

引用格式:李德泉,黄虎,庞清清. 2026. 北羌塘昌都地区中二叠统凝灰岩年龄及其地质意义[J]. 沉积学报, 44(5): 1670-1683.

LI DeQuan, HUANG Hu, PANG QingQing. 2026. Geochronology and Geological Significance of Middle Permian Tuffs in the Changdu Area, North Qiangtang Terrane[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(5): 1670-1683.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.033

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.033

北羌塘昌都地区中二叠统凝灰岩年龄及其地质意义

李德泉¹, 黄虎^{1,2,3}, 庞清清⁴

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059

3. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都 610059

4. 成都理工大学地球与行星科学学院, 成都 610059

摘要 【目的】北羌塘地块昌都地区王卡剖面中下二叠统交嘎组出现了由灰岩向碎屑岩过渡的重大岩性转变, 该岩性转变的时限可能对理解二叠纪P3冰期的成因具有重要意义。【方法】通过对王卡剖面交嘎组凝灰岩开展岩石学、锆石U-Pb定年、锆石微量元素分析、全岩主微量元素等分析, 探讨其形成时限和物质来源。【结果】王卡剖面交嘎组凝灰岩锆石U-Pb年龄为(268.2±1.9) Ma, 其锆石微量元素表现为轻稀土亏损和重稀土富集的特征。全岩样品表现出较高的Al₂O₃/TiO₂、Zr/TiO₂和Th/Sc值, 其原始地幔标准化微量元素蛛网图显示Nb、Ta、Ti等元素亏损, 而Th和U相对富集的地球化学特征。【结论】北羌塘昌都地区王卡剖面交嘎组凝灰岩的年龄与二叠纪P3冰期启动时间在误差范围内一致, 其物质来源可能为横跨北羌塘与思茅地块的火山岛弧。该火山岛弧经过强烈的风化作用可能导致或促进了二叠纪P3冰期的开始。

关键词 北羌塘地块; 二叠纪; 凝灰岩; P3冰期

第一作者 李德泉, 男, 2001年出生, 硕士研究生, 地质学, E-mail: 2023020826@stu.cdut.edu.cn

通信作者 黄虎, 男, 教授, E-mail: 118huanghu@163.com

中图分类号: P534.46 P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550(2026)05-1670-14

0 引言

古气候演化是地球科学领域的重要组成部分, 其不仅解释了地球系统的长期变化规律, 也为理解现代气候变化和预测未来气候趋势提供了关键的科学依据(支钰等, 2025)。地质历史时期的晚古生代大冰期事件尤为引人注目, 是显生宙以来持续时间最长、影响范围最广、地质记录最丰富的冰期之一(何柯衡等, 2025)。目前广大学者认为晚古生代冰期可分为三个阶段, 包括晚泥盆世—早石炭世、石炭纪中期、晚石炭世—晚二叠世(Isbell *et al.*, 2003; Frakes *et al.*, 2005)。也有部分学者通过对新南威尔士、昆士兰及东澳大利亚等地的沉积记录研究认为晚古生代冰期是由一系列断续的冰期构成, 其从早石炭世谢尔普霍夫期至晚二叠世吴家坪期共发生

8次成冰事件(C1-C4, P1-P4)(Fielding *et al.*, 2008)。近年来大量的研究成果使我们对晚古生代冰期的断续分布有了更加深入的认识(Metcalf *et al.*, 2015; Laurie *et al.*, 2016; Belica *et al.*, 2017; Phillips *et al.*, 2018; Fielding *et al.*, 2021; Wainman *et al.*, 2022), 但对于P3冰期的研究却相对薄弱, 诸如对P3冰期的起止时间、冰期触发机制等关键科学问题还存在许多争议和不确定性(Sun *et al.*, 2023; Yong *et al.*, 2024)。

北羌塘地块作为冈瓦纳大陆北缘的重要组成部分, 其二叠纪时期位于赤道附近(Huang *et al.*, 1992)。由于低纬度热带环境不利于冰川沉积物的保存, 北羌塘地块在二叠纪难以保存冰期存在的直接证据(如冰碛岩)。然而, 二叠纪地层在北羌塘昌都地区广泛出露。其中, 中下二叠统交嘎组记录了显著的沉积环境转变, 表现为下部地层以生物碎屑灰岩为

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-08-01; 录用日期: 2025-10-27; 网络出版日期: 2025-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472157)

主,而上部地层则发育巨厚的碎屑岩沉积(Qiao *et al.*, 2021)。这一岩性序列的转变与全球气候变化的关系值得深入研究。本文拟对北羌塘地块昌都地区交嘎组岩性序列转变附近的凝灰岩开展全岩主微量元素、锆石 U-Pb 定年以及锆石微量元素分析,进而探讨 P3 冰期的启动及其触发机制,为进一步理解中二叠世全球气候演变提供新的证据。

1 地质背景及样品

羌塘盆地位于青藏高原北部和特提斯构造域东段,其受印度洋板块挤压作用形成了南羌塘坳陷、羌中隆起与北羌塘坳陷两坳夹一隆的地理格局(黎东玉等, 2025)。北羌塘地块北部以金沙江缝合带为界与松潘甘孜—可可西里地块相邻,而南部以龙木

措—双湖缝合带为界与南羌塘地块相邻(沈树忠等, 2024)(图 1)。北羌塘地块东部二叠系广泛分布,其从老到新依次为里查组、莽错组、交嘎组、妥坝组和夏牙村组(图 2)。其中,中下二叠统交嘎组在昌都地区出露良好,其与下伏下二叠统莽错组整合接触,而与上覆上二叠统妥坝组呈整合接触或与上覆上三叠统甲丕拉组呈角度不整合接触(陈丰琪和钟康惠, 2013)。

本次研究的剖面位于昌都市察雅县王卡乡($30^{\circ}56'55''\text{N}$, $97^{\circ}35'45''\text{E}$)。该剖面出露中下二叠统交嘎组及上三叠统甲丕拉组(图 3)。其中,交嘎组未见底,并与上覆甲丕拉组呈不整合接触(图 4a)。该剖面交嘎组下部为生物碎屑灰岩,中部为砂岩和灰岩夹凝灰岩(图 4b)和泥岩,顶部则为砂岩沉积(Qiao *et al.*, 2021)。样品 Drg-1 和 Drg-2 均采自王卡剖面交嘎

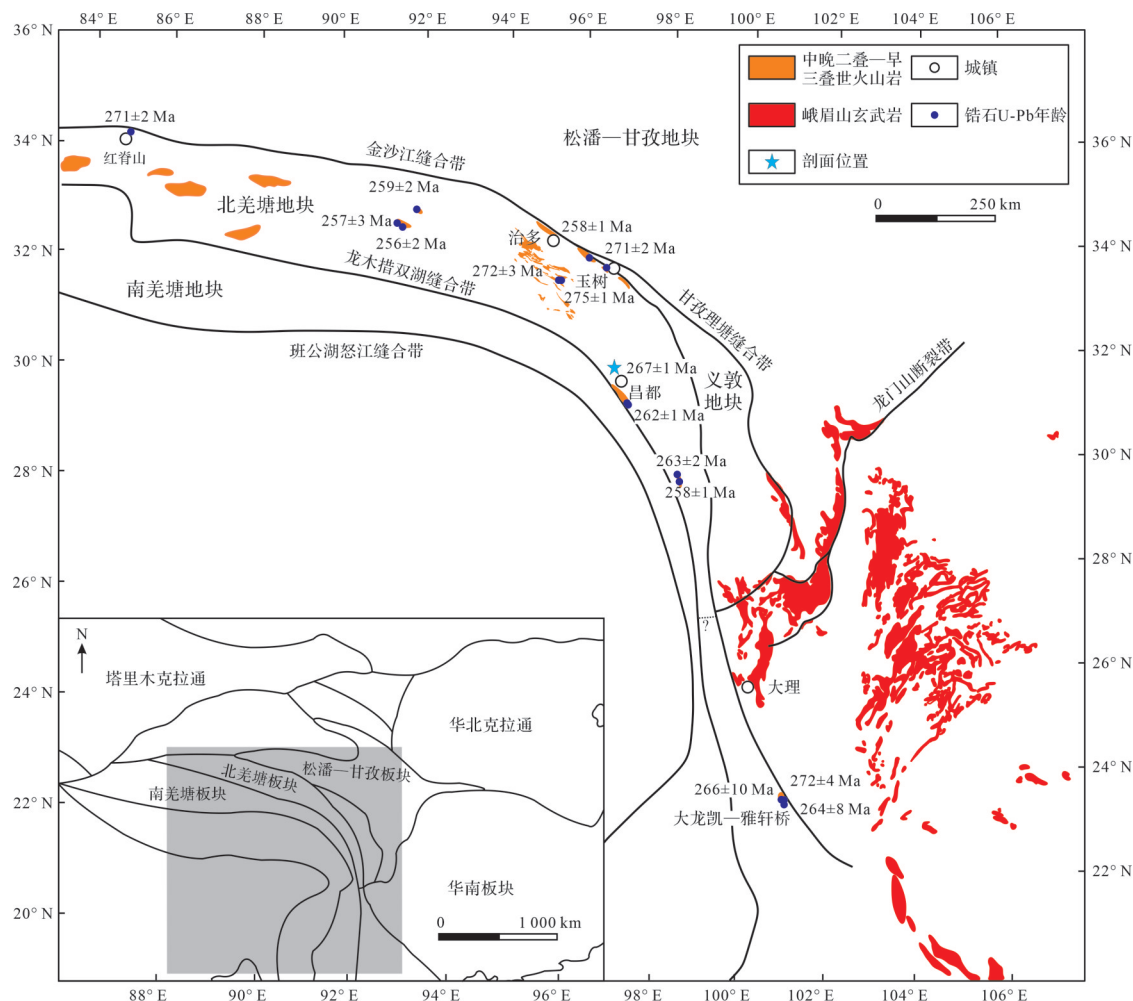


图 1 研究区地质构造简图(据沈树忠等, 2024 修改)

