/Yb)_N 的均值都指示了源区构造环境为大陆岛弧与大洋岛弧的俯冲碰撞环境。δEu 为 0.63~1.34 (平均 1.00), 多数样品的 δEu 显示大洋岛弧环境的特征, 少数显示大陆岛弧环境, 具有典型岛弧火山岩的特征。

5.3 岛弧盆地充填序列的控制因素

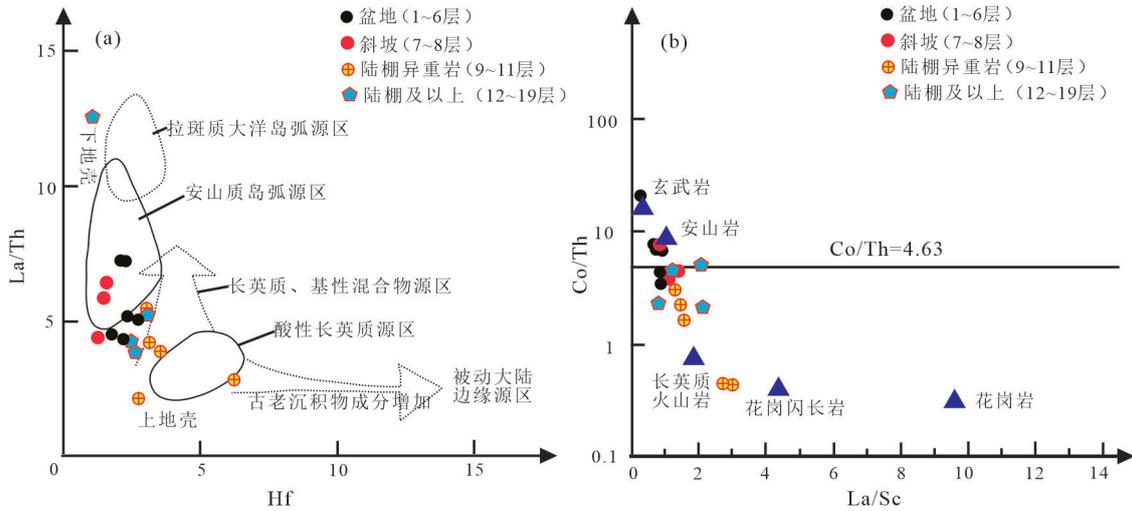
综上所述, 本文研究采用了多种手段, 具体结果简要解释如下。(1)岩相分析: 剖面上发育深水复理石—陆棚异重岩—陆棚碳酸盐岩的盆地充填序列, 而复理石建造是典型活动造山带的产物, 且包含大量陆源输入的直接产物(植物碎屑, 河流砾石); (2)砂岩碎屑组分: 物源区为岛弧环境下的过



稳定石英颗粒总量: Qt=Qm+Qp; 不稳定岩屑: L=Lv+Ls; 岩屑总量: Lt=L+Qp; 长石: F

图 10 砂岩碎屑组分与物源类型判别图解(底图据 Dickinson, 1979)

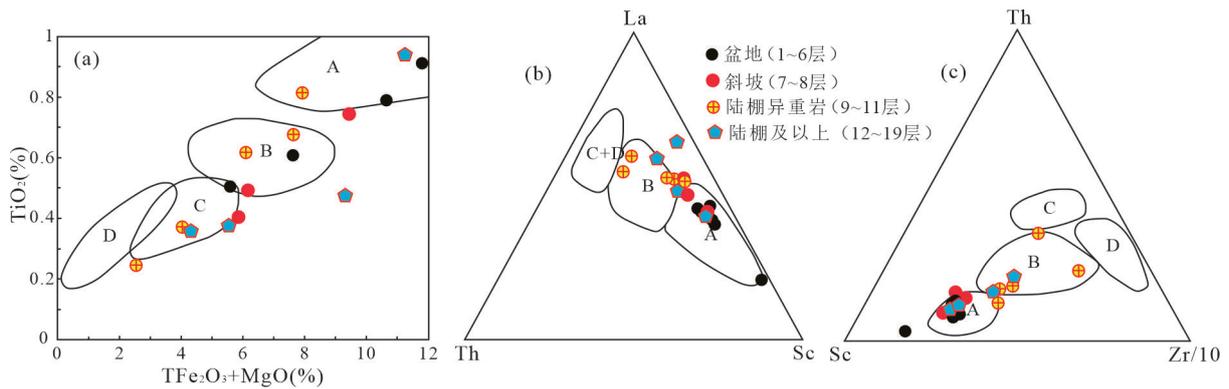
Fig. 10 Sandstone detrital composition and provenance analysis diagram (modified from Dickinson, 1979)



a. La/Th-Hf 图解 (Floyd and Leveridge, 1987); b. Co/Th-La/Sc 图解 (Gu et al., 2002)

图 11 芒克鲁 II 剖面砂岩物源属性判别图解

Fig. 11 Provenance attribute discrimination diagrams for sandstones from the Mangkelu II section



a. TiO_2 - TFe_2O_3+MgO 图解 (Bhatia, 1983); b. La-Th-Sc 图解 (Bhatia, 1985); c. Th-Sc-Zr/10 图解 (Bhatia, 1985); A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘

