

羌塘盆地毕洛错含油页岩地层构造变形特征及时代新认识

赵珍^{1*}, 张莉莉¹, 王茜¹, 杨易卓², 田涛³

1. 中国地质科学院, 北京 100037

2. 中国石油大学(北京), 北京 102249

3. 陕西省煤田地质集团有限公司自然资源部煤炭资源勘查与综合利用
重点实验室, 陕西西安 710021

摘要: 受多期逆冲、伸展构造运动及泥页岩、膏岩等塑性变形影响, 羌塘盆地毕洛错含油页岩地层(简称毕洛错地层)变形极为复杂, 加之古生物化石时代和同位素年代学结果存在争议, 严重制约了对地层岩性组合与时代归属的认识。针对毕洛错地层复杂的构造变形, 本文开展了详细的构造观测与剖面测量, 并根据逆冲-褶皱变形特征开展地层追索与对比, 将毕洛错地层自下而上分出 3 段 7 类岩性组合。对下段砂岩与中段玄武岩分别开展锆石 U-Pb 同位素测试、锆石结构与成因分析, 获得下段与中段最大沉积年龄为分别为 166 Ma 和 154 Ma。综合区域背景, 认为毕洛错地层时代至少为中侏罗世巴通期至晚侏罗世提塘期, 顶部可能为早白垩世贝里阿斯期。毕洛错含油页岩地层时代的确定, 为羌塘盆地油气勘探、区域沉积构造演化和大洋缺氧等问题的研究提供了新依据。

关键词: 羌塘盆地; 毕洛错油页岩; 构造变形; 岩性组合; 地层时代

中图分类号: P548

收稿日期: 2025-03-08

Tectonic deformation and new viewpoint on the age of the Biluoco Oil Shale Stratum in the Qiangtang Basin

Zhao Zhen^{1*}, Zhang Lili¹, Wang Qian¹, Yang Yizhuo², Tian Tao³

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

基金项目: 中国地质调查三级项目 (No.DD20221855、DD20230315)、陕西省 2023 年创新能力支撑计划 (No. 2023KJXX-122)、自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室 (SMDZ(KY)-2020-004、SMDZ-2023ZD-13)、2024 年度重大科研项目 (No. SMDZ-ZD2024-1)

作者简介: 赵珍(1987-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事羌塘盆地逆冲推覆构造与基础地质研究. ORCID: 0000-0002-0058-5307.

E-mail: zhaozhen03@126.com

3. Shaanxi Coal Geology Group CO., LTD. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an, 710021, China

Abstract: Influenced by multi-phase thrusting, extensional tectonic movements, and the plastic deformation of mudstone, shale, and gypsum, the deformation of the Biluoco oil shale stratum (BLS) in the Qiangtang Basin is extremely complex. Additionally, controversies surrounding paleontological fossil evidence and isotopic geochronology have severely constrained the understanding of the lithological assemblages and their temporal attribution. In response to the intricate structural deformation of BLS, this study conducted detailed structural observations and profile measurements. Based on the thrust-fold system, the stratum was traced and correlated, dividing into three segments with seven types of lithological assemblages from bottom to top. Zircon U-Pb isotopic testing, along with zircon structure and genetic analysis, was performed on the sandstone of the lower segment and the basalt of the middle segment, yielding maximum depositional ages of 166 Ma and 154 Ma, respectively. Integrating regional context, it is concluded that the age of BLS ranges at least from the Middle Jurassic Bathonian to the Late Jurassic Tithonian, with the top possibly extending to the Early Cretaceous Berriasian. The determination of the age for BLS provides new insights for hydrocarbon exploration in the Qiangtang Basin, as well as for studies on sedimentary tectonic evolution and oceanic anoxic events.

Key words: Qiangtang Basin; Biluoco oil shale; Structural deformation; Lithologic assemblage; Stratigraphic age

1 毕洛错地区含油页岩地层时代存在问题与争议

羌塘盆地中生代沉积地层中发育多层有机质含量较高的油页岩, 主要分布在毕洛错、西长梁、胜利河、长蛇山、托纳木等地 (图 1)。其中, 毕洛错油页岩是目前南羌塘盆地唯一发现的地表露头, 也是羌塘盆地油气勘探、大洋缺氧事件的热点研究对象之一 (Fu et al., 2017, 2020; 吴珍汉等, 2019a; 沈安江等, 2023)。

前人对毕洛错含油页岩地层（以下简称毕洛错地层, Biluoco Stratum, BLS）开展了大量的古生物化石鉴定与同位素测试等工作，但地层时代依然存在较大争议（伊海生等, 2003; Fu et al., 2016; Cheng et al., 2021; Yin et al., 2021, 2024; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024），影响了对羌塘盆地油气勘探、大洋缺氧事件以及区域沉积、构造演化等方面的认识。

1.1 地层时代划分历史

毕洛错地层发育较为丰富的生物化石，其中双壳类化石具有侏罗纪特征种属的组合面貌（伊海生等, 2003），整体应为侏罗纪，非早期认为的早三叠世中晚期（吴瑞忠, 1986）。双壳、腕足、鱼类等指示毕洛错地层可能属于巴通期布曲组（苏铁牛等, 2007）、巴通晚期-卡洛夫早期夏里组（赵政璋等, 2001）。菊石化石则多指示为早侏罗世土阿辛期（伊海生等, 2003; 王永胜和郑春子, 2008）。除生物化石外，前人获得油页岩下部玄武岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 201 Ma，结合油页岩碎屑锆石 U-Pb 测试结果（184 Ma; Fu et al., 2016），将地层置于下侏罗统曲色组（J₁q），这也成为近年来的主流观点。

1.2 生物化石时代

然而，以上菊石化石并非全部取自油页岩层位，而是位于油页岩北西约 1.5 km 处的灰岩、泥灰岩中，明显不同于油页岩处岩性组合；且文中未提供菊石点与油页岩的延伸与接触证据（图 2a, 1#~3#化石点；伊海生等, 2003; 王永胜和郑春子, 2008; Yin et al., 2021）。不仅如此，作为毕洛错地区菊石鉴定者的阴家润教授，近年来复检了菊石，将时代由早侏罗土托阿尔期修订为中侏罗晚巴柔至中卡洛夫期（Yin et al., 2021），与 2#化石点新开展的化石鉴定时代相近（Ma et al., 2017）。Zhang et al. (2024) 在油页岩层位上部新发现菊石化石（图 2a, 4#化石点），鉴定出 2 种菊石种属/科，时代为早侏罗托阿尔期，但 1 种被质疑鉴定种属错误，实际更接近巴柔阶顶至巴通阶底时代，1 种仅鉴定到科，未明确属种，对地层年代的判定意义有限（Yin et al., 2024）。

另有学者根据钙质超微化石（颗石藻）与孢粉组合认为毕洛错地层时代跨度较大，中上部可能为巴柔-巴通，甚至可能进入早卡洛期，中下部油页岩可能为下侏罗统曲色组-色哇组（Chen et al., 2019, 2023; Xia et al., 2021），进一步加剧了

地层时代的争议。

1.3 同位素年龄

基性岩锆石来源复杂,必须结合锆石内部结构特征和微量元素特征等来综合区分不同成因类型的锆石,才能合理解释锆石 U-Pb 年龄及其指示的地质意义 (Corfu et al., 2003; Wu and Zheng, 2004; 宫江华等, 2020; 杨飞等, 2024)。Fu et al. (2016) 虽然获得了玄武岩锆石 U-Pb 谐和年龄 (201 Ma), 但未进行详细的锆石形态和结构分析, 根据描述推测该组谐和年龄对应的锆石为中酸性岩浆锆石, 201 Ma 可能代表捕获围岩年龄。Cheng et al. (2021) 对玄武岩开展了详细的锆石形态与成因研究, 认为最年轻的锆石 U-Pb 谐和年龄 (154 Ma) 代表捕获锆石年龄, 玄武岩喷发时代不早于 154 Ma。此外, 前人虽然获得玄武岩上部碎屑锆石 184 Ma 的谐和年龄, 但文中未提供测试数据 (Fu et al., 2016), 不能明确 184 Ma 为碎屑锆石最年轻年龄, 能否代表地层最大沉积时代存疑。

近年来学者对经典的毕洛错油页岩剖面中的灰岩夹层开展了方解石原位 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试, 获得了 164~166 Ma 和 181 Ma 的年龄, 分别被划归为中侏罗统夏里组和下侏罗统曲色组 (Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024)。由于方解石 U-Pb 测试方法起步较晚, 依然存在尚未解决的关键技术问题, 特别是低的 U 含量、差异小的 U/Pb 比值、非同期方解石, 甚至测试仪器与标样不同, 都可能引起不同的结果 (Lu et al., 2023), 导致了对毕洛错地层时代的不同认识。

1.4 区域地层对比

“早侏罗世”毕洛错地层岩性组合极为特殊, 产出局限。很多学者在剔除石膏、油页岩等特殊岩性后, 认为其余暗色岩系可以与同一地层大区 (南羌塘盆地南部) 的下侏罗统对比 (图 1b; 伊海生等, 2003; 王永胜和郑春子, 2008)。但是南羌塘下侏罗统分布广泛、产出稳定, 与毕洛错地层在岩性组合、TOC 含量、沉积环境等方面存在明显不同。

另有观点认为毕洛错油页岩为来自北羌塘盆地的远距离逆冲推覆体, 与北羌塘半岛湖 QK5 井泥页岩、西长梁胜利河-长蛇山泥页岩、油页岩对比良好 (图 1b, 吴珍汉等, 2019a), 但并没有提供可靠的年代学依据。此外, 化石复检后, QK5 井黑色泥岩、泥页岩的生物地层时代由托阿尔期修订为中卡洛夫期 (Yin et

al., 2021); 西长梁–胜利河–长蛇山油页岩地层时代争议更大, 包括白垩纪 (王剑等, 2007; Fu et al., 2020)、中侏罗世甚至早–中侏罗世 (吴珍汉等, 2021; 沈安江等, 2023), 故开展南、北羌塘大区的油页岩地层对比需谨慎。

1.5 存在问题

毕洛错地层含有较厚的石膏、泥岩、泥页岩等, 常发育塑性变形及盐构造, 加上燕山期–喜山期南北向挤压以及中新世–第四纪南北向、北东向伸展构造事件影响, 虽分布面积小但变形复杂, 宏观构造格变形特征和地层分布认识不清, 导致前人多围绕单一剖面开展年代学和地层学研究, 缺少系统的岩性组合对比。古生物化石鉴定结果的争议以及同位素结果代表的地质意义解释不足进一步加剧了地层时代的争议。