红脊山地区岩浆岩锆石年龄引自张乐等(2014),大龙凯—雅轩桥岩浆岩锆石年龄引自孙晓奎等(2022),北羌塘其余岩浆岩锆石年龄引自 Xu *et al.* (2020),峨眉山大火成岩省分布据 Huang *et al.* (2018) 修改

Fig. 1 Geological tectonic sketch map of the study area (modified from Shen *et al.*, 2024)

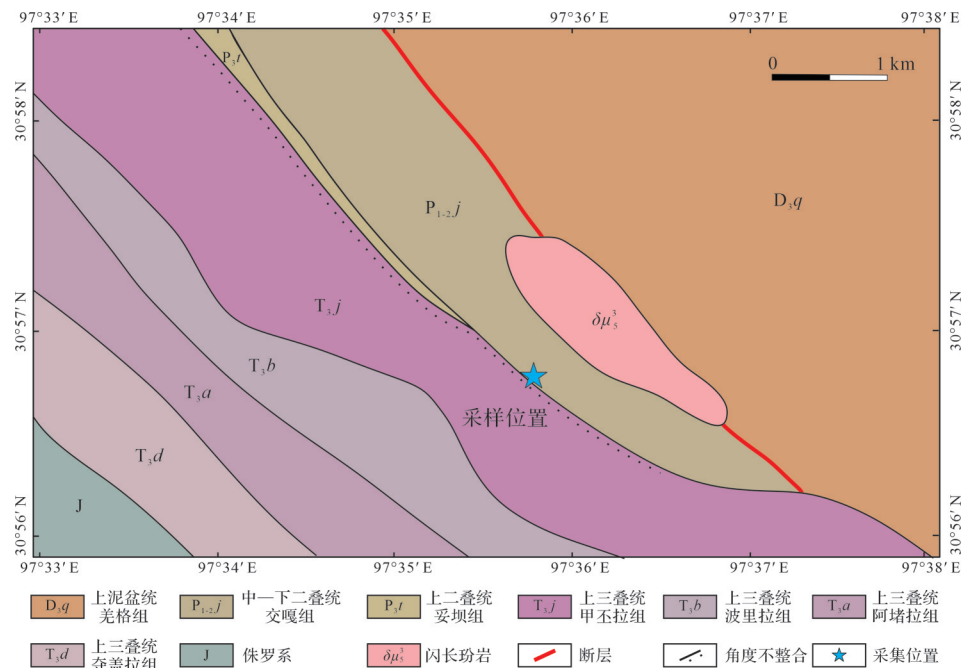


图2 北羌塘地块昌都地区王卡剖面地质简图(据陈丰琪和钟康惠,2013修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Wangka section Changdu area, North Qiangtang terrane (modified from Chen and Zhong, 2013)

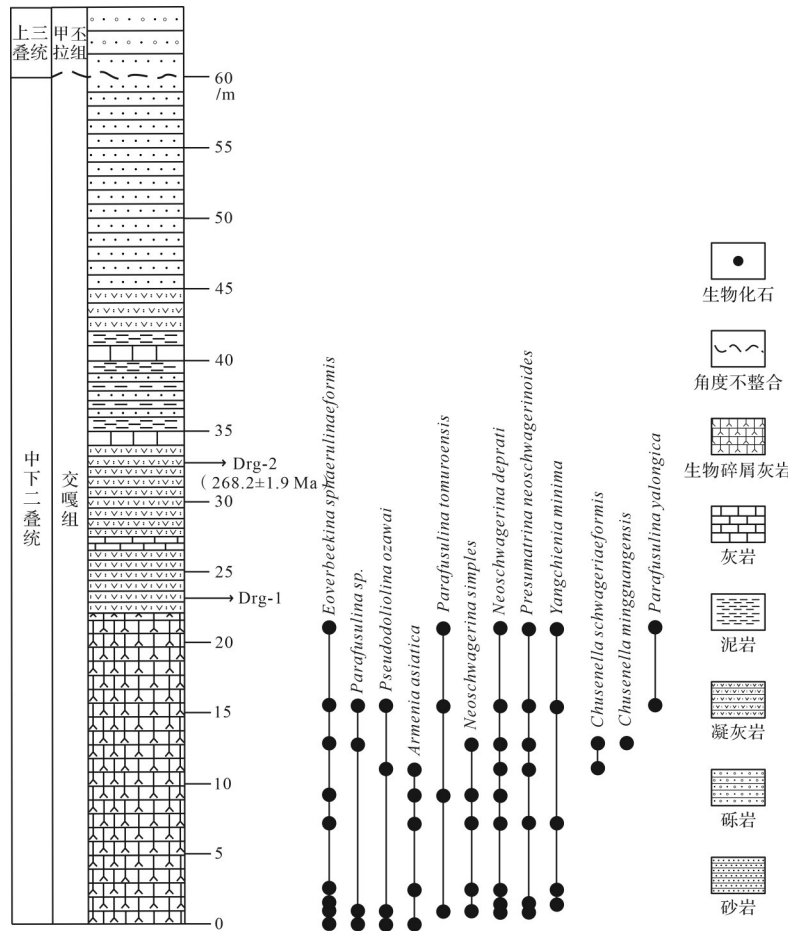


图3 北羌塘地块昌都地区王卡剖面地层柱状图(据 Qiao *et al.*, 2021 修改)

Fig. 3 Stratigraphic column of the Wangka section in Changdu area, North Qiangtang terrane (modified from Qiao *et al.*, 2021)

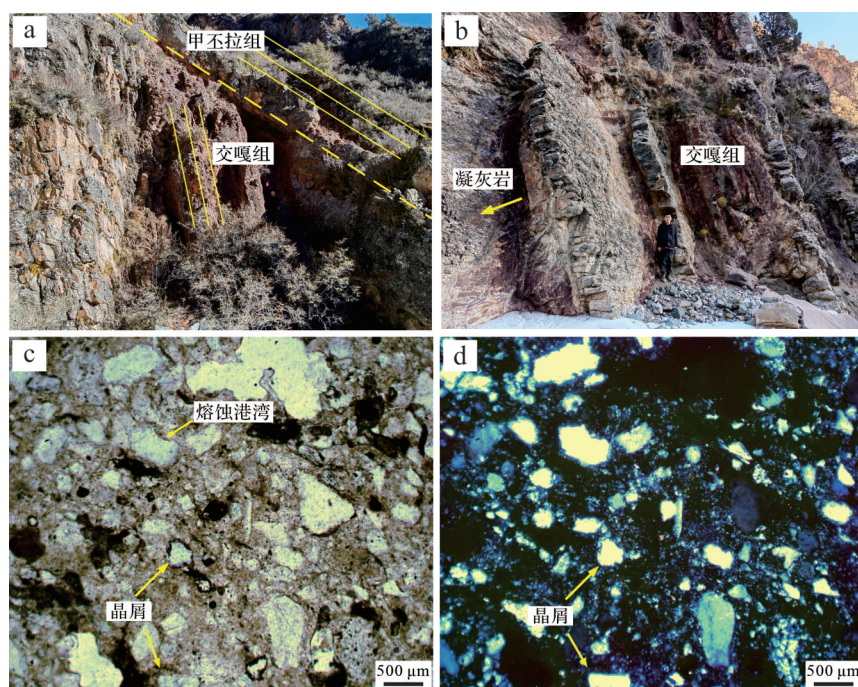


图4 王卡剖面凝灰岩特征

(a)交嘎组与甲丕拉组呈角度不整合接触;(b)交嘎组凝灰岩野外露头特征;(c,d)分别为凝灰岩镜下单偏光和正交偏光下的特征

Fig. 4 Tuff features observed in the Wangka section

(a) angular unconformity between the Jiaoga and Jiapila Formations; (b) field outcrop characteristics of tuff in the Jiaoga Formation; (c, d) photomicrographs of tuff under plane-polarized light and cross-polarized light, respectively

组凝灰岩层(图3)。在单偏光显微镜下,这些样品主要由火山尘组成(约79%),并含少量玻屑和晶屑(含量分别为5%和15%)。其中,大多数晶屑为石英,且部分石英晶体可见熔蚀港湾。同时,样品中还分布有少量岩屑和暗色矿物(1%)(图4c,d)。

2 实验方法

本次对样品 Drg-1 和 Drg-2 进行了主微量元素分析,并对样品 Drg-2 进行了锆石 U-Pb 同位素定年和锆石微量分析。锆石分选由河北廊坊诚信地质服务有限公司采用浮选法和电磁选方法进行。对形态较好的锆石进行反射光、透射光和阴极发光(CL)图像分析,并根据反射光、透射光及 CL 图像分析,尽量避开锆石内部的包裹体、裂隙,选择代表性锆石颗粒进行 U-Pb 定年和锆石微量分析。

锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。有关详细的仪器参数和分析流程见 Zong *et al.*, 2017。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7900。激光剥蚀过程

中,采用氦气作为载气,氩气作为补偿气以调节灵敏度。本次分析的激光束斑和频率分别为 24 μm 和 5 Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中,使用 91500 和 NIST610 作为外标,分别进行同位素和微量元素的馏校正。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDateCal 完成(Liu *et al.*, 2008, 2010)。对锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用软件 Isoplot 完成(Ludwig, 2003)。

全岩主量元素含量在广州澳实矿物实验室利用荷兰 PANalytical 公司的 X 射线荧光光谱仪(XRF)和德国 Sartorius 公司的电子天平完成。全岩微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成。用于 ICP-MS 分析处理的样品如下:(1)将 200 目样品置于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干 12 h;(2)称取样品 50 ng 置于 Teflon 溶样弹中;(3)先后依次缓慢加入 1 mL 高纯 HNO_3 和 1 mL 高纯 HF;(4)将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加热 24 h 以上;(5)待溶样弹冷却,开盖后置于 140 $^{\circ}\text{C}$ 电热板上蒸干,然后加入 1 mL HNO_3 并再次蒸干;(6)加入 1 mL 高纯 HNO_3 、1 mL MQ 水和 1 mL 内标 In,再次将 Teflon 溶样弹放入钢套,拧紧后置于 190 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中加入 12 h 以上;(7)将溶液转入聚乙烯料瓶中,

并用2% HNO₃稀释至100 g以备ICP-MS测试。

3 分析结果

3.1 锆石年代学和微量元素特征

CL图像显示锆石轮廓大多为自形,呈短柱状或长柱状,均具有明显的振荡环带特征,长宽比介于1:1~1:3,粒径介于40~100 μm (图5)。对样品Drg-2中的30颗锆石进行了LA-ICP-MS测试点分析,结果见表1。研究区锆石²⁰⁶Pb/²⁰⁸U年龄均小于1 000 Ma,因此选取²⁰⁶Pb/²⁰⁸U年龄代表锆石年龄。样品测年结果中,有4颗谐和度小于90%的锆石和1颗年龄为803 Ma的锆石(Drg-2-15)。锆石封闭体系被破坏发生Pb丢失或者U获得是造成锆石年龄不协和的主要原因(赖冬梅,2004)。锆石Drg-2-15晶形较差,且边部不规则,暗示其遭受不同程度的熔蚀,推测其为继承锆石(朱经经等,2016)。剩余25颗锆石²⁰⁶Pb/²⁰⁸U的年龄介于265~272 Ma,其加权平均年龄为(268.2 $\pm$ 1.9) Ma(图6a),属中二叠世。

对样品Drg-2的锆石微量元素分析结果见表2。剔除数据异常锆石后(La异常和不协和锆石),其余锆石Th含量变化范围为(24~333) $\times 10^{-6}$,U含量变化范围为(56~309) $\times 10^{-6}$,Th/U比值均大于0.4。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中,总体表现为轻稀土相对亏损,重稀土相对富集,并具有明显的Ce正异常及Eu负异常的特征(图6b)。锆石的形态学和地球化学特征均指示其为典型的岩浆成因锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003)。

3.2 全岩主微量元素含量

昌都王卡剖面交嘎组凝灰岩全岩主微量元素见表3。结果显示凝灰岩样品Drg-1和Drg-2的SiO₂含量分别为77.32%和77.49%,具有低钛(0.60%和0.58%)、较高铝(18.74%和13.30%)的特征,其Al₂O₃/TiO₂值分别为31.2和22.9,烧失量分别为7.30%和4.34%。样品球粒陨石标准化稀土元素配分模式图显示轻稀土元素富集和重稀土元素分布相对平坦的右倾式分布特征,并具有相对弱的Eu负异常(δEu 分别为0.58和0.65)(图7a)。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示样品具有Nb、Ta、Ti等高场强元素相对亏损、Th和U相对富集、Ba和Sr等元素亏损严重的地球化学特征(图7b)。

4 讨论

4.1 交嘎组岩性转变时间约束

王卡剖面交嘎组岩性从底部向上依次为生物碎屑灰岩、凝灰岩以及碎屑岩沉积,指示交嘎组内部存在着从灰岩向碎屑岩过渡的巨大岩性转变。理清交嘎组沉积时限对限定交嘎组内部岩性转变时间至关重要。前人对北羌塘交嘎组开展了较多的生物地层学研究。其中,早期饶靖国等(1988)调研了昌都市芒康县和妥坝县二叠系等剖面,并根据蜓类(*Neoschwagerina*、*Verbeekina*、*Yabeina*)和珊瑚(*Iranophyllum*、*Ipciphyllum*、*Wentzelella*)等化石将交嘎组沉积时间约束在早二叠世晚期。Zhang and Wang (2018)认为昌都地区交嘎组含有蜓类*Afghanella*

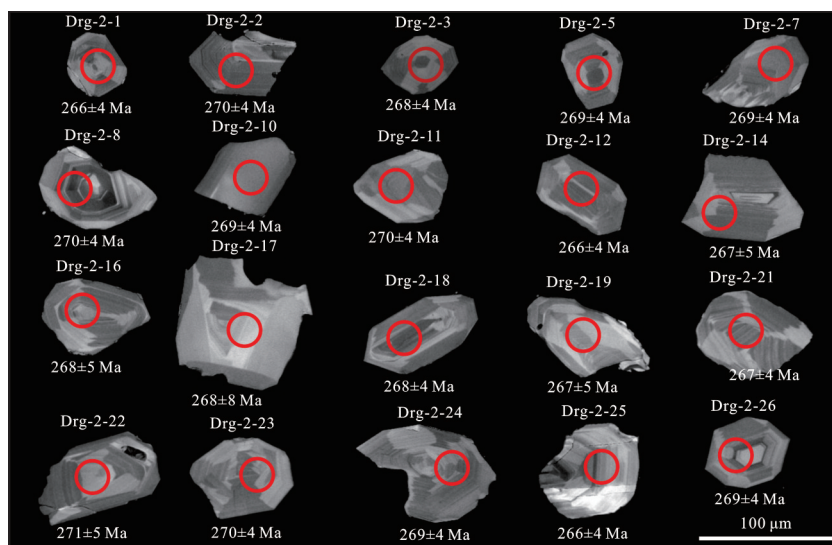


图5 代表性锆石阴极发光图像

Fig. 5 Representative zircon cathodoluminescence (CL) images

表1 北羌塘地块昌都地区王卡剖面凝灰岩样品锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 Zircon U-Pb isotopic analysis of tuff samples from the Wangka section, Changdu area, North Qiangtang terrane