图 12 砂岩主、微量元素构造判别图解

Fig. 12 Tectonic discrimination diagrams of the major and trace elements for sandstones from the Mangkelu II section

表 1 砂岩构造背景的稀土元素判别参数 (Bhatia, 1985) 与本区砂岩的对比

Table 1 Comparison of sandstone discriminant parameters and tectonic settings of REEs (after Bhatia, 1985)

构造背景	源区类型	La/ $\times 10^{-6}$	Ce/ $\times 10^{-6}$	$\sum REE/\times 10^{-6}$	LREEs/HREEs	(La/Yb) _N	Eu/Eu*
大洋岛弧	未切割岩浆弧	8.00 \pm 1.70	19.00 \pm 3.70	58.00 \pm 10.00	3.80 \pm 0.90	2.80 \pm 0.90	1.04 \pm 0.11
大陆岛弧	切割岩浆弧	27.00 \pm 4.54	59.00 \pm 8.20	146.00 \pm 20.00	7.70 \pm 1.70	7.50 \pm 2.50	0.79 \pm 0.13
活动大陆边缘	隆升基底隆起	37.00	79.00	186.00	9.10	8.50	0.60
被动大陆边缘	克拉通内高地	39.00	85.00	210.00	8.50	10.80	0.56
盆地相 (1~6层均值)		13.69	27.64	75.33	5.65	5.67	1.06
斜坡相 (7~8层均值)		13.10	26.05	68.85	6.49	6.80	0.94
陆棚异重岩相 (9~11层均值)		20.95	40.76	100.13	7.20	6.80	0.96
陆棚及以上 (12~19层均值)		18.12	36.52	97.47	5.92	6.01	0.99

渡弧与未切割弧; (3)主、微量元素物源分析: 源区为长英质火山岩及安山岩的混合源区, 并且推测为

岛弧区火山岩浆的作用产物, 剖面从下到上具有酸性物源增加的趋势; (4)主、微量元素的源区构造

环境分析: 构造上基本属于岛弧环境, 且从大洋岛弧环境向着大陆岛弧环境转变, 响应了本文盆地—斜坡—陆棚相的变化过程。

上述四种分析手段(岩相分析、碎屑组分和沉积地球化学)具有极佳的耦合度, 共同指向一个结果。即芒克鲁 II 剖面发育盆地充填序列, 其诞生于岛弧碰撞体系这一沉积构造背景, 这与前人对西准噶尔地区的大地构造背景研究结论类似(Windley et al., 2007; Xiao et al., 2010), 并且源区为岛弧碰撞产生的长英质火山岩及安山岩的岛弧源区(Liang et al., 2020)。前人利用碎屑锆石进行物源分析得到了类似结果, 碎屑岩物源都来自岛弧, 比如该地区上覆和布克赛尔组砂岩的碎屑锆石也指示了岛弧火山岩是该地区碎屑岩重要的物源(Liang et al., 2020)。另外, 早泥盆世玛依力山地层小区的马拉苏组与本文研究的芒克鲁 II 剖面的曼格尔组在岩性、生物化石组合及沉积环境上非常相似, 有学者对马拉苏组的碎屑锆石进行研究, 发现谢米斯台岛弧是马拉苏组的主要物源区(杨维等, 2015)。另外, 本次研究的微量元素与 Liu et al.(2017)研究的莫老坝组中砾岩的微量元素具有非常相似的特征, 与原始地幔相比, 都富集 Th、U, 但贫 Nb、P、Ti, 同样指示了该地区的岛弧是主要物源区。源区构造环境的分析图解及判别参数则说明了源区为大陆岛弧与大洋岛弧的俯冲碰撞环境。

因此, 岩相分析、碎屑组分与地球化学结果所反映的构造环境相同, 且吻合宏观上西准噶尔属于中亚造山带岛弧体系这一区域地质背景(Xiao et al., 2010)。因此, 在志留纪—泥盆纪之交, 沙尔布尔提山地区的岛弧俯冲过程产生的大量的岛弧火山岩是乌吐布拉克组复理石建造以及曼格尔组下部异重岩的主要物源。结合区域地质背景以及上述岩相分析和沉积地球化学的研究, 本文认为如下条件有利于芒克鲁 II 剖面复理石浊积岩体系的发育:

(1)物源供给: 研究区位于沙尔布尔提山地区, 古亚洲洋盆消减俯冲形成的弧前盆地为沉积提供场所; 俯冲形成的博什库尔—成吉斯岛弧火山岩经过抬升、风化、剥蚀、搬运, 形成了大量的砂体注入沉积盆地, 这为研究区海底扇沉积提供了丰富的物源。最直接的证据有两点: 其一是岩相 2 和岩相 1 的复理石沉积中含有大量的磨圆度极佳的河流砾石、浅水动物化石、陆地植物化石、大量的碎屑长石、种类丰富的岩屑; 其二是岩相 4 为富含长