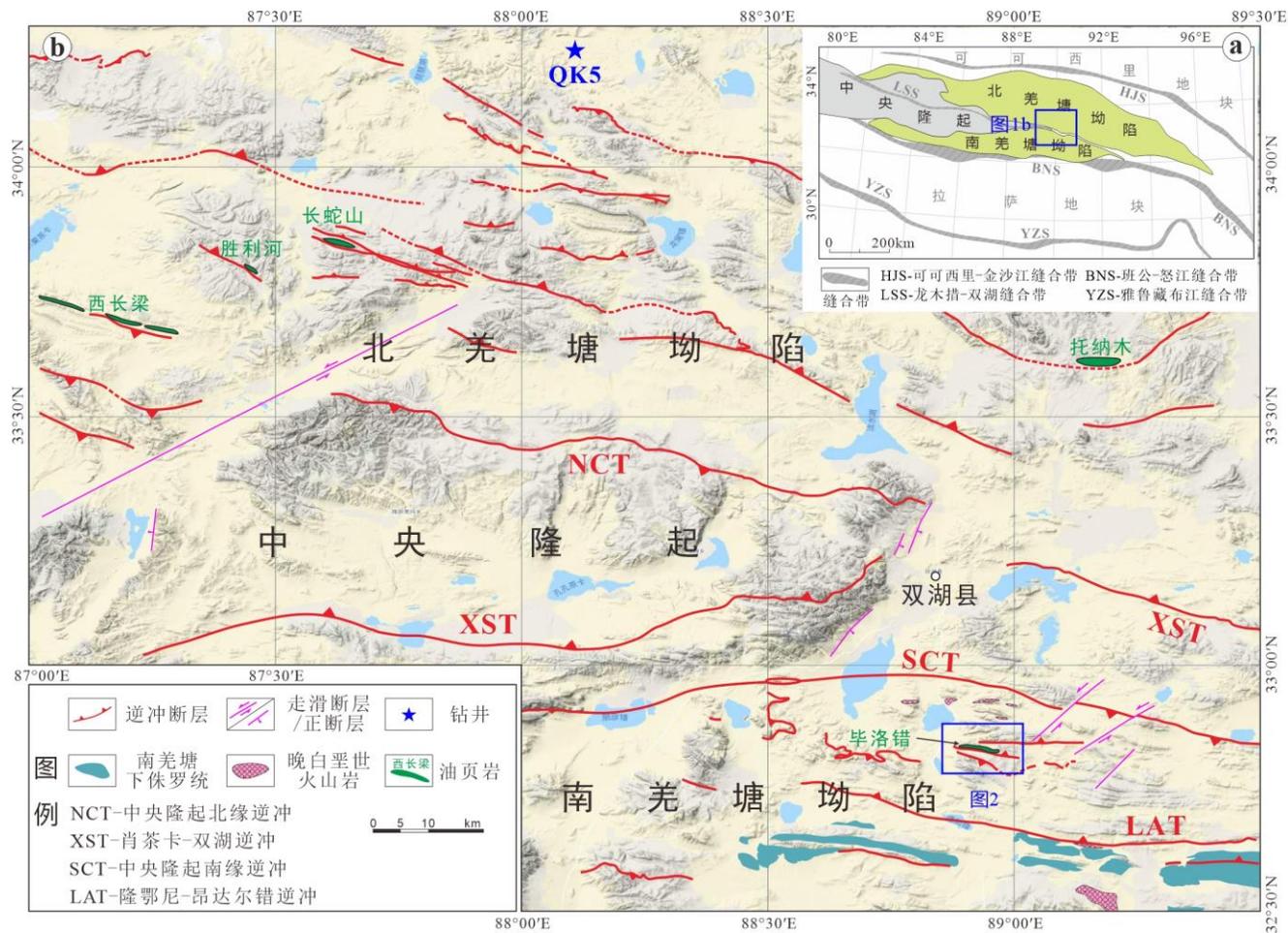
基于以上问题, 本文通过详细的构造观测与剖面测量, 从构造变形角度开展地层追索与对比, 落实岩性组合及空间分布。此外, 对玄武岩与关键层位碎屑岩开展锆石 U-Pb 同位素测试, 通过详细的锆石结构与成因研究, 明确可信的锆石年龄及其地质意义, 从而综合约束地层时代。

2 地质背景

羌塘盆地作为羌塘地块的核心部分, 夹持于班公–怒江缝合带和可可西里–金沙江缝合带之间, 南、北分别毗邻拉萨地块和可可西里地块。沿龙木错–双湖缝合带近东西向发育由古生代岩石地层单元组成的中央隆起 (张克信等, 2025), 从地貌上将羌塘盆地进一步划分为南、北羌塘坳陷 (图 1a)。晚三叠世卡尼期, 随着龙木错–双湖古大洋的消亡, 南、北羌塘地块发生碰撞并拼合为统一整体, 中央隆起经历剥蚀, 北羌塘开始发育早–中侏罗雀莫错组 (J_{1-2q}), 南羌塘发育早–中侏罗世陆棚相曲色组 (J_{1q}) 与色哇组 (J_{2s})。中–晚侏罗世, 羌塘盆地整体进入海相环境, 开始沉积莎巧木组 (J_{2sq})、布曲组 (J_{2b})、夏里组 (J_{2x}) 和索瓦组 (J_{3s})。晚侏罗世提塘期–早白垩世, 盆地南部与北东部迅速隆升成陆, 北羌塘残留以白龙冰河组 (J_3K_{1b}) 和雪山组 (J_3K_{1x}) 为代表的海陆过渡相地层 (图 1c), 至早白垩世贝里阿斯期末, 羌塘盆地结束中生代海相沉积 (王剑等, 2020 及其引文)。

晚白垩世–古近纪, 受中–新特提斯洋的闭合与印度–欧亚板块的碰撞的影响,

羌塘地块快速抬升并发育大规模逆冲推覆构造体系，不仅强烈改造了中生代含油气系统，也控制了晚白垩世阿布山组（ K_2a ）和古近纪陆相沉积（E）的发育，普遍被中新世湖相沉积角度不整合覆盖（图 1b；吴珍汉等, 2019b；赵珍等, 2019）。中新世以来，区域构造应力状态发生重大转变（高扬等, 2024），羌塘盆地发育大量 NE、NW 走向的走滑-伸展断层，最终形成现今构造格局。



纪	世	期	时间 Ma	地层单元			
				北羌塘盆地		南羌塘盆地	
古近纪-新近纪			66	E-N	E-N	E-N	E-N
				阿布山组	阿布山组	阿布山组	阿布山组
晚白垩世			100.5				
早白垩世			143.1	白龙冰河组			
				雪山组			
晚侏罗世			149.2				
基莫里			154.8	索瓦组			索瓦组
牛津			161.5				
卡洛			165.3	夏里组	夏里组	毕洛错组	夏里组
中侏罗世			168.2	布曲组	布曲组	布曲组	布曲组
					莎巧木组		
巴柔			170.9				
阿林			174.7	色哇组	色哇组	色哇组	色哇组
托阿尔			184.2	雀莫错组			
早侏罗世							
地层划分方案				(1)	(2) (未到底)	(3)	(4)

图 1 羌塘盆地构造位置 (a) 油页岩与主断裂分布 (b) 和早侏罗-新近纪地层单元划分 (c)

Fig.1 Simplified geological map (a), distribution of oil shale and faults (b) and the Early Jurassic to Neogene stratigraphic framework (c) of Qiangtang basin

图 1a 中断层与岩浆岩为实际观测; 图 1b 中 (1) 和 (4) 据王剑等, 2020 修改, (2) 据王永胜等, 2012 修改, (3) 据 Ma et al., 2017 修改

3 毕洛错地区构造变形特征

毕洛错地层产于南羌塘盆地毕洛错湖东南，地貌上三面环山，中部发育冲沟及季节性河流（图 2a）。地层从沟口开始出露，向东延续到巴欧纳，东西长约 10 km；北部至索日卡南坡，南部至大规模红层北缘，南北宽约 4 km，整体被晚白垩世-古近纪陆相砾岩角度不整合覆盖。

区内地层及构造形迹以东西走向为主，自北向南主要发育索日卡逆冲（SRT）、毕洛错逆冲（BLT）和董布拉逆冲（DBT）（图 2，图 3a）。索日卡逆冲将 J_2b 灰岩逆冲于 BLS 与 K_{2a} 之上，断层上盘断续出露含油白云岩（张莉莉等，2024），灰岩内部发育断坪-断坡，指示由北向南运动（图 3a, p）；断层下盘 K_{2a} 砾岩倾角高达 $60\sim 70^\circ$ （图 3a）。董布拉逆冲导致南侧董布拉侏罗系逆冲于古近纪砾岩之上，断层上盘早期褶皱体系被断层改造（图 3m）。毕洛错逆冲控制了 BLS 南界，将厚层石膏、灰岩、油页岩等逆冲于古近纪含砾砂岩、砾岩之上（图 3o），上盘石膏发育次级断面及拖曳褶曲，指示由北向南运动（图 3n）。此外，毕洛错逆冲可能同时受到由南向北的挤压作用，断层破碎带中砾岩呈叠瓦状分布，指示南-北向共轭挤压（图 3s），也导致 E 砾岩进一步逆冲于 BLS 之上，表现出类似角度不整合的高地貌现象（图 3o）。巴欧纳山顶古近纪砂岩夹层（图 3q, r）以及巴欧纳向斜核部灰岩内部（图 3w）均可见由北向南挤压的双重叠瓦状构造。

受对冲作用影响，区内发育宽缓褶皱。毕洛错逆冲和董布拉逆冲的共同挤压导致 K_2 -E 地层发育多组等斜褶皱（图 2a, b；图 3a, c, t, u）；研究区北部发育较大规模的毕洛错向斜，西段核部由 BLS 和 K_{2a} 砾岩组成，两翼产状较为稳定，主体在 $40\sim 55^\circ$ 之间，可见向斜转折端，核部倾角 20° ；中段受石膏影响行迹不清（图 2a）；东段核部由 E、 K_{2a} 砾以及 BLS 组成，核部 E 砾岩产状较为平缓，局部近水平。毕洛错向斜整体为宽缓的等斜褶皱。研究区南东发育巴欧纳褶皱体系，巴欧纳背斜两翼倾角以 $35\sim 60^\circ$ 为主，整体向西倾伏（图 3t），转折端发育小型正断层，导致局部产状突变。受 G07 东侧石膏影响，背斜南翼含油页岩层（G07）地层发生倒转，与北翼含油页岩地层（PM03）组成同斜褶皱（图 2c, 图 3d）。巴欧纳向斜向东倾伏，核部灰岩内部发育大量的走滑、正断层，导致灰岩能干层抬升并保留至今，呈高地貌产出（G0 处，图 3x）。该期断层规模不大，在 G06 南

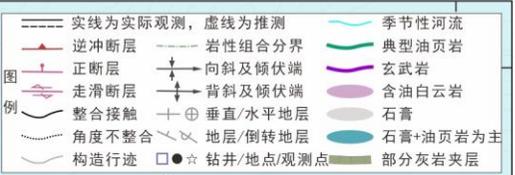
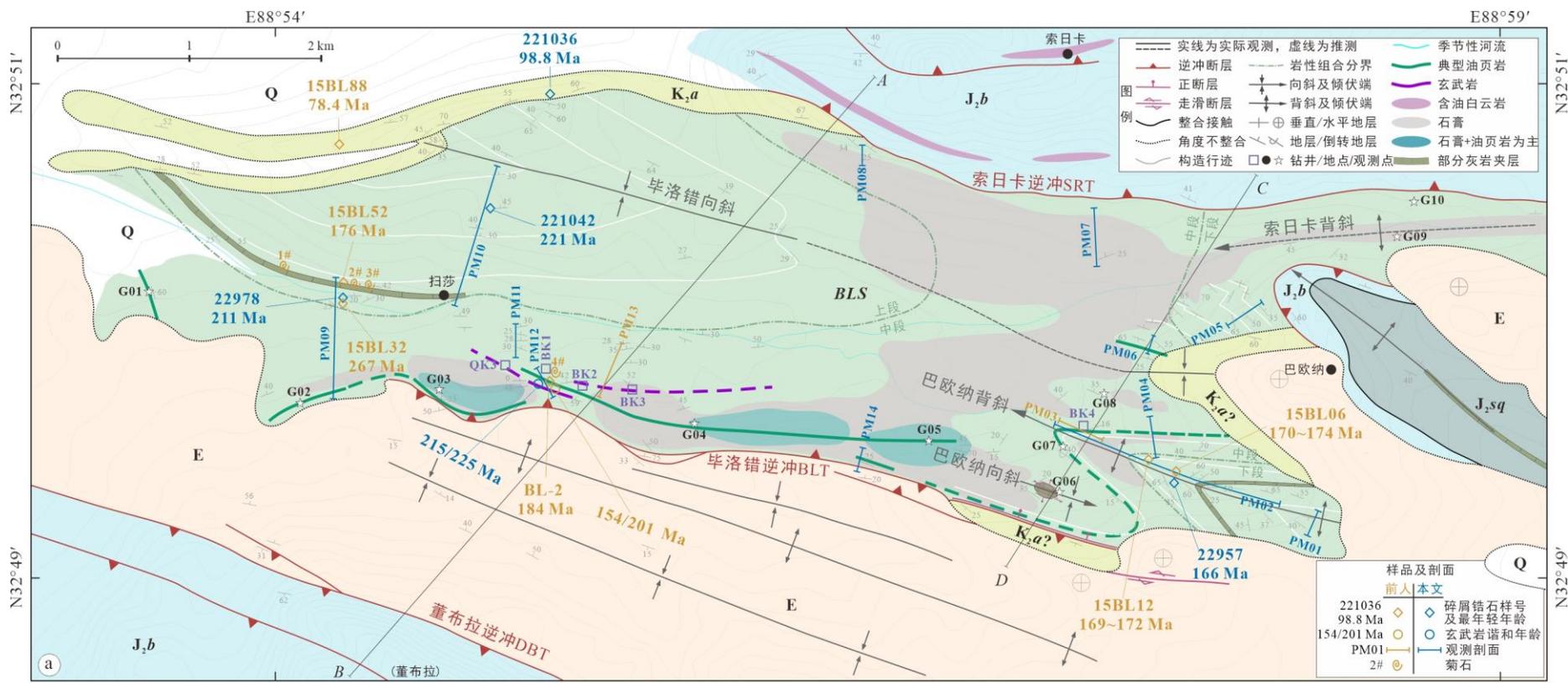
侧可见 K_{2a} 砾岩残留断层三角面，山顶 E 砾岩发育左行走滑（图 3c）。

