第 27 卷　第 6 期
2025 年　12 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27　No. 6
Dec.　2025

文章编号：1671-1505(2025)06-1532-20　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.099

扬子西北缘中三叠统天井山组斑脱岩来源及其构造启示*

程逸潇[1]　金　鑫[1,2]　颜照坤[3]　陈俞超[1]　芦　刚[4]
邹　灏[2,5]　陈海锋[5]　杜怡星[1,2]　张云望[1]　时志强[1,2]

1 成都理工大学沉积地质研究院，四川成都 610059
2 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室，四川成都 610059
3 东华理工大学地球科学学院，江西南昌 330013
4 成都理工大学能源学院，四川成都 610059
5 成都理工大学地球与行星科学学院，四川成都 610059

摘　要　中—晚三叠世是古特提斯洋俯冲消亡和印支造山运动的重要阶段，火山活动频繁。该阶段火山喷发带来的凝灰质在后期沉积蚀变作用下形成斑脱岩，这类岩石在厘定年代地层格架及指示构造活动方面具有重要的研究价值。本研究对扬子陆块西北缘中三叠统天井山组近顶部的一套斑脱岩开展岩石学、矿物学、全岩主-微量元素含量及锆石 Hf 同位素组成等分析。结果表明，该套斑脱岩富含蒙脱石和少量高岭石，地球化学特征表现为大离子亲石元素相对于高场强元素较富集。锆石 Hf 同位素分析结果显示，斑脱岩锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值集中在 -2.35~0.95 之间，具有典型的壳幔混染特征，地壳模式年龄（T_{DM}^{C}）显示为中元古代（1.21—1.41 Ga）。结合地球化学分析，推测天井山组近顶部斑脱岩的源岩浆性质为酸性，岩浆源区可能具有由年轻洋壳俯冲形成的弧岩浆特征，岩浆演化过程可能经历了部分熔融与壳幔岩浆混合作用。通过对比周缘地区同期岩浆岩记录，认为研究区斑脱岩与东昆仑东段岩浆岩的 Hf 同位素及地球化学特征相似，两者可能具有相同的源区成分，并可能反映相似的基底性质和构造亲缘关系。研究结果为厘清扬子陆块西北缘早印支期的构造演化提供了重要线索，并为古特提斯分支洋盆（阿尼玛卿洋盆）的北向俯冲闭合提供了关键证据。

关键词　Hf 同位素　元素分析　斑脱岩　天井山组　三叠系　四川盆地

第一作者简介　程逸潇，男，2000 年生，成都理工大学在读硕士研究生，主要从事沉积地球化学研究。E-mail：chyngyixia@163.com。

通讯作者简介　金鑫，男，1989 年生，教授，博士生导师，主要从事沉积地球化学研究。E-mail：jinxin2012cdut@163.com。

中图分类号：P588.28+1　　**文献标志码**：A

Provenance of bentonite in the Middle Triassic Tianjingshan Formation on northwestern margin of Yangtze Block and its tectonic implications

*国家自然科学基金项目（编号：42362020），江西省自然科学基金项目（编号：20224BAB203035）和成都理工大学珠峰科学研究计划项目（编号：2020ZF11414）共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China（No. 42362020），the Natural Science Foundation of Jiangxi Province（No. 20224BAB203035），and the Everest Scientific Research Program of Chengdu University of Technology（No. 2020ZF11414）]

收稿日期：2025-01-02　　改回日期：2025-04-30

CHENG Yixiao[1]　JIN Xin[1,2]　YAN Zhaokun[3]　CHEN Yuchao[1]　LU Gang[4]
ZOU Hao[2,5]　CHEN Haifeng[5]　DU Yixing[1,2]　ZHANG Yunwang[1]　SHI Zhiqiang[1,2]

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 University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*
3 *College of Earth Sciences*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013, *China*
4 *College of Energy*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*
5 *College of Earth and Planetary Science*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu* 610059, *China*

Abstract　The Middle to Late Triassic period is a critical phase characterized by the subduction of the Paleo-Tethys Ocean and the Indosinian orogeny, which triggered widespread volcanic activity. Volcanic tuff, altered to bentonite through sedimentary processes, plays a crucial role in stratigraphic dating and tectonic interpretation. The bentonite layer studied is found within the top of the Middle Triassic Tianjingshan Formation in the western Sichuan Basin. Comprehensive analyses, including petrology, clay mineralogy, major and trace elements, and zircon Hf isotopes, are conducted on this bentonite layer. The bentonite is mainly composed of montmorillonite with minor amounts of kaolinite. Geochemical analysis reveals that large ion lithophile elements are more enriched compared to high field strength elements. Zircon Hf isotope analysis indicates $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ranging from −2.35 to 0.95, reflecting typical crust-mantle mixing characteristics. Model ages (T_{DM}^{C}) suggest a Mesoproterozoic provenance, ranging from 1.21 Ga to 1.41 Ga. Based on these geochemical features, the bentonite layer at the top of the Tianjingshan Formation is inferred to have originated from an acidic source magma. The magma source region may exhibit arc-related characteristics formed by the subduction of young oceanic crust, with the magmatic evolution likely involving partial melting and crust-mantle magma mixing. A comparison with records of coeval magmatic rocks in surrounding regions indicates that the bentonite layer of the Tianjingshan Formation shares similar Hf isotopic and geochemical characteristics with magmatic rocks from the eastern segment of the East Kunlun. This indicates a common magmatic source and potentially reflect similar basement properties and tectonic affinities. These findings provide significant insights into the early Indosinian tectonic evolution along the northwestern margin of the Yangtze Block and offer critical evidence for the northward subduction and eventual closure of the Animaqing branch of the Paleo-Tethys Ocean.

Key words　Hf isotope, element analysis, bentonite, Tianjingshan Formation, Triassic, Sichuan Basin

About the first author　CHENG Yixiao, born in 2000, master's degree candidate from Chengdu University of Technology, is mainly engaged in sedimentary geochemistry research. E-mail: chyngyixia@163.com.

About the corresponding author　JIN Xin, born in 1989, professor, doctoral supervisor, is mainly engaged in sedimentary geochemistry research. E-mail: jinxin2012cdut@163.com.

