



引文格式: 查显锋, 黄博涛, 罗克勇, 等. 北山造山带南缘潘家井子二叠纪弧岩浆岩的识别及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 58–77. DOI: 10.12401/j.nwg.2024091

Citation: ZHA Xianfeng, HUANG Botao, LUO Keyong, et al. Identification of the Permian Arc-Related Magmatic Rocks and Its Significance in Panjiajingzi Area, Southern Margin of Beishan Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 58–77. DOI: 10.12401/j.nwg.2024091

北山造山带南缘潘家井子二叠纪弧岩浆岩的识别及构造意义

查显锋, 黄博涛, 罗克勇, 孙吉明, 关冲, 王欣

(中国地质调查局西安地质调查中心, 造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 北山造山带位于中亚造山带南缘, 对该带内原先划定的“前寒武系”的准确厘定或解体对理解造山带属性和构造演化过程认识具有重要意义。笔者对瓜州潘家井子一带原划定的敦煌岩群开展区域地质调查, 表明其为变粒岩、浅粒岩、变质砾岩及少量斜长角闪岩和黑云石英片岩等组成的一套具有强变形、低级变质的变火山–碎屑岩。获得灰白色变粒岩、云母石英片岩和浅粒岩的锆石 U-Pb 年龄为 294~285 Ma, 同时还获得变质砾岩中花岗质砾石中锆石的最小 U-Pb 年龄为 (272±6) Ma, 未发现古老年代学信息, 表明该套变质火山–碎屑岩形成时代不早于中二叠世。变质基性火山岩具有拉斑玄武岩地球化学特征, 呈略微右倾的稀土元素配分模式, 显示出高 TiO₂、Na₂O 含量, 明显的 Nb-Ta 亏损特征, 类似于弧玄武岩特征。结合本次研究成果和区域地质特征认为, 潘家井子一带原划定的“敦煌岩群”应厘定为二叠纪变火山碎屑岩, 形成于早—中二叠世俯冲作用相关的局部伸展构造环境。

关键词: 锆石年代学; 二叠纪岩浆作用; 石板山构造带; 北山造山带

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0058-20

Identification of the Permian Arc-Related Magmatic Rocks and Its Significance in Panjiajingzi Area, Southern Margin of Beishan Orogenic Belt

ZHA Xianfeng, HUANG Botao, LUO Keyong, SUN Jiming, GUAN Chong, WANG Xin

(Xi'an Center of China Geological Survey, Center for Orogenic Belt Geology of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The Beishan Orogenic Belt, located at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt, is important for understanding the tectonic affinity and evolutionary history, in terms of the accurate determination or disintegration of the namely Precambrian basement rocks. The originally defined Dunhuang Group in Panjiajingzi area is composed mainly of leptynite, leptite, meta-conglomerate, minor amphibolite, and mica quartz schist, and is characterized by strong deformation and low-grade metamorphosed pyroclastic rocks, based on re-

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-08-27; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“东天山–北山成矿带区域地质调查”(DD20240029), “东天山–北山造山带区域地质调查”(DD20221636-1)和陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-249)联合资助。

作者简介: 查显锋(1984–), 博士, 高级工程师, 主要从事构造地质和区域地质调查工作。E-mail: zha_xianfeng@126.com。

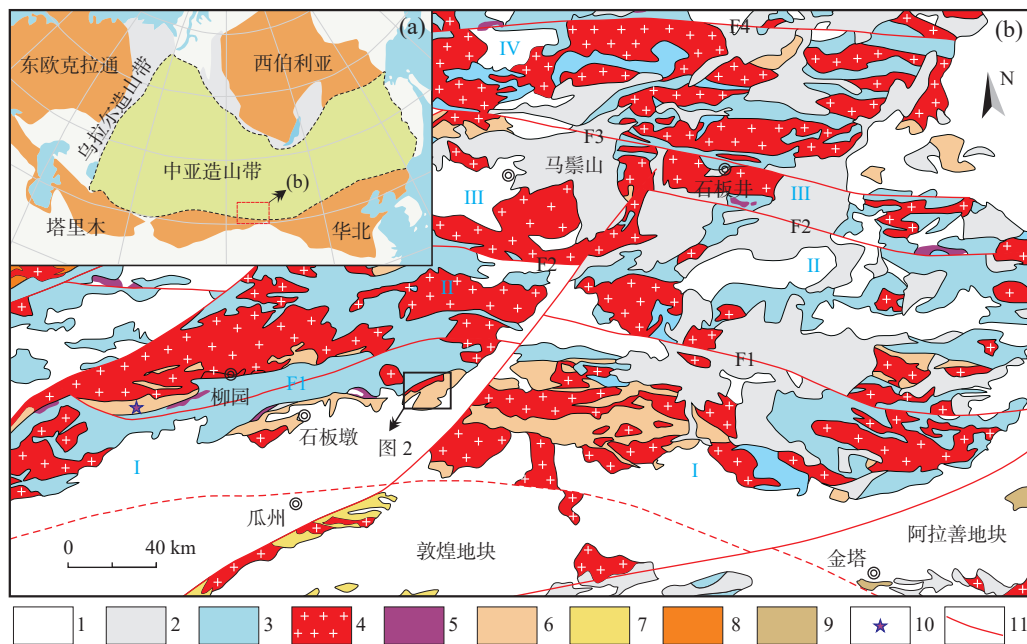
gional geological investigation. Zircon U-Pb ages of 294~285 Ma for leptynite, mica quartz schist, and leptyte samples, as well as the minimum age of (272±6) Ma for gravel sample from meta-conglomerate have been obtained with no ancient geochronological information. All these dating data indicate that these meta pyroclastic rocks were deposited later than Middle Permian. In addition, the meta basic volcanic samples have high TiO₂ and Na₂O contents with obvious Nb-Ta trough, and display right-sloping chondrite-normalized REE patterns, resembling that of the arc basalts. Combining our data and regional geology, it is reasonable to believe that these meta pyroclastic rocks were formed in a local extension setting during the subduction process during Early to Middle Permian, and thus these rocks should be disintegrated from the Dunhuang Group.

Keywords: zircon geochronology; Permian magmatism; Shibanshan belt; Beishan Orogenic Belt

位于波罗的-西伯利亚和塔里木-华北板块之间的中亚造山带是全球最显著的巨型增生造山带(Xiao et al., 2008, 2015; 高俊等, 2009; Şengör, 2022; He et al., 2018; Hong et al., 2023; 王文宝等, 2024; 吴妍蓉等, 2024), 经历了 Rodinia 超大陆汇聚(牛文超等, 2019; 袁禹, 2019; Wang et al., 2021)、裂解(Zhao et al., 2018; 李沅柏等, 2021; 卜涛等, 2022)、古生代洋-陆转换和增生造山(Santos et al., 2022)等多阶段复杂的构造过程, 不仅保留了古亚洲洋演化过程中的洋壳残片(董云鹏等, 2005; 李智佩等, 2020), 还发育洋-陆演化过程中丰富的岩浆活动和变形-变质作用记录(张立飞等, 2005; 姜洪颖等, 2013; He et al., 2014; 贺振宇等, 2015; 李炜等, 2016; Saktura et al., 2017; 姜洪颖等, 2022), 成为揭示古生代洋-陆格局和增生造山过程研究的重要场所, 长期以来受到广泛关注(李锦轶等, 2006; Xiao et al., 2008, 2010; 高俊等, 2009; 徐学义等, 2014; He et al., 2018; Niu et al., 2021; Wang et al., 2022; Santos et al., 2022; Li et al., 2023)。

北山造山带位于中亚造山带中段南缘(图 1a), 古生代以发育多岛弧结构为典型特征(Kang et al., 2020; 计文化等, 2020), 是中亚造山带构造演化的缩影, 成为研究古亚洲洋构造格局和构造演化过程的绝佳场所(Huang et al., 2022; Santos et al., 2022)。目前, 依据区内前寒武纪基底岩系(姜洪颖等, 2013; 贺振宇等, 2015; Huang et al., 2022)、蛇绿岩(李智佩等, 2020; 王国强等, 2021)及与古亚洲洋演化相关的岩浆作用(姜洪颖等, 2013; 李炜等, 2016; He et al., 2018)等方面的证据, 可将北山造山带划分为多个次级构造单元, 自南向北包括: 石板山构造带、双鹰山地体、中天山-马鬃山地块、明水旱山地块等(图 1b)(Xiao et al., 2010; Yuan et al., 2015; Zong et al., 2017; He et al., 2018; 许伟, 2019; Kang et al., 2020; Huang et al., 2022)。这些研究

为北山造山带各构造单元属性、古生代洋-陆构造过程的深入认识提供一系列重要证据。例如, 通过对北山造山带北部大量前寒武地质体的厘定、蛇绿岩及岩浆作用的梳理, 基本证实中天山-马鬃构造带具有地块或微陆块属性(Huang et al., 2022)。近年来, 在造山带南缘的变质作用和蛇绿岩等方面的研究(Liu et al., 2011; Saktura et al., 2017; Kang et al., 2020; 陈言飞等, 2022; 杨高学等, 2024)为北山造山带南缘早古生代构造格局和演化过程提供了新的约束。例如, 古堡泉榴辉岩(Saktura et al., 2017)466~465 Ma 峰期变质年龄(Saktura et al., 2017; 陈言飞等, 2022), 被认为是早古生代末期敦煌地块与北侧马鬃山-旱山地块南缘活动陆缘发生俯冲作用的记录(Saktura et al., 2017)。然而, 越来越多的研究表明北山造山带南缘经历了多阶段洋-陆演化过程, 如北山南缘二叠纪蛇绿岩(Mao et al., 2012)和同期大量的岩浆作用记录(赵泽辉等, 2006; Li et al., 2013; Zheng et al., 2014; Zhang et al., 2015; 许伟, 2019; Hong et al., 2023), 表明北山造山带南缘的增生作用过程可能持续至二叠纪。这些保存在造山带南缘的早—中二叠世岩浆岩成为研究区域构造格局和造山带属性的重要内容。已有的岩浆作用研究集中在高钾钙碱性花岗岩, 而火山岩分布局限且仅见于特定层位(赵泽辉等, 2006; Xia et al., 2008)。基于已有的研究成果, 部分学者认为这些岩浆作用形成于洋壳俯冲作用背景(Mao et al., 2012; Hong et al., 2023), 另一些学者则认为与地幔柱(Xia et al., 2008; Qin et al., 2011; Su et al., 2011)或后碰撞伸展作用相关(Zhang et al., 2011), 为裂谷环境的产物。这些分歧不仅制约了对北山造山带南缘晚古生代构造格局的认识(姜洪颖等, 2013; Niu et al., 2018; Zhang et al., 2022; Li et al., 2023), 而且也限制了对中亚造山带古生代动力学机制的深入理解。



I. 石板山单元; II. 双鹰山单元; III. 马鬃山单元; IV. 旱山单元; F1. 柳园蛇绿混杂岩带; F2. 红柳河-洗肠井蛇绿混杂岩带; F3. 石板井-小黄山蛇绿混杂岩带; F4. 红石山蛇绿混杂岩带; 1. 新生界; 2. 中生界; 3. 古生界; 4. 花岗岩; 5. 蛇绿岩; 6. 北山前寒武系; 7. 敦煌地块前寒武系; 8. 天山前寒武系; 9. 阿拉善前寒武系; 10. 榴辉岩; 11. 断层

图1 北山造山带大地构造位置(a) (Sengör et al., 1993) 及区域构造单元划分(b)

(据 He et al., 2018; Huang et al., 2022 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic sketch map of the Central Asian Orogenic Belt and (b) simplified outline map of the Beishan Orogenic belt

本次研究在北山造山带南缘石板山构造带原划定的“敦煌岩群”中解体出一套二叠纪变质火山-碎屑岩系。野外调查表明,研究区“敦煌岩群”为一套具有强变形、低级变质特征的中-低级变质岩系,不同岩性组分主要受控于近 EW 向断裂-褶皱构造。锆石 U-Pb 年代学揭示该套变火山-碎屑岩系主体形成于二叠纪,是探讨北山造山带南缘二叠纪构造环境的重要研究载体。在详细野外地质调查的基础上,笔者系统开展了火山-碎屑岩系不同组分的锆石 U-Pb 年代学及变火山岩组分的元素地球化学分析,并结合区带上已有的研究成果,为北山造山带南缘构造环境提供可能的约束。

1 区域地质概况

北山造山带以北部的北天山-贺根山-黑山缝合带和南部的南天山-西拉木伦缝合带为界,分隔北部的图瓦蒙古地块、北山地块(与中天山地块相连)、敦煌地块,并以造山带内发育的红石山、芨芨台子-小黄山、红柳河-洗肠井、辉铜山-账房山蛇绿构造混杂岩

带为界(何世平等, 2002; 王洪亮等, 2007; 贺振宇等, 2015),进一步划分为雀儿山构造带(弧或者活动大陆边缘)、明水-旱山地块(晚古生代岛弧或裂陷海盆)、(中天山-马鬃山)地块(早古生代岩浆岛弧)、双鹰山构造带、石板山构造带(图 1b)。大量的年代学研究结果表明,明水-旱山地块、双鹰山构造带、石板山构造带广泛发育变质沉积岩系,并发育 930~870 Ma 侵入岩(姜洪颖等, 2013; Yuan et al., 2015; 贺振宇等, 2015; 袁禹, 2019)。

1.1 双鹰山构造带

大量的年代学研究证实,双鹰山构造带广泛发育前寒武系,分布在双鹰山及南缘的古堡泉地区,自下而上可划分为古洞井群、平头山群和大豁落山群(牛亚卓, 2019),获得 1 550 Ma、1 229~1 158 Ma 的年代学信息(Song et al., 2013; Ao et al., 2015; He et al., 2018)。区域上,这些前寒武纪地质体被 440~420 Ma 弧岩浆岩侵入,并叠加 465 Ma 的榴辉岩相变质事件(Liu et al., 2011; 陈言飞等, 2022)。其次,在构造带南缘还发育 281 Ma 的石榴角闪岩相变质作用,认为是地壳减薄事件的记录(Kang et al., 2020)。

1.2 辉铜山-账房山蛇绿构造混杂岩带

蛇绿岩主要分布在辉铜山(446 Ma)(余吉远等, 2012)、柳园(286 Ma)(Mao et al., 2012)和账房山(363 Ma)(余吉远等, 2012)等地,由橄榄岩、辉长岩、块状-枕状玄武岩等组成。目前,基于对古亚洲构造格局的不同理解,对该构造带的构造属性还存在不同认识:一部分学者认为该带代表了长期演化的古亚洲洋主洋盆(Xiao et al., 2010; Mao et al., 2012),另一部分学者认为该带于早古生代闭合,并于石炭纪—二叠纪再次发育为裂谷盆地(左国朝等, 1990; Tian et al., 2020),呈两阶段构造演化特征。此外,还存在多期弧-弧后盆地等观点(Santos et al., 2022; Hong et al., 2023)。