研究区北东、巴欧纳北部河谷发育索日卡背斜（图 2a, c），两翼倾角近中等。南翼见少量灰岩夹石膏露头（G09，图 3k），北翼为灰绿色砂岩夹薄层灰岩（G10，图 3l），覆盖较为严重。受 PM07 一带大规模石膏变形影响，东部的褶皱形态被破坏，推测向西倾伏。特别指出的是巴欧纳高处的灰岩并非远观显示的巨厚特征，是与中侏罗莎巧木组碎屑岩地层共同组成的大型背斜，因产状陡立且恰好位于转折端，从而形成视觉误差，灰岩真厚度不超过 20 m（图 3v），背斜核部莎巧木组灰岩夹层近直立产出。

整体而言，研究区北部为索日卡逆冲与毕洛错逆冲组成的自北向南运动的叠瓦状逆冲体系，南部为由南向北运动的董布拉逆冲，导致 BLS、 K_{2a} 和 E 地层发育等斜直立或等斜倾伏褶皱，主体为对冲断层与宽缓褶皱组合样式（图 2b, c）。结合前人对区域逆冲构造活动时代以及区内断层下盘砾岩的时代的研究成果，毕洛错逆冲活动时代应该晚于晚白垩世，以古近纪为主。

4 毕洛错地层岩性组合

毕洛错地区构造变形改造了毕洛错地层的空间分布和产出，而石膏等盐构造进一步加剧了局部地区的地层变形，导致地层对比难度大。根据上文构造变形特征，本文通过剖面测量与地层追索，结合钻井及前人研究成果，落实毕洛错地层的空间分布和产出特征，为后续地层时代对比提供依据。最终将毕洛错地层分为下、中、上 3 段，共包括 7 类岩性组合（图 2，图 4a）。



样品及剖面	
前人	本文
221036	碎屑锆石样号
98.8 Ma	及最年轻年龄
154/201 Ma	玄武岩谱和年龄
PM01	观测剖面
2#	菊石

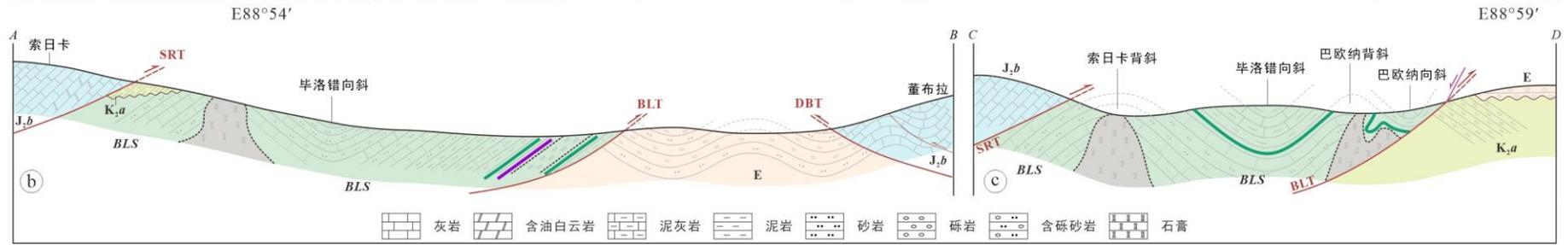
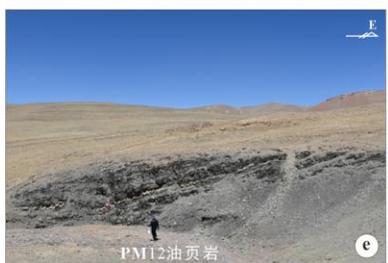
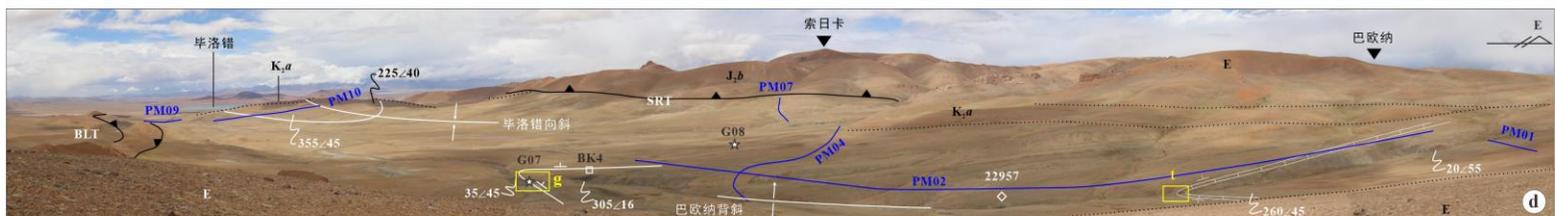
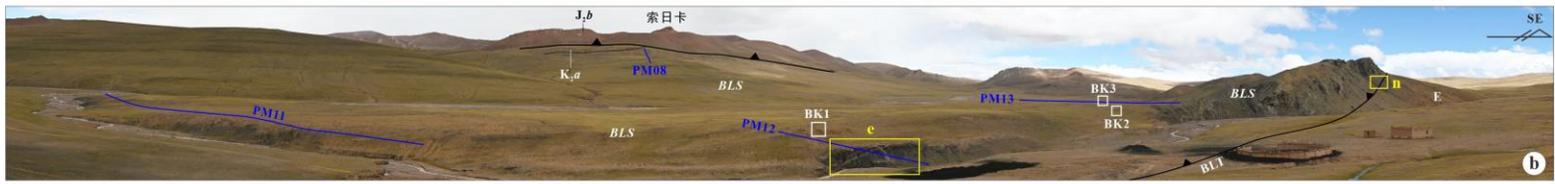
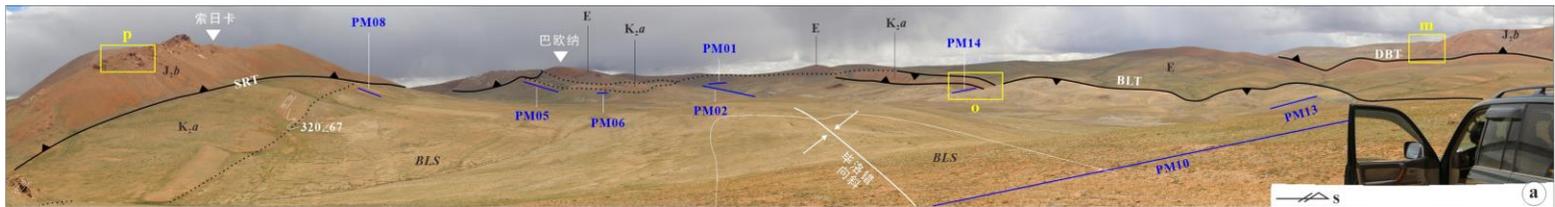


图 2 毕洛错地区地质图 (a) 和构造地质剖面图 (b, c)

Fig.2 Geological Map (a) and structural profiles (b, c) of the Biluoco area

图 2a 中 1#化石点引自伊海生等, 2003, 王永胜等, 2007. 由于 2 者相近, 暂时作为同一点位 (可能位置有偏差); 2#化石点引自 Ma et al., 2017; 3#化石点为本项目采集点, 同时也在 2 号点采集到菊石; 4#化石点引自 Zhang et al., 2024. 碎屑锆石样品 15BL32、15BL52、15BL88、15BL06 U-Pb 年龄引自 Ma et al., 2017, 样品 BL-2 锆石 U-Pb 年龄引自 Fu et al., 2016; 玄武岩锆石 U-Pb 多组谐和年龄引自 Fu et al., 2016, Cheng et al., 2021; 其他年龄均为本文测试