石的巨型的块状无结构砂岩。它们都说明了陆源输入提供了大量的砂体并堆积在陆棚边缘和盆地之中。

(2)构造抬升: 构造抬升导致的相对海平面的快速下降影响海底扇体系不同岩相的发育, 是重力流体形成的重要诱因(张青林等, 2022)。本文认为造成相对海平面下降的因素主要是: 俯冲碰撞活动可能导致弧前盆地的隆起, 岛弧火山岩剥蚀充填也使得盆地深度不断变浅, 剖面总体为一个典型的盆地充填序列, 可见从盆地浊积岩相到浅海陆棚沉积的转变。

(3)古地貌: 浊积岩中有大量河流砾石、生物碎屑和植物碎屑, 说明了从陆地或者陆棚物源区到沉积区有非常短的搬运距离, 这和岛弧环境下的狭窄陆棚是相对应的。且由于本研究在剖面中未发现因滑塌形成的角砾岩、崩塌层等相关证据, 认为从陆棚到盆地的砂体输送过程很有可能是与海底水道体系相关, 但是该水道体系并未穿过本剖面(Martinsen et al., 2009)。并且该海底水道体系可能和上游河道直接相连接, 陆源输入的砂体能被快速搬运至深海盆地, 形成浊积扇体(Martinsen et al., 2009; 刘子玉等, 2017; 张青林等, 2022)。

