

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.158>



阿尔金造山带中-新元古代沉积地层 构造变形特征及其指示意义

郝江波¹, 李宇科¹, 王超², 冀文斌², 乔元栋¹, 喻遵谱², 孙晓奎², 张帅³

1. 山西大同大学建筑与测绘工程学院, 山西大同 037003

2. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要: 为了解阿尔金造山带中-新元古代与罗迪尼亚(Rodinia)超大陆聚合与裂解相关的构造演化过程, 对该地区塔昔达坂群(1080~950 Ma)与索尔库里群(~930 Ma)进行了野外地质填图和构造解析, 结果显示塔昔达坂群为一套低绿片岩相副变质岩, 并经历了三期构造变形: 第一期(D1)以透入性片理 S_1 置换原生层理 S_0 ; 第二期(D2)受NNE-SSW挤压形成近WNW-ESE向褶皱及褶皱理 S_2 ; 第三期(D3)表现为SE-NW向挤压的逆冲断层及直立褶皱。索尔库里群不整合覆盖于塔昔达坂群之上, 两者之间存在着沉积环境、构造变形的不连续性。结合两者的物质组成、变形期次以及研究区新元古代早期岩浆岩的时空分布及形成环境, 提出阿尔金地区中元古代晚期-新元古代早期完成了从活动大陆边缘到后碰撞伸展的构造转换过程, 为约束其与Rodinia超大陆裂解-碰撞过程及其古地理归属提供了关键证据。

关键词: 阿尔金造山带; 中-新元古代; 构造变形; 构造演化; 沉积学; 岩石学。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2025)09-3679-12

收稿日期: 2025-05-03

Structural Deformation Characteristics and Its Implications of Meso- to Neoproterozoic Sedimentary Strata in the Altyn Tagh Orogenic Belt

Hao Jiangbo¹, Li Yuke¹, Wang Chao², Ji Wenbin², Qiao Yuandong¹, Yu Zunpu², Sun Xiaokui², Zhang Shuai³

1. College of Architecture and Geomatics Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Abstract: To elucidate the Meso-Neoproterozoic tectonic evolution associated with the amalgamation and breakup of the Rodinia supercontinent in the Altyn Tagh Orogenic Belt, the field geological mapping is conducted and the structural analysis is carried out on the Taxidaban Group (1080–950 Ma) and Suoerkuli Group (~930 Ma) in the region. The results show that the Taxidaban Group comprises low greenschist-facies para-metamorphic rocks subjected to three phases of deformation: (1) The D1 phase is characterized by pervasive schistosity S_1 transposing primary bedding S_0 ; (2) the D2 phase developed WNW-ESE trending folds and crenulation cleavage S_2 under NNE-SSW compression; (3) the D3 phase presents as NW-SE directed thrust faults and upright

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 42402202); 山西省基础研究计划项目(No. 202403021222259).

作者简介: 郝江波(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事前寒武纪地质学与超大陆演化、岩石学与矿物学研究. ORCID: 0009-0001-3828-0971. E-mail: jbohao@nwu.edu.cn

引用格式: 郝江波, 李宇科, 王超, 冀文斌, 乔元栋, 喻遵谱, 孙晓奎, 张帅, 2025. 阿尔金造山带中-新元古代沉积地层构造变形特征及其指示意义. 地球科学, 50(9): 3679–3690.

Citation: Hao Jiangbo, Li Yuke, Wang Chao, Ji Wenbin, Qiao Yuandong, Yu Zunpu, Sun Xiaokui, Zhang Shuai, 2025. Structural Deformation Characteristics and Its Implications of Meso- to Neoproterozoic Sedimentary Strata in the Altyn Tagh Orogenic Belt. *Earth Science*, 50(9): 3679–3690.

folds induced by SE-NW compression. The Suoerkuli Group unconformably overlies the Taxidaban Group, exhibiting distinct discontinuities in depositional environments and structural deformation between the two units. Integrating lithological compositions, deformation sequences, and spatiotemporal distribution of early Neoproterozoic magmatic rocks with their tectonic settings, this study proposes that the Altyn region completed a tectonic transition from an active continental margin to post-collisional extension during the late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic. The findings provide critical evidence for constraining its relationship with Rodinia supercontinent cycles and paleogeographic affinity.

Key words: The Altyn Tagh Orogenic Belt; Meso- to Neoproterozoic; tectonic deformation; tectonic evolution; sedimentology; petrology.

0 引言

中-新元古代是罗迪尼亚(Rodinia)超大陆聚合与裂解的关键时期,该时期不仅发育不同类型的岩浆活动,同时伴随着大量的沉积作用以及构造形迹和变形记录,能够反映中-新元古代古大陆边缘演化的重要信息(Bradley, 2011; Slagstad *et al.*, 2020; 陈欣阳等, 2025)。因此,在前人建立的基础上,开展中-新元古代沉积盆地属性分析,如沉积建造、地层序列及变形记录,对厘定造山带与沉积盆地的时空耦合关系,以及约束古大陆边缘裂解-碰撞过程具有重要意义(Cawood *et al.*, 2017; 旷红伟等, 2019; 胡修棉等, 2021)。

阿尔金造山带位于塔里木克拉通和柴达木地块之间,是多个陆块(塔里木、中祁连、柴达木)构造交接的关键地段,对重建中国西部古大陆构造格局至关重要(刘良等, 1999; 于海峰等, 2002; 辛后田等, 2013; Yu *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2023, 2024)。近年来,针对该造山带前寒武纪地质事件的研究取得了显著进展。例如, Hao *et al.* (2023) 通过碎屑锆石和侵入岩年龄限定塔昔达坂群形成于 1 080~950 Ma, 并通过凝灰岩夹层确定索尔库里群形成于 ~930 Ma。同时,大量中元古代晚期-新元古代早期(1 030~880 Ma)花岗质岩石被识别出来。然而,对于阿尔金造山带中-新元古代地质演化的认识仍存在显著分歧,核心争议在于:(1)岩浆事件成因环境:这些 1 030~880 Ma 的花岗质岩石是形成于活动大陆边缘/碰撞环境(Lu *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; He *et al.*, 2018), 作为 Rodinia 超大陆聚合事件的岩浆响应?还是形成于后碰撞伸展环境(Hao *et al.*, 2022)?(2)沉积岩系形成环境:上述岩浆事件认识的差异,直接导致了同时期沉积地层(如塔昔达坂群、索尔库里群)形成环境的争议。例如,塔昔达坂群被认为形成于稳定的滨

海-浅海台地环境(刘永顺等, 2009),而索尔库里群则被不同研究者解释为浅海台地沉积(刘永顺等, 2009)或新元古代晚期的裂谷相沉积(周世军, 2010)。尤为关键的是,尽管前人对岩浆事件和地层时代进行了深入研究,但对于直接记录构造-沉积响应的关键载体——塔昔达坂群、索尔库里群等地层却存在明显的研究空白:(1)其内部接触关系(如地层序列、不整合面)尚未系统厘定;(2)其构造变形特征(几何学、运动学、多期变形叠加关系)缺乏详细解析;(3)对沉积建造与构造变形耦合关系的关注不足。这些关键信息的缺失,严重制约了对阿尔金地区中-新元古代完整地质演化过程的精细刻画,也是导致上述岩浆-沉积环境争议难以解决的重要原因之一。