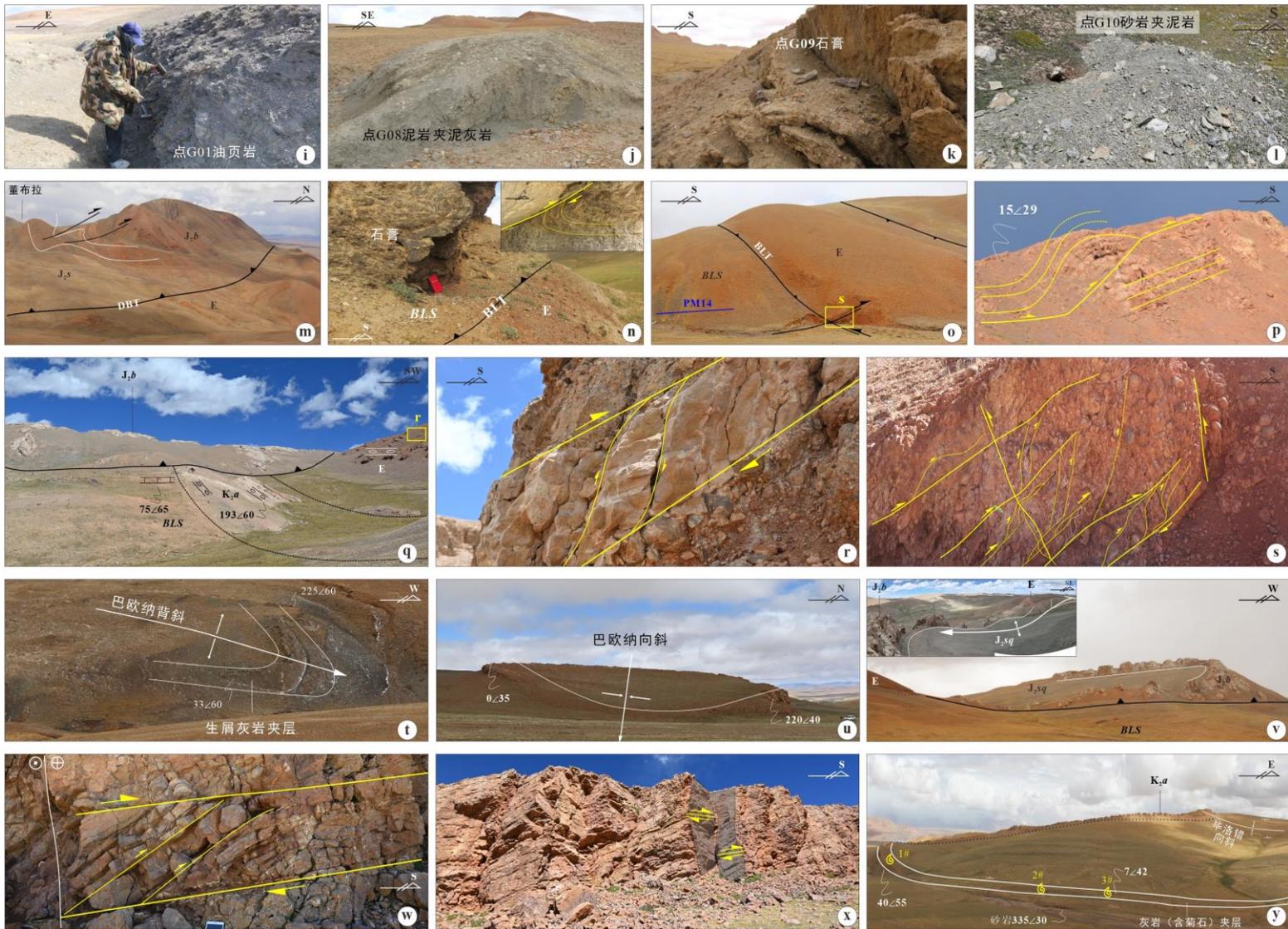


图 3 毕洛错地区构造变形特征

Fig.3 The structural deformation characteristics of the Biluoco area

a) 索日卡-董布拉宏观构造变形特征（镜向东）；b) 索日卡-毕洛错逆冲断层宏观构造变形特征（镜向北东）；c) 巴欧那一带逆冲断层和褶皱变形特征（镜向东）；d) 毕洛错地区东西向宏观构造变形特征（镜向北西）；e) PM12 厚层油页岩宏观特征；f) PM03 厚层油页岩宏观特征；g) 观测点 G07 处厚层油页岩特征；h) PM14 厚层油页岩宏观特征；i) 观测点 G01 处厚层油页岩特征；j) 观测点 G08 泥岩夹泥灰岩特征；k) 观测点 G09 石膏夹灰岩；l) 观测点 G10 砂岩夹泥灰岩；m) 董布拉逆冲断层；n) 毕洛错逆冲断层及拖曳褶皱；o) PM14 处毕洛错断层主断面；p) 索日卡逆冲断层上盘灰岩发育断坪-断坪；q) 巴欧纳 2 期砾岩及逆冲断层现象；r) 巴欧纳山顶 E 内部小型双重叠瓦状逆冲断层；s) 毕洛错逆冲断层破碎带，砾岩呈叠瓦状产出；t) 巴欧纳背斜核部转折端；u) 巴欧纳向斜核部；v) 巴欧纳山顶灰岩、碎屑岩组成背斜；w) 巴欧纳向斜核部灰岩内部发育双重叠瓦状逆冲断层；x) 巴欧纳向斜核部灰岩发育多组走滑构造；y) 灰岩夹层中的菊石化石点及毕洛错向斜

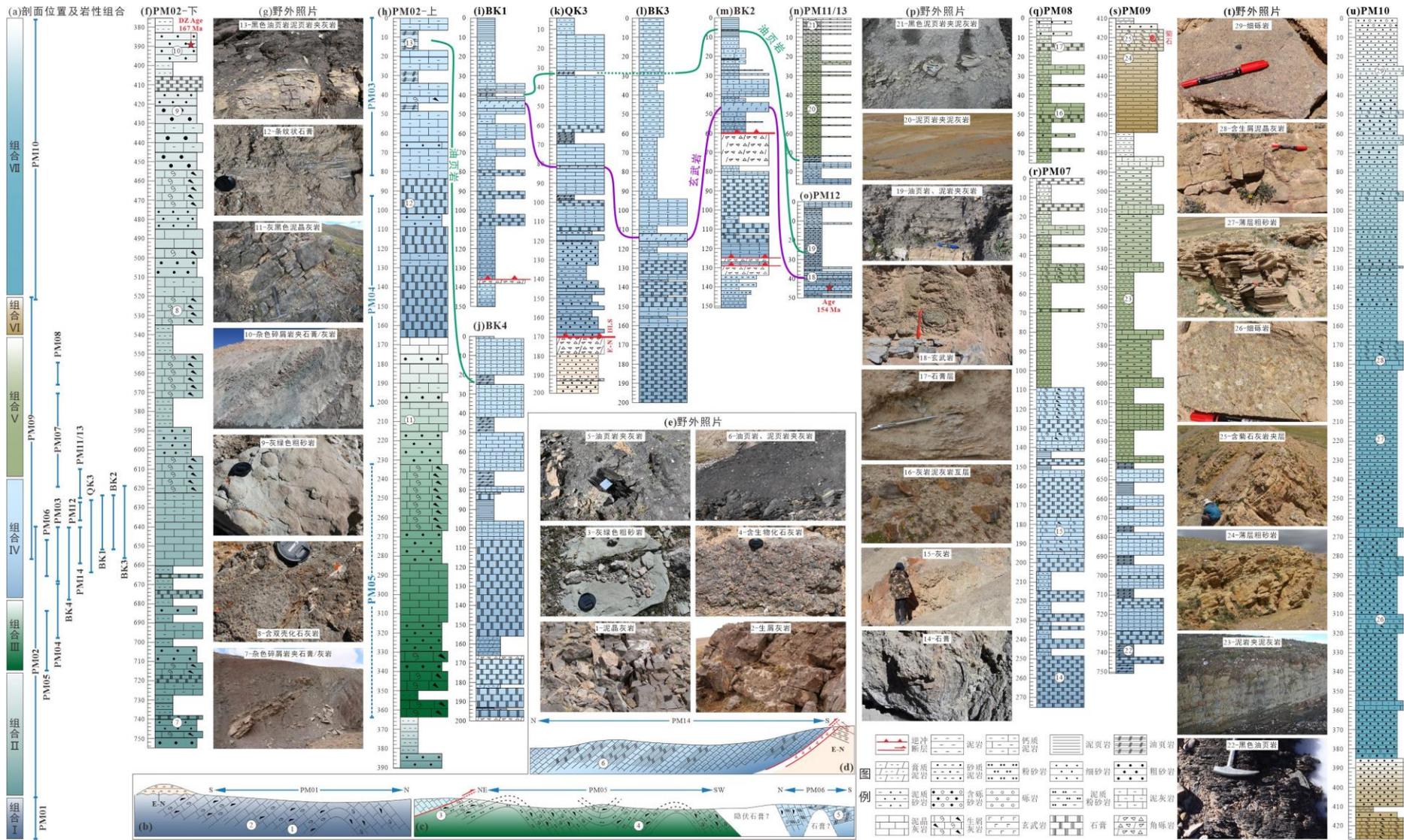


图 4 毕洛错地层岩性组合与剖面特征

Fig.4 Comparison of lithologic assemblages and profiles of the BLS

i, j, l, m 据沈安江等（2023）修改; k 为本文赴实物中心重新编录; o, n 为本文实测并结合 Xia et al. (2021) 修编; 其余为本文实测

4.1 下段：杂色碎屑岩、灰岩为主，夹少量石膏

BLS 下段主要位于研究区南东部和巴欧纳山北侧，为大套杂色碎屑岩、灰黑色泥晶灰岩、生屑灰岩夹灰绿色碎屑岩，含石膏。具体包括以下 3 类组合：

4.1.1 岩性组合 I：大套灰岩

组合 I 以 PM01 为代表，主要产于巴欧纳背斜底部，为大套灰黑色中薄层泥晶灰岩、生屑灰岩、浅淡红色薄层生屑灰岩，可见双壳化石（图 4b, 4e-1~2）。PM01 未见底，与上部地层（PM02）连续产出。由于野外未见碎屑岩露头，与上部岩性组合略有不同，暂时划分为单独的岩性组合，不作为岩性组合 II 中的夹层。

4.1.2 岩性组合 II：杂色碎屑岩夹石膏、灰岩

组合 II 以 PM02 下部为代表，以杂色碎屑岩为主，夹灰岩、石膏等，底部为大套灰绿色、紫红色粉砂岩、泥岩、泥质粉砂岩（图 4f, 4g-7）；向上出现灰岩、生屑灰岩夹碎屑岩，且灰岩中可见数层密集产出的小型双壳化石（图 4f, 4g-8），随后又发育杂色碎屑岩（图 4f, g-9~10），整体表现出 2 套杂色碎屑岩夹灰岩的韵律组合特征，其中杂色碎屑岩（含石膏夹层）是显著的识别标志。

4.1.3 岩性组合 III：灰黑色灰岩夹灰绿-灰黑色碎屑岩

岩性组合 III 以 PM02 中段为代表，为大套灰黑色、浅灰色泥晶灰岩，夹少量生屑灰岩、灰绿色砂岩、浅灰色泥灰岩等（图 4h, g-11）。与 PM01 不同的是，该组合明显发育砂岩夹层。

在研究区北东、巴欧纳北坡，可能也出露该套组合，以 PM05 为代表。由于该剖面一带发育多条逆冲和褶皱，PM05 变形复杂。剖面起点北东部发育尖棱状褶皱（图 2a），剖面上为连续产出的褶皱，导致地层重复和增厚（图 4c）。PM05 整体发育灰黑、灰绿色泥晶灰岩与生屑灰岩，夹少量浅红色生屑灰岩、灰绿色薄层粉砂岩、砂岩，以及少量浅灰白、土黄色泥岩等（图 4e-3~4），灰岩能干层保留了较好的变形特征。根据索日卡背斜的形态，G10、G09 处发育的灰绿色砂岩夹灰岩、石膏等位于 PM05 下部，整体为组合 III。

4.2 中段：黑色岩系夹基性岩、石膏

该段以黑色岩系为主，由页岩、泥页岩、泥岩、泥灰岩、灰岩等组成，夹规

模不等的石膏和玄武岩，是 BLS 的主体，也是发育油页岩的主要层位，呈西窄东宽展布。南界大致以毕洛错逆冲为界，与 K₂、E 地层为断层或角度不整合接触；北界大致沿东西向河流产出，向东扩展到索日卡逆冲，与布曲组为断层接触。其中，北界西端与上覆岩石组合连续沉积，接触关系清楚；东端受大规模石膏影响，岩性组合不清。主要包括 2 类组合：

4.2.1 岩性组合IV：含厚层油页岩的黑色岩系夹基性岩、石膏

该组合位于中段下部，整体呈深黑色、黑色，不管是地表还是钻井，均发现了连续产出的厚层油页岩和玄武岩夹层，可将其作为标志层。根据本文新发现的剖面（PM06、PM14）及观测点（G01~G05），开展地层追索。

基性岩：地表仅在 PM12 出露（图 4o, p-18），为枕状玄武岩，单层厚约 0.5~1 m，长十余米，东西向隐伏。附近实施的 QK3 和 BK3 分别在 86 m 和 112 m、BK1 和 BK2 均在~45 m 处钻遇基性岩（图 4i, k, l, m），单井累计厚度 0.2~2 m。根据地表露头及地层产状计算的深度与钻井钻遇的深度相近，暂且认为是同层基性岩。

厚层油页岩：地表露头中的油页岩单层出露厚度可达 3~22 m；钻井（QK3、BK1~BK4）揭示黑色页岩厚度 35~75 m，单层油页岩厚度 > 5 m（沈安江等, 2023）。其中，整体位于基性岩上部的厚层油页岩为同一层位，以 PM12、BK1~3、QK3 等为代表，向东沿大型石膏上部/北侧可追索到 G04、G05（图 2a）。沿该大型石膏底部/南侧追索，新发现厚层油页岩 PM14，以油页岩、泥页岩为主，夹灰岩、泥灰岩等，未见底，与古近纪红层呈断层接触，油页岩单层厚度 > 3 m、累计厚度大于 20 m（图 2a, 图 3h, 图 4d, e-6）；向西可追索到观测点 G01~G03（图 3i），组成石膏下部的油页岩层位。

PM03 与 PM12 在岩性组合、油页岩厚度及野外特征上极为相似（图 3e, f, 图 4h, o），但 BK4（井深 200 m，油页岩深度 20~80 m）未钻遇基性岩，与上述油页岩+基性岩组合不同。构造特征表明，G07 与 PM03 本为巴欧那背斜两翼，为同一油页岩层位，G07 东侧石膏造成本应该倾向南西的南翼发生地层倒转，倾向北东，沿巴欧纳向斜成“S”型转入山前，汇入 PM14（图 2a, c）。