1.3 石板山构造带

研究认为,前寒武系广泛分布在石板山构造带,即“敦煌岩群”或“敦煌杂岩”(Zhang et al., 2022),主要岩性为片麻岩、斜长角闪岩、石英片岩、绿泥石英片岩及大理岩,活动继承锆石年龄为1.4 Ga(贺振宇等, 2015),并发育933~879 Ma的混合岩化作用,指示其具有陆块基底性质(Zong et al., 2013; 贺振宇等, 2014; Yuan et al., 2015; He et al., 2018)。构造带内下古生界不发育;上古生界包括泥盆系—石炭系碎屑-碳酸盐岩、二叠系火山-碎屑岩等。其中,中—下泥盆统主要为套砂岩-粉砂岩-千枚岩组合,夹大理岩和凝灰岩;下石炭统为石英、粉砂岩、结晶灰岩(大理岩)组合,产珊瑚、腕足、蠕类等海相化石;中—下二叠统由砾岩、砂岩、粉砂岩、流纹岩、玄武岩、凝灰岩等组成,产腕足、珊瑚化石(牛亚卓, 2019)。最近,构造带西段柳园一带识别出早—中二叠世弧-弧后盆地系统(Hong et al., 2023),表明这一时期古亚洲洋仍未闭合(Wang et al., 2022; Hong et al., 2023)。

2 野外地质及样品采集

研究区位于甘肃省桥湾镇北约35 km潘家井子一带,大地构造位置处于北山造山带南缘柳园断裂和疏勒河断裂之间,属于石板山构造带(He et al., 2018)(图1b)。已有的1:5万西涧泉幅将区内出露的一套绿片岩相-低角闪岩相的变质火山-碎屑岩系划归至古元古界敦煌岩群(甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队, 1993),并进一步划分为4个岩组:自下而上主要为中酸性火山岩建造、碎屑岩-碳酸盐岩建造、

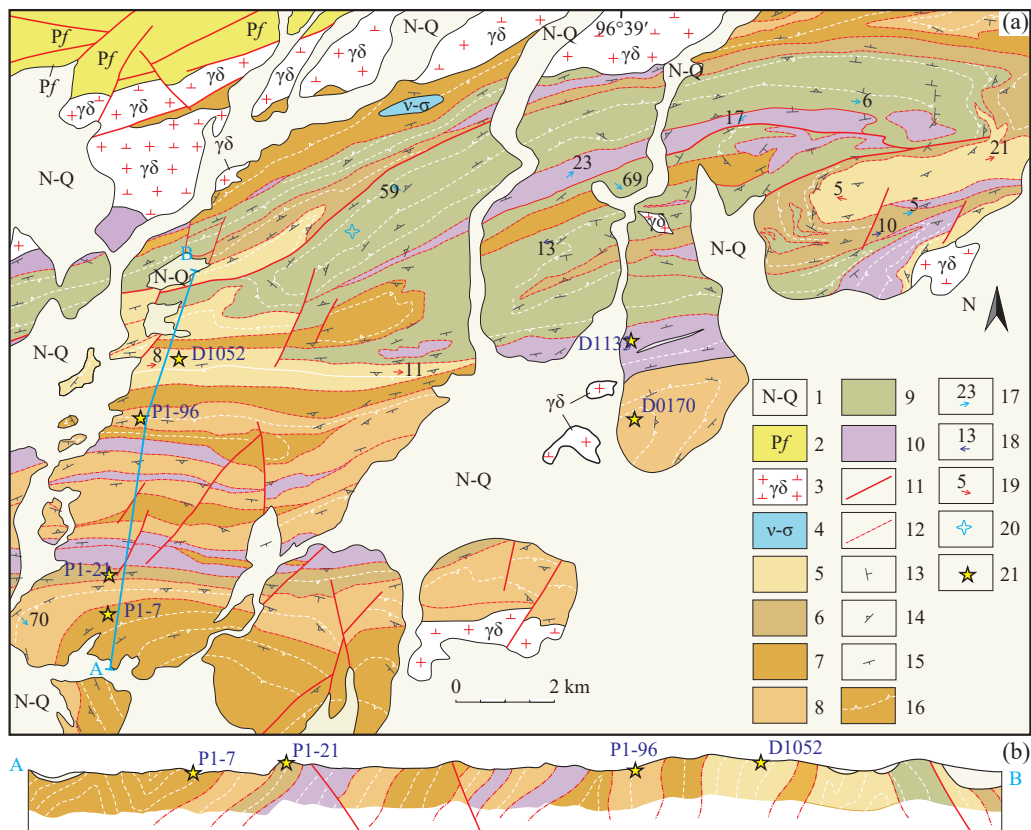
中基性火山岩建造、碎屑岩建造;不同岩组之间以断层接触,呈NEE向带状展布。尽管如此,依据浅变质砂岩中孢粉化石组合(图2a),将局部划归至二叠纪双堡塘组。野外调查表明,研究区西北部出露二叠纪方山口组火山碎屑岩,包括晶屑凝灰岩、英安岩、角砾凝灰岩等,并被后期花岗闪长岩、辉长岩脉侵入;南部被侏罗系和第四系不整合覆盖(图2)。

2.1 野外地质特征

调查结果表明,区内原划的“敦煌岩群”为一套强变形、中-低级变质的火山-碎屑岩系。岩性主要包括:灰白-灰黑色黑云斜长变粒岩、云母石英片岩、浅灰-灰白色浅粒岩、斜长角闪岩、变质砾岩等,少量条带状黑云斜片麻岩和条带状大理岩,与岩体(脉)接触部位常发育石榴子石/十字石黑云母片麻岩,指示为热接触变质作用的产物。

灰白色变粒岩为细粒变晶结构、块状-片状构造,变斑晶主要为石英、长石,少量暗色矿物为黑云母(图3a、图3b);斜长角闪岩多呈灰黑-墨绿色条带状产出,片状构造、鳞片状变晶结构,主要由角闪石、斜长石组成。云母石英片岩为片状构造,细粒变晶结构,露头上暗色矿物分布不均(图3c),石英颗粒发育明显的缝合线结构、矿物呈明显的分带性和定向特征(图3d)。灰白色浅粒岩暗色矿物较少,呈块状构造,变晶-隐晶质结构(图3e),镜下显示局部保留斑状结构,斑晶主要为石英,基质主要为长英质和少量黑云母(图3f),指示其原岩为一套酸性火山-碎屑岩组合。

宏观上,该套变质火山-碎屑岩不同岩性单元呈条带状近EW向展布,主要受控于褶皱-断裂构造(图2b),不同岩性间多呈构造面理接触,可识别出3期构造变形: D_1 期为枢纽向东/西倾伏、近水平的中常-紧闭褶皱(图4a),在弱变形域保留原岩的成分层(图4b),而在两翼发育陡倾的矿物拉伸线理,指示近SN向挤压作用形成的褶皱构造; D_2 期变形,在剪切带附近发育褶皱枢纽陡倾的不对称倾竖褶皱、变质砾石长轴呈EW向近水平定向排列(图4c、图4d)与强变形带中的矿物拉伸线理产状一致,指示近EW向右行走滑构造; D_3 期为NE向断裂及与之平行的节理较为发育,截切近EW向的带状地质体和早期片理,指示晚期左行走滑运动。区内岩石展布总体受控于 D_1 期褶皱构造(图2b),在东西两端出露变质砾岩,成分层的产状表明其为西端向西倾、东端向东倾伏的“穹状”



1.新近系—第四系; 2.二叠纪方山口组晶屑凝灰岩、角砾凝灰岩; 3.花岗闪长岩; 4.辉长-闪长岩脉; 5.变质砾岩; 6.二云石英片岩; 7.黑云斜长变粒岩; 8.灰白色二长浅粒岩; 9.灰白色细粒变粒岩; 10.斜长角闪岩; 11.断层; 12.岩相界线; 13.低角度构造面理($<30^\circ$); 14.中角度构造面理($31^\circ\sim60^\circ$); 15.高角度构造面理($>60^\circ$); 16.构造线走向及倾向; 17.矿物拉伸线理; 18.褶皱枢纽; 19.变质砾石拉伸线理; 20.孢粉化石位置(甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队, 1993); 21.本次研究采样位置

图2 北山造山带南缘潘家井子一带地质图

Fig. 2 Detailed geologic map of the Panjiajingzi area in the south margin of Beishan Orogeny

背形特征(图2), 并受地形影响呈不规则出露。

2.2 样品采集

针对区内岩石地层时代及构造属性问题, 系统采集了灰白色变粒岩(P1-7)、云母石英片岩(P1-21)、灰白色浅粒岩(P1-96)和变质砾岩中的花岗质砾石(D1052)进行锆石 U-Pb 年代学分析。并采集变质程度低、变形弱的灰白色浅粒岩(D0170-1h, -3h 和 -5h)和斜长角闪岩(D1133-2h, -3h 和 -4h)进行全岩主微量元素分析, 以期为该套变质岩石的原岩成分及大地构造环境提供可能的约束。相关样品的采集位置见图2。

3 研究分析方法

锆石 U-Pb 同位素分析和全岩主微量分析均在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。锆石 U-Pb 定年使用 GeoLas Pro 激光剥蚀系统和 Agilent

7700X 等离子质谱仪测试, 激光斑束为 $32\ \mu\text{m}$ 。用于计算 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值的标样为 91500。详细实验步骤及方法参考 Liu 等(2007)和李艳广等(2015, 2023)。全岩主、微量分别采用 X 荧光光谱和等离子光谱质谱法测定完成, 其中主量元素的分析误差优于 2%, 过渡元素的测试精度优于 10%, 其余微量元素测试精度优于 5%。锆石 U-Pb 年代学分析结果见表1~表4; 斜长角闪岩和流纹岩样品的主、微量元素组成见表5。

4 结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

来自灰白色变粒岩(P1-7)的锆石呈无色透明的粒状-板条状自形晶, 粒径为 $80\sim120\ \mu\text{m}$, 发育明显的震荡环带结构(图5a)。55个测点的锆石 Th/U 值为

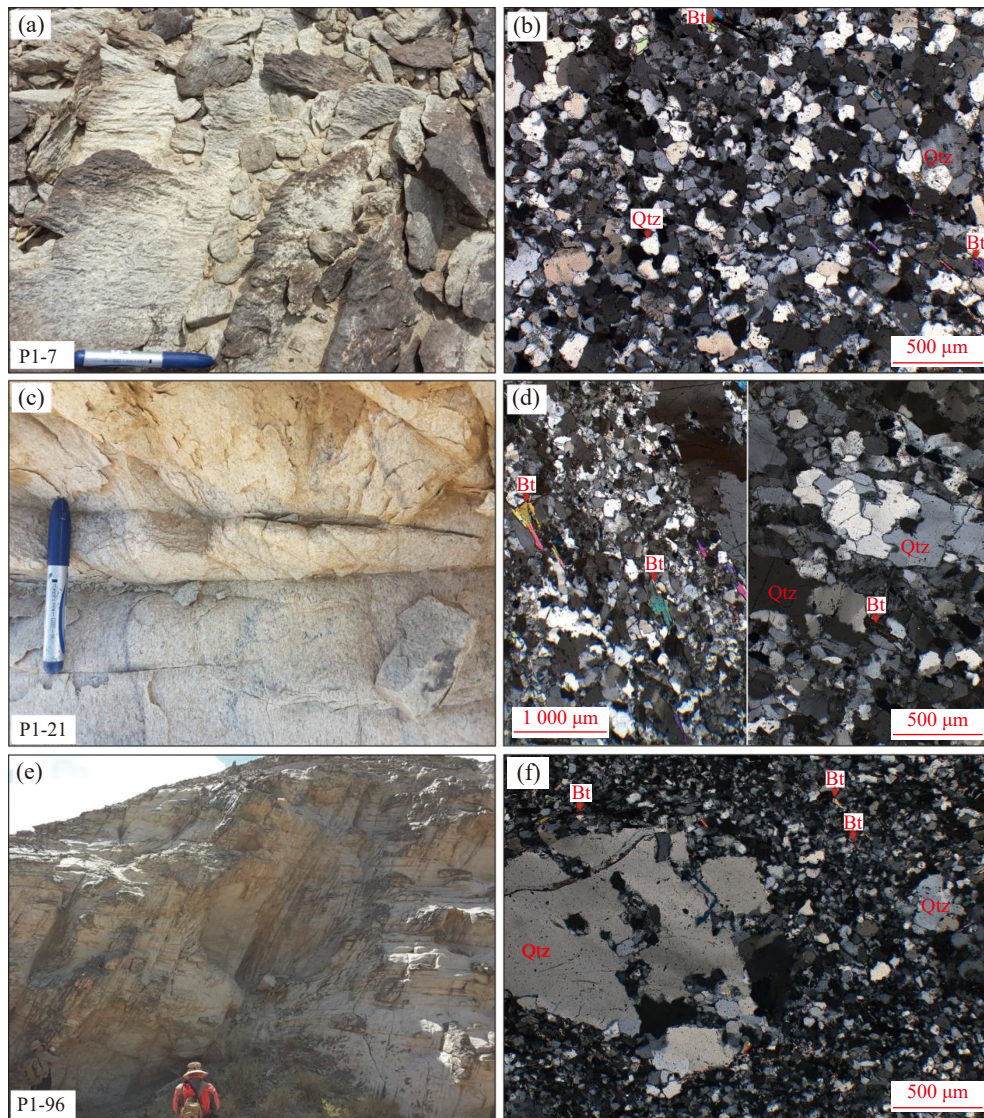


图3 潘家井子一带灰白色变粒岩(a,b)、云母石英片岩(c,d)和灰白色浅粒岩(e,f)的野外露头及显微特征

Fig. 3 (a, b) Photographs showing the outcrops and mineral assemblages of the gray laptinite, (c, d) mica quartz schist, and (e, f) white-gray leptite

0.30~1.81, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 275~299 Ma, 其加权平均年龄为 $(285\pm 2)\text{Ma}$ (表 1, 图 6a)。

挑选自云母石英片岩(P1-21)的锆石呈浅黄色柱状自形晶, 粒径为 100~200 μm , 长宽比 2:1~1:1, 发育弱震荡环带(图 5b), 锆石 Th/U 值为 0.38~0.84。50 个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 274~300 Ma, 其加权平均年龄为 $(286\pm 2)\text{Ma}$ (表 2, 图 6b)。