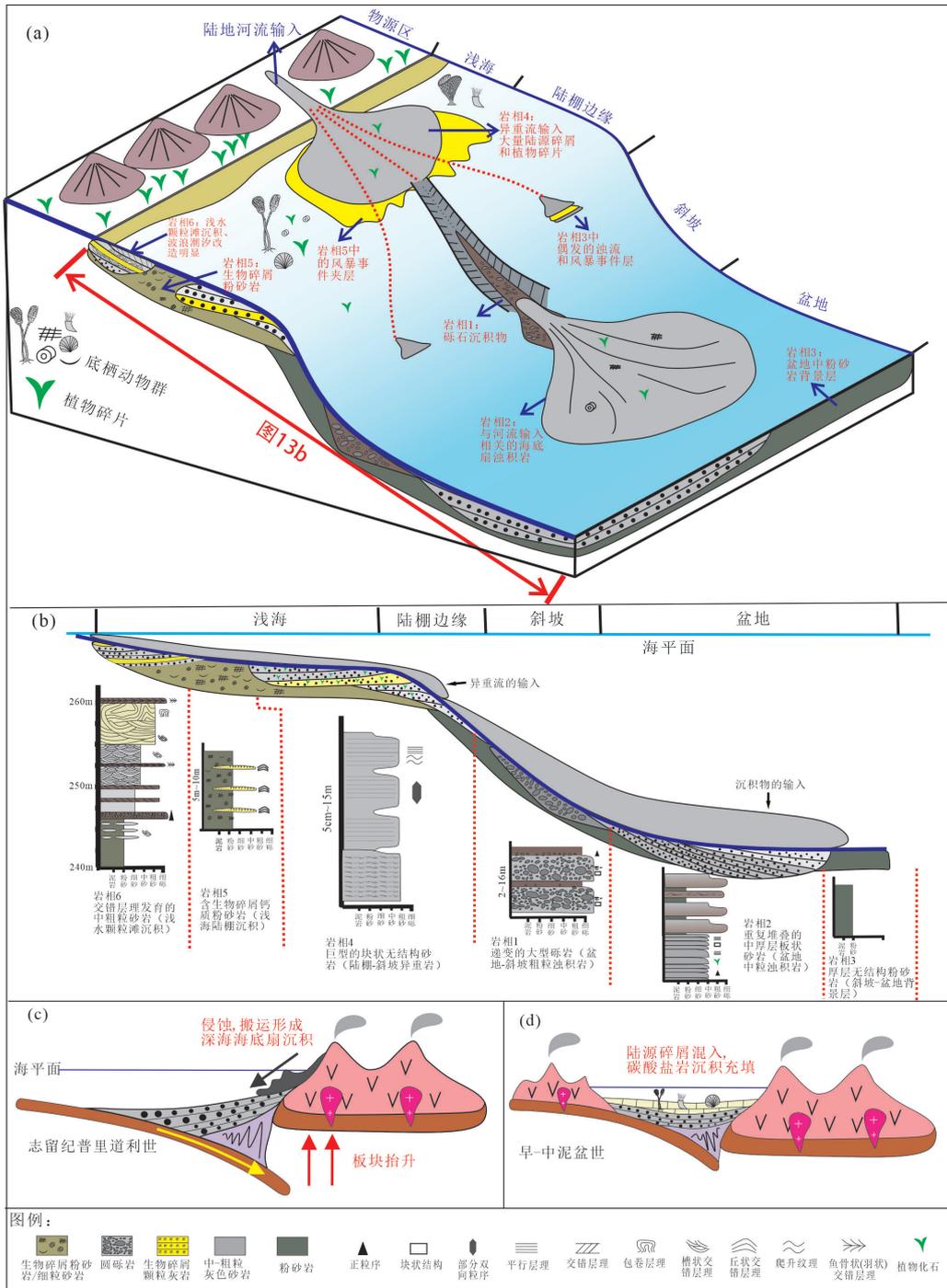
5.4 芒克鲁 II 剖面 S-D 之交的沉积构造演化

在志留纪末期, 准噶尔洋持续向北俯冲, 谢米斯台山—沙尔布尔提山岛弧火山岩非常发育, 该岛弧被认为是博什库尔—成吉斯火山弧的东延(Chen et al., 2015), 并且是中亚造山带的重要组成部分。该岛弧俯冲模式有两种, 分别是南部准噶尔—巴尔喀什洋向北俯冲(Choulet et al., 2013; Chen et al., 2015)或者其北部斋桑洋在志留纪开始向南俯冲(Ping et al., 2012)。同时有学者对谢米斯台山地区的 A 型花岗岩以及伴生岩体进行了研究, 岩体可能形成于志留纪普里道利世—早泥盆世的后碰撞环境, 指示南方以巴尔雷克—玛依勒—唐巴勒蛇绿混杂岩带所代表的火山弧, 以及北方博什库尔—成吉斯火山弧在早志留世相互碰撞, 并且在志留纪普里道利世一起拼贴增生到哈萨克斯坦微大陆(Chen et al., 2015; Chen et al., 2017; Windley et al., 2007; Ren et al., 2017)。尽管该地区岛弧俯冲碰撞的沉积大地构造背景是研究共识, 但是古亚洲洋在西准噶尔地区的闭合时限却存在着很大的争议, 从泥盆纪到石炭纪都有所报道(纵瑞文, 2016)

芒克鲁剖面志留纪—泥盆纪之交发育的盆地

充填序列, 至少可对沙尔布尔提山地区岛弧俯冲碰撞过程的终止时间产生了沉积学约束。在剖面下部即乌吐布拉克组和曼格尔组下部, 岩相 1、岩相

2 和岩相 4 所代表的重力流体系与岛弧火山岩的强烈风化剥蚀密切相关(图 13)。这一过程伴随着板块的抬升, 由此形成的岛弧火山岩受到快速的剥



c. 表示剖面下部岩相 1~4; d. 表示剖面上部早泥盆世曼格尔组 (岩相 5~6) 及上覆地层和和布克赛尔组碳酸盐岩沉积
图 13 a. 芒克鲁 II 剖面沉积模式图; b. 不同沉积环境下的岩相类型图; c-d. 准噶尔谢米斯台山—沙尔布尔提山岛弧碰撞构造沉积演化图 (据 Choulet et al., 2012; 纵瑞文, 2016 修改)

Fig. 13 a. Sedimentary model of the Mangkelu II section; b. Lithic facies type maps in different sedimentary environments; c-d. Tectonic-sedimentary evolution of the Xiemisitai-Shaerbuerti arc collision (modified from Choulet et al., 2012; Zong, 2016)

蚀作用为复理石的沉积提供了大量的物源。形成的碎屑物质被输送至沉积盆地(图 13c)。因此它们是岛弧碰撞背景下“抬升-风化-剥蚀-搬运”的沉积学响应,与上述志留纪-泥盆纪之交火山岛弧的碰撞密不可分。

随着盆地持续被充填,沉积水深继续变浅。在剖面上部即曼格尔组,产生了岩相 5 浅海陆棚相和岩相 6 浅水颗粒滩相,其中碳酸盐岩组分变多,且浅水生物化石如腕足类、珊瑚、苔藓虫等高度繁盛发育(图 8, 图 13a-b, 13d)。同时,该地区泥盆系,如芒克鲁剖面上部曼格尔组以及上覆地层和布克赛尔组陆棚碳酸盐岩大量出现,并且碳酸盐岩组分进一步增多(图 13d; 卫巍等, 2009)。由于碳酸盐岩的形成一般需要较小的陆源输入,比如广为引用的清水碳酸盐岩沉积模式,因此,陆棚碳酸盐岩的出现可能说明了盆地充填过程的停滞。

因此,芒克鲁剖面反映的盆地充填过程,从下部的志留纪复理石浊积岩(反映构造活动活跃)到较为稳定的上部泥盆纪陆棚异重岩、陆棚沉积甚至是陆棚碳酸盐岩沉积,这一岩相的转变对沙尔布尔提山地区志留纪-泥盆纪之交的岛弧俯冲碰撞过程产生了沉积学约束。它们反映了沉积构造背景从活动向稳定的转变,代表了沙尔布尔提山地区志留纪-泥盆纪之交的俯冲碰撞活动可能基本结束,预示着谢米斯台山-沙尔布尔提山岛弧拼贴增生活动间歇性的停止(图 13c-d)。

6 结论

(1)芒克鲁 II 剖面是一套连续的沉积剖面,包含了志留系普里道利统的乌吐布拉克组到下泥盆统的曼格尔组的沉积地层,反映了沉积环境从深海到浅海的变化,体现了盆地充填的过程。剖面共分为 6 个岩相,由下到上分别为:递变的大型砾岩(盆地-斜坡粗粒浊积岩)、重复堆叠的中厚层板状砂岩(盆地中粒浊积岩)、厚层无结构粉砂岩(盆地平原背景层)、巨型的块状无结构砂岩(陆棚-斜坡异重岩)、含生物碎屑钙质粉砂岩(浅海陆棚沉积)、交错层理发育的中-粗粒砂屑灰岩(浅水颗粒滩沉积)。