因此,为了有效约束阿尔金地区中-新元古代构造演化过程,并为解决相关争议提供关键地质依据,本研究聚焦于塔昔达坂群、索尔库里群等沉积地层,利用构造解析基本原则与研究方法,在系统收集区域地质资料基础上,选择地层出露较为完整、后期构造改造弱的地区开展详细的野外地质填图和构造解析。研究旨在精确查明这些地层的接触关系、几何学与运动学特征,深入分析各期不同方向构造变形之间的叠加序列,以期揭示其构造变形历史及其所指示的大地构造环境演化信息。

1 区域地质背景

阿尔金造山带呈北东-南西向横贯于青藏高原东北缘,南北分别以柴达木盆地和塔里木盆地为界,是中央造山带西段的重要组成部分。前人依据不同岩石组成单元及地质特征将阿尔金划分为北阿尔金地块、北阿尔金(红柳沟-拉配泉)古生代俯冲混杂岩带、米兰-金雁山地块(即中阿尔金地块)以及南阿尔金俯冲碰撞杂岩带四个构造单元(Liu *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2013; 徐楠等, 2024)。

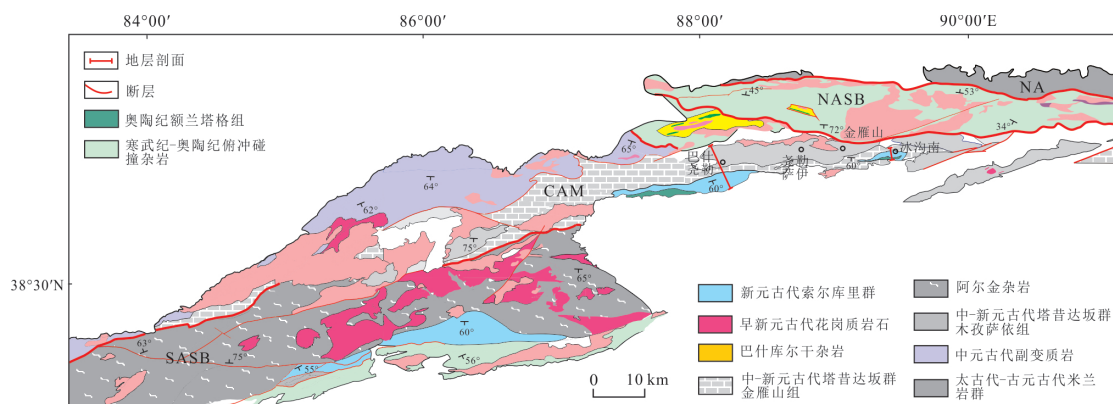


图1 阿尔金造山带地质简图

Fig.1 Geological and tectonic map of Altyn Tagh Orogenic Belt

图据 Wang *et al.* (2013); NA. 北阿尔金地块; NASB. 北阿尔金俯冲混杂岩带; CAM. 中阿尔金地块; SASB. 南阿尔金俯冲碰撞杂岩带

中阿尔金地块是阿尔金造山带的重要组成部分,位于北阿尔金蛇绿混杂岩带以南,南阿尔金俯冲碰撞杂岩带以北地区,以出露前寒武纪地层为特征. 主要由前人划分的长城纪巴什库尔干群、蓟县纪塔昔达坂群和青白口纪索尔库里群组成,但三者在空间分布上并不连续、出露也不完整(郝江波, 2021; 张建新等, 2021)(图1). 其中,巴什库尔干群主体与上覆塔昔达坂群以韧性滑脱剪切带接触,最初主要是依据与红柳沟-贝壳滩地区扎斯勒赛河组、红柳泉组等典型剖面对比确定的,并将其时代归为中元古代,岩石建造以黑云斜长变粒岩、石英片岩、二云石英片岩夹灰白色大理岩、石英岩、斜长角闪(片)岩为主(郝江波, 2021). 近年来,大量锆石年代学数据显示巴什库尔干群岩石具有新元古代中晚期-古生代的原岩形成时代(王超等, 2018; Hao *et al.*, 2023; 解添合等, 2025),说明该岩群物质组成和时代需要进一步研究,故不作为本文的研究对象. 塔昔达坂群下部为浅变质的碎屑岩,上部以厚层叠层石灰岩为主. 前人依据叠层石组合,推测该群的形成时代为中元古代蓟县纪. Hao *et al.* (2023)通过碎屑锆石分析和侵入其中的花岗岩年龄,限定其形成时代介于1 080~950 Ma. 索尔库里群下部以碎屑岩为主夹碳酸盐岩、中部以碳酸盐岩为主夹碎屑岩、上部是以碎屑岩为主的地层序列. Gehrels *et al.* (2003)对采自花土沟以北索尔库里群底部石英砂岩中的锆石进行了TIMS定年分析,获得其最年轻的测点年龄值主要集中在1.3~1.2 Ga,限定该岩群的沉积时代应晚于1.2 Ga. Hao *et al.* (2023)首次在索尔库里群发现了凝灰岩夹层,限定其形成时代为~930 Ma. 在中阿尔金地块北部不整合覆盖有早-

中奥陶世生物碎屑灰岩、碎屑岩,区域范围内缺乏震旦纪-早寒武世地层(郝江波, 2021). 另外,前人在中阿尔金地块识别出中元古代晚期-新元古代变质花岗质侵入体,形成时代主要集中在1 030~880 Ma(Wang *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2013; 王超等, 2018; Peng *et al.*, 2019; Hao *et al.*, 2022).

2 野外地质调查

为研究塔昔达坂群和索尔库里群的接触关系、构造变形等特征,本文在巴什尧勒、尧勒萨依、金雁山以及冰沟南地区开展了详细的野外地质调查工作(图1),但由于部分路线野外露头出露不好,无法测制剖面,笔者针对具体地质现象进行了观察与测量.

在中阿尔金地块巴什尧勒地区,塔昔达坂群出露岩性最全、厚度最大,近东西向展布(图1). 巴什尧勒剖面由北向南控制了塔昔达坂群的物质组成,其北部被第四纪覆盖,未见底(图2a). 塔昔达坂群分为底部木孜萨依组(Jxm)和上部金雁山组(Jxj)两部分. 其总体变质程度低,为低绿片岩相变质. 其中,木孜萨依组主要岩性为石英岩(图2b)、石英片岩、云母石英片岩、变质粉砂岩、变质杂砂岩、千枚岩(图2c)、板岩、片理化粉砂岩与泥岩等. 野外露头可见云母石英片岩与泥质片岩似层状相间出现(图2d),显示原始碎屑-泥质沉积的韵律状构造. 上部金雁山组与下伏木孜萨依组呈整合接触,岩性以灰白色厚层-薄层状白云岩、内碎屑白云岩、泥晶灰岩以及微晶灰岩为主,为碳酸盐岩建造.