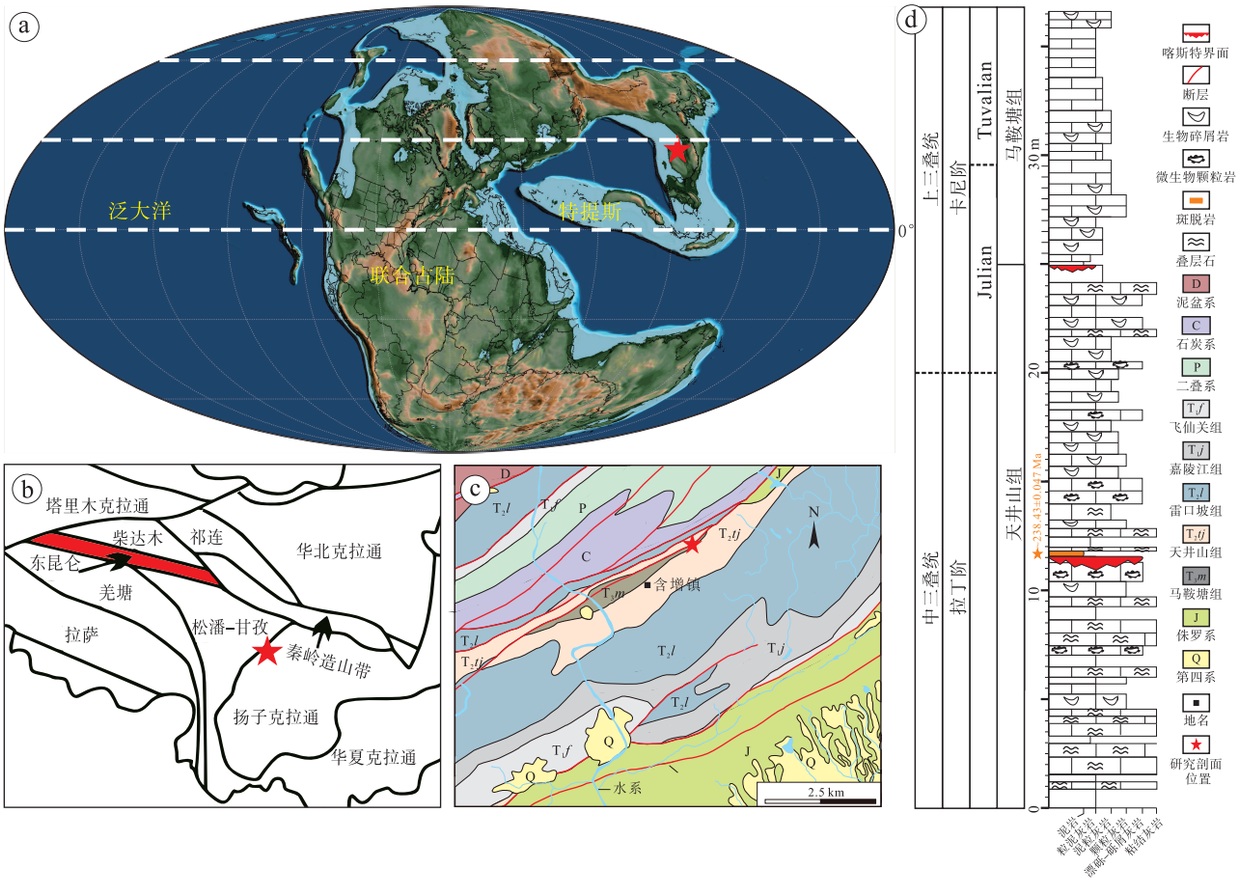
0　前言

板块边界诱发的构造-岩浆作用可通过火山喷发形成火山碎屑岩类沉积序列，其中凝灰岩、斑脱岩等为火山活动衍生的特殊沉积物，兼具有瞬时沉积的等时性和大范围空间展布等特征，可作为记录区域构造-岩浆活动的关键地质载体（Huff, 2016；刘嘉麒等，2018）。这类火山成因的岩石不仅保存了火山活动的动力学信息（如喷发强度、物质搬运机制），还可作为“标志层”用于等时参考和地层对比（Bergstrom *et al.*, 1997；Sun *et al.*, 2014；Huff, 2016；衣健等，2020）。此外，结合高精度锆石 U-Pb 同位素定年技术，能够精准厘定火山喷

发事件的时代序列，进而揭示区域构造-岩浆活动的动力学机制及其时空耦合规律（Kolata *et al.*，1996；刘嘉麒等，2018；衣健等，2020；夏磊等，2022）。

三叠纪是亚洲东部若干地块拼合的关键时期，亦是中国现代大陆形成、发展及成矿作用的关键阶段（李勇等，2011；Deng *et al.*，2014；王登红等，2020）。中国西南地区在该时期展现出复杂的构造响应特征，该地区的动力学机制主要受控于古特提斯洋多分支俯冲-闭合过程及欧亚—冈瓦纳大陆边缘系统协同演化的影响，其中华南板块的构造变形与岩浆活动主要受到古特提斯洋东支俯冲消亡的控制（图 1-a）（Wang *et al.*，2013，2018；Faure *et al.*，2016；Zhao *et al.*，2018）。在此背景下，华南板块的扬子地块作为东古特提斯洋的古陆块，其与周缘构造带的构造活动记录了古特提斯洋的演化过程，包括洋盆的开启、扩张、俯冲、消亡等一系列复杂事件（陈虹，2010）。然而，目前对东古特提斯洋构造域的演化过程尚缺乏清晰认识。例如，扬子地块西南缘的金沙江—哀牢山缝合带、昌宁—孟连缝合带和甘孜—理塘缝合带的构造关系（陈莉等，2013；方小玉等，2017；Wang *et al.*，2017；杨天南等，2019），以及北缘的阿尼玛卿—勉略缝合带构造性质（Xiong *et al.*，2014；Xia *et al.*，2015；赵东辉等，2019），仍存在争议。

华南地区广泛分布三叠纪火山灰层（多数已蚀变为黏土岩），其颜色大多呈白色、黄色、浅灰色或灰绿色，黏土矿物含量（>75%）与围岩具有显著差异（Gao *et al.*，2013；马圣钞等，2019；芦云飞等，2020；Feng *et al.*，2021；Li *et al.*，2024）。



a—中三叠世末全球古地理图，据 Scotese（2021）修改；b—中国西南地区主要构造单元示意图，据 Li 等（2015b）修改；c—研究区地质图，据 Jin 等（2022）修改；d—含增剖面部分地层综合柱状图（0~36.5 m），TIMS 锆石 U-Pb 年龄引自 Jin 等（2022）

图 1 扬子地块西北缘含增剖面位置、地质简图及天井山组—马鞍塘组地层综合柱状图

Fig. 1 Location, geological schematic map and lithological column of the Tianjingshan and Ma'antang formations at Hanzeng section in northwestern margin of Yangtze Block

这些火山灰层不仅记录了古特提斯洋的俯冲活动，而且约束了扬子地块与周缘地块碰撞诱发火山活动的时限（Yang *et al.*，2012；He *et al.*，2014；Baresel *et al.*，2017；郑斌嵩，2019），因此对这些火山灰层进行深入的成因研究，不仅有助于解析扬子地块与周缘地块的构造演化过程，也为重建古特提斯洋的演化历史提供了关键证据。

扬子地块西北缘四川江油含增地区中三叠统天井山组近顶部地层中发育有一套厚度约 20 cm 的斑脱岩。Jin 等（2022）认为该套斑脱岩是由火山喷发的凝灰质物质经过蚀变而形成，其 CA-ID-TIMS 锆石 U-Pb 定年结果为 238.43±0.047 Ma。然而，目前尚未对该套斑脱岩的矿物组成、沉积模式、岩浆源区及其构造演化背景进行深入研究。本研究通过对天井山组近顶部斑脱岩开展系统的矿物学、全岩地球化学及锆石 Hf 同位素组成研究，旨在揭示该套斑脱岩的形成过程及其火山源区特征，这对深入解析扬子地块西北缘印支运动早期的构造演化及其动力学机制具有重要意义。