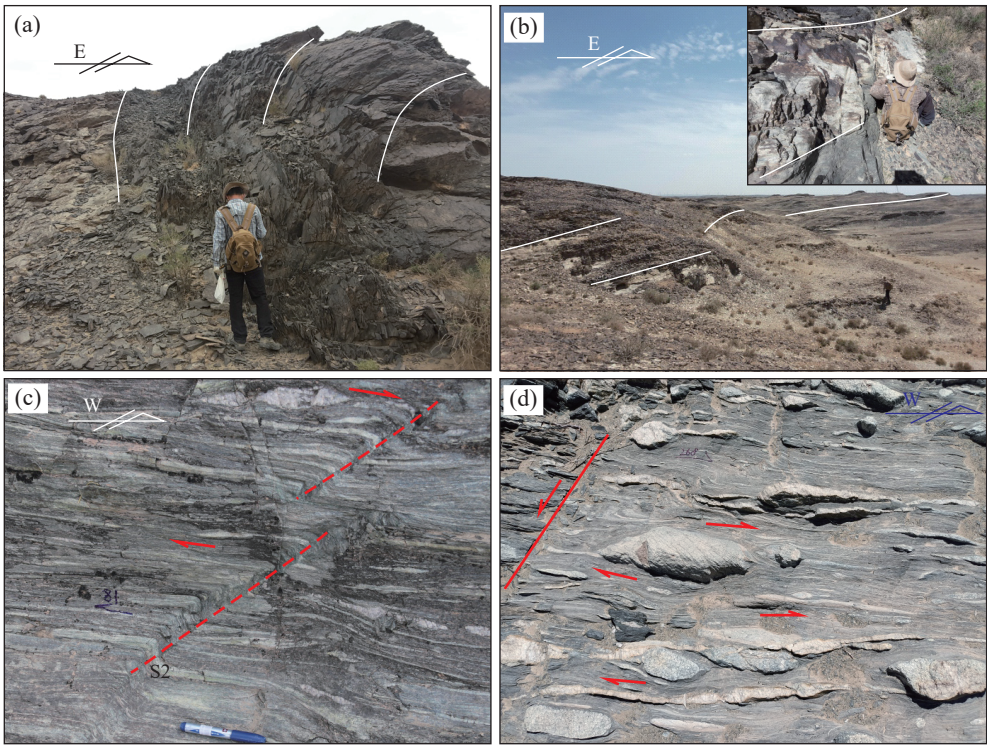
来自灰白色浅粒岩(P1-96)的锆石呈浅紫色长柱状自形晶, 粒径为 120~250 μm , 长宽比 3:1~2:1, 锆石内部震荡环带不发育, 边部发育密集的震荡环带, 总体呈面状影纹特征(图 5c), 锆石 Th/U 值 0.20~0.88。54 个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 266~327 Ma

(表 3, 图 6c), 其加权平均年龄为 $(294\pm 4)\text{Ma}$ 。

来自花岗质砾石的锆石呈无色透明自形-半自形晶, 粒径为 80~120 μm , 长宽比 2:1~1:1, 锆石 CL 影像较暗, 发育震荡环带, 个别锆石具有核幔结构(图 5d)。23 个测点 Th/U 值为 0.21~0.62, 其谐和年龄分布于 272~359 Ma, 峰值年龄为 $(318\pm 7)\text{Ma}$ (表 4, 图 6d)。其中, 最年轻锆石年龄为 $(272\pm 6)\text{Ma}$, 可限定该砾岩的最大沉积年龄。

4.2 斜长角闪岩和流纹岩地球化学特征

斜长角闪岩具有相对较低的烧失量(0.63%~0.89%)。3 件样品具有稳定的 SiO_2 含量(50.00%~50.12%), 具有高 TiO_2 (2.35%~2.42%)、 Na_2O (4.14%~



a. 岩石成分层(S₀)中常褶皱转折端, 枢纽近水平; b. 岩石成分层(S₀)近水平; c. S₁ 发育不对称褶皱指示右行剪切变形; d. 变质砾岩中砾石定向排列, 指示右行走滑构造

图4 潘家井子一带变质火山-碎屑岩变形特征

Fig. 4 The deformation characteristics of the mata-volcaniclastic rocks in Panjiajingzi area

表 1 灰白色变粒岩锆石 U-Pb 年龄数据表

Tab. 1 Zircon U-Pb age of grayish-white granulite

测试点	同位素比值								U-Pb年龄 (Ma)								含量 (10 ⁻⁶)		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Th	U	Th/U
P1-7,01	0.055 11	0.003 49	0.340 26	0.021 14	0.044 80	0.001 08	0.015 66	0.000 58	416	136	297	16	283	7	314	11	2 179	3 674	0.59
P1-7,02	0.053 38	0.003 55	0.338 60	0.022 08	0.046 02	0.001 12	0.014 13	0.000 65	345	143	296	17	290	7	284	13	1 621	4 160	0.39
P1-7,03	0.052 29	0.004 09	0.331 06	0.025 40	0.045 93	0.001 20	0.011 79	0.000 66	298	169	290	19	290	7	237	13	1 999	4 023	0.50
P1-7,04	0.051 77	0.004 36	0.339 08	0.028 00	0.047 52	0.001 26	0.015 34	0.000 71	275	182	297	21	299	8	308	14	2 218	3 536	0.63
P1-7,05	0.050 72	0.003 71	0.320 11	0.023 03	0.045 78	0.001 13	0.016 40	0.000 62	228	161	282	18	289	7	329	12	2 543	3 869	0.66
P1-7,06	0.051 18	0.003 20	0.321 32	0.019 72	0.045 54	0.001 08	0.016 98	0.000 58	249	138	283	15	287	7	340	11	2 779	3 980	0.70
P1-7,08	0.051 40	0.002 96	0.318 14	0.018 03	0.044 90	0.001 04	0.014 01	0.000 49	259	127	281	14	283	6	281	10	2 769	4 442	0.62
P1-7,09	0.051 53	0.003 31	0.316 17	0.019 93	0.044 51	0.001 07	0.015 20	0.000 64	265	141	279	15	281	7	305	13	1 476	3 523	0.42
P1-7,10	0.052 58	0.002 97	0.323 63	0.017 97	0.044 65	0.001 03	0.014 91	0.000 53	311	123	285	14	282	6	299	10	2 240	4 164	0.54
P1-7,11	0.050 11	0.004 11	0.314 94	0.025 37	0.045 59	0.001 17	0.014 83	0.000 64	200	180	278	20	287	7	298	13	1 279	2 201	0.58
P1-7,12	0.051 59	0.001 89	0.324 40	0.011 74	0.045 61	0.000 96	0.015 04	0.000 38	267	82	285	9	288	6	302	7	12 006	12 518	0.96
P1-7,13	0.051 42	0.002 31	0.323 98	0.014 33	0.045 70	0.001 00	0.015 18	0.000 47	260	100	285	11	288	6	305	9	3 722	7 290	0.51
P1-7,14	0.051 59	0.002 39	0.326 00	0.014 83	0.045 84	0.001 01	0.015 98	0.000 51	267	103	287	11	289	6	320	10	2 926	6 472	0.45
P1-7,15	0.050 87	0.002 61	0.315 63	0.015 94	0.045 01	0.001 01	0.014 51	0.000 50	235	114	279	12	284	6	291	10	2 906	5 935	0.49
P1-7,16	0.050 32	0.004 03	0.315 94	0.024 85	0.045 54	0.001 18	0.013 93	0.000 84	210	176	279	19	287	7	280	17	740	2 463	0.30
P1-7,17	0.051 53	0.002 53	0.323 93	0.015 61	0.045 60	0.001 02	0.015 37	0.000 47	265	109	285	12	287	6	308	9	4 122	5 959	0.69

续表 1

测试点	同位素比值								U-Pb年龄 (Ma)								含量 (10 ⁻⁶)		Th/U
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Th	U	
P1-7,18	0.047 47	0.007 44	0.304 27	0.046 86	0.046 50	0.001 68	0.015 13	0.001 31	72	336	270	36	293	10	304	26	268	629	0.43
P1-7,19	0.052 24	0.003 36	0.323 35	0.020 37	0.044 89	0.001 08	0.014 18	0.000 50	296	140	285	16	283	7	285	10	3 717	4 518	0.82
P1-7,20	0.052 02	0.003 38	0.328 51	0.020 93	0.045 81	0.001 10	0.015 36	0.000 60	286	142	288	16	289	7	308	12	2 284	4 142	0.55
P1-7,21	0.056 50	0.005 77	0.354 12	0.035 37	0.045 46	0.001 37	0.017 17	0.001 04	471	212	308	27	287	8	344	21	659	1 447	0.46
P1-7,22	0.051 55	0.003 50	0.311 98	0.020 77	0.043 89	0.001 07	0.014 73	0.000 51	266	149	276	16	277	7	296	10	3 213	3 576	0.90
P1-7,24	0.057 55	0.003 03	0.364 86	0.018 84	0.045 98	0.001 05	0.017 93	0.000 56	512	112	316	14	290	6	359	11	3 553	5 181	0.69
P1-7,25	0.054 27	0.002 75	0.336 46	0.016 74	0.044 96	0.001 01	0.017 14	0.000 51	382	110	295	13	284	6	344	10	4 855	6 345	0.77
P1-7,26	0.050 34	0.003 92	0.314 61	0.024 03	0.045 32	0.001 17	0.015 86	0.000 78	211	171	278	19	286	7	318	16	1 373	2 780	0.49
P1-7,27	0.053 43	0.002 32	0.334 26	0.014 26	0.045 37	0.000 98	0.016 23	0.000 45	347	95	293	11	286	6	325	9	7 294	8 820	0.83
P1-7,28	0.050 12	0.002 65	0.317 93	0.016 54	0.046 00	0.001 04	0.016 63	0.000 50	201	119	280	13	290	6	333	10	5 452	6 678	0.82
P1-7,29	0.052 83	0.003 18	0.335 41	0.019 77	0.046 04	0.001 08	0.016 69	0.000 63	322	131	294	15	290	7	335	13	2 661	5 312	0.50
P1-7,30	0.051 80	0.002 48	0.318 05	0.014 97	0.044 53	0.000 98	0.015 78	0.000 49	276	106	280	12	281	6	316	10	4 687	8 088	0.58
P1-7,32	0.058 51	0.004 63	0.377 09	0.029 18	0.046 73	0.001 24	0.015 23	0.000 78	549	164	325	22	294	8	306	16	1 146	2 326	0.49
P1-7,33	0.054 06	0.009 86	0.340 64	0.061 06	0.045 69	0.001 84	0.015 07	0.001 17	373	366	298	46	288	11	302	23	493	518	0.95
P1-7,34	0.053 22	0.002 13	0.322 88	0.012 69	0.043 99	0.000 94	0.015 85	0.000 42	338	88	284	10	278	6	318	8	11 053	12 373	0.89
P1-7,36	0.051 47	0.002 35	0.313 50	0.014 08	0.044 16	0.000 96	0.014 92	0.000 45	262	102	277	11	279	6	299	9	5 778	8 519	0.68
P1-7,37	0.050 78	0.002 27	0.315 96	0.013 88	0.045 11	0.000 98	0.018 66	0.000 58	231	100	279	11	284	6	374	12	3 494	8 375	0.42
P1-7,38	0.051 94	0.002 44	0.320 75	0.014 80	0.044 77	0.000 98	0.014 52	0.000 41	283	104	283	11	282	6	291	8	7 864	7 327	1.07
P1-7,39	0.052 03	0.002 50	0.320 83	0.015 11	0.044 70	0.000 98	0.015 78	0.000 43	287	106	283	12	282	6	317	9	8 145	6 810	1.20
P1-7,40	0.051 69	0.002 36	0.316 45	0.014 15	0.044 38	0.000 96	0.014 82	0.000 43	272	101	279	11	280	6	297	9	7 014	9 028	0.78
P1-7,41	0.063 91	0.002 94	0.407 09	0.018 29	0.046 18	0.001 02	0.018 44	0.000 61	739	94	347	13	291	6	369	12	3 459	7 079	0.49
P1-7,42	0.052 10	0.003 32	0.320 88	0.020 03	0.044 65	0.001 06	0.015 62	0.000 59	290	139	283	15	282	7	313	12	2 509	4 130	0.61
P1-7,43	0.056 60	0.002 93	0.359 66	0.018 22	0.046 06	0.001 04	0.015 22	0.000 42	475	111	312	14	290	6	305	8	9 165	5 464	1.68
P1-7,44	0.051 56	0.003 07	0.321 64	0.018 74	0.045 22	0.001 05	0.018 05	0.000 65	266	131	283	14	285	6	362	13	2 241	4 229	0.53
P1-7,45	0.053 55	0.003 05	0.332 14	0.018 53	0.044 95	0.001 04	0.016 31	0.000 64	352	123	291	14	284	6	327	13	2 311	5 079	0.45
P1-7,46	0.053 91	0.002 72	0.342 90	0.016 92	0.046 10	0.001 03	0.016 74	0.000 53	367	109	299	13	291	6	336	11	3 909	5 859	0.67
P1-7,47	0.051 71	0.002 53	0.322 88	0.015 50	0.045 25	0.001 00	0.016 01	0.000 44	273	108	284	12	285	6	321	9	8 784	6 577	1.34
P1-7,48	0.049 28	0.003 22	0.307 89	0.019 73	0.045 28	0.001 07	0.016 00	0.000 58	161	146	273	15	286	7	321	11	2 651	3 793	0.70
P1-7,49	0.050 77	0.002 92	0.312 40	0.017 59	0.044 59	0.001 02	0.015 22	0.000 51	230	127	276	14	281	6	305	10	3 595	4 836	0.74
P1-7,50	0.052 90	0.006 17	0.328 23	0.037 49	0.044 97	0.001 42	0.015 64	0.000 87	324	245	288	29	284	9	314	17	997	1 325	0.75
P1-7,51	0.052 39	0.005 22	0.319 56	0.031 15	0.044 20	0.001 28	0.013 32	0.000 51	302	212	282	24	279	8	268	10	2 811	1 552	1.81
P1-7,52	0.051 00	0.003 37	0.313 67	0.020 27	0.044 56	0.001 07	0.013 91	0.000 65	241	145	277	16	281	7	279	13	1 376	3 467	0.40
P1-7,53	0.050 37	0.003 28	0.310 83	0.019 84	0.044 71	0.001 06	0.015 38	0.000 56	212	144	275	15	282	7	308	11	3 160	4 148	0.76
P1-7,54	0.052 74	0.003 02	0.325 34	0.018 21	0.044 69	0.001 03	0.016 12	0.000 63	318	125	286	14	282	6	323	13	2 122	4 849	0.44
P1-7,56	0.051 99	0.002 89	0.318 11	0.017 30	0.044 33	0.001 01	0.015 41	0.000 51	285	122	280	13	280	6	309	10	3 693	4 946	0.75
P1-7,57	0.050 23	0.002 96	0.313 58	0.018 11	0.045 23	0.001 04	0.015 04	0.000 54	205	131	277	14	285	6	302	11	2 923	4 358	0.67
P1-7,58	0.053 37	0.002 30	0.320 96	0.013 53	0.043 57	0.000 93	0.016 02	0.000 44	345	94	283	10	275	6	321	9	8 734	8 736	1.00
P1-7,59	0.056 49	0.002 80	0.359 57	0.017 39	0.046 11	0.001 02	0.016 66	0.000 49	471	107	312	13	291	6	334	10	6 026	5 992	1.01
P1-7,60	0.051 68	0.001 99	0.330 01	0.012 43	0.046 26	0.000 97	0.017 06	0.000 46	271	86	290	9	292	6	342	9	10 769	13 004	0.83