索尔库里群自下而上分为乱石山组、冰沟南组、平洼沟组、小泉达坂组,各组之间为连续沉积. 在巴什尧勒剖面南部,索尔库里群与下伏塔昔达坂

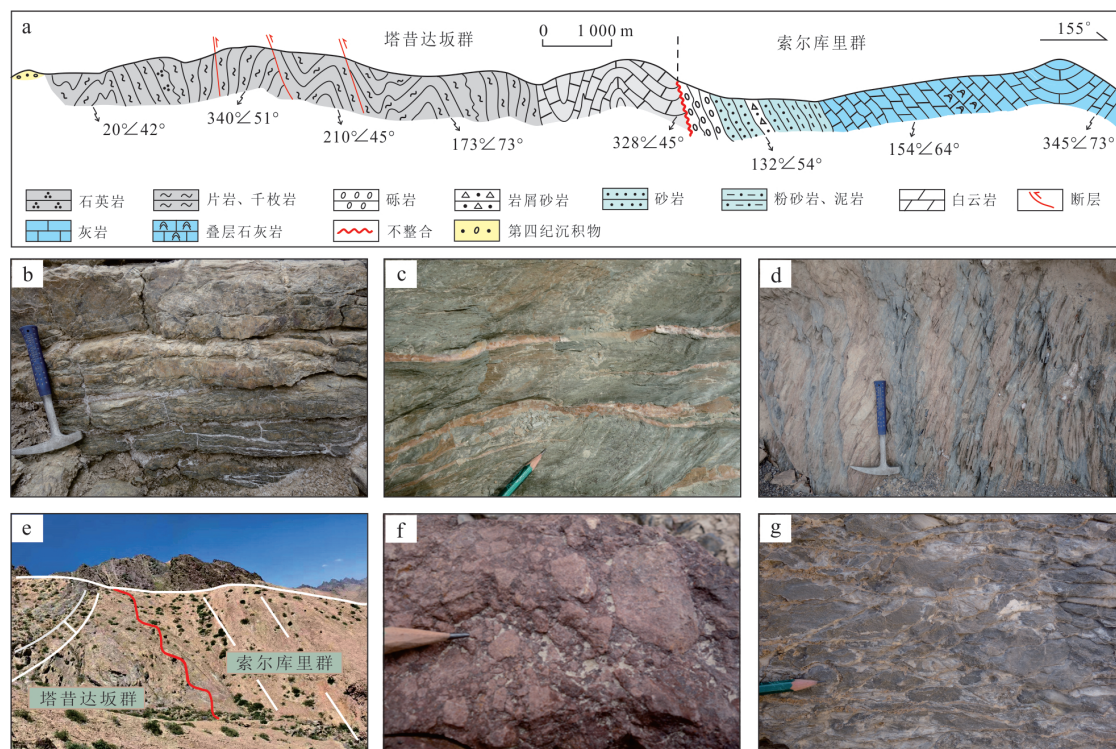


图2 巴什尧勒地区塔昔达坂群和索尔库里群剖面(a);塔昔达坂群和索尔库里群典型岩石野外照片与接触关系(b~g)
Fig.2 Geological profile showing the Taxidaban and Suoerkuli groups in the Bashenyaole area (a) and field photographs of typical rocks and field relationship of the Taxidaban and Suoerkuli groups (b~g)



图3 塔昔达坂群金雁山组红土风化壳(a)和岩石风化碎块(b);索尔库里群与塔昔达坂群呈不整合接触(c)
Fig.3 Lateritic weathering crust in the Jinyanshan Formation (a) of the Taxidaban Group, and weathered rock debris (b); unconformable contact (c) between the Suoerkuli Group and the Taxidaban Group

群呈角度不整合接触(图2e),金雁山组灰岩产状为 $328^{\circ}\angle 45^{\circ}$,索尔库里群底部乱石山组砾岩(图2f)延伸不稳定,厚度变化大,有的地方渐变为石英砂岩,石英砂岩产状 $132^{\circ}\angle 54^{\circ}$,与灰岩倾向相反.乱石山组上部为紫红色薄层细粒石英砂岩、杂砂岩、灰绿色薄层状泥质粉砂岩,偶夹泥岩.冰沟南组主要为一套碳酸盐岩沉积,底部岩性为中-厚层灰黑色微晶灰岩向上过渡为中层深灰色泥晶灰岩;中部为厚层亮晶颗粒灰岩、厚-块状鲕粒白云岩、中-厚层灰质白云岩、中厚层含叠层石灰岩等.顶部为灰黑色厚层条带状灰岩、灰色薄层状灰岩,向上过渡为深灰色中厚层竹叶状灰岩(图2g)、浅灰色厚层状灰岩.而平

洼沟组在巴什尧勒剖面形成向斜(图2a),岩性主要为灰白色块状灰质白云岩、深灰色厚层状白云岩.

在中阿尔金地块金雁山地区,出露塔昔达坂群金雁山组红土风化壳(图3a),厚约1 m,可见次棱角状岩石风化碎块(图3b),风化壳下部碳酸盐岩产状为 $170^{\circ}\angle 70^{\circ}$ (图3c),风化壳之上为索尔库里群乱石山组底部砾岩,砾岩砾石成分主要为碳酸盐岩砾、少量石英岩砾,乱石山组砾岩顶部灰岩产状 $330^{\circ}\angle 60^{\circ}$,与塔昔达坂群金雁山组碳酸盐岩倾向相反.同样表明索尔库里群与塔昔达坂群呈不整合接触.

此外,在中阿尔金地块冰沟南地区,索尔库里群出露齐全,包含全部四个组,各组之间呈整合接

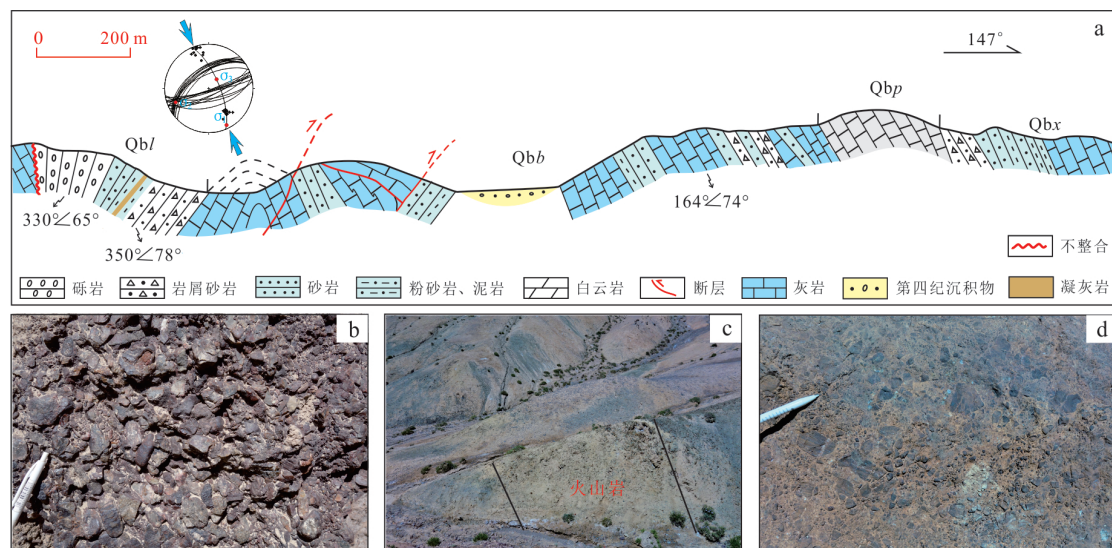


图4 冰沟南地区索尔库里群剖面(a);乱石山组底部砾岩(b);乱石山组火山岩夹层(c);小泉达坂岩屑石英砂岩(d)