PM06 也是新发现的油页岩剖面（图 2a, 图 3a, 图 4b, e-5），整体位于 PM05 之上。剖面下部/北侧，灰岩与油页岩基本呈等厚韵律产出，单层油页岩厚度为 0.5~1 m，累计厚度约 15 m，地层南倾，倾角较陡，高达 65°；向上/南侧过渡为

较厚层油页岩夹薄层土黄色、浅灰色泥晶灰岩和生屑灰岩。地层产状变为北倾，倾角 10~25°。其西部地表发育大规模石膏，推测 PM06 下部存在连片的隐伏石膏，加上油页岩本身易变形，导致地层产状突变（图 4b）。PM06 东西两侧发育石膏与新生代地层，延伸受限。

沿组合IV所在的 BK4（PM03）向北追索，地层北倾，露头较差，为大套薄层浅灰色泥岩、泥灰岩，至 G08 处，岩性组合过渡为组合 V。PM06 油页岩对应的毕洛错向斜的南翼层位，可能汇入巴欧那背斜北翼（图 2c）。因此，PM06 与 PM03、BK4 等为同层位。

BLS 中段以大规模石膏为界，至少发育 2 层较厚的油页岩，第 1 层（下层）厚度与规模最大，以 PM14、PM03、BK4、PM06 为代表。第 2 层（上层）以 PM11~13、BK1~BK3、QK3 为代表，且发育基性岩夹层，受点 G05 处盐构造变形影响，向东展布不清。

4.2.2 岩性组合 V：泥灰岩、灰岩为主的黑色岩系，夹油页岩与石膏

与组合IV最明显的区别是，组合 V 油页岩含量显著减少，甚至不发育，且宏观颜色偏浅灰，岩性以泥灰岩、泥岩、泥质粉砂岩等为主，灰岩夹层表面多被风化为土黄色，以 PM11 和 PM13 上部、PM09 中部为代表（图 4n, s, p-20~21, t-22~23），底部与组合IV连续沉积，未见明显断层或角度不整合接触关系。顶部基本以近东西向的季节性河流为界，东部受石膏影响，延伸不稳，在 G08 处可观察到沿山坡冲沟出露的地层组合 V（图 3j）。

PM07 底部发育巨厚石膏，中上部开始出现中厚层灰岩、泥岩、砂岩，至顶部 PM08 过渡为薄层灰岩、泥灰岩、泥岩、石膏等（图 4r, q, p-14~17）。据索日卡背斜形态，PM07、PM08 位于 PM05、PM06 的上部，结合大型石膏的空间产出关系，层位与 PM09、PM11、PM13 相当，故将 PM07、PM08 一带划为中段。

4.3 上段：浅色-杂色碎屑岩、灰岩

该段主要位于研究区西部，是毕洛错向斜的主要组成部分。北侧、北西侧被 K2a 红层角度不整合覆盖，东部出露大型石膏。该段为大套的砂岩夹泥岩、灰岩、砾岩、细砾岩等，见菊石、双壳等化石。颜色偏浅，下部以土黄、黄色为主，向上呈出现红色、白色、绿色等，划分以下 2 类组合：

4.3.1 岩性组合VI：土黄色砂岩夹灰黑色灰岩、泥岩

该组合以 PM09 上段为代表，为大套土黄色薄层砂岩夹灰黑色薄层生屑灰岩、青灰色泥岩等（图 4s, t-24~25），其中灰岩发育双壳、菊石化石，是目前鉴定菊石时代的层位（伊海生等, 2003; 王永胜等, 2007; Ma et al., 2017; Yin et al., 2021）。该层灰岩厚度 10~25 m，上下岩性为较为稳定的土黄色砂岩夹薄层灰绿色-灰白色泥岩等，地层连续且稳定的产出，未见明显的断层，整体作为夹层产出，向东隐伏。

4.3.2 岩性组合VII：杂色砂岩夹灰岩、砾岩

该组合以 PM10 为代表，以出现含砾砂岩、细砾岩为标志，岩性为黄色、灰绿色中薄层粗砂岩，夹红色、浅灰色薄层生屑灰岩、泥晶灰岩以及浅黄色、淡红色薄层细砾岩、含砾砂岩等（图 4u, t-26~29）。其中，砂岩可见交错层理与波痕；砾岩中砾石成份以石英为主，磨圆较好，砾径多 < 2cm。砾岩（含砾砂岩）层在该组合不同部位均有出露，直至顶部（毕洛错向斜核部）。

5 样品与测试

5.1 样品特征与分析方法

对 BLS 中的玄武岩和砂岩夹层开展锆石 U-Pb 同位素测试，其中，玄武岩样品 22987、21422 与 23433 均取自中段岩性组合IV的 PM12；22957 为钙质岩屑砂岩，取自 BLS 下段的岩性组合II（图 2a）。另有上段和中段的其他砂岩样品（图 2a），由于未取得较好的结果，文中不作具体描述。

玄武岩分别送至北京科荟测试技术有限公司（21422）、中国地质科学院矿产资源研究所（22987）以及北京燕都中实测试技术有限公司（23422）开展锆石 U-Pb 测试，砂岩 22957 锆石 U-Pb 由中国地质科学院矿产资源研究所完成。年龄成图采用 ISOPLOT 宏程序完成，频谱图年龄数据使用 1σ 误差，程序输出为 1σ 误差。具体的测试方法、流程、标样信息等见附表 1。

5.2 同位素测试结果

为获取年轻的结晶年龄，偏重于选取环带发育、自形程度高、颗粒较大的锆石，并且避开裂隙、包裹体和杂质，锆石 U-Pb 测试结果见附表 1（已剔除不谐和度大于 $\pm 10\%$ 的数据），其中，小于 1000 Ma 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为单颗粒锆

石年龄，大于 1000 Ma 的以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 作为单颗粒锆石年龄。

22957 共完成 100 个测点，有效数据 78 个，年龄为 146.92~2608.04 Ma；21422 共完成 40 个测点，获得 29 个有效数据，年龄为 17.6~1686.3 Ma；22987 共完成 52 个测点，有效数据 38 个，年龄为 18.58~2718.86 Ma；23422 共完成 232 个测点，有效数据 190 个，锆石表面年龄为 32.8~3387.8 Ma。本文测试目的在于约束地层时代，不涉及基底、物源或变质等构造事件研究。由于 BLS 至少为侏罗纪，因此，重点讨论 250 Ma 以来的年龄。

5.2.1 锆石结构与成因

4 件样品 250 Ma 以来的锆石 Th/U 比值为 0.1~0.8，区别不明显，微量元素特征可分为 2 种类型(图 5a~d)，第 1 类表现出明显的 LREE 亏损和 HREE 富集，以及强烈的 Ce 正异常和 Eu 负异常，从 La 至 Lu 含量逐渐增加(图 5a~d)，显示岩浆锆石特征(Hoskin, 2005)。其中，绝大部分锆石显示出中酸性岩浆锆石特征(Corfu et al., 2003; Wu and Zheng, 2004)，锆石以自形-半自形为主，长 30~120 μm ，长宽比值 1~3，呈长柱、短柱状，普遍发育岩浆振荡环带(图 5e)；极个别锆石(样品 21422 的点 24)显示出基性锆石特征(图 5e, Corfu et al., 2003)，呈板状且不发育震荡环带。

第 2 类锆石数量较少，形态上仍呈自形-半自形，且发育震荡环带，但是这类锆石稀土含量明显高于第 1 类，富集 LREE，且 LREE 较平坦，无明显或弱的正 Ce 异常，具有中等负 Eu 异常，整体呈海鸥型(图 5a~d)，表现出热液锆石特征(Hoskin, 2005)，可能导致 U-Pb 年龄重置。

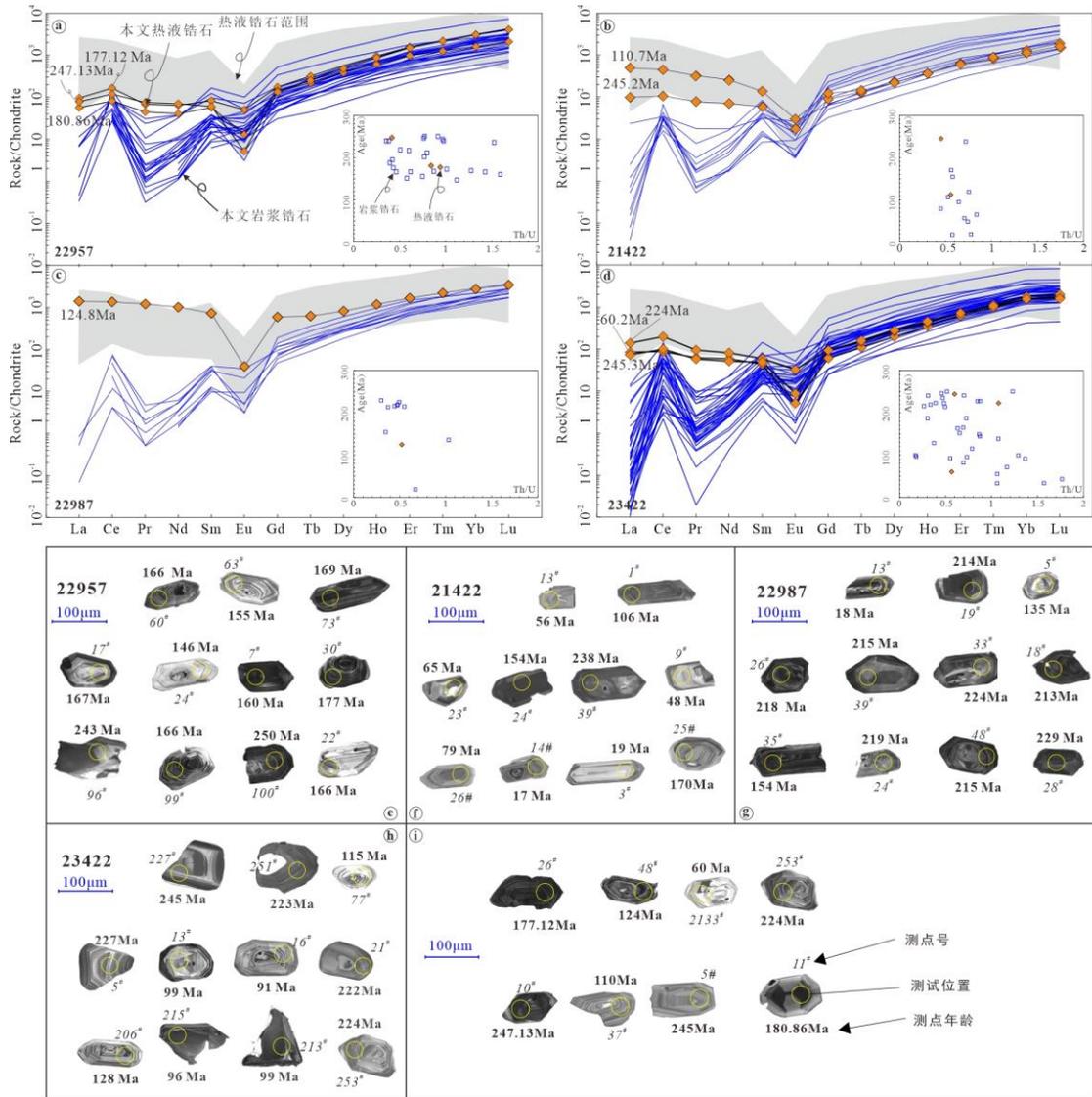


图5 砂岩和玄武岩锆石成因划分及形态

Fig.5 REE chondrite-normalized distribution pattern for sandstone and basalts of the BLS (normalized values from McDonough and Sun, 1995)