分析点	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		rho	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		谐和度/%
	(μg/g)	(μg/g)	比值	比值	±1σ	比值	±1σ	比值	±1σ		年龄/Ma	±1σ	年龄/Ma	±1σ	年龄/Ma	±1σ	
Drg-2-01	61.0	128	0.48	0.050 2	0.003 8	0.290 0	0.020 0	0.042 1	0.000 7	0.245 3	211	175	259	15	266	4	97
Drg-2-02	91.0	139	0.65	0.057 6	0.004 1	0.334 1	0.022 2	0.042 8	0.000 7	0.249 3	522	157	293	16	270	4	91
Drg-2-03	61.9	114	0.54	0.056 8	0.004 2	0.328 8	0.024 3	0.042 5	0.000 8	0.250 2	483	164	289	18	268	4	92
Drg-2-04	83.2	142	0.59	0.060 5	0.004 6	0.353 1	0.026 8	0.042 1	0.000 8	0.239 1	633	169	307	20	266	4	85
Drg-2-05	108.0	172	0.63	0.055 0	0.003 8	0.324 9	0.022 5	0.042 5	0.000 7	0.253 5	413	158	286	17	269	4	93
Drg-2-06	124.0	205	0.61	0.062 8	0.004 1	0.330 0	0.022 3	0.037 6	0.000 8	0.299 0	702	134	290	17	238	4	80
Drg-2-07	70.9	146	0.48	0.055 2	0.003 5	0.321 2	0.019 1	0.042 6	0.000 8	0.299 7	420	140	283	14	269	4	95
Drg-2-08	105.0	168	0.63	0.055 5	0.003 9	0.323 5	0.021 0	0.042 7	0.000 8	0.274 3	432	127	285	16	270	4	94
Drg-2-09	124.3	160	0.78	0.055 1	0.003 9	0.320 9	0.020 1	0.043 0	0.000 8	0.278 7	417	154	283	15	272	4	96
Drg-2-10	100.7	141	0.71	0.057 2	0.005 6	0.317 2	0.023 8	0.042 5	0.000 8	0.243 0	498	182	280	18	269	4	95
Drg-2-11	76.8	151	0.51	0.052 6	0.003 8	0.308 6	0.020 8	0.042 8	0.000 8	0.278 5	309	138	273	16	270	4	98
Drg-2-12	113.0	169	0.67	0.050 6	0.003 9	0.288 5	0.019 4	0.042 2	0.000 8	0.273 0	233	177	257	15	266	4	96
Drg-2-13	104.0	162	0.64	0.215 1	0.021 5	0.316 0	0.019 3	0.013 1	0.0006	0.785 2	2944	162	279	14	83	3	-8
Drg-2-14	74.8	132	0.57	0.050 5	0.003 7	0.290 4	0.019 6	0.042 3	0.000 8	0.297 0	217	174	259	15	267	5	96
Drg-2-15	128.0	150	0.85	0.069 9	0.002 7	1.280 2	0.047 5	0.132 7	0.001 6	0.319 5	928	80	837	21	803	8	95
Drg-2-16	71.4	116	0.62	0.046 5	0.004 0	0.268 8	0.019 9	0.042 5	0.000 8	0.259 3	33.4	187	242	15	268	5	89
Drg-2-17	23.6	56.3	0.42	0.048 5	0.005 1	0.287 8	0.027 0	0.042 4	0.001 3	0.328 2	124	242	257	21	268	8	95
Drg-2-18	105.0	152	0.69	0.055 8	0.004 0	0.323 7	0.021 6	0.042 5	0.000 7	0.236 0	456	161	285	16	268	4	94
Drg-2-19	71.7	119	0.60	0.046 9	0.003 6	0.269 3	0.018 9	0.042 3	0.000 9	0.313 2	43	177	242	15	267	5	90
Drg-2-20	69.8	130	0.54	0.050 2	0.004 2	0.296 4	0.024 5	0.042 7	0.000 8	0.213 2	211	175	264	19	269	4	97
Drg-2-21	62.5	115	0.54	0.057 4	0.004 4	0.332 3	0.024 7	0.042 3	0.000 8	0.252 7	509	167	291	18	267	4	91
Drg-2-22	98.7	158	0.62	0.047 8	0.003 2	0.279 2	0.016 8	0.043 0	0.000 8	0.313 5	100	142	250	13	271	5	91
Drg-2-23	134.0	202	0.66	0.053 1	0.003 7	0.310 8	0.020 5	0.042 8	0.000 7	0.252 3	332	159	275	15	270	4	98
Drg-2-24	74.9	142	0.53	0.048 6	0.004 5	0.281 8	0.023 6	0.042 7	0.000 8	0.214 1	128	203	252	18	269	4	93
Drg-2-25	70.1	131	0.53	0.051 9	0.003 6	0.299 9	0.020 3	0.042 1	0.000 7	0.238 0	280	154	266	15	266	4	99
Drg-2-26	65.7	121	0.54	0.053 6	0.004 3	0.316 4	0.025 1	0.042 5	0.000 8	0.235 0	367	181	279	19	269	4	96
Drg-2-27	333.0	309	1.08	0.049 0	0.002 7	0.284 1	0.015 2	0.042 4	0.000 6	0.278 5	150	127	254	12	268	3	94
Drg-2-28	87.5	162	0.54	0.053 2	0.003 9	0.307 3	0.020 1	0.042 6	0.000 7	0.261 1	345	166	272	15	269	4	98
Drg-2-29	134.0	221	0.61	0.052 4	0.002 7	0.301 9	0.015 1	0.042 0	0.000 7	0.312 0	302	116	268	11	265	4	99
Drg-2-30	103.8	143	0.72	0.048 9	0.003 6	0.2769	0.018 4	0.042 0	0.000 8	0.2700	146	162	248	14	265	4	93

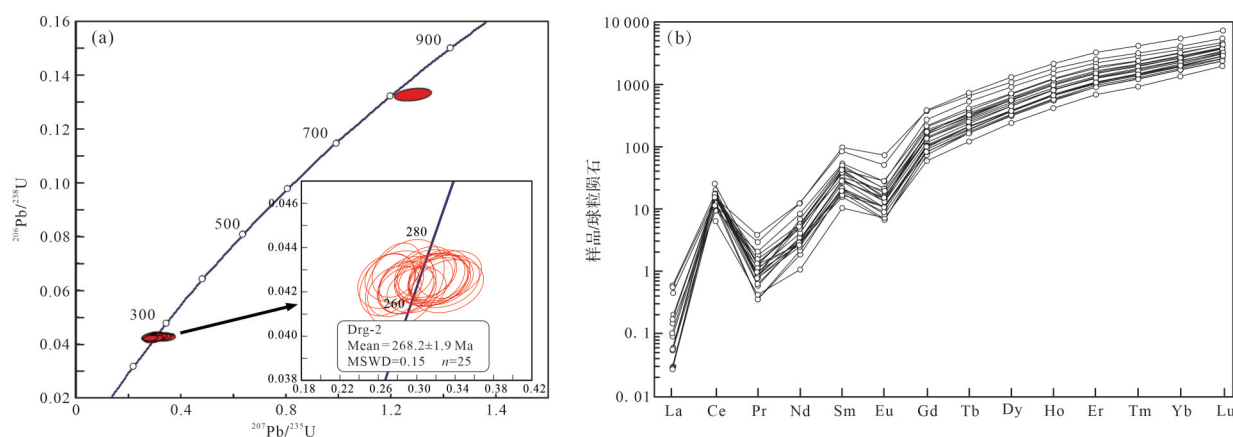


图6 (a) 锆石 U-Pb 年龄谐和曲线; (b) 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式

球粒陨石标准化值及原始地幔标准化值据 Sun and McDonough (1989)

Fig. 6 (a) zircon U-Pb concordia diagram; (b) Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns of zircons

schencki-Neoschwagerina craticulifera 组合,进而推测交嘎组沉积时代可以延续到中二叠世罗德至沃德期。近年来, Qiao *et al.* (2021) 在昌都地区王卡剖面交嘎组下部发现了蜓类 *Neoschwagerina simplex* Ozawa。该蜓类化石被广泛认为是早二叠世晚空谷—中二叠世早罗德期的标准化石 (Shen *et al.*, 2019), 并且交嘎组底部并未发现该蜓类后期更高级的变种, 因此交嘎组沉积时代被认为可提前至晚空谷时期。

昌都地区王卡剖面交嘎组其上被上三叠统甲丕拉组不整合覆盖, 其下未见底。在整个昌都地区研究区内, 交嘎组整合覆盖在莽错组之上。莽错组顶部含有大量的蜓类化石, 包括 *Misellina-Parafusulina* 生物带 (牛志军等, 2006), 该生物带表明莽错组至少沉积至早二叠世空谷期, 并限定了交嘎组沉积的底界年龄。尽管未明确到具体剖面位置, 前人在昌都地区交嘎组中还发现了蜓类化石 *Yabeina* (饶靖国等, 1988)。该化石被认为广泛分布于中二叠世卡匹敦期 (饶靖国等, 1988; Aljinović *et al.*, 2008), 因此北羌塘交嘎组沉积时代从早二叠世晚空谷时期开始, 并至少持续到中二叠世卡匹敦期。本文通过锆石 U-Pb 定年将王卡剖面交嘎组凝灰岩年龄约束为 268.2 ± 1.9 Ma。该年龄代表王卡剖面交嘎组岩性转变时的绝对年龄, 并与由生物化石推断的交嘎组沉积年龄相吻合。

4.2 交嘎组凝灰岩物源分析

大量古地磁数据表明, 南羌塘地块在中二叠世与北羌塘地块距离较远 (Cheng *et al.*, 2023), 并且南羌塘地块暂未发现中二叠世火山活动记录 (Xu *et al.*, 2020; 沈树忠等, 2024), 因此排除南羌塘地块作

为昌都地区交嘎组凝灰岩物质来源的可能。思茅地块和华南地块在中二叠世与北羌塘地块古纬度相近 (Metcalf, 2013; 闫永刚等, 2024)。同时, 思茅地块和北羌塘地块均发育大量中二叠世火山岩 (许王等, 2021), 而华南地块也发育以峨眉山大火成岩省为代表的中—晚二叠世火山岩 (Xu *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2018, 2022b)。因此, 北羌塘地块、思茅地块和华南板块中二叠世火山活动产物均可能是昌都地区交嘎组凝灰岩的物质来源。

昌都地区王卡剖面交嘎组凝灰岩拥有较高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 Zr/TiO_2 、 Th/Sc 值和明显的 Eu 负异常 (图 7a、图 8a~c)。这些特征表明该凝灰岩与酸性火山喷发有关 (Winchester and Floyd, 1977; McLennan *et al.*, 1993; Hayashi *et al.*, 1997)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 昌都凝灰岩表现出显著的 Nb、Ta、Ti 元素亏损; 在全岩 Th/Nb - Hf/Th 图解中, 昌都凝灰岩也落入弧相关环境 (Yang *et al.*, 2012) (图 8d)。这些特征表明昌都凝灰岩的形成可能与岛弧火山活动有关 (于漫等, 2017)。思茅地块中二叠世岩浆岩主要集中在雅轩桥附近。在全岩 Al_2O_3 - TiO_2 图解中, 雅轩桥玄武岩落入中性和酸性交界区域 (图 8b), 在全岩 Nb/Y - Zr/TiO_2 图解中, 其落入亚碱性玄武岩区域 (图 8c)。雅轩桥玄武岩与昌都凝灰岩虽然在成分上有所差异, 但值得注意的是, 雅轩桥玄武岩具有大离子亲石元素富集和高场强元素亏损的特征, 其全岩微量元素 Nb/La 介于 0.38~0.81, 该特征与岛弧岩浆岩类似 (Fan *et al.*, 2010)。雅轩桥玄武岩与昌都凝灰岩的形成环境相同, 即使它们成分有所差异, 但碍于岩浆演化的复杂性, 特别是岩浆分异结晶作用的影响

表2 北羌塘地块昌都地区王卡剖面凝灰岩样品锆石微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 2 Trace element concentrations of zircons ($\times 10^{-6}$) from tuff samples, Wangka section, Changdu area, North Qiangtang terrane