(2)芒克鲁 II 剖面的砂岩碎屑组分表明:砂岩中长石、岩屑含量非常高,石英含量较低,源区为过渡弧。岩石地球化学研究表明:芒克鲁 II 剖面砂岩的 ICV 与 CIA 值有成熟度低,化学风化程度低

的特点。沉积环境为大洋岛弧与大陆岛弧所构成的板块俯冲的环境,物源区为酸性长英质火山岩与中酸性或基性岩的混合区,指示了谢米斯台山-沙尔布尔提山岛弧火山岩为盆地的沉积提供了丰富的物源。

(3)志留纪-泥盆纪之交,西准噶尔谢米斯台山-沙尔布尔提山地区可能处于俯冲碰撞环境,产生了大量的岛弧火山岩并给盆地的充填提供了大量物质。在本文研究的芒克鲁 II 剖面中,无论是盆地中的复理石建造以及陆棚中的大量异重流砂体,都说明了大量的陆源输入的存在,它们都为岛弧碰撞背景下“抬升-风化-剥蚀-搬运”的沉积学响应。另外,该剖面下部盆地复理石浊积岩向上部陆棚异重岩/陆棚碳酸盐岩的岩相的转变说明了盆地充填过程的暂时性停止,可能代表了沙尔布尔提山地区的俯冲碰撞活动可能基本结束。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)刘士博、刘一龙、马娟、杜晓琦在野外踏勘采样中提供的帮助。感谢福州大学紫金地质与矿业学院王力圆和安晏庆在样品处理过程中提供的帮助,以及詹顺超在碎屑组分统计中的帮助。

References

- Bao W C, Xia G Q, Lu C, et al., 2023. Late Eocene to early Oligocene geochemical characteristics and paleoclimatic significance of the second member of Niubao Formation in the Lunpola Basin, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (3): 580 - 591 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia M R, 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91 (6): 611 - 627.
- Bhatia M R, 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45: 97 - 113.
- Bhatia M R, Crook K, 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 92: 181 - 193.
- Cai C Y, Dou Y W, Edwards D, 1993. New observations on a Pridoli plant assemblage from north Xinjiang, northwest China, with comments on its evolutionary and palaeogeographical significance[J]. *Geological Magazine*, 130 (2): 155 - 170.
- Chen J F, Han B F, Zhang L, et al., 2015. Middle Paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the West Junggar (NW China): Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemitaitai-Saier Mountains[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 90-109.

- Chen Wen, Windley, et al., 2017. Late Silurian-early Devonian adakitic granodiorite, A-type and I-type granites in NW Junggar, NW China: Partial melting of mafic lower crust and implications for slab roll-back[J]. *Gondwana Research*, 43: 55–73.
- Choulet F, Faure M, Cluzel D, et al., 2013. Architecture and evolution of accretionary orogens in the Altaids Collage: The early Paleozoic West Junggar (NW China) [J]. *American Journal of Science*, 312: 1098–1145.
- Cox R, Lowe D R, Cullers R L, 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 2919–2940.
- Dickinson W R, 1979. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 63: 2164–2182.
- Dickinson W R, Valloni R, 1980. Plate settings and provenance of sands in modern ocean basins[J]. *Geology*, 8 (2) : 82–86.
- Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, et al., 1983. Provenance of north American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 94 (2) : 222–235.
- Dickinson W R, 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones[J]. *Provenance of Arenites*, 148: 333–361.
- Dickinson W R, 1988. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins[J]. Springer New York: 3–25.
- Dykstra M, Kneller B, 2009. Lateral accretion in a deep-marine channel complex: Implications for channelized flow processes in turbidity currents[J]. *Sedimentology*, 56: 1411–1432.
- Fan R Y, Gong Y M, 2016. Ichnological constraints of palaeoenvironmental and palaeoclimatological features of the middle Palaeozoic Palaeo-Asian Ocean, evidence from the western Junggar, NW China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 209–228.
- Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M, 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23: 921–924.
- Floyd P A, Leveridge B E, 1987. Tectonic environment of the Devonian grampscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144: 531–542.
- Gong Y M, Zong R W, Wang G C, et al., 2013. Paleozoic stratigraphic regionalization and paleogeographic pattern in western Junggar, Northwestern China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37 (4) : 590–592 (in Chinese with English abstract).
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al., 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72: 393–407.
- Hein F J, Walker R G, 1982. The Cambro - Ordovician Cap Enragé Formation, Québec, Canada: Conglomeratic deposits of a braided submarine channel with terraces[J]. *Sedimentology*, 29 (3) : 309–329.
- Jahn B M, Wu F Y, Chen B, 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[C]//The Fourth Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks. Geological Society of America: 0. 10.1130/0-8137-2350-7.181.
- Johnson K S, et al., 2001. A decadal record of underflows from a coastal river into the deep sea[J]. *Geology*, 29: 1019–1022.
- Liang H, Chen J F, Ma X, et al., 2020. Detrital zircon U - Pb geochronology and provenance of the Hebuke-saier Formation in the Shaerbuerti Mountains, northern West Junggar: Implication for devonian subduction of the Junggar-Balkhash Ocean[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 94: 1410–1427.
- Li J Y, 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological Review*, 50 (3) : 19 (in Chinese with English abstract).
- Li P, Kneller B, Thompson P, et al., 2018. Architectural and facies organisation of slope channel fills: Upper Cretaceous Rosario Formation, Baja California, Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 92: 632–649.
- Liu B, Han B F, Chen J F, et al., 2017. Closure time of the Junggar-Balkhash Ocean: Constraints from late Paleozoic volcano-sedimentary sequences in the Barleik Mountains, West Junggar, NW China[J]. *Tectonics*, 36: 2823–2845.
- Liu Z Y, Lü M, Lu J M, et al., 2017. Deepwater depositional system in the background of narrow shelf in the Ruvuma Basin, eastern Africa[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22 (4) : 27–34 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, 2013. Sedimentary basin geodynamics in China: Advances and frontiers during the first decade of the 21st century[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32 (3) : 290–300 (in Chinese with English abstract).
- Ma A L, Hu X M, 2021. Constraining the obduction process of the Dongqiao ophiolite in the Bangongco-Nujiang suture zone by the sedimentary record[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2) : 163–175 (in Chinese with English abstract).
- Ma J, Yin J, Liu Y, et al., 2023. The latest encrinurid trilobites from the Lower Devonian of Xinjiang, Northwest China[J]. *Geological Magazine*, 160: 1578–1585.
- Martinsen O J, Smme T O, Helland - Hansen W, et al., 2009. Relationships between morphological and sedimentological parameters in source - to - sink systems: a basis for predicting semi - quantitative characteristics in subsurface systems[J]. *Basin Research*, 21 (4) : 361–387.
- McLennan S M, Hemming S R, Mcdaniel D K, et al., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[C]//Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Geological Society of America: 0. 10.1130/SPE284-p21.
- M L Irwin, 1980. General principles of clear water in eperic sea[M]//M M Aslani, et al., translated by Feng Zengzhao. Carbonate Sedimentary Environments, Series 4 of Collections of Translated Papers on Petroleum Geology. Beijing: Science Press: 10–24.