5.2.2 岩浆型锆石 U-Pb 结果

砂岩 22957 的岩浆型锆石 (24 颗) 年龄为 146.92~250.49 Ma (图 6a), 主峰值为 168 Ma, 次峰值为 154 Ma、188 Ma、212 Ma、239 Ma 与 250 Ma (图 6c)。其中, 主峰值 (166.19~169.27 Ma) 获得谐和年龄 166.1±1.4 Ma (图 6b), 代表一期物源年龄。

玄武岩 21422 的岩浆型锆石 (12 颗) 年龄为 17.6~245.2 Ma (图 6d, e), 年龄谱较为分散, 主峰值为 18 Ma, 次级峰值为 48 Ma、56 Ma、154 Ma 和 238 Ma (图 6f), 未获得谐和年龄。

玄武岩 22987 的岩浆型锆石（10 颗）年龄介于 18.81~229.58 Ma 之间（图 6g），主峰值为 18 Ma 和 215 Ma，次级峰值年龄为 154 Ma 和 136 Ma（图 6i）。215 Ma 峰值（222.7~228 Ma）获得一组谐和年龄 215.1 ± 2.3 Ma（图 6h），代表的是捕获围岩的锆石年龄。

玄武岩 23422 的岩浆型锆石（35 颗）年龄介于 32.8~250.4 Ma（图 6j），由于测点较多，该样品 250 Ma 以来的年龄峰值明显多于其他样品，主峰值为 33 Ma、96 Ma 和 224 Ma，次级峰值包括 43 Ma、151 Ma 和 249 Ma（图 6l）。其中 224 Ma 峰值（222.7~228 Ma）获得谐和年龄 224.9 ± 0.9 Ma（图 6k），代表的是捕获围岩的锆石年龄。

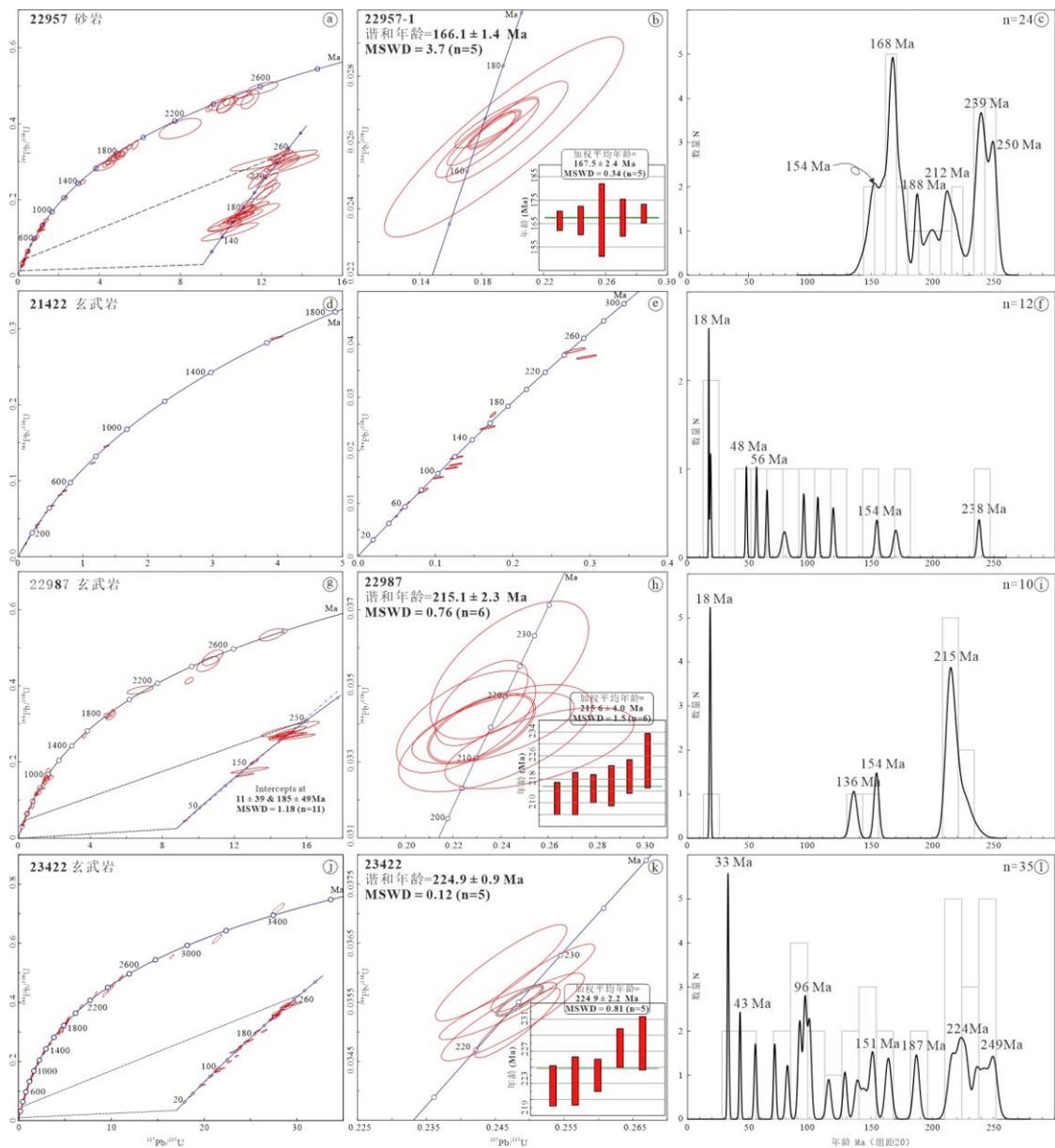


图 6 毕洛错砂岩与玄武岩锆石 U-Pb 年龄

Fig.6 Zircons U-Pb ages for sandstone and basalts of the BLS

6 讨论

6.1 毕洛错地层时代

地表剖面和钻井揭示了基性岩作为夹层出露,因此,玄武岩喷发年龄可以代表沉积地层的时代。但基性岩锆石来源复杂,年龄的地质解释存在一定难度或争议,很多学者进一步利用沉积岩最年轻碎屑锆石结果约束地层最大沉积时代。不管哪种方法,都需要根据地质特征、区域背景、野外接触关系等多方面综合判断年龄的可靠性。由于 BLS 被 103~74 Ma 阿布山组角度不整合覆盖(Li et al., 2015; He et al., 2020; 赵珍等, 2020),地层时代不可能早于 103 Ma。

6.1.1 玄武岩异常年轻锆石 U-Pb 年龄及其意义

越来越多的研究表明,基性岩中存在明显晚于地层时代的异常年轻锆石年龄,不能简单的用测试误差或混样解释(宫江华等, 2020)。本文 3 件玄武岩样品也存在明显年轻的锆石年龄(<103 Ma),由于这 3 件玄武岩样品是野外分批采集、分批次送至不同公司开展的样品前处理和单矿物挑选工作,又送至不同实验室开展 U-Pb 测试,但年轻年龄依然普遍存在,可以排除不合理的样品处理或测试问题。异常年轻锆石结构又没有表现出明显的“热液”特征,因此也不能用后期强烈的流体蚀变或改造解释。

研究表明,未遭受显著变质的锆石,可以在低温流体作用下发生 Pb 丢失和 U-Pb 年龄的重启,从而产生晚于地层沉积时代的“异常年轻”锆石年龄,且锆石晶体与岩浆锆石难以区分(Belousova et al., 2015; Zi et al., 2022)。因此,本文玄武岩较多的异常年轻的“岩浆型”锆石 U-Pb 年龄可能与低温流体作用有关,不具有约束岩浆结晶年龄或地层最大沉积年龄的作用。

6.1.2 玄武岩喷发年龄

3 件玄武岩 U-Pb 年龄从 3.3Ga 到约 17 Ma 连续分布,与前人获得的 U-Pb 分布结果相似(Fu et al., 2016; Cheng et al., 2021),显示典型的碎屑锆石分布特征。因此,与碎屑锆石作用相似,如果测试数据足够多,最年轻的谐和年龄可以代表岩浆结晶年龄。

虽然已经排除了 103 Ma 以来的异常年轻年龄,但是玄武岩在 103~154 Ma

之间依然存在峰值年龄。考虑到分析方法的系统误差和 Pb 丢失的影响，前人认为单颗粒碎屑锆石作为最年轻年龄的误差较大，至少 3~6 颗锆石才能证明年龄可靠 (Dickinson and Gehrels, 2009; Gehrels et al., 2011)。而本文 3 件玄武岩 103~150 Ma 数据对应的颗粒数多为 1~2，且未获得可靠的加权平均年龄，因此认为其没有可信的最年轻年龄。

本文及前人获得了玄武岩多组中酸性岩浆锆石结晶年龄 (154 Ma、224.9 Ma、201 Ma 和 215.1 Ma; 图 6h, k; Fu et al., 2016; Cheng et al., 2021)，指示玄武岩喷发过程中至少捕获了 4 期晚三叠至晚侏罗的围岩，其中，最年轻的 154 Ma 代表了玄武岩喷发年龄下限。本文虽然没有获得 154 Ma 的谐和年龄，但每件样品均获得了 154 Ma 的单颗粒锆石年龄 (样品 21422 点 24; 样品 22987 点 35, 样品 23433 点 2142 与 2143)，证明了 154 Ma 的可靠。特别是 21422 中的点 24 锆石呈现出基性岩浆特征，虽然颗粒数量少，但是不排除~154 Ma 可以直接代表基性岩喷发年龄。

6.1.3 碎屑锆石 U-Pb 最年轻年龄

学者提出了多种评价碎屑锆石最年轻年龄的方法 (Dickinson and Gehrels, 2009; Sharman and Malkowski, 2020)。砂岩 22957 最年轻碎屑锆石年龄 (YDZ) 和最年轻单颗粒年龄 (YSG) 基本一致，分别为 147.5 Ma 和 146.9 Ma; 最年轻图像碎屑锆石年龄 (YPP) 为 168 Ma (表 1; 图 6c)，其谐和年龄为 166.1 Ma (图 6b)，与 $YC1\sigma(2+)$ 计算的 168.0 ± 2.3 Ma 一致。图 6c 显示在 168 Ma 之前发育弱的 154 Ma 峰值，可能是测试精度较差形成的伪峰值 (Dickinson and Gehrels, 2009)。虽然 $YC2\sigma(3+)$ 获得的 155.3 Ma 比 $YC1\sigma(2+)/YPP$ 更年轻，但对应的数据为 146.92 Ma、151.37 Ma、155.60 Ma 与 160.33 Ma，整体误差较大，且无法获得可信的谐和年龄/加权年龄。因此，本文认为 22957 最可信的年轻年龄为 $YPP/YC1\sigma(2+)$ ，对应的谐和年龄为 166.1 Ma，代表了 22957 砂岩沉积下限。

表 1 毕洛错地层砂岩最年轻年龄

Table 1 The comparison of youngest detrital zircon ages calculated by different methods of sandstone from the BLS

样号	有效测点数	YDZ	YSG	YPP	$YC1\sigma(2+)$ 颗粒数	$YC2\sigma(3+)$ 颗粒数
22957	78	$147.5 +6.3/-12$	146.92 ± 5	168	$168.0 \pm 2.3(n=6)$	$155.3 \pm 8.2(n=4)$

15BL06	76	170.4±5.1/-7.8	172±3	174	174.6±3.4(n=4)	174.6±3.4(n=4)
15BL12	60	169.2±6.2/-14	171±3	170.8	171.7±5.1(n=3)	171.7±5.1(n=3)

YDZ-Isoplot 计算的最年轻年龄;YSG-最年轻的单颗粒锆石;YPP-最年轻频谱图峰值年龄(Isoplot 成图);YC1 σ (2+) 两颗以上最年轻锆石在 1 σ 误差下的加权平均年龄, YC2 σ (3+) 三颗以上最年轻锆石在 2 σ 误差下的加权平均年龄 (Dickinson and Gehrels, 2009), 均使用 Isoplot 4.15 计算。15BL06 和 15BL12 引自 Ma et al., 2017.