1　区域地质背景

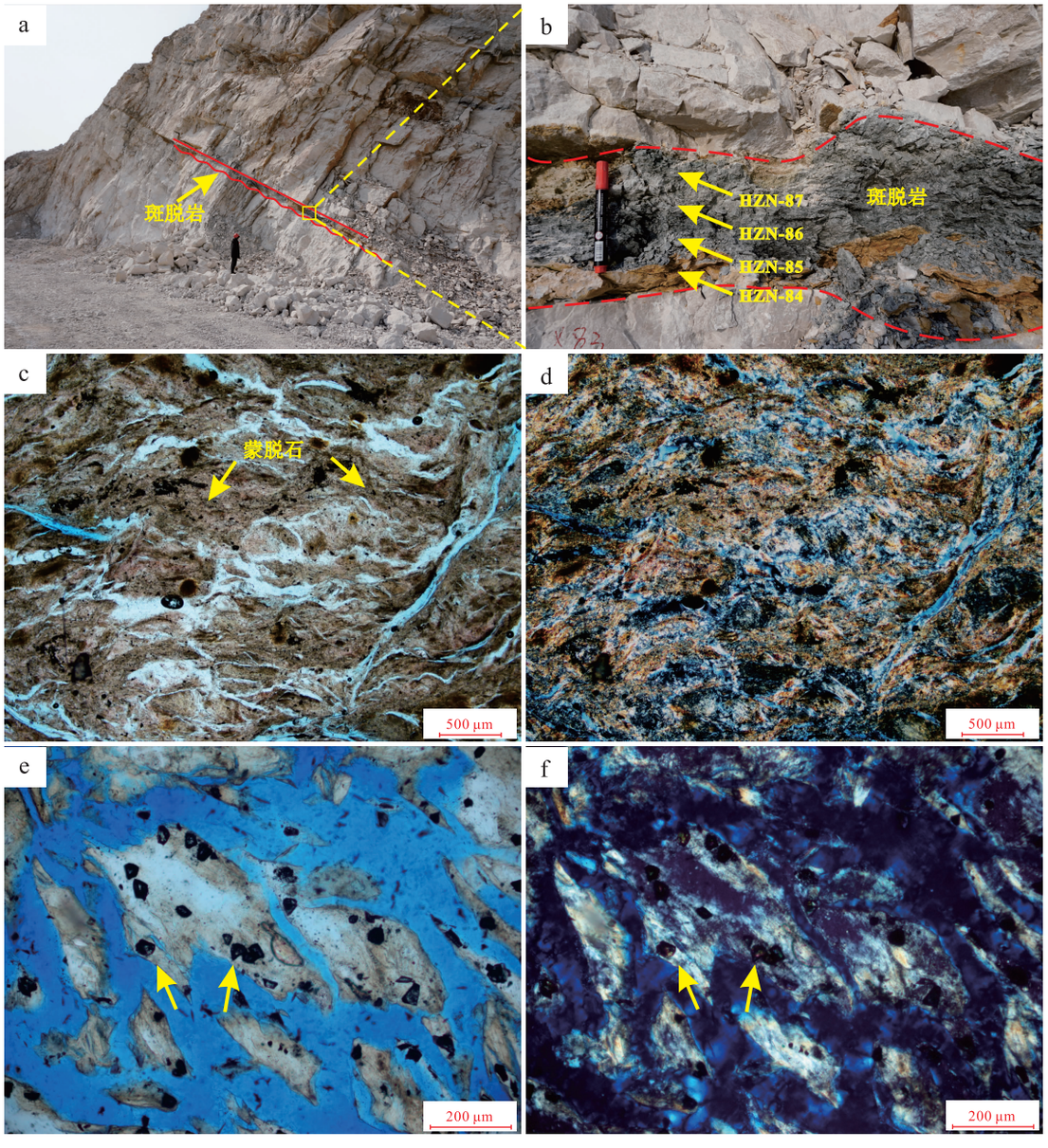
四川盆地位于扬子地块西北缘，是经过多期次构造运动演化形成的复杂叠合盆地（张浩然等，2020）。该盆地与五大构造带接壤，北部以米仓山隆起、大巴山构造带与秦岭—大别造山带为界，西接松潘—甘孜造山带和龙门山褶皱带（图 1-b）。四川盆地基底的性质较为复杂，由太古代—古元古代结晶基底、中元古代褶皱—结晶基底、新元古代过渡性基底组成（罗志立，1998）。从新元古代到中三叠世末期，扬子地块逐渐形成一个地理上相对稳定的单元（Lehrmann *et al.*，2005）。中三叠世末，受印支运动初始阶段活动的影响，四川盆地由被动大陆边缘环境逐渐转变为前陆盆地（李勇等，2011）。印支运动引发的地壳抬升，造成海水向西退缩，盆地内中下三叠统地层广泛遭受剥蚀（李勇等，2011；颜照坤等，2023）。

含增剖面位于四川盆地西北缘北段，地处江油含增镇北东约 2.5 km 处（图 1-c）。该剖面由中三叠统天井山组（T_2tj）与上覆的上三叠统马鞍塘组（T_3m）组成（图 1-d）。有孔虫化石鉴定结果表明，天井山组近顶部地层的时代仍属于晚三叠世（Jin *et al.*，2022）。天井山组以叠层石（或层纹石）粘结岩和含微生物颗粒灰岩为主，局部可见泥粒灰岩或粒泥灰岩。在天井山组近顶部，出露 1 期暴露型喀斯特界面（图 2-a，2-b），界面呈不规则形态，局部发育溶蚀沟或溶蚀缝，内部填充灰岩，并伴有局部铁锈色氧化现象（吴冰等，2018；Jin *et al.*，2022）。前人研究认为，该喀斯特界面可能与强烈的构造作用或全球海平面变化相关（吴冰等，2018）。此外，也有学者提出该界面的形成与印支运动早期活动相关，可能是由于川西龙门山构造负载引起的前隆剥蚀作用所致（李勇等，2011；He *et al.*，2019；颜照坤等，2023）。在喀斯特界面之上发育 1 层厚约 20 cm 的斑脱岩（图 2-a，2-b）。斑脱岩层上覆地层仍为天井山组，但叠层石（或层纹石）粘结岩和含微生物颗粒灰岩的含量相较于下伏地层有所减少。天井山组与马鞍塘组（T_3m）之间以另一套喀斯特界面为界（图 2-a，2-b）（吴冰等，2018；Jin *et al.*，2022）。该喀斯特界面具有全球性特征，在高精度年代地层学框架下，可在不同构造背景下的海相地层中进行等时对比，并被推测其形成与卡尼期气候事件相关（Jin *et al.*，2022）。马鞍塘组主要以泥粒灰岩或粒泥灰岩为主（图 1-d）。

2　样品采集及测试

斑脱岩样品采自一处新矿坑，距离 Jin 等（2022）采样的老矿坑约 500 m。基于斑脱岩及其上、下地层的岩性特征，推测 2 处斑脱岩样品来源于同一层位。该斑脱岩层由顶部和底部厚 3～5 cm 的透镜状黄色氧化色部分和中部厚约 15 cm 的灰绿色至灰黑色部分构成（图 2-a，2-b）。自下而上依次采集 4 件样品，分别命名为 HZN-84、HZN-85、HZN-86 和 HZN-87（图 2-b）。其中，样品 HZN-84 来自下部氧化色部分（图 2-b）。4 件样品均具有较强的吸水性，结构松散，抗风化能力较弱，露头常呈凹槽状，风化后呈黄色；原岩颜色为灰绿色或灰黑色，具蜡状光泽，呈泥状或土状产出，水浸湿后具有滑腻感，符合斑脱岩的野外识别特征（Su *et al.*，2003；Huff，2008；胡艳华等，2009；张迪等，2025）。

4 件样品均进行全岩主-微量元素分析，其中，HZN-84 和 HZN-87 还用于岩石学和 X 射线衍射分析，而微区原位锆石 Hf 同位素分析则基于 Jin



a—天井山组近顶部地层中发育厚度约 20 cm 的斑脱岩层（红色线条之间，黄色箭头所指）；b—图 a 中斑脱岩层的细节放大，红色虚线之间为斑脱岩层，黄色箭头所指为 4 个样品具体采样位置；c—HZN-84 样品单偏光镜下特征，可见蒙脱石（黄色箭头所指），蒙脱石矿物形态上多呈细鳞片状单体和毯毛状、纤维状结合体；d—与图 c 同视域 HZN-84 样品正交偏光镜下特征；e—HZN-87 样品单偏光镜下特征，可见较多的重矿物颗粒（黄色箭头所指），呈不规则短柱状；f—与图 e 同视域 HZN-87 样品正交偏光镜下特征，可见重矿物颗粒（黄色箭头所指），重矿物正交偏光下具有二级干涉色