- 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).
- Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, et al., 2003. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 861 – 882.
- Mulder T, Alexander J, 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 48 (2) : 269 – 299.
- Mutti E, Normark W R, 1987. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts[J]. *Marine Clastic Sedimentology*: 1 – 38.
- Nesbitt H W, Young G M, 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715 – 717.
- Ni Y, Lenz A, Chen X, 1998. Pridoli graptolites from northern Xinjiang, Northwest China[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35: 1123 – 1133.
- Ouyang J, Wang S S, Yu M, et al., 2010. Igneous assemblages of different origin in islandarc and their geological significances[J]. *Gansu Geology*, 19 (2) : 18 – 26 (in Chinese with English abstract).
- Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al., 1980. Chemical characteristics of island-arc basalts: Implications for mantle sources[J]. *Chemical Geology*, 30: 227 – 256.
- Ping S, Shen Y, Li X H, et al., 2012. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A geochemical and geochronological approach[J]. *Lithos*, 140–141: 103 – 118.
- Piret Plink-Björklund, Ron J Steel, 2004. Initiation of turbidity currents: Outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites[J]. *Sedimentary Geology*, 165 (1 – 2) : 29 – 52.
- Ren R, Han B, Xu Z, et al., 2014. When Did the Subduction First Initiate in the Southern Paleo-Asian Ocean: New Constraints from a Cambrian Intra-Oceanic Arc System in West Junggar, NW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 388: 222 – 236.
- Ren R, Han B F, Guan S W, et al., 2017. Linking the southern West Junggar Terrane to the Yili Block: Insights from the oldest accretionary complexes in West Junggar, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 159: 279 – 293.
- Roser B P, Korsch R J, 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *Journal of Geology*, 94: 635 – 650.
- Ruan W, Huang J, 2010. Sedimentary architecture characteristics of tidal bars and dunes: An example from Roda sandstone in Pyrenean foreland basin, NE Spain[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28: 118 – 127 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R, Shan G, 2003. Composition of the continental crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1 – 64.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S, 1993. Evolution of the altheid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299 – 307.
- Şengör A M C, Natal'in B A, 1996. Turkic-Type orogeny and its role in the making of the continental crust[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24: 263 – 337.
- Shen P, Pan H D, Xiao W J, et al., 2014. An Ordovician intra-oceanic subduction system influenced by ridge subduction in the West Junggar, Northwest China[J]. *International Geology Review*, 56: 206 – 223.
- Stow D, 1985. Fine-grained sediments in deep-water: An overview of processes and facies models[J]. *Geo-Marine Letters*, 5: 17 – 23.
- Stow D, Smillie Z, 2020. Distinguishing between deep-water sediment facies: Turbidites, contourites and hemipelagites[J]. *Geosciences*, 10: 68.
- Steel E, Simms A R, Steel R, et al., 2018. Hyperpycnal delivery of sand to the continental shelf: Insights from the Jurassic Lajas Formation, Neuquén Basin, Argentina[J]. *Sedimentology*, 65 (6) : 2149 – 2170.
- Sun, McDonough, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1) : 313 – 345.
- Sun F N, Yang R C, Li D Y, 2016. Research progresses on hyperpycnal flow deposits[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34 (3) : 452 – 462 (in Chinese with English abstract).
- Tang H, Hu L, Wei L, et al., 2020. The geochemistry and zircon U-Pb dating for the metamorphic volcanic rocks in Nimu area, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (2) : 104 – 115 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: Its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 94: 57 – 72.
- Van D, Leake B E, 1985. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Earth sciences*, 76: 411 – 449.
- Walker R G, 1978. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps[J]. *AAPG Bulletin*, 62: 239 – 263.
- Wang J, Wang W L, Yu Y L, et al., 2023. Depositional environment of the Dagushi Formation, Mesoproterozoic Xiong'er Group, southern North China Block: Evidence from geochemical analysis[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1 – 20[2025-02-25]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.012> (in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Gong Y M, Zong R W, et al., 2014. New knowledge about the Late Devonian Zhulumute Formation in the Wulankeshun region, Western Junggar[J]. *Journal of Stratigraphy*, 38 (1) : 51 – 59 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z H, Zong R W, Gong Y M, et al., 2015. Late Devonian conodonts and chondrichthyes from Taketai Formation in western Junggar, NW China[J]. *Earth Science*, 40 (3) : 588 – 596 (in Chinese with English abstract).
- Wei W, Pang X Y, Wang Y, et al., 2009. Sediment facies, provenance evolution and their implications of the Lower Devonian to Lower Carboniferous in Shaerbuerti Mountain in North Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (3) : 689 – 698 (in Chinese with English abstract).

- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, et al., 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 31–47.
- Windley B, Xiao W, 2018. Ridge subduction and slab windows in the Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications for the evolution of an accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 61: 73–87.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, et al., 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304 (4): 370–395
- Xiao W J, Kusky T, 2009. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asian and Related Orogenic Belts: Introduction[J]. *Gondwana Research*, 16: 167–169.
- Xiao W, Huang B, Han C, et al., 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 18: 253–273.
- Xu Z, Han B F, Ren R, et al., 2013. Palaeozoic multiphase magmatism at Barleik Mountain, southern West Junggar, Northwest China: Implications for tectonic evolution of the West Junggar[J]. *International Geology Review*, 55: 633–656.
- Xu X Y, Li R S, Chen J L, et al., 2014. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (6): 1521–1534 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z Y, Hu G Y, Xiao H T, et al., 2019. Geochemical characteristics of the Early Cretaceous sandstones from the Tangbai deposit, Tibet: Implications for the tectonic evolution of the southern margin of the Gangdese[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35: 2189–2205.
- Yang G X, Zhu Z, Liu X Y, et al., 2023. Ophiolite in West Junggar: Records of the Subduction-accretion Process in Ancient Ocean. *Acta Geologica Sinica*, 97 (6): 2054–2066 (in Chinese with English abstract).
- Yang W, Wang G C, Zong R W, et al., 2015. Determination of Silurian-Devonian arc-basin pattern in western Junggar and its regional tectonic significance[J]. *Earth Science*, 40 (3): 448–460+503 (in Chinese with English abstract).
- Yoshida M, Yoshiuchi Y, Hoyanagi K, 2009. Occurrence conditions of hyperpycnal flows, and their significance for organic-matter sedimentation in a Holocene estuary, Niigata Plain, Central Japan[J]. *Island Arc*, 18 (2): 320–332.
- Yu Y J, Hu S Y, He D F, 2020. Skeleton Components of Permian-Lower Jurassic Clastic Rocks in NW Margin of Junggar Basin: Tracing to Provenance and Tectonic Settings Evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (5): 1347–1366 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q L, Zhang X T, Li H. B., et al., 2022. Large submarine fan system controlled by narrow continental shelf-faulted continental slope in northern South China Sea[J]. *Earth Science*, 47 (7): 2421–2432 (in Chinese with English abstract).
- Zhao H, Li Y J, Guan B W, et al., 2016. Provenance and tectonic setting of the Mesozoic to Cenozoic sedimentary rocks around the western Bogeda Mountains, Xinjiang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (3): 66–76 (in Chinese with English abstract).
- Zavala C, Gamero H, Arcuri M, 2006. Lofting rhythmites: A diagnostic feature for the recognition of hyperpycnal deposits[J]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 38 (7): 541.
- Zavala C, Arcuri M, Di Meglio M, et al., 2011. A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits, in *Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System*[J]. *AAPG Studies in Geology*, 61: 31–51.
- Zavala C, Arcuri M, Zorzano A, et al., 2024. Deltas: new paradigms[J]. *The Depositional Record*, 10 (5): 600–636.
- Zhang P, Wang G, Shen T, et al., 2021. Paleozoic convergence processes in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Insights from U-Pb dating of detrital zircons from West Junggar, northwestern China[J]. *Geoscience Frontiers*, 12 (2): 531–548.
- Zong R, Wang Z, Jiang T, et al., 2016. Late Devonian radiolarian-bearing siliceous rocks from the Karamay ophiolitic mélange in western Junggar: Implications for the evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 448: 266–278.
- Zong R W, Gong Y M, 2020. Discovery of scyphocrinoid loboliths in western Junggar, Xinjiang, NW China: Implications for scyphocrinoid paleobiogeography and identification of the Silurian-Devonian boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 557: 109914.
- Zong R W, Wang Z H, Fan R Y, et al., 2020. New knowledge on the Hongguleng Formation and Devonian-Carboniferous boundary in western Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (8): 2460–2475 (in Chinese with English abstract).
- Zong R W, 2016. Reconstruction of the Devonian-Carboniferous stratal sequence and paleogeography in the western Junggar orogenic belt and its constraint on the evolution of the Paleo-Asian Ocean[D]. China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包万铨, 夏国清, 路畅, 等, 2023. 西藏伦坡拉盆地牛堡组二段晚始新世—早渐新世地球化学特征与古气候意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 43 (3): 580–591.
- 龚一鸣, 纵瑞文, 王国灿, 等, 2013. 西准噶尔古生代地层区划及古地理格局[J]. *地层学杂志*, 37 (4): 590–592.
- 李锦轶, 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. *地质论评*, 50 (3): 19.
- 刘子玉, 吕明, 卢景美, 等, 2017. 东非鲁伍马盆地窄陆架背景下的深水沉积体系[J]. *海相油气地质*, 22 (4): 27–34.
- 李忠, 2013. 中国的盆地动力学——21世纪开初十年的主要研究进展及前沿[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32 (3): 290–300.
- 马安林, 胡修棉, 2021. 沉积记录约束班公湖—怒江缝合带东巧蛇绿岩的仰冲过程[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (2): 163–175.
- M L Irwin, 1980. 陆表海清水沉积作用的一般原理[M]. 冯增昭, 译. 石油地质学译文集(第四集): 碳酸盐岩沉积环境. 北京: 科学出版社: 10–24.