分析点	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
Drg-2-1	3.51	1 222	3.09	—	7.93	0.036	0.94	3.23	0.64	22.3	8.39	102	42.5	195	40.9	381	82.7	9 848	1.47	61.0	128
Drg-2-2	5.11	1 710	2.09	—	10.10	0.140	2.53	6.21	1.12	37.4	12.60	156	61.2	269	54.1	477	100	9 717	1.10	91.0	139
Drg-2-3	10.10	1 231	2.56	0.110	9.37	0.130	1.41	4.65	0.66	23.6	8.84	106	42.6	196	40.7	371	79.6	9 931	1.29	61.9	114
Drg-2-4	9.24	1 217	2.84	0.160	10.90	0.094	2.52	2.99	0.67	22.6	8.14	109	42.3	194	40.4	371	78.9	9 915	1.36	83.2	142
Drg-2-5	6.07	1 768	2.28	0.051	10.40	0.180	2.84	7.74	1.34	40.6	13.20	163	62.9	278	56.6	504	105	9 525	1.02	108	172
Drg-2-6	7.63	1 749	4.17	0.140	12.00	0.200	2.81	6.09	1.25	37.4	14.40	170	62.7	276	55.7	506	104	10 051	1.84	124	205
Drg-2-7	6.62	975	3.00	—	9.44	0.036	1.05	3.05	0.43	16.3	6.71	84.7	33.7	162	33.6	314	65.1	9 787	1.36	70.9	146
Drg-2-8	10.40	1 436	3.59	—	8.32	0.059	1.58	4.87	0.81	25.5	9.40	121	50.0	231	49.0	446	96.0	8 473	1.36	105	168
Drg-2-9	11.10	1 515	3.41	14.100	45.70	5.020	23.30	9.66	1.23	34.0	11.30	136	53.8	244	50.9	449	94.5	9 810	1.59	124	160
Drg-2-10	5.99	2 337	0.92	0.035	5.61	0.200	3.87	7.90	1.56	54.4	19.30	225	82.8	355	69.7	589	114	8 158	0.46	100	141
Drg-2-11	6.77	1 016	2.94	0.140	10.60	0.075	1.35	2.32	0.39	18.1	6.70	90.4	36.2	163	34.7	320	69.1	9 597	1.32	76.8	151
Drg-2-12	5.86	1 825	2.28	0.014	11.80	0.080	3.14	7.43	1.18	41.5	13.90	172	66.1	289	58.1	517	107	9 629	1.06	113	169
Drg-2-13	4.61	1 831	2.04	0.013	11.00	0.140	3.87	6.30	1.26	42.5	14.30	168	66.4	292	58.3	524	108	9 998	1.02	104	162
Drg-2-14	6.15	1 486	2.88	0.007 2	8.95	0.088	2.42	4.80	1.11	31.0	10.90	138	53.6	241	48.6	430	90.8	9 060	1.11	74.8	132
Drg-2-15	9.97	2 908	1.48	—	13.60	0.210	3.63	7.33	1.74	51.6	18.80	245	100	467	97.3	902	190	9 973	0.50	128	150
Drg-2-16	5.75	1 363	2.22	0.040	9.87	0.100	1.87	6.18	0.90	28.3	10.50	125	48.5	216	44.3	398	81.8	9 673	1.04	71.4	116
Drg-2-17	6.22	673	1.28	—	3.85	0.040	0.49	1.56	0.41	11.8	4.40	59.2	22.8	110	22.7	223	48.5	8 589	0.71	23.6	56.3
Drg-2-18	9.90	2 662	2.35	0.013	6.93	0.280	5.84	14.90	4.27	77.0	24.60	276	101	413	80.4	687	138	8 387	0.97	105	152
Drg-2-19	7.16	1 303	1.90	0.014	9.69	0.084	1.57	4.52	0.83	27.7	10.10	122	46.2	206	41.5	384	80.2	9 810	1.04	71.7	119
Drg-2-20	5.66	1 119	3.26	8.490	30.60	2.780	15.10	6.31	0.73	22.3	7.57	100	39.4	177	38.2	354	76.4	9 631	1.50	69.8	130
Drg-2-21	9.08	1 045	2.32	0.140	9.57	0.082	1.61	2.60	0.65	21.5	7.12	93.2	37.3	169	34.4	316	66.0	9 564	1.12	62.5	115
Drg-2-22	6.57	1 631	2.32	—	10.90	0.120	2.74	6.57	0.88	35.1	12.70	154	59.0	267	52.6	478	98.7	9 783	1.31	98.7	158
Drg-2-23	4.69	1 558	2.68	0.022	9.65	0.150	2.30	5.94	0.77	36.0	12.20	141	55.3	248	49.2	447	93.0	9 406	1.23	134	202
Drg-2-24	9.04	964	2.66	—	10.20	0.061	1.40	3.28	0.48	16.9	6.49	84.6	33.5	159	32.9	303	65.7	9 074	1.21	74.9	142
Drg-2-25	4.61	956	3.36	0.007 1	10.50	0.076	1.21	3.35	0.64	17.7	6.34	83.9	33.5	154	31.8	300	62.9	9 971	1.34	70.1	131
Drg-2-26	6.28	1 343	2.03	0.006 8	7.26	0.110	1.39	4.45	0.91	28.7	9.70	117	47.2	217	43.6	396	83.8	9 175	1.04	65.7	121
Drg-2-27	9.19	2 046	5.82	—	16.00	0.130	2.51	6.72	1.69	45.6	16.10	188	72.7	325	62.6	564	114	8 338	1.71	333	309
Drg-2-28	5.33	1 118	3.03	0.007	11.00	0.096	1.28	3.05	0.54	21.2	7.95	97.8	39.0	182	37.8	350	74.7	10 007	1.51	87.5	162
Drg-2-29	7.54	1 683	5.66	5.860	30.40	2.060	11.50	6.19	0.77	33.4	11.90	145	57.3	270	55.8	512	107	9 489	2.12	134	221
Drg-2-30	12.70	3 504	2.90	0.025	9.82	0.380	5.89	13.30	3.03	81.2	28.20	337	125	551	109	946	191	7 178	0.94	103	143

表3 北羌塘地块昌都地区王卡剖面凝灰岩样品全岩主微量元素含量(%)

Table 3 Whole-rock major and trace element concentrations (%) of tuff samples from the Wangka section, Changdu area, North Qiangtang terrane

样品号码	Drg-1	Drg-2	样品号码	Drg-1	Drg-2
SiO ₂	72.32	77.49	Zr	366	155.00
TiO ₂	0.60	0.58	Nb	28.10	17.70
Al ₂ O ₃	18.74	13.30	Ba	31.30	360.00
TFe ₂ O ₃	0.79	2.06	La	24.90	73.70
MnO	—	—	Ce	46.70	165.00
MgO	0.04	0.24	Pr	4.73	20.90
CaO	0.01	0.16	Nd	15.40	84.60
Na ₂ O	0.01	0.13	Sm	2.48	13.80
K ₂ O	0.07	1.30	Eu	0.48	2.42
P ₂ O ₅	—	0.13	Gd	2.54	8.06
LOI	7.30	4.34	Tb	0.55	1.13
Total	99.88	99.73	Dy	3.91	6.99
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	31.2	22.90	Ho	0.90	1.50
Sc	7.15	7.99	Er	2.94	4.33
V	43.0	88.20	Tm	0.50	0.65
Cr	41.7	51.20	Yb	3.65	4.42
Ni	1.52	5.02	Lu	0.57	0.68
Cu	6.65	3.23	Hf	9.78	3.99
Zn	3.07	10.80	Ta	1.91	0.75
Rb	4.09	115.00	Th	15.50	9.71
Sr	30.8	415.00	U	3.04	1.70
Y	24.6	41.60	REE	110	387.00

(李霓等, 2004; 苏本勋等, 2009; 孙晓奎等, 2022), 仍不能排除雅轩桥玄武岩所代表的思茅地块对昌都凝灰岩提供物质来源的可能性。实际上, 前人在该雅轩桥玄武岩的剖面上发现了英安岩, 并且雅轩桥玄武岩与英安岩呈互层沉积(Fan *et al.*, 2010), 该英安岩很可能是由雅轩桥玄武岩岩浆分异结晶形成的。可惜的是暂未发现该英安岩的相关数据。基于思茅地块与北羌塘地块在中二叠世古纬度接近(Metcalf, 2013), 且雅轩桥玄武岩与昌都凝灰岩在形成的构造环境以及时间上具有较好的一致性, 思茅地块火山活动仍可能为昌都凝灰岩提供物质