Fig.4 Geological profile showing the Suoerkuli groups (a) in the Binggounan area; basal conglomerate and interbedded volcanic rocks (b-c) in the Luanshishan Formation; lithic quartz sandstone (d) of the Xiaoquandaban Formation

触(图4a).索尔库里群与下伏塔昔达坂群呈角度不整合接触,其上被奥陶系不整合覆盖.乱石山组岩性主要由紫红色中-厚层状砾岩、土黄色石英砂岩、灰绿色粉砂质泥岩夹火山岩、岩屑砂岩组成.其中紫红的砾岩成分复杂,主要以石英岩和碳酸盐岩砾为主,含有少量的花岗岩砾(图4b).砾石分选较差,磨圆度中等,多呈椭圆或长条状,层理不明显.火山岩厚度较小,为2~3 m,风化面呈土黄色,夹于灰绿色薄层状泥岩之中(图4c).冰沟南组主要为一套碳酸盐岩-碎屑岩沉积,与下伏乱石山组碎屑岩区别明显,以碎屑岩消失和碳酸盐岩出现作为两个组的区分标志.其底部为薄层微晶灰岩夹泥质灰岩、中厚层状含叠层石灰岩、厚层状隐晶质砾屑灰岩夹深灰色薄层粉砂岩;顶部为石英砂岩、岩屑石英砂岩,向上过渡为深灰色薄层灰岩夹紫红色薄层粉砂岩.平洼沟组底部以灰色、浅白色厚层状白云质灰岩为主,顶部为灰白色块状白云岩.小泉达坂组底部为紫红色薄-中层状岩屑石英砂岩(图4d),向上过渡为紫灰色薄层状细砂岩、灰绿色泥质粉砂岩、碳酸盐岩.

综上所述,塔昔达坂群木孜萨依组下部总体表现为长英质含量较高的块状石英岩、石英片岩、杂砂岩等.上部主要为泥质含量相对较高的变质粉砂岩、千枚岩、泥岩等,基本层序表现为向上变薄变细的特征.索尔库里群岩石基本未发生变质,仅发生少量重结晶.地层原始层序保留较好,四个组呈现

出碎屑岩(乱石山组)-碳酸盐岩(冰沟南组下部)、碎屑岩(冰沟南组上部)-碳酸盐岩(平洼沟组下部)、碎屑岩-碳酸盐岩(小泉达坂组)三个大的沉积旋回.

3 构造变形分析

本文通过对上述地区塔昔达坂群和索尔库里群发育的褶皱、断层以及伴生的线理、面理开展野外观测与构造解析,明确研究区主控构造形迹的空间展布规律,并在构造几何学特征、叠加改造关系研究的基础上,划分叠加变形序列,为揭示区域构造变形演化过程提供资料.

从区域观察来看,塔昔达坂群总体片理化发育,变形强烈,而变质较弱.研究表明,塔昔达坂群至少经历了3期主要的构造变形过程,具有不同的几何学、运动学特征.其中以第二期变形最为突出,其变形表现最为强烈.

第一期构造变形主要是对原生层理 S_0 的改造,形成的 S_1 面理在区域呈透入性发育,以片岩、千枚岩透入性面理(S_1)为特征.区域上大部分地区原生层理 S_0 已无法分辨,但在局部地区可见原生层理 S_0 与后期面理 S_1 的置换关系.如在能干性较弱、沉积韵律发育的岩层中发育分隔劈理带,层面(S_0)产状为 $120^\circ \angle 84^\circ$,劈理面(S_1)产状为 $332^\circ \angle 66^\circ$ (图5a).在部分地段 S_1 面理表现为发育在板岩、千枚岩中的轴面面理(图5b).在能干性较强的变砂岩以及石英岩中,控制其成分的依然是原始层理 S_0 ,露头可见

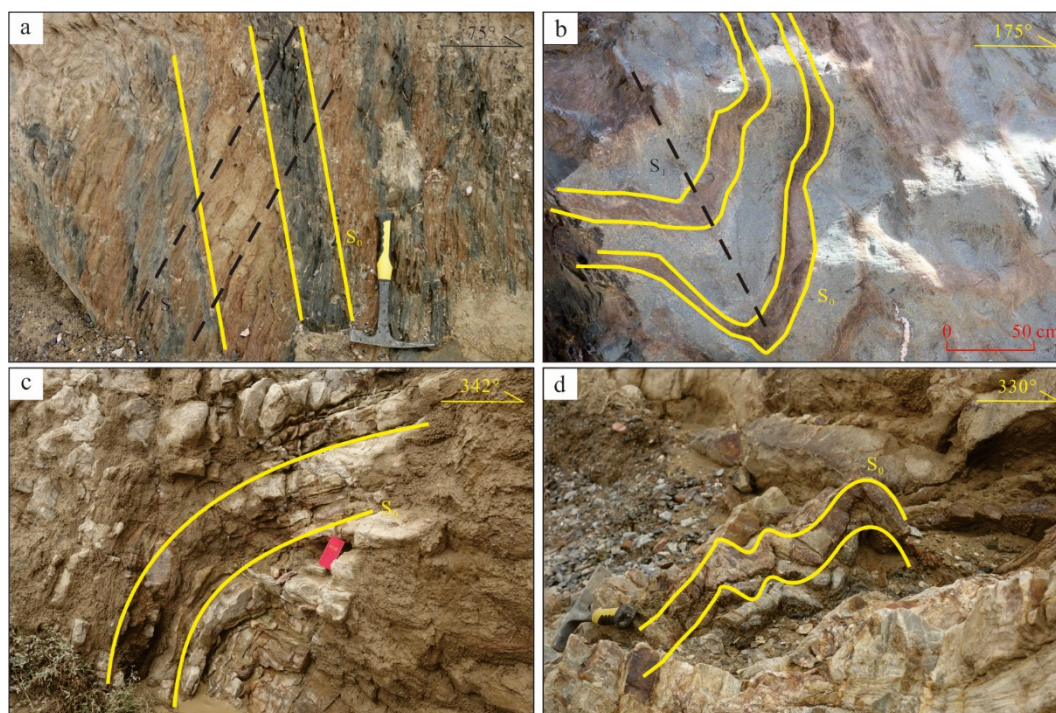


图 5 中阿尔金地块塔昔达坂群 S_0 面理露头尺度构造变形特征

Fig.5 Outcrop-scale structural deformation characteristics of S_0 foliation in the Taxidaban Group, Central Altyn Block

层理 S_0 形成水平褶皱、倾伏褶皱(图 5c~5d). 由于受到后期多期变形改造, S_1 的运动学方向已无法分辨.