图 2 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩野外地质特征和显微照片

Fig. 2 Field geological characteristics and micrographs of bentonite layer from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

等（2022）研究的斑脱岩样品进行。

2.1 岩石学分析

本研究薄片分析于成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室完成，镜下观察和拍照分析仪器为尼康 Eclipse LV100POL 偏光显微镜。

2.2 全岩主、微量元素含量分析

岩石地球化学分析委托成都谱谱检测技术有限公司完成。制备 200 目以下的粉末样品，主量元素

含量分析利用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES、美国 PE 5300V）完成，分析精度优于 1%~5%。微量元素与稀土元素含量分析采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS、Aglient Technologies 7700）测定，分析精度优于 2%~5%。球粒陨石与原始地幔标准化数据采用 Sun 和 McDonough（1989）标准，地球化学数据分析处理和绘图使用 Geokit 及 CorelDRAW 等软件完成。

2.3　X 射线衍射分析

X 射线衍射（全岩分析、黏土分析）委托成都谱谱检测技术有限公司完成。全岩测试分析方法如下：取少量样品（10 g）粉碎至 200 目，用背压法在模具中将粉末垂直均匀压实。熔片法实验检测标准依据中国石油天然气总公司发布的“沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法（SYT 5163-2010）”。X 射线扫描使用日本理学 Rigaku XRD/Rigaku Ultima Ⅳ进行。

黏土分析方法如下：首先，将粉碎后的粉末加入纯水，采用水悬浮液分离提取粒径小于 2 μm 的黏土矿物，经过离心操作后使黏粒沉淀，使得黏土分离提取。接着，向悬浮液中添加适量纯水，充分搅拌后吸取 1 mL 悬浮液置于载玻片上，并在常温下自然风干（记为 N 片），对于自然定向片，风干后上机进行 X 射线衍射测试，测试后将其置于恒温环境为 60 ℃的乙二醇蒸汽干燥皿中进行饱和处理，恒温时间不少于 8 h（记为 E 片），乙二醇饱和处理后继续上机进行 X 射线衍射测试。测试完成后，再将其置于 450 ℃的马弗炉中进行恒温处理，恒温时间超过 2.5 h（记为 H 片），冷却后，继续进行衍射实验。实验使用仪器（日本理学 Rigaku XRD/Rigaku Ultima Ⅳ）和执行标准与全岩测试一致。

2.4　锆石 Hf 同位素

微区原位锆石 Hf 同位素组成分析测试委托武汉上谱分析科技有限责任公司完成。样品粉碎分选后，在镜下挑选纯度较高和形态完整的锆石制成环氧树脂样品靶，制靶后磨蚀抛光，经锆石阴极发光（CL）镜下显微照片观察，标记合适测试点位置，以备上机测试。Lu-Hf 同位素分析采用德国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS（Neptune Plus），激光剥蚀系统为 Geolas HD，输出能量密度为~8.0 J/cm^2。采用的激光斑束固定为 44 μm，具体分析条件及流程详见 Hu 等（2012）。分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal（Liu *et al.*, 2010）完成。

3　测试结果

3.1　岩石学特征

岩石薄片镜下观察显示，HZN-84 和 HZN-87 样品蚀变严重，结构松散，具有典型的火山蚀变黏土岩特征（图 2-c，2-d）。镜下显微观察表明，斑脱岩主要由浅褐色黏土矿物组成（占比约 90%），局部可见隐晶质石英。黏土矿物在单偏光下呈无色至浅黄褐色，形态上多呈细鳞片状单体和毯毛状、纤维状结合体（图 2-c），这一特征与蒙脱石的光学性质相似。通过黏土矿物 X 射线衍射定量分析（表 1），结合镜下特征，认为黏土矿物以蒙脱石为主，伴有少量高岭石及石英。此外，在 HZN-87 样品的薄片中，局部可见较多的重矿物颗粒，单偏光下呈不规则短柱状，矿物边缘粗而黑，具极高正突起，不见解理，正交偏光下具有鲜艳的二级干涉色（图 2-e，2-f）。

表 1　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩样品黏土矿物 X 射线衍射定量分析

Table 1　Quantitative XRD analysis of clay minerals in bentonite from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

样品名称	黏土矿物含量/%					
	蒙脱石	伊利石	高岭石	绿泥石	伊/蒙混层	绿/蒙混层
HZN-84	95	0	5	0	0	0
HZN-87	92	0	8	0	0	0

注：“0”表示低于检出限。

3.2　主、微量元素含量特征

斑脱岩样品主量及微量元素测试结果见表 2。测试结果显示，扬子地块西北缘天井山组斑脱岩主量元素总体具有较高的 SiO_2（49.16%~56.94%）、Al_2O_3（19.82%~22.72%）、MgO（4.45%~5.00%）和 K_2O（1.65%~1.97%）含量，较低的 Na_2O（0.02%~0.11%）、TFe_2O_3（1.66%~0.81%）和 CaO（1.78%~2.18%）含量。样品的烧失量较高（12.57%~19.94%），推测主要来源于黏土矿物中的结构水。

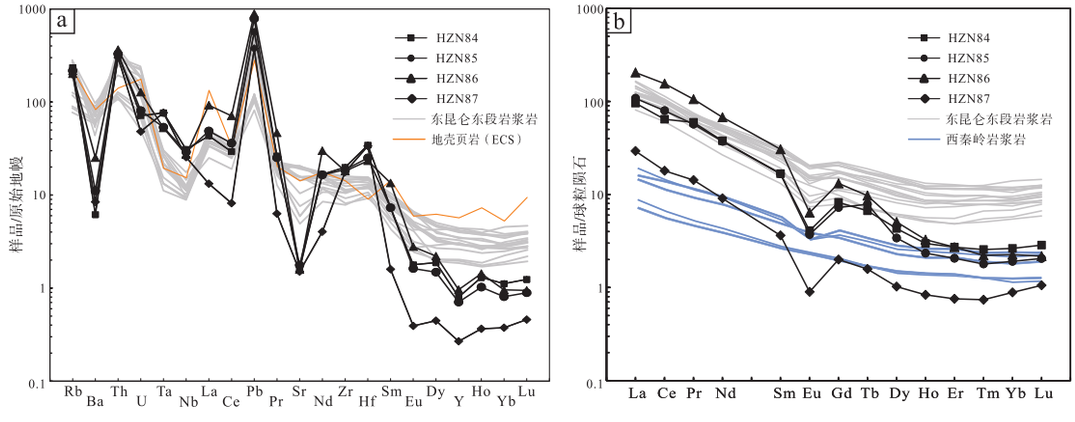
微量元素特征表现出明显的 Eu 负异常（δEu 为

表 2 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩样品主量元素（%）和微量元素（μg/g）分析结果

Table 2 Results of major element (%) and trace elements (μg/g) of bentonite samples from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