- 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.
- 欧阳京, 汪双双, 于漫, 等, 2010. 岛弧环境中不同成因的火成岩组合及其地质意义[J]. 甘肃地质, 19(2): 18-26.
- 阮伟, 黄洁, 2010. 潮流沙脊和沙波沉积结构特征——以西班牙东北部比利牛斯前陆盆地 Roda 砂岩组为例[J]. 沉积学报, 28: 118-127.
- 孙福宁, 杨仁超, 李冬月, 2016. 异重流沉积研究进展[J]. 沉积学报, 34(3): 452-462.
- 唐华, 胡林, 魏龙, 等, 2020. 西藏尼木地区变质火山岩的地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40(2): 104-115.
- 王俊, 江武龙, 余雅兰, 等, 2023. 华北克拉通南缘中元古界熊耳群大古石组沉积环境——来自地球化学的证据[J/OL]. 沉积学报: 1-20[2025-02-25]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.012>.
- 王志宏, 龚一鸣, 纵瑞文, 等, 2014. 西准噶尔乌兰柯顺地区晚泥盆世朱鲁木特组地层新知[J]. 地层学杂志, 38(1): 51-59.
- 王志宏, 纵瑞文, 龚一鸣, 等, 2015. 晚泥盆世牙形刺及软骨鱼类在西准噶尔塔克台组中的发现及意义[J]. 地球科学, 40(3): 588-596.
- 卫巍, 庞绪勇, 王宇, 等, 2009. 北疆沙尔布尔提山地区早泥盆-早石炭世沉积相、物源演变及其意义[J]. 岩石学报, 25(3): 689-698.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等, 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. 岩石学报, 30(6): 1521-1534.
- 杨高学, 朱钊, 刘晓宇, 等, 2023. 西准噶尔蛇绿岩: 古大洋俯冲增生过程的记录[J]. 地质学报, 97(6): 2054-2066.
- 杨维, 王国灿, 纵瑞文, 等, 2015. 西准噶尔志留纪-泥盆纪弧盆格局的确定及其区域构造演化意义[J]. 地球科学, 40(3): 448-460+503.
- 蔚远江, 胡素云, 何登发, 2020. 准噶尔盆地西北缘二叠系-下侏罗统碎屑岩骨架组分及其物源与构造背景演化示踪[J]. 地质学报, 94(5): 1347-1366.
- 张青林, 张向涛, 李洪博, 等, 2022. 南海北部狭窄陆架-断裂陆坡控制的大型深水扇体系[J]. 地球科学, 47(7): 2421-2432.
- 赵恒, 李艳杰, 关宝文, 等, 2016. 新疆西博格达山周缘地区中新生代沉积岩源区和构造背景[J]. 沉积与特提斯地质, 36(3): 66-76.
- 纵瑞文, 王志宏, 范若颖, 等, 2020. 新疆西准噶尔洪古勒楞组与泥盆系-石炭系界线新知[J]. 地质学报, 94(8): 2460-2475.
- 纵瑞文, 2016. 西准噶尔造山带泥盆纪-石炭纪地层系统与古地理重建及其对古亚洲洋演化的约束[D]. 中国地质大学(武汉).