第二期变形作用是对第一期变形的改造与叠加, S_1 面理受后期挤压作用, 不仅形成一系列近 WNW-ESE 走向的褶皱, 而且还发育褶劈理. 如在巴什尧勒地区千枚岩内部发育露头尺度的褶皱构造, 褶皱两翼优选产状分别为 $10^\circ\sim 35^\circ\angle 45^\circ\sim 58^\circ$ 和 $190^\circ\sim 215^\circ\angle 34^\circ\sim 48^\circ$ (图 6a, 6j)、枢纽(l_2)优选产状为 $110^\circ\sim 130^\circ\angle 10^\circ\sim 30^\circ$ (图 6k), 为近水平或小角度倾伏于南东的直立水平褶皱或直立倾伏褶皱(图 6a). 另外, 在千枚岩中发育褶劈理(S_2), 劈理域宽约 5~8 cm, 该期面理切割第一期片理(S_1)(图 6b~6c). 同时, 在 S_1 面理上广泛发育细褶皱纹线理(l_2)(图 6d), 线理优选产状为 $95^\circ\sim 140^\circ\angle 10^\circ\sim 30^\circ$ (图 6k), 与褶皱枢纽优选方位一致, 指示其受 NNE-SSW 向挤压作用. 此外, 在巴什尧勒地区塔昔达坂群木孜萨依组千枚岩中, S_1 面理形成次级“S”型和“Z”型褶皱(图 6e~6f), 构成背斜构造, 其褶皱轴面指示 S_2 面理, 枢纽(l_2)优选产状为 $101^\circ\sim 125^\circ\angle 10^\circ\sim 30^\circ$ (图 6k). 在尧勒萨依一带, S_1 面理总体倾向西南, 局部地区石英岩面理(S_1)发育有北倒南倾的宽缓不对称褶皱, 褶皱的不对称性指示其形成主要受运动学指向 NNE 的构造作用(图 6g).

第三期构造变形以新生的面理(S_2)为构造变形面形成大型褶皱, 在千枚岩中发育的褶劈理(S_2)产状有两组, 其北翼产状优选方位为 $300^\circ\angle 65^\circ$, 南翼产状优选方位为 $115^\circ\angle 62^\circ$, 褶皱的轴面以及碳酸盐岩面理具有向 SE 陡倾的特征, 指示 SE-NW 向挤压作用. 同时, 褶劈理两翼极点投影(图 6i)能清晰地反映塔昔达坂群这种变形特征. 与该期褶皱相伴, 还发育走向为北东向的脆性断层, 断层面倾向南东, 倾角为 $60^\circ\sim 85^\circ$, 断层上盘发育的石英脉以及牵引褶皱指示断层运动性质为逆断层, 显示断层形成过程中受 SE 向挤压作用(图 6h~6i).

综上所述, 塔昔达坂群经历至少 3 期构造变形, 早期构造样式多被晚期构造变形改造置换. S_0 面理仅在 S_1 面理弱变形域中残存, 主要分布在厚层状石英岩、变砂岩以及韵律成分层中, 第一期变形形成的 S_1 面理在区域呈透入性发育, 以片岩、千枚岩透入性面理(S_1)为特征. 由于受第二期变形叠加, S_1 面理表现为一系列不对称褶皱以及次级“Z”型、“S”褶皱, S_2 面理非透入性分布, 主要表现为切割 S_1 面形成褶劈理 S_2 以及轴面面理, 指示由 SSW 向 NNE 挤压. 第三期变形主要表现为褶劈理 S_2 形成的褶皱, 褶皱的轴面以及断层面指示由 SE 向 NW 挤压.

索尔库里群不整合覆盖于塔昔达坂群之上, 而

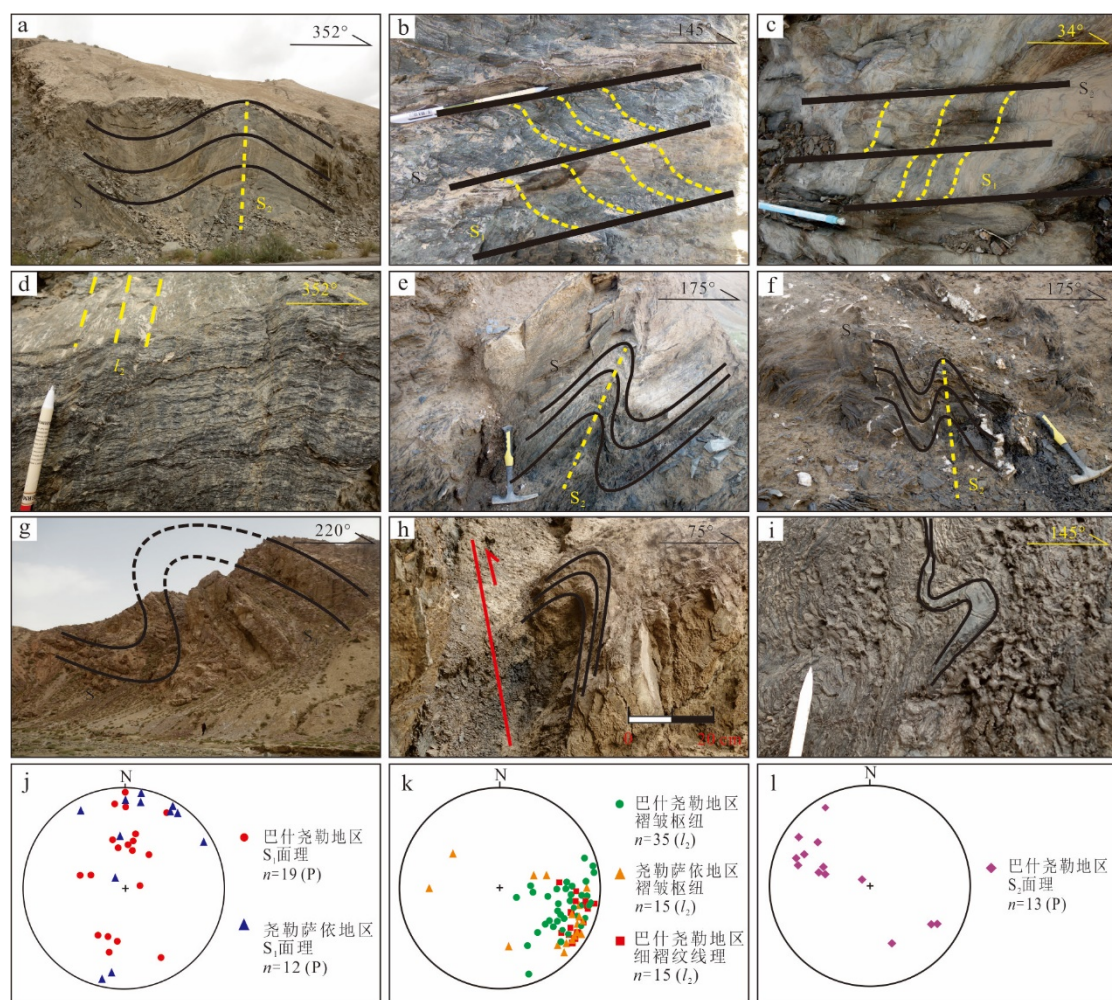


图6 中阿尔金地块塔昔达坂群多期构造事件的野外表现及构造要素的赤平投影结果,赤平投影结果为等角度下半球投影
Fig.6 Polyphase structural style and stereographic projection results (equal-angle lower-hemisphere projections) of tectonic elements in the Taxidaban Group, Central Altyn Block

且两者之间存在明显的沉积间断标志(风化壳、底砾岩等),表明两者之间存在构造间断或不连续性,索尔库里群与塔昔达坂群不是同一期形成的产物.索尔库里群总体构造变形相对简单,其基本未发生变质,地层中可见原始层理.组内发育的褶皱均表现为开阔-紧闭褶皱,转折端较圆滑,两翼岩层倾角相近,褶皱轴面近直立,枢纽近水平,剖面形态类型为等厚褶皱.在冰沟南地区,碳酸盐岩发育宽缓褶皱,其总体不发育轴面劈理,反映较浅层次的变形特征.北翼主体产状为 $300^{\circ}\sim 335^{\circ}/50^{\circ}\sim 75^{\circ}$,南翼主体产状为 $153^{\circ}\sim 171^{\circ}/55^{\circ}\sim 87^{\circ}$,利用 π 圆弧法分析,确定褶皱主轴迹方位为 $70^{\circ}\sim 150^{\circ}$,表明该褶皱受到NW-SE向挤压(图4a).