样品	SiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	TiO_2	P_2O_5	烧失量	Sc
HZN-84	56.94	1.97	0.11	1.78	5.00	19.82	1.55	<0.01	0.12	0.02	12.57	3.40
HZN-85	49.42	1.80	0.04	2.18	4.60	20.85	1.45	0.01	0.12	0.02	19.33	3.91
HZN-86	49.16	1.65	0.02	1.96	4.45	20.84	1.66	0.01	0.11	0.03	19.94	3.56
HZN-87	54.75	1.75	0.10	1.93	4.67	22.72	0.81	<0.01	0.13	0.01	13.01	3.26
样品	Zr	Ni	Cu	Zn	Ba	Rb	Sr	Y	Nb	Hf	Pb	Th
HZN-84	222.42	5.73	2.09	89.28	43.19	148.53	33.57	3.65	22.01	10.64	40.54	28.04
HZN-85	210.40	10.52	3.45	531.64	77.22	137.56	37.35	3.22	20.74	7.73	55.78	27.95
HZN-86	202.76	15.34	2.87	280.28	175.86	127.35	33.33	4.38	19.39	7.20	63.13	31.03
HZN-87	198.58	6.57	4.19	41.37	58.88	125.77	31.71	1.22	18.24	10.40	26.63	25.51
样品	U	V	Ga	Ta	Sn	Sb	Cs	Bi	Tl	Te	La	Ce
HZN-84	1.50	23.06	21.74	3.14	5.79	5.78	101.75	0.78	3.57	0.07	29.75	51.93
HZN-85	1.70	15.21	21.08	2.20	4.84	3.36	125.39	0.57	6.24	0.02	33.48	64.29
HZN-86	2.67	36.13	23.42	2.15	4.97	3.17	122.87	0.56	6.97	0.07	63.40	125.80
HZN-87	1.01	121.30	19.41	3.14	4.12	0.97	95.53	0.81	8.84	0.20	9.08	14.54
样品	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
HZN-84	7.27	22.64	3.26	0.30	2.13	0.32	1.39	0.21	0.57	0.08	0.55	0.09
HZN-85	6.95	22.32	3.25	0.27	1.88	0.37	1.10	0.17	0.43	0.06	0.40	0.07
HZN-86	12.90	40.60	5.99	0.47	3.41	0.46	1.63	0.24	0.57	0.07	0.47	0.07
HZN-87	1.74	5.45	0.71	0.07	0.52	0.08	0.33	0.06	0.16	0.02	0.19	0.03

注：TFe_2O_3 代表全铁含量，以上数据均已四舍五入保留 2 位小数处理；烧失量及之前的氧化物的单位为“%”，Sc~Lu 等微量元素单位为“μg/g”。



球粒陨石数据引自 Boynton（1984）；原始地幔标准化数据引自 Sun 和 McDonough（1989）；区域对比数据引自 Ren 等（2016），严镜等（2021）；地壳页岩（ECS）数据引自 Turekian 和 Wedepohl（1961）

图 3 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩原始地幔标准化多元素蛛网图（a）及球粒陨石标准化稀土配分曲线（b）

Fig. 3 (a) Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram and (b) chondrite-normalized rare earth element distribution pattern of bentonite samples from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

0.29~0.33）。在微量元素原始地幔标准化蛛网图（图 3-a）中，4 件样品的分布趋势相似。样品相对富集 Rb、Th、U 等元素，相对亏损 Zr、Ba、Sr、Eu 等元素。4 件样品的稀土元素总量（∑REE）为 32.98~256.08 μg/g；轻稀土总量（∑LREE）为 31.59~249.16 μg/g；重稀土总量（∑HREE）为 1.39~6.92 μg/g。轻、重稀土比（∑LREE/ΣHREE）为 21.56~36.01，显示轻、重稀土分异明显。4 件样品

的$(La/Yb)_N$的值为 32.22～90.94；其中（$(Ce/Yb)_N$ >1(19.79～69.23)，在球粒陨石标准化稀土配分曲线上表现为轻稀土富集的右倾分布型式(图 3-b)；$(La/Sm)_N$>1（5.74～8.04），反映出轻稀土元素之间存在分异；（$(Gd/Yb)_N$ 值为 2.21～5.85，$(Dy/Yb)_N$值为 1.13～2.25。稀土分配曲线整体向右倾斜，表明重稀土元素之间的分馏程度较轻稀土元素减弱。

3.3　黏土分析结果

全岩样品的 X 射线衍射分析结果显示(表 3)，HZN-84 和 HZN-87 样品富含黏土矿物（分别为 95.3%和 95.0%）和少量的石英矿物（分别为 4.7%和 5.0%）。黏土矿物 X 射线衍射定量分析结果显示(表 1)，HZN-84 和 HZN-87 样品黏土矿物主要为蒙脱石（分别为 95%和 92%）和少量的高岭土（分别为 5%和 8%）。

综合分析表明，2 件斑脱岩样品具有相近的矿物组成，黏土矿物化学组成接近蒙脱石，这与 XRD 分析结果一致。样品基本上由蒙脱石黏土矿物组成，其他矿物含量极低，仅检测到少量石英，未见云母或斜长石等矿物。

3.4　Hf 同位素组成

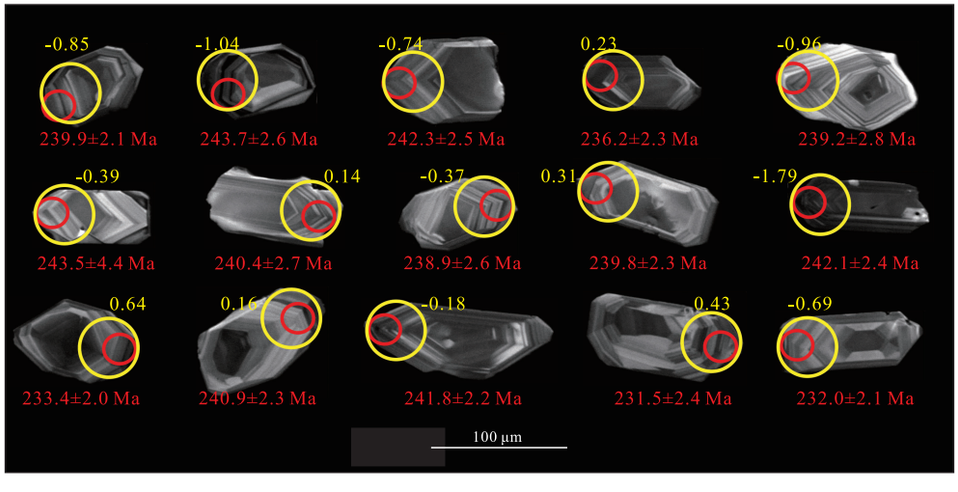
斑脱岩锆石 Hf 同位素测点位置见图 4，分析及计算结果见表 4。所有 Hf 同位素的原位分析点均位于对应锆石 U-Pb 测试点位的旁边或同一锆石的相同韵律环带内。$^{176}Hf/^{177}Hf$初始比值和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值依据相应锆石的 U-Pb 年龄计算。本次共测试 52 个点位，结果显示锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为 0.001037～0.003597，均值为 0.001855。除了 HZ-K2-37、HZ-K2-42、HZ-K2-19 这 3 个测点的 $^{176}Lu/^{177}Hf$值大于 0.003 外，其余测点的$^{176}Lu/^{177}Hf$ 值均小于 0.003，且较为均一，表明锆石结晶后基本没有明显的放射性成因 Hf 的累积，因此所测定的$^{176}Hf/^{177}Hf$值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位

表 3　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩样品全岩 X 射线衍射定量分析结果

Table 3　Quantitative whole-rock XRD results of bentonite sample from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

样品名称	成分含量/%										
	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	方沸石	萤石	石膏	黏土矿物
HZN-84	4.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95.3
HZN-87	5.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95.0

注：“0”表示低于检出限。



具有代表性的锆石 CL 图像、U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值，红色圆圈代表锆石 U-Pb 定年测点位置，黄色圆圈代表 Lu-Hf 同位素测点位置（底图引自 Jin *et al.*, 2022）