6.1.4 毕洛错地层时代

前人根据碎屑锆石最年轻年龄 (172~175 Ma) 将 BLS 下段置于 J_{2s}, 但未明确与其他岩性组合的接触关系 (Ma et al., 2017), 本文获得碎屑岩锆石最年轻 U-Pb 年龄 (166.1 Ma) 明显晚于前人结果, 根据最新国际地层划分 (www.stratigraphy.org, V2024/12), 将 BLS 下段最大沉积年龄由巴柔期修改为巴通晚期。BLS 下段发育至少 2 层杂色碎屑岩夹膏岩旋回, 野外特征和岩性组合与夏里组极为相似, 不同于 J_{2s} 大套浅灰黑色页岩、泥岩、泥灰岩夹灰绿色碎屑岩的岩性组合, 因此, 下段有可能从巴通期延续到夏里组对应的卡洛夫期。

虽然 Cheng et al. (2021) 新获得玄武岩喷发年龄, 但也保守的仅仅将含玄武岩层位 (对应 PM12 下段) 修订为晚侏罗世, 仍尊重前人对上部含油页岩 J_{1q} 的划分 (对应 PM12 上段), 并将两者接触关系修订为“不明确”。而野外露头上玄武岩与上、下层位并无断层, 本文重新编录的 QK3 井以及前人 BK1~BK3 钻遇的含玄武岩层位与油页岩也同样为连续产出。因此, 玄武岩喷发年龄 (154 Ma) 可以约束 BLS 中段组合 IV 最大沉积时代, 为钦莫利期, 远远年轻于前人划分的托阿尔期 (Fu et al., 2016)。

对于 BLS 上段, 不管是本文还是前人均没有获得可探讨的碎屑锆石最年轻年龄 (图 2a, 样品 221042 和 15BL32)。前人从该层位划分并新建毕洛错组 (J_{2bl}, Biluoco Formation, 对应 PM09 中上部), 时代介于巴通 (166~168 Ma) 与早卡洛夫 (166~164 Ma) 之间 (Ma et al., 2017)。但是, PM09 和 PM10 为连续沉积地层, 从下部油页岩所在的岩性组合 IV, 逐步发育到大套细碎屑岩组合 V (PM09, 图 4s, 图 4t-23~24), 向北/上进一步发育以 PM10 为代表的含砾碎屑岩 (图 4u, 图 4t-26~29), 如果划为毕洛错组 (Ma et al., 2017, 2023), 无法解释其与下部油页岩的时代关系和接触关系。此外, 前人根据 PM09 和 PM10 交界处的含菊石灰岩约束毕洛错组地层时代 (Ma et al., 2017, 2023), 而这套层位的菊石时代恰是前文争议最大的 (伊海生等, 2003; 王永胜等, 2003; Yin et al., 2021)。

BLS 上段 (PM10) 整体为近韵律产出的砂岩夹灰岩、砾岩, 岩性组合特征不同于前人新划分的毕洛错组 (Ma et al., 2017, 2023), 也不同于现今对南羌塘晚侏罗沉积环境与地层的认识。虽然主流观点认为南羌塘内部不存在早白垩海陆过渡相地层, 但陆续有证据表明南羌塘可能存在晚侏罗–早白垩世海相、海陆过渡相碳酸盐岩以及碎屑岩夹生物碎屑灰岩的地层 (毕志伟等, 2018 及其引文)。结合 BLS 下段和中段的沉积时代与区域背景, 推测 BLS 上段至少为晚侏罗晚期提塘阶, 很有可能进入早白垩世。南羌塘可能也存在与北美塘同期的下白垩统贝里阿斯阶海陆过渡性沉积。

综上所述, BLS 时代至少为中侏罗世巴通至晚侏罗统提塘, 上部可能进入早白垩世贝里阿斯期。

6.2 地层时代观点对比和存在问题

6.2.1 毕洛错地层时代观点对比

根据前文岩性组合和测试结果, 毕洛错地层可能包含前人划分的不同地层“组”, 但由于缺少标准生物化石与可靠的同位素测试结果, 且羌塘盆地侏罗纪地层普遍存在穿时性, 加剧了地层对比的难度 (薛伟伟等, 2020)。因此本文暂时仅探讨 BLS 沉积时代, 不划分对应的地层“组”。

前人对毕洛错地层时代开展了大量的研究, 主要通过古生物年代学和同位素年代学。其中, 菊石 (含双壳) 多存在属种误判的问题, 从最初的早侏罗托阿尔修订为巴柔–卡洛夫 (Yin et al., 2021)。其中最大的问题是, 该层菊石实际非油页岩层位 (对应本文划分的中段岩性组合 IV), 而是上段的岩性组合 VI, 从而导致了毕洛错地层 (特别是油页岩) 时代的误判, 长期将其置于早侏罗曲色组。Zhang et al. (2024) 在油页岩上部 (对应本文划分的中段岩性组合 V) 采集到原位菊石, 本身对于约束真正的油页岩段时代具有极大的意义, 结合方解石 U-Pb 测试, 将地层划分为曲色组, 但不仅化石种属鉴定遭到质疑 (Yin et al., 2024), 方解石 U-Pb 年龄也因过低的 U/Pb 比值被认为不可靠 (Wang et al., 2024)。此外, 方解石 U-Pb 测试在本研究区面临的问题, 可能强烈的构造–热事件会破坏其封闭体系。其他孢粉、颗石藻等古生物年代学, 因为时代跨度大、气候干扰强, 均具有其局限性, 必须结合其他方法进行综合评价才能获得可靠的结果 (图 7)。

毕洛错地层最大的问题是构造改造导致的地层空间展布不清、各岩性组合接

触关系不明，加之可靠的研究对象少，研究手段有限。因此，本文立足于构造-地层关系的追索，明确各岩性组合空间产出关系。同时，采取技术方法更成熟稳定、更被认可的锆石 U-Pb 测试，结合区域地质背景、实际地质特征，明确各年龄的地质意义，最终划分了毕洛错地层时代（图 7）。

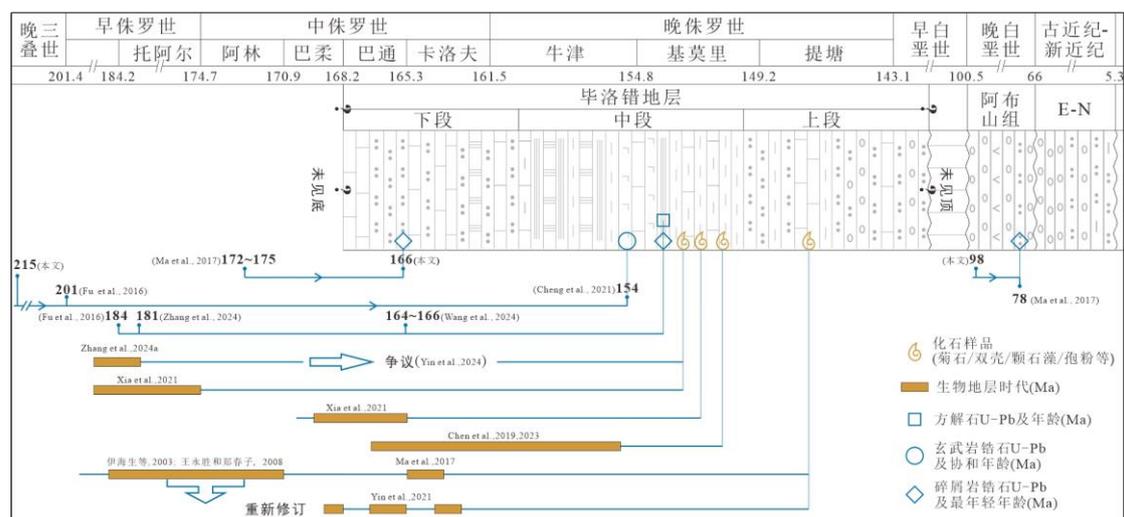


图 7 毕洛错地层时代

Fig.7 Stratigraphic age of the BLS

6.2.2 存在问题

现有同位素测试没有获得可以有效约束 BLS 上段沉积时代的结果，还需要进一步补充相关工作，通过多手段、多方法明确上段时代，这对于南羌塘盆地区域构造、沉积演化等研究具有重要意义。

近年来发展的磷灰石 U-Pb 测试在限定基性岩时代取得了较好的成果，本团队也对玄武岩开展了磷灰石 LA-ICP-MS U-Pb 测试工作，但是不同批次样品、不同测试单位获得的磷灰石 U-Pb 结果均为 100 Ma 左右（未发表），与邻区发育的晚白垩世岩浆活动（He et al., 2018; 赵珍等, 2020）、逆冲推覆构造活动时代（吴珍汉等, 2019b）等同期，推测岩浆活动或者逆冲构造等对研究区热改造的影响程度非常大；玄武岩中异常年轻年龄也表明区内可能发育晚期低温流体作用，可能会破坏不同矿物同位素体系的封闭温度。因此，同位素测试应该谨慎解释数据的地质意义。

References

Belousova, E. A., Jiménez, G. J. M., Graham, I., et al., 2015. The Enigma of Crustal Zircons in

- Upper-Mantle Rocks: Clues from the Tumut Ophiolite, Southeast Australia. *Geology*, 43(2): 119–122. <https://doi.org/10.1130/G36231.1>
- Bi, Z. W., Li, Z. M., Li, Q., et al., 2018. Discovery of Upper Jurassic-Lower Cretaceous Marine Strata in the Southwestern Margin of the Qiangtang Block. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 38(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L., Mattioli, E., Da, X. J., et al., 2019. Calcareous Nannofossils from the Jurassic Black Shales in the Qiangtang Basin, Northern Tibet (China): New Records of Stratigraphic Ages and Palaeoceanography. *Newsletters on Stratigraphy*, 52(1): 55–72. <https://doi.org/10.1127/nos/2018/0464>
- Chen, L., Mattioli, E., Da, X. J., et al., 2023. Integrated Carbon-isotope and Calcareous Nannofossil Stratigraphy in the Middle Jurassic of Qinghai-Xizang (China). *Newsletters on Stratigraphy*, 56(4): 405–421. <https://doi.org/10.1127/nos/2023/0714>
- Cheng, J. B., Li, Y. L., He, H. Y., et al. 2021. Late Jurassic Nb-enriched Basalts from the Bilong Co Area in the Southern Qiangtang Terrane, Central Tibet, and Their Implications. *Geological Journal*, 57: 358–379. <https://doi.org/10.1002/gj.4302>
- Corfu, F., Hachar, J. M., Hoskin, P. W. O., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Dickinson, W. R., Gehrels, G. E., 2009. Use of U-Pb Ages of Detrital Zircons to Infer Maximum Depositional Ages of Strata: A Test Against a Colorado Plateau Mesozoic Database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1–2): 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.013>
- Fu, X. G., Wang, J., Feng, X. L., 2016. Early Jurassic Carbon-Isotope Excursion in the Qiangtang Basin (Tibet), the Eastern Tethys: Implications for the Toarcian Oceanic Anoxic Event. *Chemical Geology*, 442: 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.09.007>
- Fu, X. G., Wang, J., Wen., H., G., et al., 2020. Carbon-Isotope Record and Paleoceanographic Changes Prior to the OAE 1a in the Eastern Tethys: Implication for the Accumulation of Organic-Rich Sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 113: 104049. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104049>
- Fu, X. G., Wang, J., Zeng, S.Q., et al., 2017. Continental Weathering and Palaeoclimatic Changes through the Onset of the Early Toarcian Oceanic Anoxic Event in the Qiangtang Basin, Eastern Tethys. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 487: 241–250.