综上所述,索尔库里群与下伏塔昔达坂群不仅在岩石变质作用方面存在差异,而且在构造几何学特征和变形期次方面存在明显不同,这种强烈的反

差指示两者之间存在着大的构造环境突变.

4 地质意义

4.1 构造背景分析

中阿尔金地块的归属长期存在争议,一些学者认为中阿尔金地块与中祁连、柴达木地块是早古生代造山作用之前从华北板块、塔里木板块或华南陆块裂解出来的(Long *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2013; Peng *et al.*, 2019).近年来,部分学者通过碎屑锆石频谱对比,提出这些块体可能为外来地块,不属于华北、塔里木或华南陆块,而属于劳伦古陆东北侧的一部分(Wang *et al.*, 2013; Hao *et al.*, 2023).由于古地磁数据的缺乏,正确理解这些地块中-新元古代岩浆-沉积事件的性质,是约束它们古地理位置的关键.

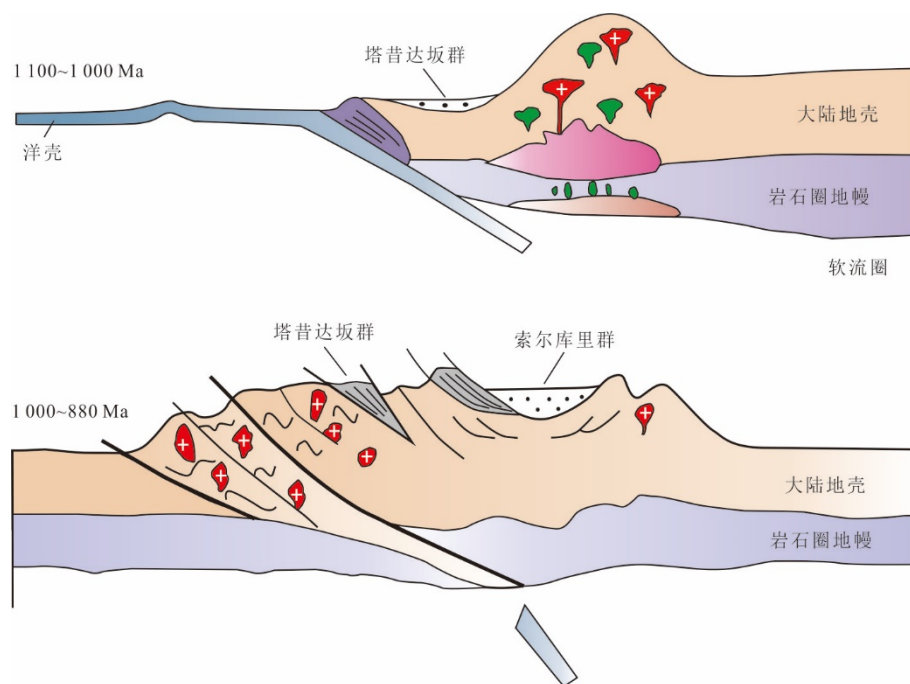


图7 中阿尔金地块中元古代晚期-新元古早期构造演化模型

Fig.7 Tectonic evolutionary model of the Central Altyn Block during the late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic

中元古代晚期-新元古代早期是Rodinia超大陆由聚合向裂解过渡的重要阶段(Hoffman, 1991; Meert and Torsvik, 2003; Li *et al.*, 2008).然而,这一时期的岩浆-变质事件在不同地区形成的构造背景存在明显差异,或存在不同的解释,部分事件与Rodinia超大陆聚合过程中的格林威尔造山作用相关,而另一些事件则关联于拉张环境下的基性岩墙群侵位及大火成岩省形成(张建新等, 2021及相关文献).前人的研究资料表明,塔昔达坂群的形成时代为1080~950 Ma,且其被区内具有I型和S型特征的1030~880 Ma花岗质岩石侵入(Hao *et al.*, 2023).不同的学者对这些花岗质岩石的形成环境存在不同的认识,如形成于活动大陆边缘/碰撞背景(Lu *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; He *et al.*, 2018),或者形成于后碰撞伸展阶段(Hao *et al.*, 2023).值得注意的是,这些花岗质岩石的形成时代明显晚于区内发现的、形成于大陆弧环境的1123~1343 Ma的基性岩(魏启荣等, 2007; 张海迪等, 2012).结合前人资料及本次研究成果,将索尔库里群与1030~880 Ma岩浆活动解释为形成于后碰撞伸展阶段似乎更为合理,证据如下:(1)在中阿尔金地块除发育大量花岗质岩石外,还出露形成与板内拉张环境的(920±20) Ma的流纹岩,以及945~950 Ma的大陆拉斑玄武岩(张志诚

等, 2010; 曾忠诚等, 2019);(2)这些形成于板内环境的火山岩与索尔库里群的形成时代(~930 Ma)较为一致,且该时期中阿尔金地块缺乏高压变质事件(Hao *et al.*, 2023);(3)前人通过岩相学、碎屑锆石以及全岩地球化学分析,认为塔昔达坂群形成于活动大陆边缘的构造环境,且物质源区以长英质陆弧和上地壳物质为主;而索尔库里群物质源区主要来自再旋回造山带,少数来源于克拉通,且索尔库里群砾岩和岩屑砂岩成分与塔昔达坂群物质组成相似,同时两者具有相似的碎屑锆石频谱,说明塔昔达坂群为索尔库里群提供了物源(Hao *et al.*, 2023).这些证据表明该地区在中元古代晚期至新元古代早期可能已经由俯冲造山逐步转换为同碰撞晚期-后碰撞垮塌阶段.在此过程中,大陆碰撞晚期的俯冲板块断离、岩石圈拆沉以及地幔对流等深部过程,共同诱发了巨量花岗质岩浆的形成.此外,索尔库里群与下伏塔昔达坂群之间存在着大的沉积、变形间断,进一步反映两个地层单元之间存在大的构造转换,即塔昔达坂群形成于活动大陆边缘,而索尔库里群形成于后碰撞伸展阶段(图7).这些新的证据为进一步探讨中阿尔金地块在Rodinia超大陆的古地理位置提供了重要依据.