图 4　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩锆石阴极发光（CL）图像

Fig. 4　Cathodoluminescence (CL) image of zircons from bentonite sample within the Middle Triassic Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

表 4 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 4 Lu-Hf isotopic composition of zircons from bentonite sample within the Middle Triassic Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

样品号	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	Age/Ma	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM}/Ga	T_{DM}^{C}/Ga
HZ-K2-01	0.001 836	0.063 194	0.282 607	0.000 016	239.9	0.282 599	−0.85	0.94	1.32
HZ-K2-02	0.002 569	0.083 397	0.282 619	0.000 023	237.1	0.282 608	−0.61	0.94	1.30
HZ-K2-03	0.001 843	0.062 383	0.282 600	0.000 018	243.7	0.282 591	−1.04	0.95	1.34
HZ-K2-04	0.001 534	0.051 988	0.282 628	0.000 017	238.6	0.282 621	−0.11	0.90	1.27
HZ-K2-05	0.001 859	0.064 746	0.282 653	0.000 013	242.9	0.282 645	0.83	0.87	1.22
HZ-K2-06	0.002 489	0.087 269	0.282 636	0.000 024	235.6	0.282 625	−0.05	0.91	1.27
HZ-K2-07	0.001 367	0.048 333	0.282 607	0.000 016	242.3	0.282 601	−0.74	0.92	1.32
HZ-K2-08	0.001 445	0.048 642	0.282 634	0.000 016	231.2	0.282 628	−0.02	0.89	1.26
HZ-K2-09	0.001 239	0.040 677	0.282 621	0.000 019	236.8	0.282 616	−0.33	0.90	1.29
HZ-K2-10	0.001 096	0.039 433	0.282 645	0.000 014	236.6	0.282 641	0.55	0.86	1.23
HZ-K2-11	0.001 176	0.042 989	0.282 646	0.000 015	234.8	0.282 640	0.50	0.87	1.23
HZ-K2-12	0.001 332	0.045 540	0.282 637	0.000 013	240.4	0.282 631	0.28	0.88	1.25
HZ-K2-13	0.001 917	0.069 159	0.282 623	0.000 016	241.0	0.282 615	−0.27	0.91	1.29
HZ-K2-14	0.002 296	0.082 426	0.282 647	0.000 016	234.0	0.282 637	0.37	0.89	1.24
HZ-K2-15	0.001 638	0.059 268	0.282 616	0.000 016	237.1	0.282 609	−0.56	0.92	1.30
HZ-K2-16	0.001 692	0.053 882	0.282 612	0.000 018	236.4	0.282 604	−0.74	0.93	1.31
HZ-K2-17	0.001 729	0.062 770	0.282 620	0.000 015	237.1	0.282 612	−0.46	0.92	1.29
HZ-K2-18	0.001 538	0.050 836	0.282 565	0.000 018	238.0	0.282 558	−2.35	0.99	1.41
HZ-K2-19	0.003 597	0.116 918	0.282 648	0.000 024	236.2	0.282 632	0.23	0.92	1.25
HZ-K2-20	0.001 955	0.066 137	0.282 605	0.000 017	239.2	0.282 597	−0.96	0.94	1.33
HZ-K2-21	0.002 250	0.076 177	0.282 626	0.000 023	240.0	0.282 615	−0.27	0.92	1.28
HZ-K2-22	0.001 753	0.064 053	0.282 630	0.000 015	236.2	0.282 622	−0.11	0.90	1.27
HZ-K2-23	0.002 277	0.072 114	0.282 620	0.000 019	243.5	0.282 610	−0.39	0.93	1.29
HZ-K2-24	0.002 610	0.095 237	0.282 610	0.000 016	232.5	0.282 598	−1.04	0.95	1.33
HZ-K2-25	0.002 283	0.075 444	0.282 637	0.000 023	240.4	0.282 627	0.14	0.90	1.26
HZ-K2-26	0.001 920	0.065 814	0.282 626	0.000 016	233.7	0.282 618	−0.33	0.91	1.28
HZ-K2-27	0.001 310	0.041 820	0.282 640	0.000 018	239.4	0.282 634	0.39	0.88	1.24
HZ-K2-28	0.002 006	0.068 037	0.282 626	0.000 018	241.9	0.282 617	−0.18	0.91	1.28
HZ-K2-29	0.002 003	0.072 932	0.282 622	0.000 018	238.9	0.282 613	−0.37	0.92	1.29
HZ-K2-30	0.002 305	0.077 710	0.282 626	0.000 019	234.7	0.282 616	−0.36	0.92	1.29
HZ-K2-31	0.001 224	0.039 584	0.282 637	0.000 017	239.8	0.282 632	0.31	0.88	1.25
HZ-K2-32	0.001 367	0.048 923	0.282 619	0.000 015	242.6	0.282 613	−0.30	0.91	1.29
HZ-K2-33	0.002 054	0.070 585	0.282 596	0.000 023	234.3	0.282 587	−1.39	0.96	1.35
HZ-K2-34	0.001 698	0.060 884	0.282 657	0.000 015	231.3	0.282 650	0.75	0.86	1.21
HZ-K2-35	0.001 820	0.059 426	0.282 652	0.000 020	237.6	0.282 644	0.70	0.87	1.22
HZ-K2-36	0.001 305	0.046 456	0.282 650	0.000 016	233.6	0.282 645	0.62	0.86	1.22
HZ-K2-37	0.003 362	0.106 607	0.282 650	0.000 030	236.6	0.282 635	0.35	0.91	1.24
HZ-K2-38	0.001 800	0.064 165	0.282 619	0.000 019	238.5	0.282 611	−0.48	0.92	1.30
HZ-K2-39	0.001 037	0.034 132	0.282 616	0.000 016	241.1	0.282 611	−0.39	0.90	1.29
HZ-K2-40	0.001 363	0.047 876	0.282 647	0.000 020	235.0	0.282 641	0.54	0.87	1.23
HZ-K2-41	0.001 602	0.050 167	0.282 644	0.000 020	235.5	0.282 637	0.41	0.88	1.24
HZ-K2-42	0.003 386	0.107 983	0.282 586	0.000 030	242.1	0.282 571	−1.79	1.01	1.38

续表 4

样品号	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	Age/Ma	$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM}/Ga	T_{DM}^{C}/Ga
HZ-K2-43	0.002 293	0.083 000	0.282 655	0.000 021	233.4	0.282 645	0.64	0.88	1.22
HZ-K2-44	0.001 456	0.054 104	0.282 642	0.000 017	241.0	0.282 635	0.45	0.88	1.24
HZ-K2-45	0.001 356	0.045 293	0.282 633	0.000 015	240.9	0.282 627	0.16	0.89	1.26
HZ-K2-46	0.001 609	0.055 855	0.282 652	0.000 016	233.5	0.282 645	0.62	0.87	1.22
HZ-K2-47	0.002 511	0.081 257	0.282 628	0.000 021	241.8	0.282 617	−0.18	0.92	1.28
HZ-K2-48	0.001 290	0.041 475	0.282 646	0.000 019	231.5	0.282 640	0.43	0.87	1.23
HZ-K2-49	0.002 984	0.094 225	0.282 645	0.000 025	233.2	0.282 632	0.18	0.91	1.25
HZ-K2-50	0.001 063	0.036 150	0.282 656	0.000 016	238.1	0.282 651	0.95	0.85	1.21
HZ-K2-51	0.001 637	0.052 924	0.282 616	0.000 020	232.0	0.282 609	−0.69	0.92	1.30
HZ-K2-52	0.001 365	0.046 487	0.282 624	0.000 018	231.2	0.282 618	−0.38	0.90	1.28