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.09.005>

- Gehrels, G., Kapp, P., Decelles, P., et al., 2011. Detrital Zircon Geochronology of Pre-Tertiary Strata in the Tibetan-Himalayan Orogen. *Tectonics*, 30(5): TC5016. <https://doi.org/10.1029/2011TC003013>
- Gao, Y., Wu, Z. H., Zuo, J. M., et al., 2024. Spatial-Temporal Activity of Quaternary Faults at Southern End of Nyalam-Coqen Rift, Southern Tibet. *Earth Science*, 49(7): 2552–2569. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.009>
- Gong, J. H., Wang, Z. Q., Wang, D. S., et al., 2020. A Discussion on Genesis, Provenance and U-Pb Ages of the Zircons from Ultrabasic-Basic Rocks: A Case Study in Western Jiangnan Orogenic Belt. *Geological Review*, 66(6): 1536–1554 (in Chinese with English abstract).
- He, H. Y., Li, Y. L., Ning, Z. J., et al., 2020. Transition from Oceanic Subduction to Continental Collision in Central Tibet: Evidence from the Cretaceous Magmatism in Qiangtang Block. *International Geology Review*, 64(4): 545–563. <https://doi.org/10.1080/00206814.2020.1867912>
- Hoskin, P. W. O., 2005. Trace-Element Composition of Hydrothermal Zircon and the Alteration of Hadean Zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
- Li, Y. L., He, J., Wang, C. S., et al., 2015. Cretaceous Volcanic Rocks in South Qiangtang Terrane: Products of Northward Subduction of the Bangong–Nujiang Ocean? *Journal of Asian Earth Sciences*, 104: 69–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2014.09.033>
- Lu, X. S., Gui L. L., Chen, W. Y., et al., 2023. Improvement of *in situ* LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology. *Science China Earth Sciences*, 66(12): 2914–2929. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1072-2>
- Ma, A. L., Hu, X. M., Garzanti, E., et al., 2017. Sedimentary and Tectonic Evolution of the Southern Qiangtang Basin: Implications for the Lhasa-Qiangtang Collision Timing. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(7): 4790–4813. <https://doi.org/10.1002/2017JB014211>
- Ma, A. L., Hu, X. M., Garzanti, E., et al., 2023. Paleogeographic and tectonic evolution of Mesozoic Qiangtang basins (Tibet). *Tectonophysics*, 862: 229957. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229957>

- McDonough, W. F., Sun, S. S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4)
- Sharmana, G. R., Malkowski, M. A., 2020. Needles in a Haystack: Detrital Zircon U-Pb Ages and the Maximum Depositional Age of Modern Global Sediment. *Earth-Science Reviews*, 203: 103109. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103109>
- Shen, A. J., Fu, X. D., Zhang, J. Y., et al., 2023. Characteristics and Discovery Significance of Marine Shale Oil in the Upper Triassic–Lower Jurassic of the Qiangtang Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5): 962–974 (in Chinese with English abstract).
- Su, T. N., Zhang, W. Z., Zhang, S. Q., et al., 2007. Geologic features of gypsum strata in the middle part of Buqu Formation, Biluocuo area, Tibet. *Jilin Geology*, 2: 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Fu, X. G., Du, A. D., et al., 2007. Organic Geochemistry and Re-Os Dating of Marine Oil Shale in Shenglihe Area, Northern Tibet, China. *Marine Origin Petroleum Geology*, 3: 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Fu, X. G., Tan, F. W., et al., 2020. Strategic Investigation of Oil and Gas Resources in Qiangtang Basin. Beijing: Science Press, 1–332 (in Chinese).
- Wang, L. C., Garzanti, E., Peng, H., 2024. Discovery of the Callovian Oceanic Anoxic Event in the Qiangtang Basin, Eastern Tethys: Insights from in Situ Calcite U-Pb Dating. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 656(1–3): 112572. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112572>
- Wang, Y. S., Zhang, S. Q., Xie, Y. H., 2012. 1:250,000 Regional Geological Survey Report of the Angdar Co Sheet, People's Republic of China. Wuhan: University of Geosciences Press, 1–220 (in Chinese).
- Wang, Y. S., Zheng, C. Z., 2008. Gypsum Beds of The Early Jurassic Quse Formation in the Biluocuo Area of the Southern Qiangtang Basin, Northern Xizang. *Journal of Stratigraphy*, 3: 321–326 (in Chinese with English abstract).
- Wu, R. Z., Hu, C. Z., Wang, C. S., et al., 1985. The Stratigraphical System of Qiangtang District in Northern Xizang (Tibet). Contribution to The Geology of The Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau, 9: 1–32 (in Chinese with English abstract).

- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569.
- Wu, Z. H., Ji, C. J., Zhao, Z., et al., 2019a. Main Source Rocks and Petroleum Resource Potential in the Bandao Lake-Donghu Area of the Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1738–1753 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Zhao, Z., Ji, C. J., 2019b. Atlas of Nappe Structure and Its Effect to Petroliferous Sequence in Central Qiangtang Block, Northern Tibet. Wuhan:China University of Geosciences Press, 1-126 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Zhao, Z., Ji, C. J., et al., 2021. Geological Time of Marine Source Rocks in the Woruoshan Mountain and Its Adjacent Areas, Northern Qiangtang Depression. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 352–361 (in Chinese with English abstract).
- Xia, G. Q., Mansour, A., Gentzis, T., et al., 2021. Depositional paleoenvironment and source rock characterization across the Toarcian Oceanic Anoxic Event from the eastern Tethys, Tibet, SW China. *International Journal of Coal Geology*, 243: 103780. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103780>
- Xue, W. W., Ma, A. L., Hu, X., M., et al., 2020. The Redefinition of the Jurassic–Cretaceous Lithostratigraphic Framework in the Qiangtang Basin, Xizang Plateau. *Geological Review*, 66(5): 1114–1129.
- Yang, F., Han, H., W., Bian, T. Y., et al., 2024. Identification of Zircons of Different Origin in Complex Rock Mass and its Implications for Zircon U-Pb Age: A Case Study from Zircon of Archean Basement in Liaohe Depression. *Chinese Journal of Geology*, 59(5): 1308–1325 (in Chinese with English abstract).
- Yi, H. S., Lin, J. H., Zhao, B., et al., 2003. New Biostratigraphic Data of the Qiangtang Area in the Northern Tibetan Plateau. *Geological Review*, 1: 59–65 (in Chinese with English Abstract).
- Yin, J. R., 2021. A Revision and New Data on the Jurassic Ammonites from the Biluoco Area, Southern Qiangtang Block (North Tibet). *Newsletters on Stratigraphy*, 54(4): 1–19. <https://doi.org/10.1127/nos/2021/0648>
- Yin, J. R., 2024. Comment on Zhang et al. New Age Constraints of the Bilong Co Oil Shale in the Qiangtang Basin, Northern Tibet: Evidence from In Situ U-Pb Dating and Palaeontology. *Minerals*, 14: 777. <https://doi.org/10.3390/min14080777>

- Zhang, K. X., Song, B. W., He, W. H., et al., 2025. Distribution and Evolution of the Tethyan OPS in the Central-Southern Qinghai-Xizang Region. *Earth Science*, 50(3): 1162–1200. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.147>
- Zhang, H., Wang, J., Mansour, A., et al., 2024. New Age Constraints of the Bilong Co Oil Shale in the Qiangtang Basin, Northern Tibet: Evidence from In Situ U-Pb Dating and Palaeontology. *Minerals*, 14(3): 246. <https://doi.org/10.3390/min14030246>
- Zhang, L. L., Zhao, Z., Yang, Y. Z., et al., 2024. Fluid Inclusion Characteristics and the Hydrocarbon Accumulation Stages of the Middle Jurassic Buqu Formation in the Qiangtang Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, (in Chinese with English abstract). <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.p.20240927.0923.002>
- Zhao, Z. Z., Li, Y. T., Ye, H. F., et al., 2001. Stratigraphy of the Tibetan Plateau. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wu, Z. H., Yu, J. Q., et al., 2019. Thrust structures of the Nima–Rongma area in the Qiangtang Block, Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 93(8): 1849–1866 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z., Wu, Z.H., Yang, Y. Z., et al., 2020. U-Pb Age Constraints on the Terrestrial Red Beds in Central Qiangtang. *Geological Review*, 66(05): 1155–1171 (in Chinese with English abstract).
- Zi, J. W., Rasmussen, B., Muhling, J. R., et al., 2022. In Situ U-Pb and Geochemical Evidence for Ancient Pb-Loss During Hydrothermal Alteration Producing Apparent Young Concordant Zircon Dates in Older Tuffs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 320: 324–338. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.015>

中文参考文献

- 毕志伟, 李志敏, 李强, 等, 2018. 羌塘地块西南缘上侏罗统–下白垩统海相地层的发现. *沉积与特提斯地质*, 38(1): 1–10.
- 高扬, 吴中海, 左嘉梦, 等, 2024. 藏南聂拉木–措勤裂谷南段第四纪正断层作用的时空特征. *地球科学*, 49(7): 2552–2569.
- 宫江华, 王宗起, 王东升, 等, 2020. 对超基性–基性岩中锆石成因、来源及其 U-Pb 年龄的探讨——以江南造山带西段为例. *地质论评*, 66(6): 1536–1554.

- 沈安江, 付小东, 张建勇, 等, 2023. 羌塘盆地上三叠统-下侏罗统海相页岩油特征及发现意义. 石油勘探与开发, 50(5): 962-974.
- 苏铁牛, 张维忠, 张树岐, 等, 2007. 西藏比洛错一带布曲组中段膏盐地层的地质特征. 吉林地质, 2: 10-15.
- 王剑, 付修根, 杜安道, 等, 2007. 羌塘盆地胜利河海相油页岩地球化学特征及 Re-Os 定年. 海相油气地质, 3: 21-26.
- 王剑, 付修根, 谭富文, 等, 2020. 羌塘盆地油气资源战略调查. 北京: 科学出版社, 1-332.
- 王永胜, 张树岐, 谢元和, 等, 2012. 中华人民共和国昂达尔错幅 1: 25 万区域地质调查报告. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-220.
- 王永胜, 郑春子, 2008. 藏北南羌塘盆地毕洛错地区下侏罗统曲色组石膏岩层. 地层学杂志, 3: 321-326.
- 吴瑞忠, 胡承祖, 王成善, 等, 1985. 藏北羌塘地区地层系统. 青藏高原地质文集, 9: 1-32.
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 等, 2019a. 羌塘盆地半岛湖-东湖地区主力烃源岩及油气资源潜力. 地质学报, 93(7): 1738-1753.
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 等, 2019b. 羌塘推覆构造与油气地质图集. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-126.
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 等, 2021. 北羌塘凹陷沃若山及邻区海相烃源岩形成时代. 地质学报, 95(2): 352-361.
- 薛伟伟, 马安林, 胡修棉, 等, 2020. 羌塘盆地侏罗系-白垩系岩石地层格架厘定. 地质论评, 66(5): 1114-1129.
- 杨飞, 韩宏伟, 边天一, 等, 2024. 复杂岩体中锆石的成因判识及其对锆石 U-Pb 年龄的影响: 以辽河坳陷太古宇基底中的锆石为例. 地质科学, 59(5): 1308-1325.
- 伊海生, 林金辉, 赵兵, 等, 2003. 藏北羌塘地区地层新资料. 地质论评, 1: 59-65.
- 张克信, 宋博文, 何卫红, 等, 2025. 青藏中-南部特提斯洋板块地层分布与演化. 地球科学, 50(3): 1162-1200.
- 张莉莉, 赵珍, 杨易卓, 等, 2024. 羌塘盆地中侏罗统布曲组包裹体特征及油气成藏期次研究. 地球学报, <https://link.cnki.net/urlid/11.3474.p.20240927.0923.002>
- 赵珍, 吴珍汉, 于俊秋, 等, 2019. 西藏中部尼玛-荣玛地区逆冲推覆构造特征. 地质学报, 93(8): 1849-1866.
- 赵珍, 吴珍汉, 杨易卓, 等, 2020. 羌塘中部陆相红层时代的 U-Pb 年龄约束. 地质论评, 66(5):

1155-1171.

赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等, 2001. 青藏高原地层. 北京: 科学出版社, 1-593.