4.2 构造变形序列及动力学背景讨论

近年来,一些学者对北阿尔金俯冲碰撞杂岩带

内的构造样式、变形特征及形成时限进行了研究,依据复杂褶皱和逆冲断层的构造样式和产状,确定其经历了两期挤压构造应力场,表现为早期受到SSW向NNE挤压作用,之后又遭受SE向挤压作用(郝江波,2021)。吴玉等(2019)依据卷入褶皱变形的最年轻地层和区内“钉合”岩体年龄,确定SSW向NNE挤压作用形成于中奥陶世-早泥盆世,与北阿尔金洋俯冲作用导致的洋壳强烈缩短变形有关。塔昔达坂群与上覆索尔库里群呈不整合接触,从现有的构造变形资料分析,索尔库里群至少是在塔昔达坂群第一期变形之后沉积的,即第一期变形可能发生在950~930 Ma之间。塔昔达坂群第二期变形以发育WNW-ESE走向的褶皱以及细褶皱纹线理为主,与北阿尔金俯冲碰撞杂岩带内斜卧褶皱、同斜褶皱走向基本一致,应为同期构造事件所致,均指示出区域上SSW向NNE的挤压作用。因此,笔者推测在中奥陶世-早泥盆世北阿尔金洋俯冲消减过程中,塔昔达坂群、索尔库里群与俯冲碰撞杂岩带物质一起经历变形,形成一系列由SSW向NNE挤压的构造。而索尔库里群之所以没有表现出由SSW向NNE挤压的构造,可能由于受到晚期NW-SE向挤压作用,与褶皱走向发生局部调整有关。

塔昔达坂群晚期变形方向与索尔库里群、俯冲碰撞杂岩带中记录的NW-SE向挤压作用一致,指示三者为同期构造事件所致。前人研究表明,阿尔金地区是受中-新生代阿尔金断裂系主体控制呈北东东向展布的、以左行走滑为主的强烈变形带,其内部卷入了新生代以前地质历史时期不同构造发展阶段的构造单元和地质实体(Yin *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2018)。因此,笔者推测,塔昔达坂群、索尔库里群以及巴什库尔干杂岩晚期NW-SE向挤压作用可能与阿尔金形成左行走滑断裂系有关。当然,仅通过关联构造变形来推断区内变形时限,这一方法存在较大挑战性,因此还需要结合其他地质证据开展进一步研究。

5 结论

(1)塔昔达坂群与索尔库里群以不整合接触,两者之间存在风化壳及底砾岩等沉积间断标志,表明两者形成于不同的构造环境。

(2)塔昔达坂群至少经历三期构造变形:D1与Rodinia超大陆聚合期俯冲-碰撞作用相关,形成透入性片理S1;D2受北阿尔金洋俯冲

引发的SSW-NNE挤压,发育褶皱与褶劈理S2;D3受阿尔金断裂左行走滑影响,形成NW-SE向挤压构造。索尔库里群仅保留浅层次开阔褶皱,表明其沉积后未经历强烈构造改造,印证了塔昔达坂群与索尔库里群间的构造环境突变。

(3)阿尔金造山带中元古代晚期-新元古代早期,完成了由挤压造山到伸展裂解的构造转换。

致谢:感谢两位匿名审稿人提出的建设性意见。感谢编辑部老师对稿件的详细校对修订!

References

- Bradley, D. C., 2011. Secular Trends in the Geologic Record and the Supercontinent Cycle. *Earth-Science Reviews*, 108(1-2): 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2011.05.003>
- Cawood, P. A., Pisarevsky, S. A., 2017. Laurentia-Baltica-Amazonia Relations during Rodinia Assembly. *Precambrian Research*, 292: 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.01.031>
- Chen, X. Y., Li, B., Li, C., 2025. Chemical Weathering during the Neoproterozoic Snowball Earth Events. *Earth Science*, 50(3): 1048-1065 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels, G. E., Yin, A., Wang, X. F., 2003. Detrital Zircon Geochronology of the Northeastern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 115(7): 881-896. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)1150881:dgotnt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)1150881:dgotnt>2.0.co;2)
- Hao, J. B., 2021. Composition, Geochronology and Mesoproterozoic - Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Central-Southern Altyn Tagh (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Hao, J. B., Wang, C., Liu, L., et al., 2022. Reappraisal of the Petrogenetic Processes of Neoproterozoic Granitoids in the Altyn Tagh, NW China: Implications for Reconstruction of the Qaidam Block in Rodinia. *Precambrian Research*, 379: 106782. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106782>
- Hao, J. B., Wang, C., Zhang, S., et al., 2023. Grenvillian Evolution of the Qaidam Block and Its Position in Rodinia Constrained by U-Pb-Hf Composition of Detrital Zircons from the Altyn Tagh, Northern Tibet. *Gondwana Research*, 122: 60-73. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.06.003>
- He, D. F., Dong, Y. P., Liu, X. M., et al., 2018. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope of Granitoids in East Kunlun: Implications for the Neoproterozoic Mag-

- matism of Qaidam Block, Northern Tibetan Plateau. *Precambrian Research*, 314: 377–393. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.06.017>
- Hoffman, P. F., 1991. Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-Out? *Science*, 252(5011): 1409–1412. <https://doi.org/10.1126/science.252.5011.1409>
- Hu, X. M., Xue, W. W., Lai, W., et al., 2021. Sedimentary Basin Orogenic Belt and Continental Geodynamics. *Acta Geologica Sinica*, 95(1): 139–158 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, H. W., Liu, Y. Q., Geng, Y. S., et al., 2019. Important Sedimentary Geological Events of the Meso-Neoproterozoic and Their Significance. *Journal of Palaeogeography*, 21(1): 1–30 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xia, Y. Q., Zhang, X. L., et al., 2024. Paleozoic Multi-Stage Magmatic Events Related to Proto-Tethys and Paleo-Tethys Evolution: Insights from Intrusive Rocks in the Eastern Altyn Orogen, NW China. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1130–1148. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1603-z>
- Li, X., Liu, L., Liao, X. Y., et al., 2023. Metamorphic Evolution of Garnet Amphibolite from the Yaganbuyang Area in the South Altyn Orogen, West China: Insights from Phase Equilibria Modeling and Geochronology. *Journal of Earth Science*, 34(3): 640–657. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1439-6>
- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1–2): 179–210. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.021>
- Liu, L., Che, Z. C., Wang, Y., et al., 1999. The Petrological Characters and Geotectonic Setting of High Pressure Metamorphic Rock Belts in Altun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 57–63 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Wang, C., Chen, D. L., et al., 2009. Petrology and Geochronology of HP-UHP Rocks from the South Altyn Tagh, Northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3–4): 232–244. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.10.007>
- Liu, Y. S., Yu, H. F., Xin, H. T., et al., 2009. Tectonic Units Division and Precambrian Significant Geological Events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract).
- Long, X. P., Sun, M., Yuan, C., et al., 2012. Zircon REE Patterns and Geochemical Characteristics of Paleoproterozoic Anatectic Granite in the Northern Tarim Craton, NW China: Implications for the Reconstruction of the Columbia Supercontinent. *Precambrian Research*, 222: 474–487. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.009>
- Lu, S. N., Li, H. K., Zhang, C. L., et al., 2008. Geological and Geochronological Evidence for the Precambrian Evolution of the Tarim Craton and Surrounding Continental Fragments. *Precambrian Research*, 160(1–2): 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.025>
- Meert, J. G., Torsvik, T. H., 2003. The Making and Unmaking of a Supercontinent: Rodinia Revisited. *Tectonophysics*, 375(1–4): 261–288. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00342-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00342-1)
- Peng, Y. B., Yu, S. Y., Li, S. Z., et al., 2019. Early Neoproterozoic Magmatic Imprints in the Altun-Qilian-Kunlun Region of the Qinghai-Tibet Plateau: Response to the Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 199: 102954. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102954>
- Slagstad, T., Marker, M., Roberts, N. M. W., et al., 2020. The Sveconorwegian Orogeny - Real amalgamation of the Fragmented Southwestern Margin of Fennoscandia. *Precambrian Research*, 350: 105877. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105877>
- Wang, C., Liu, L., Li, R. S., 2018. Precambrian Geology of the Northern Margin of the Tibetan Plateau: Review and Discussion. *Chinese Journal of Geology*, 53(3): 972–999 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C., Liu, L., Yang, W. Q., et al., 2013. Provenance and Ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the Early Neoproterozoic Evolution of Northwestern China. *Precambrian Research*, 230: 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.02.003>
- Wei, Q. R., Li, D. W., Wang, G. C., 2007. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of Volcanic Rocks from the Wanbaogou Group in East Kunlun Orogenic Belt. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(1): 97–106 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y., Chen, Z. L., Chen, B. L., et al., 2019. Early Paleozoic Tectonic Deformation in Qiashenkansayigou Area, North Altun, and Implication for Tectonic Evolution. *Journal of Geomechanics*, 25(3): 301–312. (in Chinese with English abstract).
- Xie, T. H., Cao, Y. T., Liu, L., et al., 2025. The Property of the Metamorphic Strata from Bashkurgan Group in