素组成（吴福元等，2007）。

锆石 Hf 同位素测试结果表明，$^{176}Hf/^{177}Hf$ 的初始比值介于 0.282565～0.282657 之间，计算得出的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值范围为−2.35～0.95，主要集中分布于−1～0 之间，均值为−0.14（图 5-a）。对应的单阶段模式年龄为 0.85—1.01 Ga，集中分布在 0.90—0.95 Ga 之间。本研究用 Hf 地壳模式年龄（T_{DM}^{C}）来代表岩浆源区从亏损地幔分离的时间，其模式年龄（T_{DM}^{C}）介于 1.21—1.41 Ga 之间（图 6-e）。分析结果表明，该类岩石具有相对均一的同位素组成。此外，U-Pb 年龄结果显示斑脱岩中锆石的结晶年龄差异小于 3 Ma（Jin *et al.*，2022），这进一步支持该套斑脱岩可能来源于深部的同一岩浆房。

4　讨论

4.1　斑脱岩源岩浆性质的判别

黏土岩在蚀变过程中，部分元素可能发生迁移或富集，从而对岩性分类和判别产生影响（Zielinski，1985；Kiipli *et al.*，2017）。斑脱岩中 Ga、Ti、Nb、Zr、Ta、Th 等微量元素含量相对稳定（Zielinski，1985；Kiipli *et al.*，2017），因此基于斑脱岩的地球化学元素含量特征可推测原岩性质。在 Winchester 和 Floyd（1977）创建的 Ga-Zr/TiO_2 判别图解中，斑脱岩样品均位于流纹岩区域（图 7-a）。在 Leat 等（1986）建立的 Zr-Nb 判别图解中，斑脱岩样品原岩具有高钾钙碱性的特征（图 7-b）。综合上述地球化学特征及判别图解分

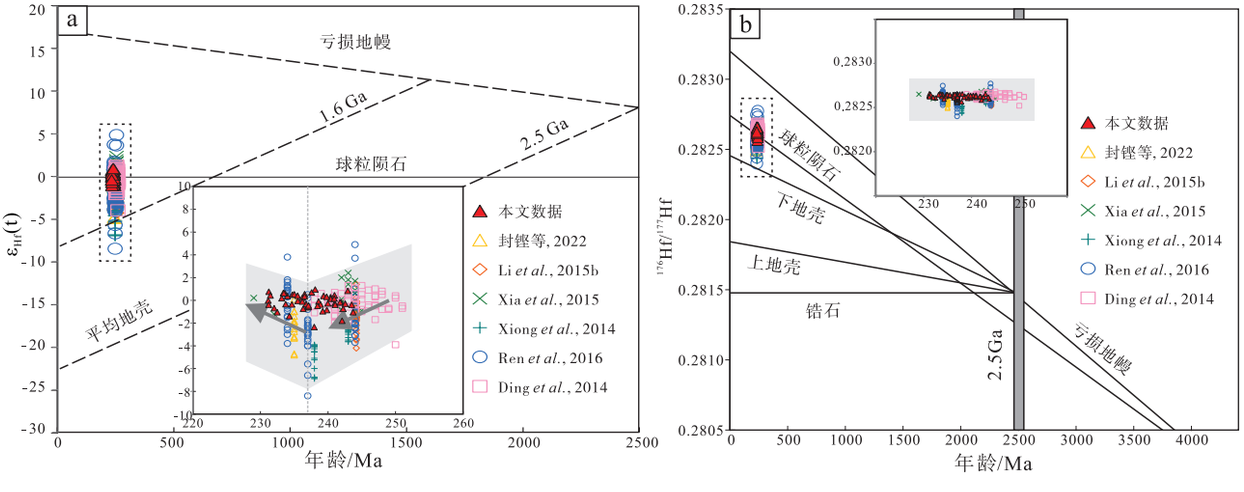
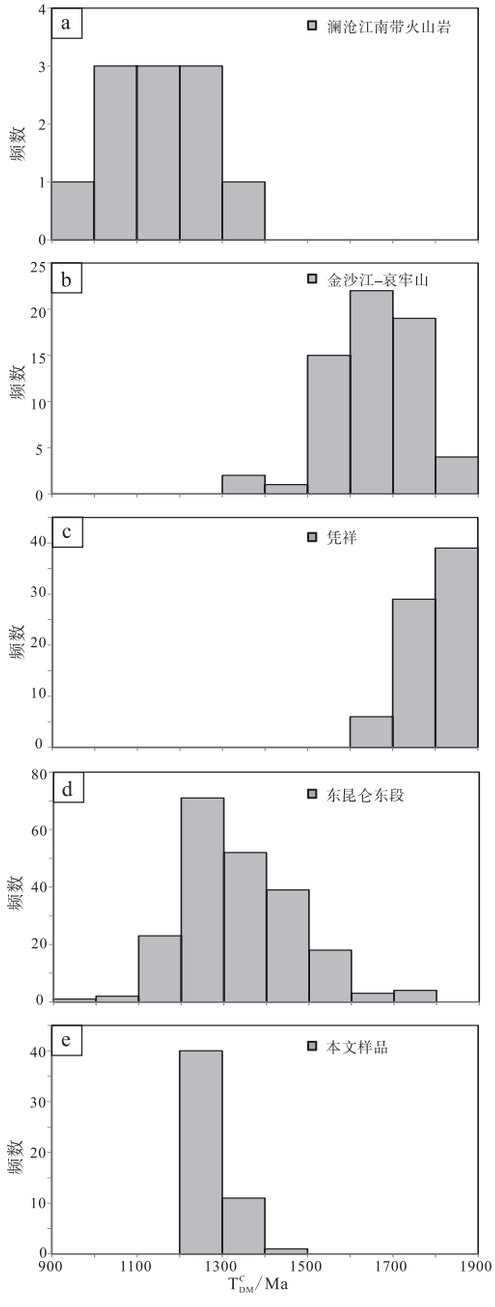


图 5　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩样品 Age-$\varepsilon_{Hf}(t)$ 与 Age-$^{176}Hf/^{177}Hf$ 图

Fig. 5　Age-$\varepsilon_{Hf}(t)$ and age-$^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios of zircons from bentonite sample within the Middle Triassic Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block



a—澜沧江南带岩浆岩，数据引自 Yang 等(2014)；b—金沙江—哀牢山一带岩浆岩，数据引自 Wang 等（2016）；c—凭祥地区岩浆岩，数据引自 Gan 等（2021），夏磊等（2022）；d—东昆仑造山带东段三叠纪花岗岩，数据引自 Ding 等（2014），Xiong 等（2014），Li 等（2015b），Xia 等（2015），Ren 等（2016），封锟等（2022）；e—本文样品

图 6 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩及周缘造山带花岗岩（年龄区间在 235—244 Ma）Hf 同位素模式年龄（T^{c}_{DM}）直方图

Fig. 6 Hf isotope model age (T^{C}_{DM}) of zircons from bentonite sample in the Tianjingshan Formation and coeval granitic rocks (235—244 Ma) from surrounding orogenic belts