表 2 云母石英片岩锆石 U-Pb 年龄数据表

Tab. 2 Zircon U-Pb ages of mica quartz schist

测试点	同位素比值								U-Pb年龄 (Ma)								含量 (10 ⁻⁶)		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Th	U	Th/U
P1-21,03	0.057 96	0.005 28	0.355 97	0.031 83	0.044 53	0.001 27	0.011 59	0.000 55	528	188	309	24	281	8	233	11	1 557	1 861	0.84
P1-21,04	0.051 33	0.003 57	0.318 29	0.021 85	0.044 96	0.001 13	0.011 84	0.000 49	256	153	281	17	284	7	238	10	1 528	2 726	0.56
P1-21,05	0.057 28	0.004 76	0.365 35	0.029 79	0.046 25	0.001 27	0.013 25	0.000 60	502	174	316	22	291	8	266	12	1 352	1 925	0.70
P1-21,06	0.052 18	0.005 05	0.328 43	0.031 30	0.045 64	0.001 28	0.013 51	0.000 64	293	207	288	24	288	8	271	13	1 152	1 699	0.68
P1-21,08	0.053 53	0.003 77	0.337 87	0.023 44	0.045 77	0.001 15	0.012 95	0.000 51	351	151	296	18	289	7	260	10	2 592	3 689	0.70
P1-21,10	0.049 43	0.003 56	0.324 41	0.023 06	0.047 60	0.001 19	0.014 22	0.000 52	168	160	285	18	300	7	285	10	2 313	3 170	0.73
P1-21,11	0.058 66	0.003 99	0.382 01	0.025 57	0.047 23	0.001 19	0.014 64	0.000 58	554	142	329	19	298	7	294	12	1 923	3 238	0.59
P1-21,12	0.054 44	0.004 87	0.350 54	0.030 82	0.046 70	0.001 30	0.013 36	0.000 71	389	189	305	23	294	8	268	14	1 054	1 879	0.56
P1-21,14	0.053 80	0.003 60	0.330 35	0.021 79	0.044 54	0.001 10	0.013 00	0.000 51	362	144	290	17	281	7	261	10	2 487	4 269	0.58
P1-21,15	0.049 16	0.004 61	0.310 76	0.028 69	0.045 85	0.001 27	0.014 60	0.000 71	156	206	275	22	289	8	293	14	1 152	2 075	0.56
P1-21,16	0.052 21	0.004 33	0.320 84	0.026 16	0.044 57	0.001 20	0.012 52	0.000 60	295	178	283	20	281	7	252	12	1 493	2 671	0.56
P1-21,17	0.052 58	0.003 08	0.330 40	0.019 11	0.045 58	0.001 08	0.012 84	0.000 44	311	128	290	15	287	7	258	9	3 524	4 948	0.71
P1-21,18	0.054 05	0.003 79	0.345 50	0.023 89	0.046 36	0.001 16	0.013 41	0.000 52	373	151	301	18	292	7	269	10	2 168	3 352	0.65
P1-21,20	0.050 95	0.007 90	0.318 30	0.048 51	0.045 31	0.001 68	0.014 80	0.001 15	239	323	281	37	286	10	297	23	443	860	0.52
P1-21,21	0.054 47	0.002 59	0.340 30	0.016 04	0.045 32	0.001 02	0.014 32	0.000 42	391	103	297	12	286	6	288	8	5 966	9 491	0.63
P1-21,22	0.056 32	0.004 41	0.361 22	0.027 78	0.046 53	0.001 24	0.014 42	0.000 65	464	166	313	21	293	8	289	13	1 701	2 957	0.58
P1-21,23	0.050 82	0.003 80	0.314 41	0.023 13	0.044 88	0.001 15	0.014 62	0.000 55	232	164	278	18	283	7	293	11	2 390	3 204	0.75
P1-21,24	0.055 72	0.007 42	0.339 00	0.044 25	0.044 13	0.001 54	0.014 92	0.000 92	441	272	296	34	278	10	299	18	820	1 146	0.72
P1-21,25	0.051 78	0.004 34	0.317 13	0.026 11	0.044 43	0.001 19	0.013 48	0.000 63	276	181	280	20	280	7	271	12	1 845	3 185	0.58
P1-21,26	0.052 70	0.004 61	0.335 74	0.028 83	0.046 21	0.001 27	0.013 79	0.000 65	316	187	294	22	291	8	277	13	1 758	2 461	0.71
P1-21,27	0.058 49	0.006 27	0.362 78	0.038 14	0.045 00	0.001 39	0.012 42	0.000 73	548	219	314	28	284	9	249	15	1 193	1 822	0.66
P1-21,28	0.056 41	0.004 12	0.359 08	0.025 77	0.046 18	0.001 18	0.013 99	0.000 55	468	155	312	19	291	7	281	11	2 209	3 089	0.72
P1-21,29	0.055 64	0.004 93	0.350 02	0.030 44	0.045 64	0.001 28	0.011 58	0.000 61	438	186	305	23	288	8	233	12	1 315	1 958	0.67
P1-21,30	0.052 42	0.004 09	0.326 69	0.025 05	0.045 21	0.001 17	0.014 94	0.000 65	304	168	287	19	285	7	300	13	1 999	3 687	0.54
P1-21,32	0.053 99	0.005 47	0.336 88	0.033 48	0.045 27	0.001 33	0.015 79	0.000 80	370	213	295	25	285	8	317	16	1 404	2 115	0.66
P1-21,33	0.059 17	0.004 81	0.366 27	0.029 25	0.044 91	0.001 20	0.013 58	0.000 59	573	168	317	22	283	7	273	12	1 937	2 852	0.68
P1-21,35	0.046 29	0.005 40	0.288 49	0.033 06	0.045 21	0.001 39	0.011 06	0.001 01	13	259	257	26	285	9	222	20	785	2 075	0.38
P1-21,36	0.054 80	0.004 80	0.337 28	0.029 03	0.044 65	0.001 22	0.013 19	0.000 62	404	185	295	22	282	8	265	12	1 904	2 903	0.66
P1-21,37	0.055 84	0.006 09	0.348 12	0.037 25	0.045 23	0.001 38	0.015 62	0.000 82	446	226	303	28	285	9	313	16	1 304	1 982	0.66
P1-21,38	0.049 65	0.004 28	0.313 79	0.026 62	0.045 85	0.001 22	0.015 43	0.000 72	179	189	277	21	289	8	310	14	1 594	3 065	0.52
P1-21,39	0.058 38	0.005 77	0.371 44	0.035 98	0.046 16	0.001 36	0.015 63	0.000 83	544	203	321	27	291	8	314	16	1 225	2 068	0.59
P1-21,40	0.053 93	0.004 62	0.325 33	0.027 39	0.043 77	0.001 18	0.012 58	0.000 73	368	183	286	21	276	7	253	15	1 523	3 435	0.44
P1-21,41	0.057 82	0.008 06	0.345 67	0.047 26	0.043 38	0.001 54	0.013 68	0.001 05	523	280	302	36	274	10	275	21	709	1 376	0.52
P1-21,42	0.047 54	0.004 31	0.299 31	0.026 76	0.045 68	0.001 21	0.014 09	0.000 62	76	203	266	21	288	7	283	12	2 124	3 157	0.67
P1-21,43	0.049 68	0.003 68	0.306 37	0.022 32	0.044 74	0.001 12	0.013 87	0.000 58	180	164	271	17	282	7	279	11	2 855	4 907	0.58
P1-21,44	0.056 80	0.004 65	0.348 17	0.027 94	0.044 47	0.001 19	0.013 41	0.000 72	483	172	303	21	281	7	269	14	1 812	3 654	0.50
P1-21,45	0.050 66	0.003 66	0.316 26	0.022 46	0.045 29	0.001 13	0.015 01	0.000 57	226	159	279	17	286	7	301	11	2 822	4 149	0.68
P1-21,46	0.050 52	0.007 08	0.321 52	0.044 27	0.046 18	0.001 60	0.011 11	0.000 86	219	295	283	34	291	10	223	17	714	1 171	0.61
P1-21,47	0.053 05	0.004 71	0.334 59	0.029 14	0.045 76	0.001 25	0.018 28	0.000 89	331	189	293	22	288	8	366	18	1 773	3 605	0.49
P1-21,48	0.055 84	0.005 21	0.338 84	0.030 96	0.044 02	0.001 26	0.015 18	0.000 72	446	195	296	23	278	8	305	14	2 494	3 618	0.69
P1-21,50	0.056 15	0.007 99	0.343 17	0.047 73	0.044 34	0.001 67	0.018 02	0.001 37	458	288	300	36	280	10	361	27	591	1 019	0.58
P1-21,51	0.059 60	0.005 07	0.373 92	0.031 13	0.045 52	0.001 26	0.015 02	0.000 73	589	175	323	23	287	8	301	15	2 012	3 184	0.63
P1-21,52	0.051 50	0.005 37	0.324 48	0.033 20	0.045 71	0.001 35	0.014 95	0.000 86	263	223	285	25	288	8	300	17	1 310	2 541	0.52
P1-21,53	0.055 17	0.005 16	0.349 04	0.032 04	0.045 91	0.001 30	0.015 98	0.000 88	419	197	304	24	289	8	320	17	1 486	2 926	0.51
P1-21,54	0.047 59	0.005 76	0.308 52	0.036 80	0.047 04	0.001 42	0.014 87	0.000 91	78	266	273	29	296	9	298	18	1 023	1 994	0.51
P1-21,55	0.055 38	0.004 91	0.340 13	0.029 53	0.044 56	0.001 24	0.014 76	0.000 71	427	187	297	22	281	8	296	14	2 092	3 366	0.62
P1-21,56	0.051 36	0.004 41	0.313 46	0.026 41	0.044 28	0.001 19	0.014 89	0.000 67	257	186	277	20	279	7	299	13	2 133	3 402	0.63
P1-21,57	0.053 05	0.007 11	0.318 52	0.041 89	0.043 56	0.001 46	0.011 23	0.000 88	331	278	281	32	275	9	226	18	713	1 390	0.51
P1-21,58	0.054 53	0.004 38	0.337 48	0.026 60	0.044 90	0.001 18	0.015 73	0.000 66	393	171	295	20	283	7	315	13	2 448	3 664	0.67
P1-21,59	0.050 82	0.004 29	0.313 73	0.025 98	0.044 79	0.001 19	0.014 01	0.000 69	233	184	277	20	283	7	281	14	1 468	2 832	0.52