- the Munabulake Area in South Altyn Tagh, Northwest-ern China: Constrains from Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopic Composition. *Acta Petrologica Sinica*, 41(1): 198—214 (in Chinese with English abstract).
- Xin, H. T., Liu, Y. S., Luo, Z. H., 2013. The Growth of Archen Continental Crust in Aqtashtagh Area of South-east Tarim, China: Constrains from Petrochemistry and Chronology about Milan Group and TTG-Gneiss. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 240—259 (in Chinese with English abstract).
- Xu, N., Wu, C. L., Zhao, M. M., et al., 2024. Genesis and Geological Significance of Post-Collision Granites in South Altun. *Earth Science*, 49(12): 4418—4433 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., He, B. Z., Zhang, C. L., et al., 2013. Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Precambrian Basement of the Tarim Block in NW China: New Geochronological Evidence from Deep Drilling Samples. *Precambrian Research*, 235: 150—162. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.06.001>
- Yin, A., Dang, Y. Q., Zhang, M., et al., 2008. Cenozoic Tectonic Evolution of the Qaidam Basin and Its Surrounding Regions (Part 3): Structural Geology, Sedimentation, and Regional Tectonic Reconstruction. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7—8): 847—876. <https://doi.org/10.1130/b26232.1>
- Yu, H. F., Lu, S. N., Liu, Y. S., 2002. Composing of the Altyn Tagh Formation-Complex and Its Tectonic Signification. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 834—840 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. Y., Zhang, J. X., del Real, P. G., et al., 2013. The Grenvillian Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Mountain Belts of Northern Tibet Plateau: Constraints from Geochemical and Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Study of Magmatic Rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 372—395. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.04.042>
- Zeng, Z. C., Bian, X. W., Zhao, J. L., et al., 2019. U-Pb Geochronology of Zircons from the Volcanic Rocks in Bingounan Formation, Southern Altyn Tagh: Implication for the Precambrian Tectonic Evolution. *Geological Review*, 65(1): 103—118 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. D., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2012. The Material Composition and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of East Kunlun Tectonic Melange in Xiaonanchuan Area, Golmud City, Qinghai Province, and Its Geological Significance. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 38—49 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., Lu, Z. L., Mao, X. H., et al., 2021. Revisiting the Precambrian Micro-Continental Blocks within the Early Paleozoic Orogenic System of the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau: Insight into the Origin of Proto-Tethyan Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 23—46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Fang, X. M., Wang, Y. D., et al., 2018. Late Cenozoic Tectonic Activity of the Altyn Tagh Range: Constraints from Sedimentary Records from the Western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 737: 40—56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.04.021>
- Zhang, Z. C., Guo, Z. J., Feng, Z. S., et al., 2010. SHRIMP U-Pb Age of Zircons from Suoerkuli Rhyolite in the Altyn Tagh Mountains and Its Geological Significations. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 597—606 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. J., 2010. Division to the Tectofacies in the Caledonian Tectonic Belt in Lapeiquan Area in Altun Mountain (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈欣阳, 李彪, 李超, 2025. 新元古代成冰纪雪球地球与化学风化作用. *地球科学*, 50(3): 1048—1065.
- 郝江波, 2021. 中-南阿尔金地区中-新元古代物质组成、年代学及构造演化(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 胡修棉, 薛伟伟, 赖文, 等, 2021. 造山带沉积盆地与大陆动力学. *地质学报*, 95(1): 139—158.
- 旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等, 2019. 中国中新元古代重要沉积地质事件及其意义. *古地理学报*, 21(1): 1—30.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等, 1999. 阿尔金高压变质带的特征及其构造意义. *岩石学报*, 15(1): 57—63.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等, 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430—1438.
- 王超, 刘良, 李荣社, 2018. 青藏高原北缘前寒武纪地质演化: 进展与研究. *地质科学*, 53(3): 972—999.
- 魏启荣, 李德威, 王国灿, 2007. 东昆仑万保沟群火山岩(Pt₂w)岩石地球化学特征及其构造背景. *矿物岩石*, 27(1): 97—106.
- 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等, 2019. 北阿尔金恰什坎萨依沟地区早古生代构造变形特征及构造演化启示. *地质力学学报*, 25(3): 301—312.
- 解添合, 曹玉亭, 刘良, 等, 2025. 南阿尔金木纳布拉克地区巴什库尔干岩群变质岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义. *岩石学报*, 41(1): 198—214.

- 辛后田,刘永顺,罗照华,等,2013. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区新太古代陆壳增生:米兰岩群和 TTG 片麻岩的地球化学及年代学约束. 地学前缘, 20(1): 240—259.
- 徐楠,吴才来,赵苗苗,等,2024. 南阿尔金早古生代后碰撞花岗岩的成因及地质意义. 地球科学, 49(12): 4418—4433.
- 于海峰,陆松年,刘永顺,等,2002. “阿尔金山岩群”的组成及其构造意义. 地质通报, 21(12): 834—840.
- 曾忠诚,边小卫,赵江林,等,2019. 阿尔金南缘冰沟南组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其前寒武纪构造演化意义. 地质论评, 65(1): 103—118.
- 张海迪,李荣社,计文化,等,2012. 青海省格尔木市小南川地区昆南构造混杂岩带的物质组成、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 31(1): 38—49.
- 张建新,路增龙,毛小红,等,2021. 青藏高原东北缘早古生代造山系中前寒武纪微陆块的再认识—兼谈原特提斯洋的起源. 岩石学报, 27(1): 23—46.
- 张志诚,郭召杰,冯志硕,等,2010. 阿尔金索尔库里地区元古代流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 26(2): 597—606.
- 周世军,2010. 阿尔金山拉配泉地区加里东期构造带大地构造相划分(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.