来源。峨眉山大火成岩省的岩浆活动以玄武岩为主体, 也含有少量酸性火山岩(Xu *et al.*, 2001), 其中峨眉山玄武岩又可以细分为高Ti玄武岩和低Ti玄武岩(Xu *et al.*, 2010)。在全岩Zr/Sc-Th/Sc图解与全岩Al₂O₃-TiO₂图解中, 峨眉山低Ti和高Ti玄武岩均落入中—基性区域(图8a, b); 在全岩Nb/Y-Zr/TiO₂图解中, 峨眉山玄武岩落入碱性和亚碱性玄武岩区域, 与昌都凝灰岩差异明显(图8c)。但与峨眉山大火成岩省相关的流纹岩在全岩Al₂O₃-TiO₂图解中落入酸性区域且分布于昌都凝灰岩附近(图8b), 表明峨眉山大火成岩省后期的酸性火山活动也可能是昌都交嘎组凝灰岩的物质来源(Huang *et al.*, 2022a)。前人研究表明, 高场强元素的相对含量(特别是Nb和Ta)可以对凝灰岩的来源作出合理有效的解释(Huang *et al.*, 2016; Hong *et al.*, 2017, 2019; Kiipili *et al.*, 2017; Dai *et al.*, 2018)。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 峨眉山大火成岩省相关流纹岩的Nb和Ta元素未表现出明显的负异常(图7d)。在锆石Th/Nb-Hf/Th图解中, 该流纹岩落入板内环境, 与昌都凝灰岩差异明显(图8d)。高场强元素和锆石微量元素指示的形成环境差异排除了峨眉山大火成岩省作为交嘎组物质来源的可能, 表明华南地块不能为交嘎组凝灰岩提供物源。反观北羌塘地块自身, 北羌塘地块中二叠世火山岩主要集中在红脊山、治多、昌都等区域。治多火山岩拥有与昌都凝灰岩相似的Al₂O₃/TiO₂值, 且在全岩Zr/Sc-Th/Sc图解中也落入酸性岩浆岩区域(图8a)。在全岩Nb/Y-Zr/TiO₂图解中, 治多火山岩和红脊山花岗岩与昌都凝灰岩一同落入中酸性区域(图8c)。同时, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图和原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 治多岩浆岩和红脊山花岗岩拥有与昌都凝灰岩相似的高场强元素相对含量(图7a, b)。更重要的是, 治多岩浆岩和红脊山花岗岩的形成环境均被认为是岛弧, 与昌都凝灰岩一致(Yang *et al.*, 2011; 张乐等, 2014)。综上所述, 昌都地区王卡剖面交嘎组凝灰岩的物质来源可能为北羌塘地块与思茅地块的火山弧, 而与华南地块的峨眉山大火成岩省没有关系。

4.3 对二叠纪P3冰期的启示

晚古生代冰期在地球历史中扮演着重要的角色。其中, P3冰期作为晚古生代重要的组成部分, 一直以来都是学者们讨论的热点(Sun *et al.*, 2023;

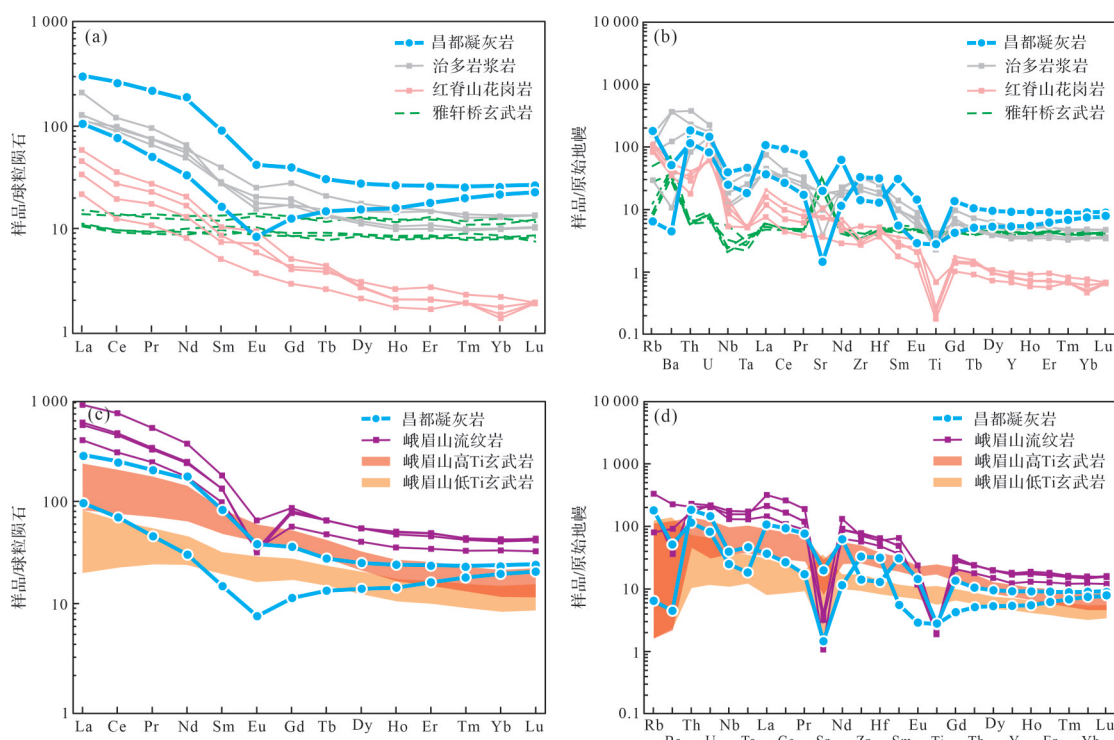


图7 全岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a, c)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, d)

红脊山花岗岩全岩微量元素数据引自张乐等(2014), 治多区域岩浆岩全岩微量元素数据引自Yang *et al.* (2011), 雅轩桥全岩微量元素数据引自Fan *et al.* (2010), 峨眉山高Ti和低Ti全岩微量元素数据引自Huang *et al.* (2022a), 峨眉山流纹岩锆石微量和全岩微量元素数据引自Huang *et al.* (2022a), 球粒陨石标准化值及原始地幔标准化值据Sun and McDonough (1989)

Fig. 7 (a, c) Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns; (b, d) primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for whole-rock samples

Yong *et al.*, 2024)。目前, P3冰期的起止时间学界已基本达成一致, 而对于P3冰期的启动机制仍然存在争议(Jones *et al.*, 2016; McKenzie *et al.*, 2016; Godd ris *et al.*, 2017)。Fielding *et al.* (2023)认为P3冰期开始于约270 Ma, 这与王卡剖面交嘎组岩性转变时间(268.2 ± 1.9 Ma)在误差范围内一致。王卡剖面记录了由碳酸盐岩向碎屑岩过渡的巨大岩性转变, 并且该岩性转变时间与P3冰期启动时间相吻合, 暗示了其可能是对P3冰期开始的响应, 并与P3冰期的成因有关。关于冰期的启动机制, 目前有观点认为酸性火山活动所释放的硫酸盐气溶胶会在平流层形成“阳伞效应”致使气温在短期内快速降低(Soreghan *et al.*, 2019)。而火山岩风化, 特别是玄武岩的风化会大量消耗大气中的温室气体, 使气温持续维持较低水平并导致冰期的开始(Raymo *et al.*, 1988)。本文认为北羌塘昌都地区交嘎组的凝灰岩来源于北羌塘地块和思茅地块的火山岛弧。该火山岛弧在中二叠世岩浆活动剧烈, 并形成大量火山岩。值得注意的是, 古地磁数据表明在中二叠世时期, 北

羌塘地块从南半球中纬度地区迅速向赤道附近漂移(Shen *et al.*, 2019)。从中纬度地区向低纬度地区漂移导致北羌塘地块气温急剧上升, 而温度的升高会加剧火山岩的风化, 从而大量消耗空气中的温室气体, 最终致使气候变冷以及冰期产生。考虑到目前对交嘎组岩性转变的时间约束并不是来自高精度年代学研究, 还无法明确该岩性转变与P3冰期开始的先后关系。但是, 对交嘎组凝灰岩年代学和成因研究, 至少表明北羌塘地块和思茅地块发育的火山岛弧在中二叠世的强风化作用可能致使或促进了二叠纪P3冰期的产生。

5 结论

北羌塘地块昌都地区王卡剖面交嘎组凝灰岩的年龄为(268.2 ± 1.9) Ma, 物质来源为北羌塘地块和思茅地块的火山弧。该火山弧在中二叠世岩浆活动剧烈并形成大量火山岩, 其火山岩的强风化作用可能致使或促进了二叠纪P3冰期的产生。