表 3 变火山碎屑岩锆石 U-Pb 年龄数据表

Tab. 3 Zircon U-Pb ages of metamorphic pyroclastic rocks

测试点	同位素比值								U-Pb年龄 (Ma)								含量 (10 ⁻⁶)		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Th	U	Th/U
P1-96,01	0.053 37	0.003 94	0.331 72	0.023 95	0.045 10	0.001 09	0.014 89	0.000 65	344	158	291	18	284	7	299	13	1 148	2 581	0.45
P1-96,02	0.053 66	0.003 38	0.332 03	0.020 43	0.044 89	0.001 03	0.014 21	0.000 44	357	136	291	16	283	6	285	9	3 445	3 912	0.88
P1-96,03	0.055 90	0.003 54	0.345 42	0.021 36	0.044 83	0.001 03	0.013 58	0.000 47	448	135	301	16	283	6	273	9	2 521	3 520	0.72
P1-96,04	0.055 22	0.003 57	0.333 31	0.021 03	0.043 78	0.001 02	0.013 99	0.000 49	421	138	292	16	276	6	281	10	2 692	4 024	0.67
P1-96,05	0.049 77	0.007 75	0.303 98	0.046 68	0.044 31	0.001 46	0.016 80	0.001 08	184	327	270	36	280	9	337	22	529	969	0.55
P1-96,06	0.051 61	0.007 44	0.313 33	0.044 46	0.044 03	0.001 42	0.014 13	0.001 13	268	301	277	34	278	9	284	22	537	1 095	0.49
P1-96,07	0.058 73	0.006 52	0.340 93	0.036 99	0.042 10	0.001 30	0.012 15	0.000 75	557	225	298	28	266	8	244	15	1 716	2 674	0.64
P1-96,08	0.056 26	0.005 31	0.365 68	0.033 77	0.047 14	0.001 30	0.013 87	0.000 75	462	197	316	25	297	8	278	15	921	1 670	0.55
P1-96,09	0.051 90	0.002 81	0.320 26	0.016 98	0.044 75	0.000 98	0.013 55	0.000 44	281	119	282	13	282	6	272	9	3 807	6 637	0.57
P1-96,10	0.053 06	0.002 97	0.324 56	0.017 76	0.044 36	0.000 98	0.015 04	0.000 50	331	122	285	14	280	6	302	10	3 315	6 312	0.53
P1-96,11	0.053 17	0.003 75	0.329 98	0.022 79	0.044 99	0.001 08	0.013 76	0.000 57	336	152	290	17	284	7	276	11	2 027	3 554	0.57
P1-96,12	0.055 54	0.006 58	0.342 06	0.039 71	0.044 64	0.001 39	0.015 10	0.000 89	434	245	299	30	282	9	303	18	993	1 641	0.61
P1-96,13	0.053 02	0.004 33	0.324 19	0.025 96	0.044 32	0.001 13	0.012 22	0.000 63	330	175	285	20	280	7	246	13	1 389	2 777	0.50
P1-96,14	0.052 49	0.006 78	0.326 43	0.041 36	0.045 08	0.001 45	0.015 85	0.000 98	307	270	287	32	284	9	318	20	823	1 403	0.59
P1-96,16	0.053 25	0.006 01	0.331 07	0.036 64	0.045 06	0.001 33	0.013 99	0.000 80	340	237	290	28	284	8	281	16	810	1 344	0.60
P1-96,17	0.061 60	0.004 78	0.395 26	0.029 93	0.046 51	0.001 21	0.015 08	0.000 68	660	158	338	22	293	7	303	14	1 584	2 662	0.60
P1-96,18	0.053 18	0.005 39	0.336 36	0.033 44	0.045 83	0.001 29	0.014 99	0.000 73	337	215	294	25	289	8	301	14	1 830	2 648	0.69
P1-96,19	0.053 52	0.004 64	0.340 21	0.028 89	0.046 06	0.001 21	0.015 45	0.000 77	351	184	297	22	290	7	310	15	1 593	3 268	0.49
P1-96,20	0.053 77	0.005 61	0.334 24	0.034 23	0.045 04	0.001 28	0.014 40	0.000 87	361	220	293	26	284	8	289	17	934	1 886	0.50
P1-96,21	0.049 94	0.004 27	0.334 54	0.028 09	0.048 54	0.001 25	0.015 67	0.000 74	192	187	293	21	306	8	314	15	1 670	3 208	0.52
P1-96,22	0.056 82	0.005 50	0.384 03	0.036 38	0.048 97	0.001 40	0.017 29	0.000 90	484	201	330	27	308	9	347	18	1 612	2 640	0.61
P1-96,23	0.053 93	0.005 06	0.351 24	0.032 27	0.047 18	0.001 32	0.013 53	0.000 82	368	199	306	24	297	8	272	16	1 302	2 637	0.49
P1-96,24	0.048 22	0.009 41	0.303 33	0.058 41	0.045 58	0.001 76	0.013 20	0.001 38	110	405	269	46	287	11	265	28	407	822	0.50
P1-96,25	0.058 91	0.009 64	0.392 18	0.062 83	0.048 23	0.001 91	0.016 76	0.001 40	564	321	336	46	304	12	336	28	514	944	0.54
P1-96,27	0.055 41	0.005 18	0.361 52	0.033 15	0.047 27	0.001 30	0.015 91	0.000 81	429	196	313	25	298	8	319	16	1 403	2 546	0.55
P1-96,28	0.053 59	0.008 54	0.357 95	0.056 19	0.048 39	0.001 69	0.012 81	0.001 25	354	325	311	42	305	10	257	25	489	1 060	0.46
P1-96,29	0.052 86	0.005 33	0.339 30	0.033 55	0.046 50	0.001 35	0.013 28	0.000 74	323	214	297	25	293	8	267	15	1 588	2 512	0.63
P1-96,32	0.054 78	0.003 83	0.362 00	0.024 80	0.047 87	0.001 18	0.016 07	0.000 65	403	149	314	18	302	7	322	13	2 809	4 956	0.57
P1-96,33	0.053 27	0.004 10	0.332 02	0.025 09	0.045 16	0.001 15	0.014 52	0.000 63	340	165	291	19	285	7	291	13	2 260	3 891	0.58
P1-96,34	0.053 84	0.005 89	0.356 87	0.038 20	0.048 02	0.001 48	0.019 53	0.001 02	364	230	310	29	302	9	391	20	1 243	1 770	0.70
P1-96,35	0.050 60	0.004 55	0.338 32	0.029 85	0.048 44	0.001 30	0.018 21	0.000 89	223	195	296	23	305	8	365	18	1 800	3 753	0.48
P1-96,36	0.049 32	0.003 47	0.322 04	0.022 26	0.047 31	0.001 15	0.015 37	0.000 66	163	157	284	17	298	7	308	13	2 070	4 462	0.46
P1-96,37	0.054 89	0.005 10	0.334 66	0.030 47	0.044 18	0.001 23	0.019 36	0.001 37	408	195	293	23	279	8	388	27	569	2 832	0.20
P1-96,38	0.048 34	0.006 43	0.342 38	0.044 71	0.051 32	0.001 72	0.020 15	0.001 56	116	287	299	34	323	11	403	31	1 106	2 689	0.41
P1-96,39	0.049 30	0.006 22	0.317 66	0.039 28	0.046 68	0.001 53	0.015 93	0.001 13	162	271	280	30	294	9	320	22	1 047	2 244	0.47
P1-96,40	0.051 58	0.004 08	0.343 71	0.026 65	0.048 28	0.001 25	0.015 59	0.000 69	267	172	300	20	304	8	313	14	2 640	4 314	0.61
P1-96,41	0.052 58	0.004 25	0.359 25	0.028 51	0.049 51	0.001 30	0.017 32	0.000 69	311	174	312	21	312	8	347	14	3 472	4 412	0.79
P1-96,42	0.051 36	0.003 96	0.355 79	0.026 94	0.050 20	0.001 29	0.017 49	0.000 72	257	168	309	20	316	8	351	14	3 324	5 181	0.64
P1-96,43	0.053 75	0.004 70	0.343 99	0.029 48	0.046 38	0.001 28	0.019 24	0.000 95	360	186	300	22	292	8	385	19	2 359	4 959	0.48
P1-96,44	0.048 39	0.005 50	0.330 30	0.036 91	0.049 47	0.001 47	0.018 88	0.001 10	118	248	290	28	311	9	378	22	1 048	2 229	0.47
P1-96,45	0.056 36	0.009 26	0.369 33	0.059 42	0.047 49	0.001 92	0.018 56	0.001 72	466	328	319	44	299	12	372	34	399	938	0.43
P1-96,47	0.053 82	0.004 22	0.347 31	0.026 71	0.046 77	0.001 22	0.017 32	0.000 82	363	167	303	20	295	8	347	16	1 958	3 913	0.50
P1-96,49	0.045 63	0.010 92	0.313 76	0.074 01	0.049 84	0.002 35	0.014 97	0.001 94	0	473	277	57	314	14	300	39	352	891	0.39
P1-96,50	0.051 66	0.004 10	0.340 90	0.026 53	0.047 83	0.001 25	0.016 92	0.000 74	270	172	298	20	301	8	339	15	2 426	4 129	0.59
P1-96,51	0.053 96	0.005 88	0.370 05	0.039 52	0.049 72	0.001 53	0.020 95	0.001 26	369	229	320	29	313	9	419	25	1 275	2 750	0.46
P1-96,52	0.051 55	0.004 28	0.352 21	0.028 68	0.049 54	0.001 33	0.018 74	0.000 79	266	180	306	22	312	8	375	16	3 232	4 829	0.67
P1-96,53	0.051 55	0.005 81	0.340 43	0.037 63	0.047 89	0.001 50	0.016 45	0.000 94	266	239	298	29	302	9	330	19	1 591	2 508	0.63
P1-96,54	0.048 57	0.008 05	0.331 07	0.053 93	0.049 43	0.001 92	0.014 67	0.001 53	127	349	290	41	311	12	294	31	660	1 201	0.55
P1-96,55	0.052 81	0.005 00	0.358 15	0.033 24	0.049 19	0.001 40	0.018 56	0.001 13	321	202	311	25	310	9	372	22	1 750	4 106	0.43
P1-96,56	0.053 75	0.006 30	0.363 97	0.041 83	0.049 12	0.001 58	0.020 83	0.001 17											

表 4 花岗质砾石的锆石 U-Pb 年龄数据表

Tab. 4 Zircon U-Pb ages of granitic gravel

测试点	同位素比值								U-Pb年龄 (Ma)								含量 (10 ⁻⁶)		Th/U
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		Th	U	
D1052,1	0.054 00	0.002 34	0.321 43	0.013 57	0.043 17	0.000 90	0.013 72	0.000 40	371	94	283	10	272	6	275	8	4 395	7 940	0.55
D1052,2	0.058 11	0.001 88	0.366 85	0.011 53	0.045 79	0.000 92	0.016 71	0.000 44	533	70	317	9	289	6	335	9	7 166	21 172	0.34
D1052,3	0.052 55	0.002 35	0.315 22	0.013 74	0.043 50	0.000 91	0.015 12	0.000 49	310	99	278	11	275	6	303	10	3 009	8 739	0.34
D1052,4	0.054 24	0.002 70	0.351 51	0.017 09	0.047 01	0.001 01	0.016 02	0.000 61	381	108	306	13	296	6	321	12	1 893	6 174	0.31
D1052,6	0.053 54	0.002 52	0.326 74	0.015 01	0.044 27	0.000 94	0.014 57	0.000 49	352	103	287	11	279	6	292	10	3 046	7 791	0.39
D1052,8	0.055 94	0.002 62	0.390 12	0.017 78	0.050 58	0.001 08	0.018 15	0.000 70	450	101	335	13	318	7	364	14	3 913	17 397	0.22
D1052,9	0.058 26	0.002 73	0.374 86	0.017 12	0.046 67	0.001 00	0.021 99	0.000 73	539	100	323	13	294	6	440	15	3 137	10 819	0.29
D1052,12	0.051 07	0.004 10	0.337 86	0.026 57	0.047 99	0.001 21	0.022 22	0.001 14	244	175	296	20	302	7	444	22	17 334	63 444	0.27
D1052,13	0.051 75	0.003 61	0.360 19	0.024 59	0.050 49	0.001 20	0.020 67	0.000 99	274	152	312	18	318	7	413	20	2 711	9 584	0.28
D1052,14	0.052 82	0.004 22	0.366 14	0.028 60	0.050 28	0.001 27	0.019 14	0.000 97	321	171	317	21	316	8	383	19	2 660	7 097	0.37
D1052,16	0.052 42	0.005 49	0.413 47	0.042 36	0.057 21	0.001 68	0.029 26	0.001 98	304	222	351	30	359	10	583	39	1 582	5 886	0.27
D1052,17	0.057 67	0.003 82	0.429 86	0.027 77	0.054 07	0.001 29	0.029 24	0.001 31	517	139	363	20	339	8	583	26	3 030	11 556	0.26
D1052,18	0.050 12	0.006 26	0.341 59	0.041 75	0.049 44	0.001 60	0.020 93	0.001 66	201	266	298	32	311	10	419	33	1 363	4 545	0.30
D1052,19	0.050 87	0.004 57	0.366 28	0.032 22	0.052 23	0.001 39	0.024 66	0.001 14	235	195	317	24	328	9	492	22	2 541	5 598	0.45
D1052,20	0.049 34	0.005 16	0.335 84	0.034 42	0.049 37	0.001 41	0.018 86	0.001 27	164	228	294	26	311	9	378	25	1 540	5 063	0.30
D1052,21	0.054 67	0.002 97	0.396 98	0.021 06	0.052 67	0.001 17	0.025 49	0.001 04	399	117	340	15	331	7	509	20	3 824	18 291	0.21
D1052,23	0.052 43	0.003 41	0.370 18	0.023 54	0.051 21	0.001 19	0.019 30	0.000 89	304	142	320	17	322	7	386	18	2 942	11 049	0.27
D1052,24	0.053 13	0.003 66	0.368 05	0.024 79	0.050 25	0.001 20	0.020 19	0.000 72	335	149	318	18	316	7	404	14	5 753	9 298	0.62
D1052,25	0.060 34	0.003 14	0.479 62	0.024 29	0.057 66	0.001 28	0.028 85	0.001 04	616	109	398	17	361	8	575	20	6 708	23 529	0.29
D1052,27	0.057 43	0.003 76	0.392 42	0.025 09	0.049 57	0.001 18	0.019 10	0.000 88	508	138	336	18	312	7	382	17	3 441	10 876	0.32
D1052,28	0.055 75	0.004 28	0.382 86	0.028 72	0.049 82	0.001 25	0.021 12	0.000 99	442	163	329	21	313	8	422	20	24 908	68 272	0.36
D1052,29	0.055 40	0.003 19	0.367 43	0.020 62	0.048 11	0.001 09	0.018 86	0.000 74	428	124	318	15	303	7	378	15	3 263	9 877	0.33
D1052,30	0.058 56	0.003 45	0.417 18	0.023 93	0.051 67	0.001 18	0.024 95	0.001 00	551	124	354	17	325	7	498	20	2 882	10 137	0.28

表 5 斜长角闪岩和浅粒岩主量元素(%)与微量元素(10⁻⁶)

Tab. 5 Main (%) and trace (10⁻⁶) elements in plagioclase amphibolite and leptite

送样号	D1133-2-2h	D1133-2-3h	D1133-2-4h	D0170-1-1H	D0170-1-3H	D0170-1-5H
SiO ₂	49.22	49.21	49.27	75.41	80.88	78.86
TiO ₂	2.31	2.33	2.38	0.14	0.17	0.14
Al ₂ O ₃	16.66	16.67	16.88	11.22	9.33	9.33
Fe ₂ O ₃	4.73	4.22	5.13	2.49	1.39	2.18
FeO	6.35	6.82	6.32	0.50	0.50	0.45
MnO	0.17	0.17	0.16	0.07	0.05	0.07
MgO	5.32	5.21	5.22	0.07	0.09	0.06
CaO	8.33	8.75	7.91	5.37	2.89	5.02
Na ₂ O	4.09	4.15	4.69	1.23	2.30	1.74
K ₂ O	0.67	0.37	0.23	2.81	1.80	1.23
P ₂ O ₅	0.35	0.36	0.35	0.02	0.02	0.02
LOI	0.89	0.80	0.63	0.50	0.41	0.73
Total	99.09	99.06	99.17	99.83	99.828	99.82

续表 5

送样号	D1133-2-2h	D1133-2-3h	D1133-2-4h	D0170-1-1H	D0170-1-3H	D0170-1-5H
Li	30.3	28.8	26.0	2.67	4.02	4.18
Sc	25.5	27.8	28.9	3.33	3.98	2.54
V	255	273	270	7.78	4.80	9.10
Cr	101	99.6	94.1	1.43	1.56	1.1
Co	39.2	41.7	40.8	0.550	0.450	0.500
Ni	76.9	78.4	71.8	2.10	4.52	2.16
Cu	129	84.5	77.6	3.06	2.32	3.00
Zn	117	113	118	22.3	30.4	15.8
Ga	21.9	21.5	22.1	33.9	20.9	25.0
Rb	25.8	10.3	6.25	123	74.8	52.4
Sr	341	314	398	256	141	206
Y	38.2	38.8	41.3	58.0	55.0	47.2
Zr	266	264	283	316	318	286
Nb	6.74	6.28	6.73	13.1	13.6	11.6
Cs	2.27	1.94	0.67	1.12	0.810	0.620
Ba	79.7	95.4	27.6	624	439	384
La	16.7	16.8	17.6	43.7	41.6	38.0
Ce	44.3	43.8	45.9	94.4	93.3	81.2
Pr	6.25	6.41	6.78	12.1	11.4	10.4
Nd	28.8	30.1	31.3	47.9	47.0	41.8
Sm	7.36	7.88	7.93	10.8	10.7	9.22
Eu	2.21	2.33	2.37	1.63	1.66	1.44
Gd	8.11	8.37	8.85	10.9	11.1	9.70
Tb	1.26	1.35	1.38	1.92	1.89	1.63
Dy	8.02	7.91	8.41	11.1	10.8	9.67
Ho	1.54	1.64	1.71	2.26	2.27	2.02
Er	4.58	4.75	4.90	6.74	7.09	5.98
Tm	0.790	0.800	0.810	1.22	1.18	1.06
Yb	4.33	4.53	4.67	6.55	6.57	5.92
Lu	0.730	0.750	0.770	1.12	1.13	0.980
Hf	6.54	6.60	7.10	9.61	9.61	8.78
Ta	0.500	0.460	0.480	1.09	1.05	0.960
Pb	9.29	8.13	13.3	28.3	18.5	18.0
Th	3.93	3.48	3.72	16.6	15.7	14.4
U	1.26	1.23	1.39	3.78	3.76	3.34

4.76%)、 Al_2O_3 (16.97%~17.13%) 含量和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (6.1~20.4), 以及较低的 MgO (5.30%~5.42%)、 P_2O_5 (0.36%~0.37%) 和 $\text{Mg}^\#$ (46.2~47.4)。考虑到其变质作用对其成分的影响, 采用 Nb/Y-Zr/Ti 图解 (图 7a) 进行分类, 显示其具有安山岩/玄武岩组分特征, 在 SiO_2 - $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 图解上进一步显示其具有拉斑系列岩石特征 (图 7b)。斜长角闪岩样品具有相对较低的稀土元素总量 ($\Sigma\text{REE}=135\times10^{-6}\sim143\times10^{-6}$), 呈轻稀土元素 (如 Rb、Ba、Th 等) 富集、重稀土平坦, 总体呈略微右倾 (图 8a) 的配分模式 ($(\text{La}/\text{Yb})_\text{cn}=2.51\sim2.61$), 并显示微弱的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.86\sim0.87$)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 所有样品显示大离子亲石

元素富集、高场强元素分异不明显, 和明显的 Nb-Ta 亏损的特征 (图 8b), 表现出与 Cascades 弧玄武岩相似的地球化学特征 (Schmidt et al., 2017)。

灰白色浅粒岩的烧失量较低 (0.41%~0.73%)。 SiO_2 含量较高 (75.92%~81.35%), 而 TiO_2 (0.14%~0.17%)、 Na_2O (1.24%~2.31%)、 MgO (0.06%~0.09%) 含量则相对较低。在 Nb/Y-Zr/Ti 图解上, 3 件样品落入流纹岩区域 (图 7a)。浅粒岩样品稀土元素具有明显的轻稀土富集、重稀土平坦的右倾配分模式, $(\text{La}/\text{Yb})_\text{cn}=(4.28\sim4.51)$, 具有明显的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.45\sim0.46$) (图 8a)。微量元素显示大离子亲石元素富集和明显的 Nb-Ta、Ti、P 亏损的特征 (图 8b)。

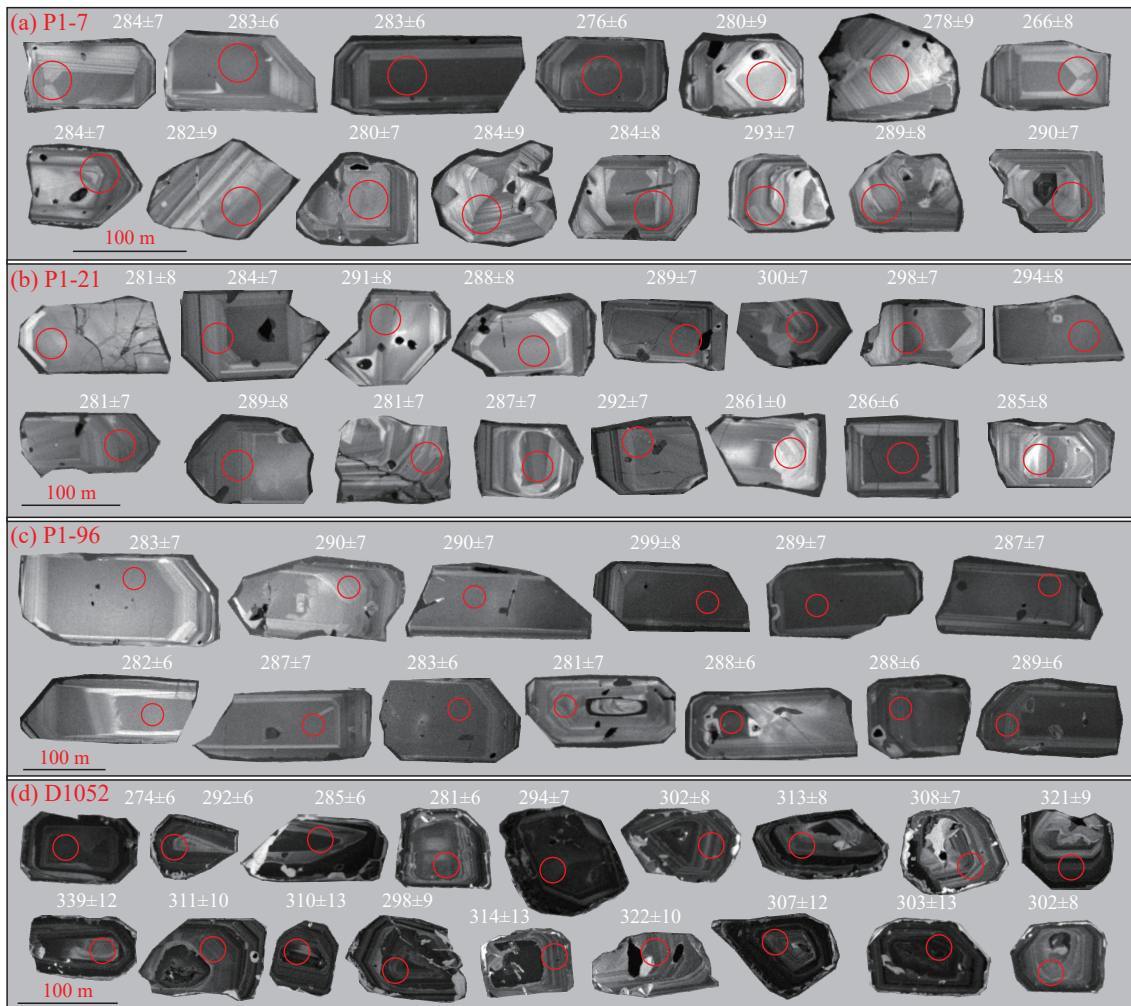


图5 北山造山带南缘潘家井子一带灰白色变粒岩(a)、云母石英片岩(b)、变火山碎屑岩(c)和花岗质砾石(d)的锆石阴极发光照片

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircon grains from (a) gray leptynite, (b) mica quartz schist, (c) white-gray leptite, and (d) gravel samples from meta-conglomerate

5 讨论

5.1 年代学意义及地层时代约束

已有的研究表明位于辉铜山-账房山蛇绿构造混杂岩带和疏勒河断裂之间的石板山构造带发育大量的前寒武纪物质组分,如变质岩石中 1.4 Ga 的继承锆石年代学信息(贺振宇等, 2015)以及新元古代侵入岩浆作用(Zong et al., 2013),证实其具有陆块基底性质。然而,越来越多的研究资料显示,北山造山带原划的“北山岩群”(南部称为“敦煌岩群”)(1:25 万马鬃山幅和红宝石幅)(甘肃省地质调查院, 2001, 2005)包括了大量的新元古代、甚至是古生代的变质火山-碎屑岩,由此导致了对北山造山带前寒武纪构造认识

的分歧和争论(张海迪等, 2021; Zhang et al., 2022),这些分歧也直接制约了对北山造山带南缘构造属性及构造过程的深刻认识。

本次研究获得灰白色变粒岩、云母石英片岩和灰白色浅粒岩锆石自形程度较高,呈自形-半自形晶,发育明显的震荡环带,且具有较高的 Th/U 值(> 0.2),指示其为岩浆成因的锆石(Wu et al., 2004)。其次,获得 3 件样品相对集中的碎屑锆石年代学数据(327~266 Ma),其加权平均年龄为(285±2)Ma~(294±4)Ma,并未发现古老的年代学信息,表明其原岩为物源相对单一的火山-碎屑岩或火山岩。潘家井子变火山-碎屑岩不同组分主要受控于褶皱-断裂构造,说明其形成于不同岩性组分(如英安岩、晶屑凝灰岩、粉砂岩、砾岩等)经历变形-变质而形成带状展布的地质体(图 2)。

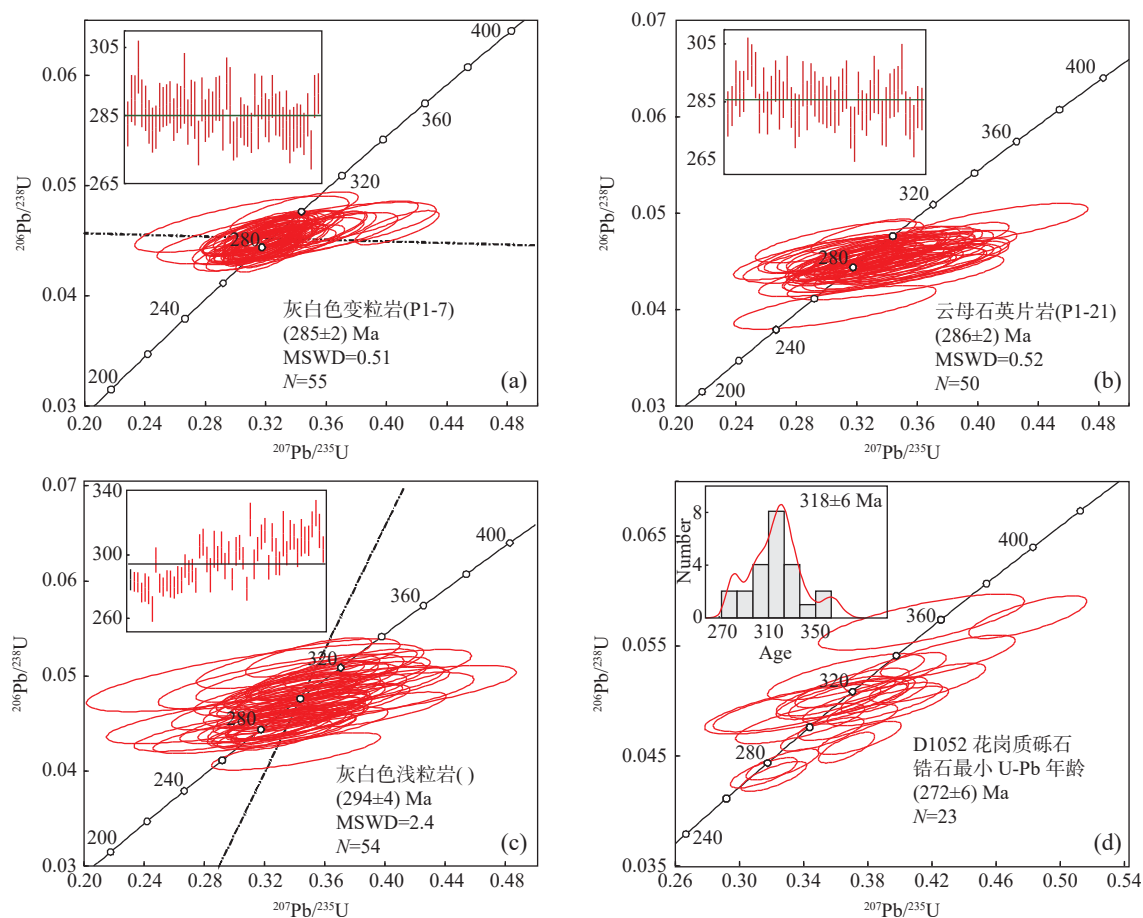
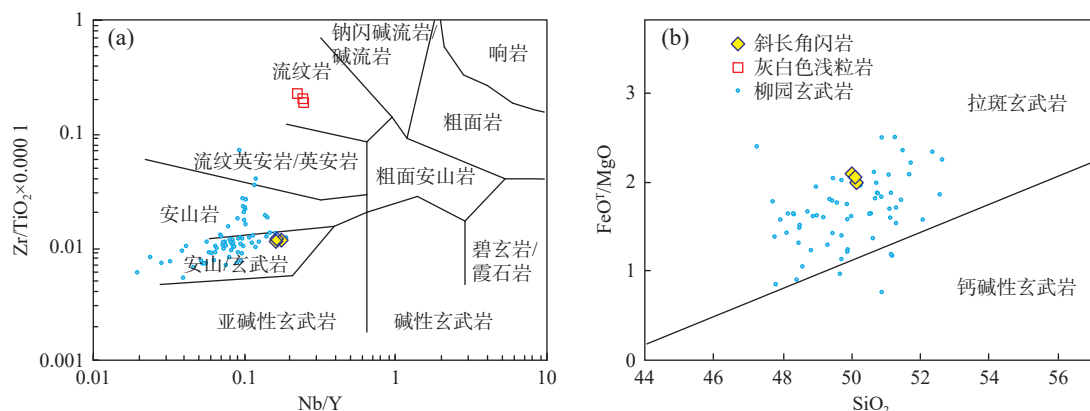


图6 北山造山带南缘潘家井子一带灰白色变粒岩(a)、云母石英片岩(b)、变火山碎屑岩(c)和花岗质砾石(d)的锆石 U-Pb 年龄谐和图和加权平均年龄(或频率分布图)

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams and weighted mean ages (or probability density plot) for (a) gray laptynite, (b) mica quartz schist, (c) white-gray leptite, and (d) gravel samples from meta-conglomerate



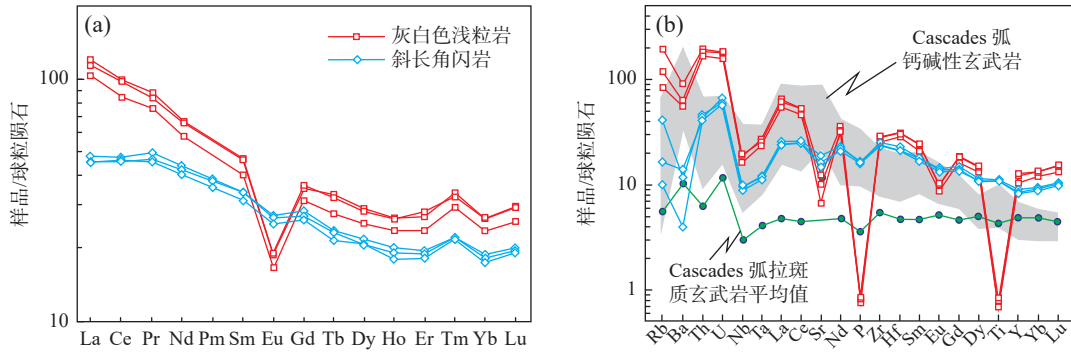
a. Nb/Y-Zr/TiO₂ 图 (Winchester et al., 1977); b. SiO₂-FeO^T/MgO 图 (Miyashiro, 1974); 柳园杂岩中玄武岩数据来自 Santos 等 (2022)

图7 北山造山带南缘潘家井子一带斜长角闪岩和白色变粒岩岩石分类图解

Fig. 7 Classification diagrams for the amphibolite and gray laptynite samples from the Panjiajingzi area, Beishan orogeny