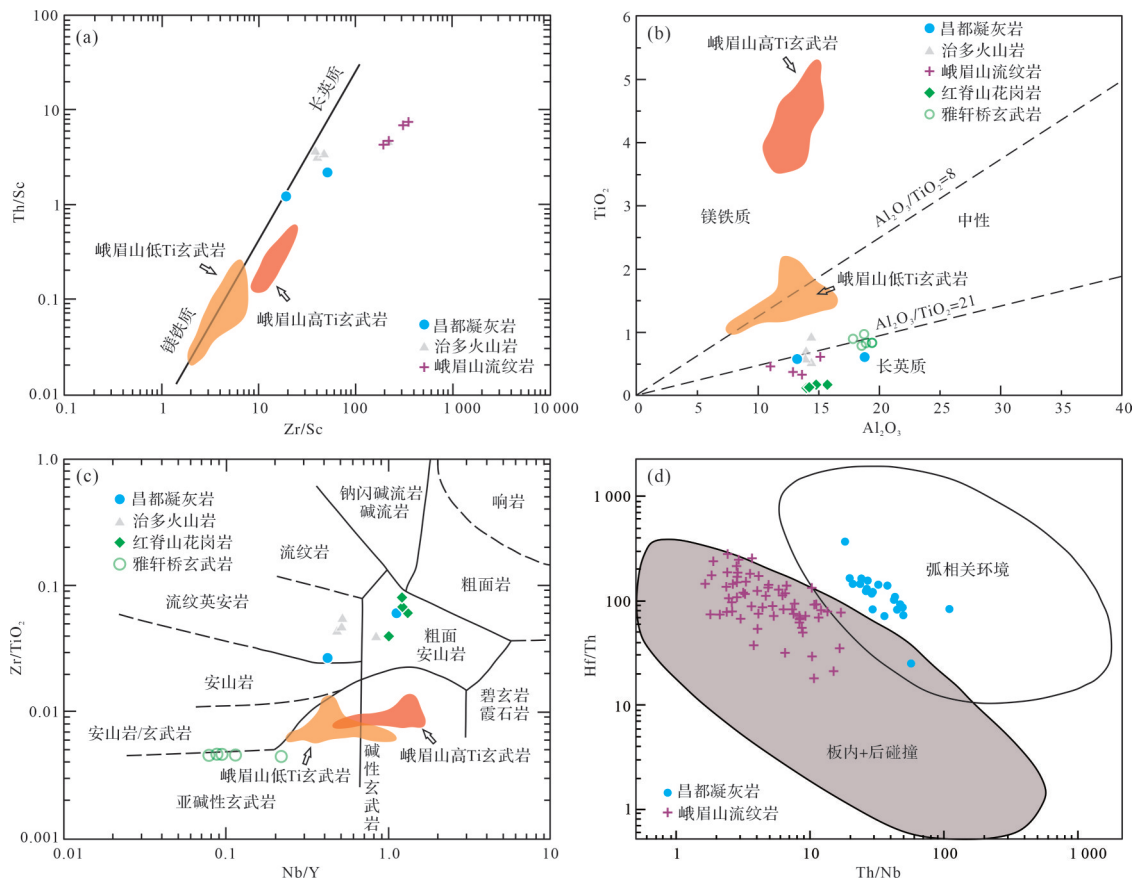


图8 (a)全岩 Zr/Sc-Th/Sc 图解; (b)全岩 Al_2O_3 - TiO_2 图解; (c)全岩 Nb/Y-Zr/ TiO_2 图解; (d)锆石 Th/Nb-Hf/Th 图解
 红脊山花岗岩全岩微量元素数据引自张乐等(2014), 治多区域岩浆岩全岩微量元素数据引自 Yang *et al.* (2011), 雅轩桥玄武岩全岩微量元素数据引自 Fan *et al.* (2010), 峨眉山高Ti和低Ti全岩微量元素数据引自 Huang *et al.* (2022a), 峨眉山流纹岩锆石微量和全岩微量数据引自 Huang *et al.* (2022a)

Fig. 8 (a) Zr/Sc vs. Th/Sc diagram; (b) Al_2O_3 vs. TiO_2 diagram; (c) Nb/Y vs. Zr/ TiO_2 diagram; (d) Th/Nb vs. Hf/Th diagram

参考文献 (References)

- 陈丰琪, 钟康惠. 2013. 藏东优日铅锌铜多金属矿床地质特征与成因探讨[J]. 四川有色金属, (3): 9-14. [Chen Fengqi, Zhong Kanghui. 2013. The discussion about the geological characteristics and genesis of Youri Lead-zinc deposit, eastern Tibet[J]. Sichuan Non-ferrous Metals, (3): 9-14.]
- 何柯衡, 许欢, 安显银, 等. 2025. 拉萨地块晚古生代冰期沉积特征研究: 以申扎地区为例[J]. 沉积学报, 43(3): 976-995. [He Keheng, Xu Huan, An Xianyin, et al. 2025. Sedimentary characteristics of the Late Paleozoic Ice Age in the Lhasa Block: A case study from the Xainza area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(3): 976-995.]
- 赖冬梅. 2004. 锆石 U-Pb 年龄不一致原因浅析[J]. 四川有色金属, (2): 12-18. [Lai Dongmei. 2004. Preliminary analysis of discordant reason of zircon U-Pb dating[J]. Sichuan Nonferrous Metals, (2): 12-18.]
- 黎东玉, 唐友军, 孙鹏, 等. 2025. 北羌塘坳陷夏里组油砂地球化学特征及油源探讨[J]. 地球学报, 46(3): 671-682. [Li Dongyu, Tang Youjun, Sun Peng, et al. 2025. Geochemical characteristics and oil source discussion of Xiali Formation oil sand extracts in the northern Qiangtang Depression[J]. Acta Geoscientica Sinica, 46(3): 671-682.]
- 李霓, 樊祺诚, 孙谦, 等. 2004. 长白山天池火山岩浆演化: 来自主矿物成分的证据[J]. 岩石学报, 20(3): 575-582. [Li Ni, Fan Qicheng, Sun Qian, et al. 2004. Magma evolution of Changbai-shan Tianchi volcano: Evidences from the main phenocrystal minerals[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 575-582.]
- 牛志军, 段其发, 王建雄, 等. 2006. 青海南部治多—杂多—二叠系杂岩组[J]. 地层学杂志, 30(2): 109-115. [Niu Zhijun, Duan Qifa, Wang Jianxiong, et al. 2006. On the Gadikao Formation in Zhidoi and Zadoi areas, southern Qinghai[J]. Journal of Stratigraphy, 30(2): 109-115.]
- 饶靖国, 张正贵, 杨曾容. 1988. 西藏志留系泥盆系及二叠系[M]. 成都: 四川科学技术出版社: 1-121. [Rao Jingguo, Zhang Zhenggui, Yang Zengrong. 1988. Silurian, Devonian and Permian Systems of Tibet[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press: 1-121.]
- 沈树忠, 张以春, 袁东勋, 等. 2024. 青藏高原及其周边二叠纪综合地层、生物群以及古地理和古气候演化[J]. 中国科学: 地球科学, 54(4): 1125-1170. [Shen Shuzhong, Zhang Yichun, Yuan Dongxun, et al. 2024. Permian integrative stratigraphy, biotas, paleogeographical and paleoclimatic evolution of the Qinghai-Tibetan Pla-

- teau and its surrounding areas[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(4): 1125-1170.]
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 2009. 新疆北山地区红石山镁铁—超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示[J]. *岩石学报*, 25(4): 873-887. [Su Benxun, Qin Kezhang, Sun He, et al. 2009. Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area, Xinjiang: Implications for assimilation and fractional crystallization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 873-887.]
- 孙晓奎, 王超, 李航, 等. 2022. 弧地壳深部岩浆结晶分异过程: 来自中祁连西段哈马尔达坂杂岩体的年代学、地球化学和热力学模拟研究[J]. *岩石学报*, 38(4): 1169-1188. [Sun Xiaokui, Wang Chao, Li Hang, et al. 2022. Geochemical, geochronological and thermodynamic modeling of the Hamardaban plutonic complex in the Central Qilian Belt: Implications for deep arc crustal magma differentiation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(4): 1169-1188.]
- 许王, 刘福来, 冀磊, 等. 2021. 西南三江德钦—维西地区中二叠—晚三叠世岩浆岩与古特提斯演化[J]. *岩石学报*, 37(2): 462-480. [Xu Wang, Liu Fulai, Ji Lei, et al. 2021. Middle Permian-Late Triassic magmatism in the Deqin-Weixi area of the Sanjiang Orogenic Belt: Implications for Paleo-tethyan evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(2): 462-480.]
- 闫永刚, 黄宝春, 张培震, 等. 2024. 印支地块晚古生代以来运动历史的古地磁学重建: 进展与展望[J]. *科学通报*, 69(18): 2498-2517. [Yan Yonggang, Huang Baochun, Zhang Peizhen, et al. 2024. Paleomagnetic constraint on the movement of the Indochina Block since Late Paleozoic: Progress and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 69(18): 2498-2517.]
- 于漫, 王玉玺, 王晓伟, 等. 2017. 岛弧火山岩成因和地球化学特征[J]. *甘肃地质*, 26(1): 17-24. [Yu Man, Wang Yuxi, Wang Xiaowei, et al. 2017. The origin and geochemical characteristics of island arc volcanic rocks[J]. *Gansu Geology*, 26(1): 17-24.]
- 张乐, 董永胜, 张修政, 等. 2014. 藏北羌塘中西部红脊山地区早二叠世埃达克质岩石的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 33(11): 1728-1739. [Zhang Le, Dong Yongsheng, Zhang Xiuzheng, et al. 2014. The discovery of the Early Permian adakitic rock in the Hongji Mountain area within central and western Qiangtang, Tibet Plateau, and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1728-1739.]
- 支钰, 卞惠瑛, 宋飞, 等. 2025. 陕西洛南盆地黄土剖面色度参数及古气候变化[J]. *地质通报*, 44(6): 1151-1163. [Zhi Yu, Bian Huiying, Song Fei, et al. 2025. The chromaticity parameters and paleoclimate changes of loess profile in Luonan Basin, Shaanxi province[J]. *Geological Bulletin of China*, 44(6): 1151-1163.]
- 朱经经, 钟宏, 谢桂青, 等. 2016. 右江盆地酸性脉岩继承锆石成因及地质意义[J]. *岩石学报*, 32(11): 3269-3280. [Zhu Jingjing, Zhong Hong, Xie Guiqing, et al. 2016. Origin and geological implication of the inherited zircon from felsic dykes, Youjiang Basin, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3269-3280.]
- Aljinović D, Isozaki Y, Sremac J. 2008. The occurrence of giant bi-valve Alatoconchidae from the Yabeina zone (Upper Guadalupian, Permian) in European Tethys[J]. *Gondwana Research*, 13(3): 275-287.
- Belica M E, Tohver E, Pisarevsky S A, et al. 2017. Middle Permian paleomagnetism of the Sydney Basin, eastern Gondwana: Testing Pangea models and the timing of the end of the Kiaman Reverse Superchron[J]. *Tectonophysics*, 699: 178-198.
- Cheng X, Wei B T, Jiang N, et al. 2023. Evolution of the North Qiangtang Block in the Late Paleozoic: Paleomagnetism and its tectonic implications[J]. *GSA Bulletin*, 136(1/2): 707-724.
- Dai S F, Nechaev V P, Chekryzhov I Y, et al. 2018. A model for Nb–Zr–REE–Ga enrichment in Lopingian altered alkaline volcanic ashes: Key evidence of H–O isotopes[J]. *Lithos*, 302-303: 359-369.
- Fan W M, Wang Y J, Zhang A M, et al. 2010. Permian arc–back-arc basin development along the Ailaoshan tectonic zone: Geochemical, isotopic and geochronological evidence from the Mojiang volcanic rocks, Southwest China[J]. *Lithos*, 119(3/4): 553-568.
- Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P, et al. 2008. Stratigraphic imprint of the Late Palaeozoic Ice Age in eastern Australia: A record of alternating glacial and nonglacial climate regime[J]. *Journal of the Geological Society*, 165(1): 129-140.
- Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P. 2023. A revised, Late Palaeozoic glacial time-space framework for eastern Australia, and comparisons with other regions and events[J]. *Earth-Science Reviews*, 236: 104263.
- Fielding C R, Frank T D, Tevyaw A P, et al. 2021. Sedimentology of the continental end-Permian extinction event in the Sydney Basin, eastern Australia[J]. *Sedimentology*, 68(1): 30-62.
- Frakes L A, Francis J E, Syktus J I. 2005. Climate modes of the Phanerozoic[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-274.
- Goddéris Y, Donnadieu Y, Carretier S, et al. 2017. Onset and ending of the Late Palaeozoic Ice Age triggered by tectonically paced rock weathering[J]. *Nature Geoscience*, 10(5): 382-386.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Hong H L, Fang Q, Wang C W, et al. 2017. Clay mineralogy of altered tephra beds and facies correlation between the Permian-Triassic boundary stratigraphic sets, Guizhou, South China[J]. *Applied Clay Science*, 143: 10-21.
- Hong H L, Zhao L L, Fang Q, et al. 2019. Volcanic sources and diagenetic alteration of Permian–Triassic boundary K-bentonites in Guizhou province, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 519: 141-153.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27-62.
- Huang H, Cawood P A, Hou M C, et al. 2016. Silicic ash beds bracket Emeishan Large Igneous Province to <1 m. y. at ~260 Ma[J]. *Lithos*, 264: 17-27.