分析结果揭示,灰白色浅粒岩原岩具有流纹岩地球化学特征,与野外地质特征(图 3e、图 3f)和年代学结果相一致,进一步表明该套变质岩系原岩可能为同期岩

浆作用的产物。此外,本次获得了变质砾岩中花岗质砾石的锆石 U-Pb 年龄分布于 559~272 Ma,最小年龄为 (272±6)Ma,表明该套砾岩沉积时代不早于中二



原始地幔数值来自 Sun 等(1989); Cascades 弧玄武岩数据来自 Schmidt 等(2017)

图8 北山造山带南缘潘家井子一带斜长角闪岩和白色变粒岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 8 (a) Chondrite-normalized REE patterns and (b) primitive mantle normalized trace element spider diagrams for the amphibolite and gray laptynite samples from the Panjiayingzi area, Beishan orogeny

叠世。

区内的岩石地层单元划分是基于野外地质调查成果,但限于当时的测试条件,主要依据岩石组成及变质-变形特征将该套地层划分为古元古代敦煌岩群(甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队,1993)。然而,越来越多的研究在这些“古老的地层”中解体出大量的古生代变质岩(Wang et al., 2021; Li et al., 2023)。其次,在北山造山带南缘独山-干泉-梧桐沟-双堡塘等地发育以中-酸性火山岩为主、夹少量玄武岩-安山岩为特征的火山岩组合(如双堡塘组玄武岩夹层),形成时代集中于 294~268 Ma(许伟, 2019),与本次获得的年代学信息一致。值得注意的是,甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队(1993)根据弱变形粉砂岩中的孢粉化石将“敦煌岩群”局部地层厘定为二叠纪双堡塘组。

综上所述,石板山构造带潘家井子一带近 EW 向展布的变质火山-碎屑岩系,岩浆作用时代主要为早二叠世,而砾岩中砾石限定沉积时代不早于中二叠世。因此该套变质岩系应该从原规定的前寒武纪敦煌岩群中予以解体。

5.2 岩浆作用过程和成因

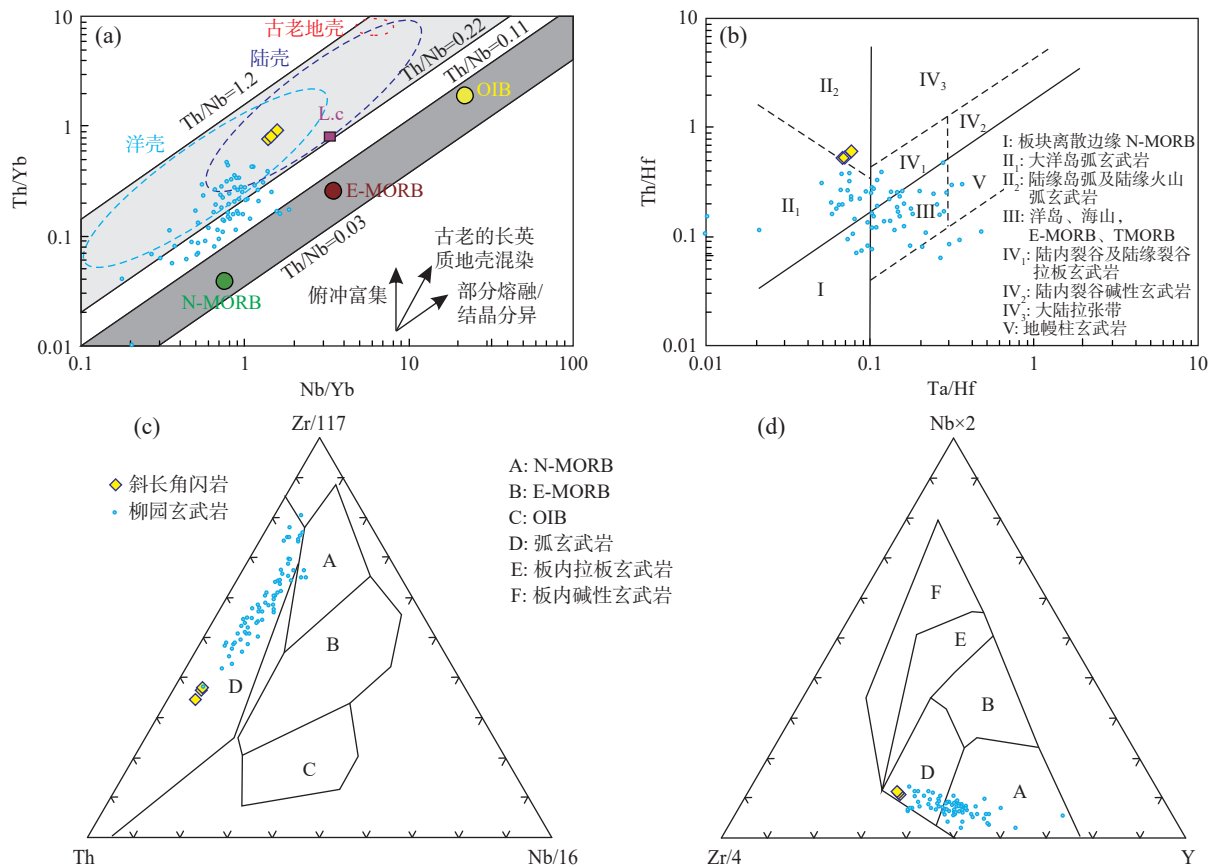
全岩地球化学分析结果显示,斜长角闪岩及变英安岩(灰白色浅粒岩)的烧失量均较低,分别为 0.63%~0.89% 和 0.41%~0.73%,表明岩石相对较弱的后期蚀变。一般而言,Zr 岩石中最稳定的元素,并常用来评估岩浆演化过程中元素的稳定性(Polat et al., 2003)。斜长角闪岩具有稳定的 Zr 含量($264 \times 10^{-6} \sim 283 \times 10^{-6}$),高场强元素(如 Hf、Th、Yb、Y 等)与 Zr 含量正相关,表明其在岩浆演化过程中保持相对稳定。

斜长角闪岩样品具有低 SiO_2 、 P_2O_5 , 富 MgO ($\text{Mg}^\# = 46.2 \sim 47.4$)、高 TiO_2 和 Na_2O 的特征,指示其为安山岩/玄武岩组分特征(图 7a),为幔源岩浆作用的产物。微量元素蛛网图显示,斜长角闪岩具有微弱的 Ti 正异常、弱的 P 负异常(图 8b),表明其发生了相对微弱的地壳混染。斜长角闪岩样品具有相对较高的 Th/Yb 值, Nb/Yb-Th/Yb 判别图解(Smithies et al., 2018)显示其主要受俯冲作用富集的趋势(图 9a),而受古老地壳混染的影响相对较小。相较原始岩浆,斜长角闪岩相对较低的 $\text{Mg}^\#$ 暗示其经历的一定程度的结晶分异,其 Cr、Ni 含量与 MgO 含量呈明显正相关性,指示其经历了一定程度的橄榄石和辉石的结晶分异;而 CaO 、 FeO^T 、 Al_2O_3 等与 MgO 含量无明显相关性,且无明显的 Eu 负异常(图 8a),表明斜长角闪岩的原岩岩浆未经斜长石的结晶分异作用。

灰白色浅粒岩具有明显的 Eu 负异常、P 和 Ti 亏损(图 8),表明相较斜长角闪岩原岩,灰白色浅粒岩(英安岩)经历了明显的斜长石分异和地壳混染。因此,笔者主要利用斜长角闪岩的地球化学特征来探讨其原岩形成的构造环境。

5.3 构造环境

斜长角闪岩具有轻稀土富集、重稀土平坦、高场强元素分异不明显的特征,此外其具有明显高 TiO_2 、亏损 Nb-Ta 等(图 8)特征,指示其具有类似于陆缘弧玄武岩的地球化学特征。在 Nb/Yb-Th/Yb 判别图解上(Smithies et al., 2018),斜长角闪岩样品显示其可能受到俯冲作用的富集和微弱的古老地壳物质的混染(图 9a);而在 Ta/Hf-Th/Hf 环境判别图解上,样品显示大洋岛弧和陆缘火山弧玄武岩特征(图 9b)。在 Zr-Th-



a. Nb/Yb-Th/Yb 图解 (Smithies et al., 2018); b. Ta/Hf-Th/Hf 构造环境判别图 (汪云亮等, 2001); c. Zr-Th-Nb 图解;
d. Nb-Zr-Y 图解 (Meschede, 1986); 柳园杂岩中玄武岩数据来自 Santos 等 (2022)

图9 北山造山带南缘潘家井子一带斜长角闪岩的构造环境判别图

Fig. 9 Discrimination diagrams for the amphibolite and gray laptnite samples from the Panjiajingzi area, Beishan orogeny

Nb 和 Nb-Zr-Y 判别图解中, 均显示出具有弧玄武岩的特征 (图 9c、图 9d)。研究认为, 拉斑质和钙碱性弧玄武岩形成于相对较高的压力和温度条件 (1.0~2.5 GPa, 1220~1350 °C), 而潘家井子斜长角闪岩具有高 Na₂O、TiO₂、Th、Zr 的特征, 也指示其可能形成于俯冲板片熔体的加入 (Schmidt et al., 2017)。区域上, 在珊瑚井、后红泉地区 291~289 Ma 玄武岩地球化学研究结果 (许伟, 2019), 表明其可能经历了陆缘沉积岩、大陆地壳物质的改造。此外, 柳园地区干泉、白墩子一带识别的弧岩浆岩 (297~293 Ma、290~282 Ma) (Hong et al., 2023) 研究结果指示沿着石板山构造带北缘发育早—中二叠世弧岩浆岩带, 可能为柳园洋的洋壳向南俯冲至石板山地块之下诱发的弧岩浆作用 (Xiao et al., 2010; Mao et al., 2012), 并可能持续到三叠纪最终闭合 (Xiao et al., 2015; Wang et al., 2022)。

目前, 部分学者认为北山造山带南部发育的石炭世—中二叠世火山岩可能与地幔柱相关 (Xia et al., 2008; Qin et al., 2011; Su et al., 2011)。然而, 区内以拉

斑玄武岩为主且相对较低 TiO₂ 含量与地幔成因的高 TiO₂ (约 2.87%) (Sun et al., 1989) 洋岛玄武岩 (OIB) 存在一定差异。其次, 已有的研究认为与地幔柱相关的火山喷发具有时限短的特征 (张招崇等, 2007), 这与北山南缘长期持续活动的火山作用不一致, 由此难以推断北山南部同期火山作用与地幔柱相关。此外, 大量的研究表明北山南部中—晚泥盆世发育磨拉石沉积, 认为柳园洋盆早—中二叠世处于裂谷盆地—后碰撞伸展阶段 (左国朝等, 1990; 徐学义等, 2014; 许伟等, 2018; Niu et al., 2021; 张海迪等, 2021; 俞胜等, 2022)。特别是, 近年来在北山造山带南缘柳园一带新厘定出二叠纪多期弧岩浆作用 (Hong et al., 2023) 及三叠纪增生杂岩带 (Wang et al., 2022), 指示沿该带在二叠纪仍处于与俯冲作用相关的构造背景。潘家井子一带变基性火山岩地球化学支持其形成岩浆弧构造环境, 但区内发育大量同期中—酸性火山岩 (294~285 Ma), 也指示其可能构成双峰式火山岩 (许伟, 2019), 与区内已报道的 A 型花岗岩 (许伟等, 2018), 表明其总体位

于与俯冲相关的局部伸展背景。

6 结论

(1)精细的野外调查显示桥湾北变火山碎屑岩具有强变形、弱变质的特征,发育两期明显的构造变形:早期 EW 走向的中常褶皱—断裂构造,晚期叠加近 EW 向走滑剪切变形。

(2)火山岩年代学结果表明其形成于 294~285 Ma,为早—中二叠世岩浆作用的产物;砾岩中的花岗质砾石的锆石 U-Pb 年龄为 272 Ma,表明其沉积时代晚于中二叠世。这些结果表明石板山地块潘家井子一带“敦煌岩群”应厘定为二叠纪(变)火山—碎屑岩。

(3)结合火山岩地球化学特征及区域地质资料,表明北山造山带南缘石板山构造带于早—中二叠世处于与俯冲作用相关的局部伸展构造环境。

致谢:在论文修改过程中,匿名评审人细致评阅全文,并提出了具体修改意见和建议,在此谨致谢忱。

参考文献(References):

- 卜涛,王国强,黄博涛,等.北山北带新元古代 A 型花岗岩: Rodinia 超大陆裂解早期的地质响应[J].岩石学报,2022,38(10):2988–3002.
- BU Tao, WANG Guoqiang, HUANG Botao, et al. Neoproterozoic A type granites in northern Beishan Orogenic Belt: Early response of the Rodinia supercontinent break-up [J]. Acta Petrologica Sinica, 38(10): 2988–3002.
- 陈言飞,邵兆刚,陈宣华,等.北山古堡泉地区榴辉岩变质作用 P-T-t 轨迹及构造意义[J].地球学报,2022,43(6):895–908.
- CHEN Yanfei, SHAO Zhaogang, CHEN Xuanhua, et al. P-T-t Path and Tectonic Implications of Gubaoquan Eclogite from Beishan Region[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(6): 895–908.
- 董云鹏,周鼎武,张国伟,等.中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境[J].岩石学报,2005,21(1):37–44.
- DONG Yunpeng, ZHOU Dingwu, ZHANG Guowei, et al. Tectonic setting of the Wuwamen ophiolite at the southern margin of middle Tianshan Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 37–44.
- 高俊,钱青,龙灵利,等.西天山的增生造山过程[J].地质通报,2009,28(12):1804–1816.
- GAO Jun, QIAN Qing, LONG Lingli, et al. Accretionary orogenic process of Western Tianshan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(12): 1804–1816.
- 何世平,任秉琛,姚文光,等.甘肃内蒙古北山地区构造单元划分[J].西北地质,2002,35(4):30–40.
- HE Shiping, REN Bingchen, YAO Wenguang, et al. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu-Inner Mongolia [J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 30–40.
- 贺振宇,孙立新,毛玲娟,等.北山造山带南部片麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素:中元古代的岩浆作用与地壳生长[J].科学通报,2015,60(4):389–399.
- HE Zhenyu, SUN Lixin, MAO Lingjuan, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beishan orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(4): 389–399.
- 贺振宇,宗克清,姜洪颖,等.北山造山带南部早古生代构造演化:来自花岗岩的约束[J].岩石学报,2014,30(8):2324–2338.
- HE Zhen, ZONG Keqiong, JIANG Hongying, et al. Early Paleozoic tectonic evolution of the southern Beishan orogenic collage: Insights from the granitoids[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(8): 2324–2338.
- 计文化,李荣社,陈奋宁,等.中国西北地区南华纪—古生代构造重建及关键问题讨论[J].地质力学学报,2020,26(5):634–655.
- JI Wenhua, LI Rongshe, CHEN Fenning, et al. Tectonic reconstruction of northwest China in the Nanhua-Paleozoic and discussions on key issues[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 634–655.
- 姜洪颖,贺振宇,宗克清,等.北山造山带南缘北山杂岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素研究[J].岩石学报,2013,29(11):3949–3467.
- JIANG Hongying, HE Zhenyu, ZONG Keqiong, et al. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic studies on the Beishan complex in the southern Beishan orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11): 3949–3967.
- 姜洪颖,贺振宇.北山造山带南部晚古生代花岗岩—闪长岩的成因与构造意义[J].地球科学,2022,47(9):3270–3284.
- JIANG Hongying, HE Zhenyu. Petrogenesis and Tectonic Implications of Late Paleozoic Granite-Diorite from the Southern Beishan Orogen [J]. Earth Science, 47(9): 3270–3284.
- 李锦轶,王克卓,李亚萍,等.天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J].地质通报,2006,25(8):896–909.
- LI Jingyi, WANG Kezhuo, LI Yaping, et al. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(8): 896–909.
- 李炜,陈隽璐,董云鹏,等.早古生代古亚洲洋俯冲记录:来自东天山卡拉塔格高镁安山岩的年代学、地球化学证据[J].岩石学报,2016,32(2):505–521.
- LI Wei, CHEN Junlu, DONG Yunpeng, et al. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Zircon U-Pb geochronological and geochemical evidence from the Kalatag high-Mg andesites, East Tianshan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(2): 505–521.
- 李艳广,靳梦琪,汪双双,等.LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J].西北地质,2023,56(4):274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration

- of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Mingwu, et al. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2400–2418.
- 李沅柏, 李海泉, 周文孝, 等. 北山造山带新元古代热事件及其构造意义: 来自甘肃北山南带两期花岗质岩的地球化学和年代学证据[J]. *地质通报*, 2021, 40(7): 1117–1139.
- LI Yuanbo, LI Haiquan, ZHOU Wenxiao, et al. Neoproterozoic thermal events and tectonic implications in the Beishan orogenic belt: Geochemical and geochronological evidence from two sets of granitic rocks from southern Beishan orogenic belt, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(7): 1117–1139.
- 李智佩, 吴亮, 颜玲丽. 中国西北地区蛇绿岩时空分布与构造演化[J]. *地质通报*, 2020, 39(6): 783–871.
- LI Zhipei, WU Liang, YAN Lingli. Spatial and temporal distribution of ophiolites and regional tectonic evolution in Northwest China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(6): 783–871.
- 牛文超, 辛后田, 段连峰, 等. 内蒙古北山地区百合山蛇绿混杂岩带的厘定及其洋盆俯冲极性——基于 1:5 万清河沟幅地质图的新认识[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 977–994.
- NIU Wenchao, XIN Houtian, DUAN Lianfeng, et al. The identification and subduction polarity of the Baiheshan ophiolite mélanges belt in the Beishan area, Inner Mongolia: New understanding based on the geological map of Qinghegou Sheet (1:50 000)[J]. *Geology in China*, 2019, 46(5): 977–994.
- 牛亚卓. 新甘蒙北山地区晚古生代古沉积面貌及构造属性[D]. 西安: 西北大学, 2019, 1–142.
- NIU Yazhuo. Late Paleozoic paleogeographic reconstruction and tectonic implication of the Beishan region, NW China[D]. Xi'an: Northwest University, 2019, 1–142.
- 甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队. 1:50 000 西洞泉幅(K47E019003)区域地质图[R]. 甘肃省地质矿产局酒泉地质矿产调查队, 1993.
- 甘肃省地质调查院. 1:25 万红宝石幅区域地质调查报告[R]. 甘肃省地质调查院, 2005.
- 甘肃省地质调查院. 1:25 万马鬃山幅区域地质调查报告[R]. 甘肃省地质调查院, 2001.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413–421.
- WANG Yunliang, ZHANG Chengjiang, XIU Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413–421.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J]. *地质通报*, 2021, 40(1): 71–81.
- WANG Guoqiang, LI Xiangmin, XU Xueyi, et al. Research status and progress of Paleozoic ophiolites in Beishan orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 71–81.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南缘蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 11–28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 11–28.
- 王洪亮, 徐学义, 何世平, 等. 1:1 000 000 中国天山及邻区地质图[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- WANG Hongliang, XU Xueyi, HE Shipping, et al. 1:1 000 000 Geological Map of Chinese Tianshan and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- 王文宝, 李卫星, 雷聪聪, 等. 中亚造山带中段早—中三叠世埃达克岩和 A 型花岗岩成因及构造意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 29–43.
- WANG Wenbao, LI Weixing, LEI Congcong, et al. Early-Middle Triassic Adakitic and A-type Granite in Middle Segment of Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 29–43.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1521–1534.
- XU Xueyi, LI Rongshe, CHEN Junlu, et al. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1521–1534.
- 许伟, 徐学义, 牛亚卓, 等. 北山南部早二叠世 A 型流纹岩地球化学特征及其地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(10): 3011–3022.
- XU Wei, XU Xueyi, NIU Yazhuo, et al. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of the Early Permian A-type rhyolite from southern Beishan orogen, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(10): 3011–3022.
- 许伟. 北山南部晚古生代构造格局与演化: 来自古地磁与岩浆作用的制约[D]. 西安: 长安大学, 2019, 1–194.
- XU Wei. The Late Paleozoic tectonic framework and evolution in southern Beishan: constraints from paleomagnetism and magmatism[D]. Xi'an: Chan'an University, 2019, 1–194.
- 杨高学, 刘晓宇, 朱钊, 等. 中亚造山带西准噶尔地区达尔布特蛇绿岩研究进展与展望[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 1–10.
- YANG Gaoxue, LIU Xiaoyu, ZHU Zhao, et al. Progress and Prospect of the Darbut Ophiolite in West Junggar, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 1–10.
- 余吉远, 李向民, 王国强, 等. 北山地区辉铜山、帐房山蛇绿岩 U-Pb 年龄及其意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(12): 2038–2045.
- YU Jiyuan, LI Xiangmin, WANG Guoqiang, et al. Zircon U-Pb ages of Huitongshan and Zhangfangshan ophiolite in Beishan of Gansu-Inner Mongolia border area and their significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(12): 2038–2045.
- 俞胜, 赵斌斌, 贾轩, 等. 北山造山带南缘一条山闪长岩地球化学、年代学特征及其构造意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 267–279.
- YU Sheng, ZHAO Binbin, JIA Xuan, et al. Geochemistry, geochronology characteristics and tectonic significance of Yitiaoshan diorite in the southern margin of Beishan Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 267–279.
- 袁禹. 北山造山带大陆地壳的形成与演化[D]. 武汉: 中国地质

- 大学, 2019, 1–144.
- YUAN Yu. The continental crust formation and evolution of the Beishan Orogenic Belt [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019, 1–144.
- 张海迪, 陈博, 吕鹏瑞, 等. 东天山黄山西角闪辉长岩成因及其地质意义: 来自锆石 U-Pb 年代学及地球化学的证据[J]. 西北地质, 2021, 54: 51–65.
- ZHANG Haidi, CHEN Bo, LÜ Pengrui, et al. The Petrogenesis and Geological Significance of the Hornblende Gabbro in Western Huangshan of East Tianshan: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54: 51–65.
- 张立飞, 艾永亮, 李强, 等. 新疆西南天山超高压变质带的形成与演化[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1029–1038.
- ZHANG Lifei, AI Yongliang, LI Qiang, et al. The formation and tectonic evolution of UHP metamorphic belt in southwestern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4): 1029–1038.
- 张招崇, 董书云. 大火成岩省是地幔柱作用引起的吗?[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 247–254.
- ZHANG Zhaochong, DONG Shuyun. Were large igneous provinces caused by mantle plumes?[J]. *Geoscience*, 2007, 21(2): 247–254.
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等. 新疆东部-甘肃北山地区二叠纪玄武岩对比研究及其构造意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1279–1293.
- ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, HAN Baofu, et al. Comparative study on Permian basalts from eastern Xinjiang-Beishan area of Gansu province and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1279–1293.
- 左国朝, 何国琦. 北山板块构造及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990, 1–226.
- ZUO Guochao, HE Guoqi. Plate Tectonics and Metallogenic Regularities in Beishan Region [M]. Beijing: Peking University Press, 1990, 1–226.
- Ao S J, Xiao W J, Windley B F, et al. Paleozoic accretionary orogenesis in the eastern Beishan orogen: Constraints from zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology [J]. *Gondwana Research*, 2015, 30: 224–235.
- He Z Y, Klemdb R, Yana L L, et al. The origin and crustal evolution of microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 1–14.
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, et al. Metamorphic P–T–t evolution of mafic HP granulites in the northeastern segment of the Tarim Craton (Dunhuang block): Evidence for early Paleozoic continental subduction [J]. *Lithos*, 2014, 196–197: 1–13.
- Hong T, Santos G S, Van Staal C R, et al. Mapping uncovered a multi-phase arc-back-arc system in the southern Beishan during the Permian [J]. *National Science Review*, 2023, 10: nwac204.
- Huang B T, Wang G Q, Li X M, et al. Precambrian tectonic affinity of the Beishan Orogenic Belt: Constraints from Proterozoic metasedimentary rocks [J]. *Precambrian Research*, 2022, 376: 106686.
- Kang W B, Li W, Kang L, et al. Metamorphism and geochronology of garnet amphibolite from the Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt: Constraints from P-T path and zircon U-Pb dating[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11: 1189–1201.
- Li J, Wu C, Chen X H, et al. Tectonic evolution of the Beishan orogen in central Asia: Subduction, accretion, and continent-continent collision during the closure of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2023. doi: 10.1130/B36451.1.
- Li S, Wilde S A, Wang T. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2013, 179: 99–119.
- Liu X C, Chen B L, Jahn B M, et al. Early Paleozoic (ca. 465 Ma) eclogites from Beishan (NW China) and their bearing on the tectonic evolution of the southern central Asian orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42, 715–731.
- Liu X M, Gao S, Diwu C R, et al. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9), 1257–1264.
- Mao Q, Xiao W, Windley B F, et al. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: a Carboniferous-Permian ophioliteic fore-arc silver in the southern Altai [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149: 483–509.
- Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207–218.
- Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins [J]. *American Journal of Science*, 1974, 274: 321–355.
- Niu Y Z, Liu C Y, Shi G R, et al. Unconformity-bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan Region (NW China) and implications for the timing of the Paleo-Asian Ocean closure [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 167: 11–32.
- Niu Y Z, Shi G R, Wang J Q, et al. The closing of the southern branch of the Paleo-Asian Ocean: Constraints from sedimentary records in the southern Beishan region of the Central Asian Orogenic Belt, NW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 124: 104791.
- Polat A, Hofmann A W. Alteration and geochemical patterns in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland [J] *Precambrian Research*, 2003, 126(3–4): 197–218.
- Qin K Z, Su B X, Sakya P A, et al. SIMS Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311: 237–260.
- Saktura W M, Buckman S, Nutman A P, et al. Continental origin of the Gubaoquan eclogite and implications for evolution of the Beishan Orogen, Central Asian Orogenic Belt, NW China [J].

- Litos, 2017, 294–295: 20–38.
- Santos G S, Hong T, Van Staal C R, et al. Permian back-arc basin formation and arc migration in the southern Central Asian Orogenic Belt, NW China [J]. *Geological Journal*, 2022. doi: 10.1002/gj.4609.
- Schmidt M W, Jagoutz O. The global systematics of primitive arc melts [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18: 2817–2854.
- Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299–307.
- Şengör A M C, Sunal G, Natal'in B A, et al. The Altaids: A review of twenty-five years of knowledge accumulation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022. doi: org/10.1016/j.earscirev.2022.104013.
- Smithies R H, Jwanic T J, Lowrey J R, et al. Two distinct origins for Archean greenstone belts [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 487: 106–116.
- Song D F, Xiao W J, Han C M, et al. Geochronological and geochemical study of gneiss–schist complexes and associated granitoids, Beishan Orogen, southern Altaids [J]. *International Geology Review*, 2013, 55(14): 1705–1727.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. U–Pb ages and Hf–O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(2–3): 516–531.
- Sun S S, Mc Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Magmatism in Ocean Basins*, Geological Society of London Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- Tian Z H, Xiao W J. An Andean-type arc transferred into a Japanese-type arc at final closure stage of the Palaeo-Asian Ocean in the southernmost of Altaids [J]. *Geological Journal*, 2020, 55: 1613–1619.
- Wang B, Yang X S, Li S C, et al. Geochronology, geochemistry, and tectonic implications of early Neoproterozoic granitic rocks from the eastern Beishan Orogenic Belt, southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Precambrian Research*, 2021, 352, 106016.
- Wang K, Xiao W J, Windley B F, et al. The Dashui subduction complex in the Eastern Tianshan Beishan Orogen (NW China): Long-Lasting subduction accretion terminated by unique Mid-Triassic strike-slip juxtaposition of arcs in the Southern Altaids [J]. *Tectonics*, 2022, 41, e2021TC007190.
- Winchester J A, and Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325–343.
- Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554–1569.
- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, et al. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31(4–6): 357–378.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(2–4): 102–117.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage [J]. *American Journal of Science*, 2010, 310(10): 1553–1594.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477–507.
- Yuan Y, Zong K Q, He Z Y, et al. Geochemical and geochronological evidence for a former early Neoproterozoic microcontinent in the south Beishan orogenic belt, southernmost central Asian orogenic belt [J]. *Precambrian Research*, 2015, 266, 409–424.
- Zhang Q W L, Chen Y C, Li Z M G, et al. Identification of continental fragments in orogen: an example from Dunhuang Orogenic Belt, NW China [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67, 1549–1552.
- Zhang Y Y, Dostal J, Zhao Z H, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from Southern Beishan area, NW China: Implications for crust-mantle interaction [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(4): 816–830.
- Zhang Y Y, Yuan C, Sun M, et al. Permian doleritic dikes in the Beishan Orogenic Belt, NW China: Asthenosphere-lithosphere interaction in response to slab break-off [J]. *Lithos*, 2015, 233: 174–192.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262–286.
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. Geochronology and geochemistry of late Paleozoic magmatic rocks in the Yinwaxia area, Beishan: Implications for rift magmatism in the southern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 91: 39–55.
- Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 2017, 290, 32–48.
- Zong K Q, Liu Y S, Zhang Z M, et al. The generation and evolution of Archean continental crust in the Dunhuang block, northeastern Tarim craton, northwestern China [J]. *Precambrian Research*, 2013, 235(34): 251–263.