- Huang H, Cawood P A, Hou M C, et al. 2018. Provenance of Late Permian volcanic ash beds in South China: Implications for the age of Emeishan volcanism and its linkage to climate cooling[J]. *Lithos*, 314-315: 293-306.
- Huang H, Cawood P A, Hou M C, et al. 2022a. Zircon U-Pb age, trace element, and Hf isotopic constrains on the origin and evolution of the Emeishan Large Igneous Province[J]. *Gondwana Research*, 105: 535-550.
- Huang H, Huyskens M H, Yin Q Z, et al. 2022b. Eruptive tempo of Emeishan Large Igneous Province, southwestern China and northern Vietnam: Relations to biotic crises and paleoclimate changes around the Guadalupian-Lopingian boundary[J]. *Geology*, 50(9): 1083-1087.
- Huang K N, Opdyke N D, Peng X J, et al. 1992. Paleomagnetic results from the Upper Permian of the eastern Qiangtang terrane of Tibet and their tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 111(1): 1-10.
- Isbell J L, Miller M F, Wolfe K L, et al. 2003. Timing of Late Paleozoic glaciation in Gondwana: Was glaciation responsible for the development of northern Hemisphere cyclothems? [C]//Chan M A, Archer A W. *Extreme Depositional Environments: Mega end Members in Geologic Time*. Geological Society of America, 5-24.
- Jones M T, Jerram D A, Svensen H H, et al. 2016. The effects of large igneous provinces on the global carbon and sulphur cycles[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 441: 4-21.
- Kiipili T, Hints R, Kallaste T, et al. 2017. Immobile and mobile elements during the transition of volcanic ash to bentonite: An example from the Early Palaeozoic sedimentary section of the Baltic Basin[J]. *Sedimentary Geology*, 347: 148-159.
- Laurie J R, Bodorkos S, Nicoll R S, et al. 2016. Calibrating the Middle and Late Permian palynostratigraphy of Australia to the geologic time-scale via U-Pb zircon CA-IDTIMS dating[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 63(6): 701-730.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34-43.
- Ludwig K R. 2003. *Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center: 1-71.
- McKenzie N R, Horton B K, Loomis S E, et al. 2016. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability [J]. *Science*, 352(6284): 444-447.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[C]//Johnson M J, Basu A. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America, 21-40.
- Metcalf I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1-33.
- Metcalf I, Crowley J L, Nicoll R S, et al. 2015. High-precision U-Pb CA-TIMS calibration of Middle Permian to Lower Triassic sequences, mass extinction and extreme climate-change in eastern Australian Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 28(1): 61-81.
- Phillips L J, Crowley J L, Mantle D J, et al. 2018. U-Pb geochronology and palynology from Lopingian (Upper Permian) coal measure strata of the Galilee Basin, Queensland, Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 65(2): 153-173.
- Qiao F, Zhang Y C, Wang Y, et al. 2021. An updated age of Permian strata in the Raggyorcaka and Qamdo areas, Tibet and their palaeogeographic implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 582: 110660.
- Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. 1988. Influence of Late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles[J]. *Geology*, 16(7): 649-653.
- Shen S Z, Zhang H, Zhang Y C, et al. 2019. Permian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 62(1): 154-188.
- Soreghan G S, Soreghan M J, Heavens N G. 2019. Explosive volcanism as a key driver of the Late Paleozoic Ice Age[J]. *Geology*, 47(7): 600-604.
- Sun S, Chen A Q, Ogg J G, et al. 2023. Continental weathering indices recorded in low-latitude carbonates unveil the P3 glacial of the Late Paleozoic Ice Age[J]. *Global and Planetary Change*, 220: 103994.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.
- Wainman C C, McCabe P J, Crowley J L. 2022. New insights on the age and stratigraphy of the Cisuralian succession in the Cooper Basin, Australia, based on U-Pb CA-TIMS dating of volcanic air-fall tuffs[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 69(4): 497-508.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325-343.
- Xu W, Liu F L, Dong Y S. 2020. Cambrian to Triassic geodynamic evolution of central Qiangtang, Tibet[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103083.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian - Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58(3/4): 145-168.
- Xu Y G, Chung S L, Shao H, et al. 2010. Silicic magmas from the Emeishan Large igneous Province, Southwest China: Petrogenesis and their link with the end-Guadalupian biological crisis[J]. *Lithos*, 119(1/2): 47-60.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. 2012. Large igneous Province

- and magmatic arc sourced Permian–Triassic volcanogenic sediments in China[J]. *Sedimentary Geology*, 261-262: 120-131.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, et al. 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U–Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 284(3/4): 270-282.
- Yong R A, Sun S, Chen A Q, et al. 2024. Weathering, redox proxies and carbon isotope data from the Maokou Formation, Upper Yangtze, South China: Implications for the Guadalupian P3 glaciation of the Late Paleozoic Ice Age[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 650: 112350.
- Zhang Y C, Wang Y. 2018. Permian fusuline biostratigraphy[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 450(1): 253-288.
- Zong K Q, Klemm R, Yuan Y, et al. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of Early Neoproterozoic (ca. 900Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 290: 32-48.

Geochronology and Geological Significance of Middle Permian Tuffs in the Changdu Area, North Qiangtang Terrane

LI DeQuan¹, HUANG Hu^{1,2,3}, PANG QingQing⁴

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610059, China

3. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu 610059, China

4. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: [Objective] The Wangka section in the Changdu area, North Qiangtang terrane, records a critical lithological transition from limestone to clastic rocks in the Early-to-Middle Permian Jiaoga Formation. The timing of this transition may hold significant implications for understanding the mechanisms driving the Permian P3 glaciation. [Methods] An integrated study of the Jiaoga Formation tuffs was conducted to include petrography, zircon U-Pb geochronology, zircon trace element analysis and whole-rock major/trace element geochemistry, to constrain their emplacement age and provenance. [Results] Zircon U-Pb dating yielded a weighted mean age of (268.2 ± 1.9) Ma for the tuffs. Zircon trace elements exhibit light rare earth element (LREE) depletion and heavy REE (HREE) enrichment. Whole-rock geochemistry shows high $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, Zr/TiO_2 and Th/Sc ratios. Primitive mantle-normalized patterns indicate Nb-Ta-Ti depletion and Th-U enrichment. [Conclusions] The age of the Jiaoga Formation tuffs overlaps with the onset of Permian P3 glaciation within analytical uncertainty. Their geochemical signatures suggest derivation from a volcanic island arc spanning the North Qiangtang-Simao terranes. Intensive weathering of this arc system may have triggered or amplified P3 glaciation.

Key words: North Qiangtang terrane; Permian; tuff; P3 glaciation