析结果，本研究认为天井山组近顶部斑脱岩的源岩浆性质为酸性。

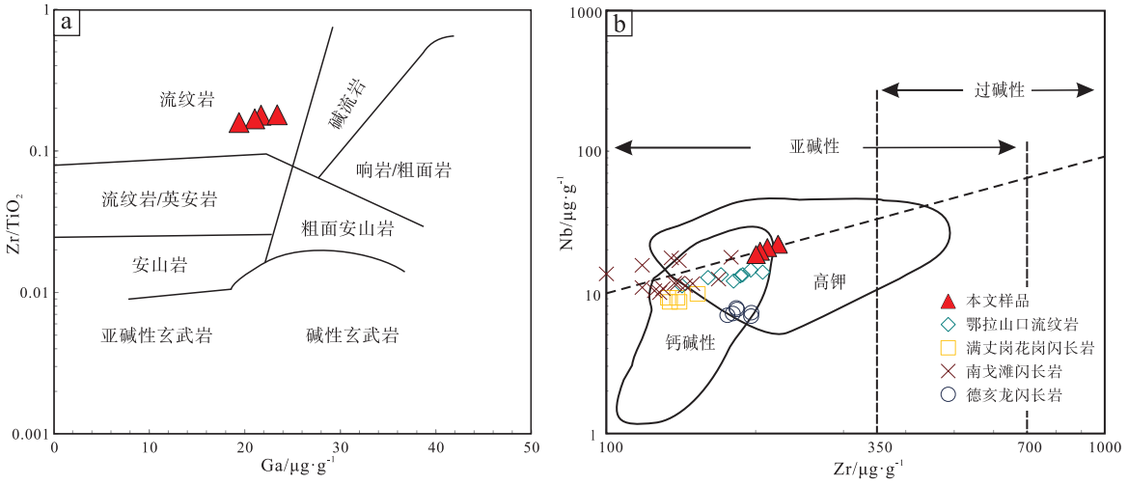
斑脱岩样品的稀土元素配分曲线显示，其具有较强的负 Eu 异常（δEu 均值为 0.31），且重稀土元素（HREE）分布模式较为平坦(图 3-b)。斑脱岩样品微量元素蛛网图(图 3-a）显示，其 Rb、Th 等大离子亲石元素（LILE）相对于 Nb、Sr 等高场强元素（HFSE）富集的特征，暗示了其源岩浆有壳源物质的加入。斑脱岩样品中的 Nb/U 均值为 13.05、Ta/U 均值为 1.83、Ce/Pb 均值为 1.24，区别于地壳均值（Nb/U = 12.09、Ta/U = 1.10、Ce/Pb = 4.12；Taylor and McLennan，1985），表明其岩浆演化过程中非单一的岩浆上升导致的地壳熔融。

斑脱岩样品锆石 Hf 同位素显示，$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -2.35 ~ 0.95 之间，均值为 -0.14，在 Age-$\varepsilon_{Hf}(t)$ 与 Age-$^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值图解中，斑脱岩样品均分布于球粒陨石演化趋势线上，介于下地壳和亏损地幔的区域之间(图 5)，表明其具有典型的壳幔混染特征。再者，斑脱岩锆石 Hf 同位素特征进一步揭示了火山凝灰质源区的属性。样品的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值呈现明显的正负相间特征(图 5-a)，指示岩浆在上升侵位过程中经历了壳源物质的混染，其中锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 的正值暗示岩浆源区可能存在部分幔源物质的加入。此外，依据 Liu 等（2010）提供的方法计算得出，斑脱岩样品 Hf 同位素地壳模式年龄 T^{C}_{DM} 平均值为 1.27 Ga（T^{C}_{DM} = 1.21-1.41 Ga）(图 6-e)，也表明岩浆源区经历了中元古代地壳物质与幔源底侵岩浆的混合作用。

因此，综合稀土元素配分模式（负 Eu 异常、平坦 HREE 分布）、微量元素特征、锆石 Hf 同位素组成及地壳模式年龄等证据，本研究认为天井山组近顶部斑脱岩源岩浆性质为酸性岩浆，具有壳幔混染的特征，岩浆演化过程中存在中元古代壳源物质发生部分熔融。

4.2 斑脱岩源火山构造背景

基于上述对斑脱岩源岩浆性质的厘定，本研究进一步结合扬子地块西北缘与周缘造山带岩浆系统的时空耦合关系，对天井山组近顶部斑脱岩源岩浆源区的物质组成及构造继承性展开系统对比分析。通过区域构造-岩浆演化对比及源区示踪结果，认



a—斑脱岩 Ga-Zr/TiO_2 判别图解，据 Winchester 和 Floyd（1977）修改；b—Zr/Nb 判别图，据 Leat 等（1986）修改，东昆仑东段（满丈岗和德亥龙）数据引自 Ren 等（2016），南戈滩数据引自 Xia 等（2015），鄂拉山口流纹岩数据引自周红智（2019）

图 7　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩原岩判别图解

Fig. 7　Protolith identification diagram of bentonite sample from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block

为天井山组斑脱岩的凝灰质来源可能与扬子地块西北缘及其周缘地区中—晚三叠世多构造域岩浆活动存在成因联系，且可能存在以下 6 种潜在来源：（1）澜沧江南段云县—景谷地区的中三叠世“双峰式”火山岩系（陈莉等，2013；Yang *et al.*，2014）；（2）西秦岭地区的三叠纪花岗岩（Wang *et al.*，2019；赵东辉等，2019；严镜等，2021）；（3）西部金沙江缝合带的俯冲—碰撞岩浆岩（葛孟春等，2002；Wang *et al.*，2017；杨天南等，2019）；（4）义敦弧的中—晚三叠世弧岩浆型岩浆岩（Wang *et al.*，2011；Chen *et al.*，2014；方小玉等，2017）；（5）凭祥地区的酸性岛弧火山岩（覃小锋等，2011；Gan *et al.*，2021）；（6）东昆仑造山带东段的三叠纪花岗岩（Xiong *et al.*，2014；Xia *et al.*，2015）。通过综合分析，认为东昆仑造山带东段火山活动形成的岩浆岩最为合理。具体原因如下：

（1）澜沧江带记录了古特提斯大洋向东俯冲，昌宁—孟连带古特提斯俯冲至思茅地体下方，形成云县—景谷弧（魏君奇等，2008；Wang *et al.*，2014；Yang *et al.*，2014）。中三叠世俯冲洋壳断离后，伸展作用导致云县—景谷地区形成“双峰式”火山岩系（陈莉等，2013）。这些火山岩的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 −0.7～−6.1 之间，Hf 同位素地壳模式年龄 T_{DM}^{C} 平均值为 1.14 Ga（Yang *et al.*，2014），与研究剖面斑脱岩锆石 Hf 同位素表现不一致（图 6-a）。（2）西秦岭在印支早期（250—235 Ma）有岩浆活动发育，侵入的岩体主要发育在西秦岭的中西部，呈线性展布，与区域构造线平行，而火山岩少见（赵东辉等，2019；严镜等，2021）。此外，这些岩体的稀土元素配分曲线表现为无或弱 Eu 负异常，且球粒陨石标准化稀土配分曲线呈平坦型，与研究剖面中的斑脱岩稀土元素特征不符（图 3-b）。（3）金沙江缝合带形成于古特提斯洋的俯冲作用，～250 Ma 进入弧陆碰撞阶段，～244 Ma 进入碰撞后伸展阶段（Wang *et al.*，2017；杨礼创等，2025）。然而，这一地质背景及其 Hf 同位素特征与研究剖面中的斑脱岩明显不同（图 6-b）。（4）中三叠世末期，甘孜—理塘洋盆向西俯冲至中咱地块，引发了义敦弧岩浆活动，时代集中于 225—215 Ma（Wang *et al.*，2011；Chen *et al.*，2014；Wu *et al.*，2017；方小玉等，2017）。然而，在 238 Ma 前后，义敦弧火山活动尚未开始或强度较弱，故可排除。（5）晚二叠世至中三叠世，八布—Cao Bằng 古特提斯分支洋盆北向俯冲，在富宁—那坡—凭祥一带形成弧火山岩（覃小锋等，2011；Gan *et al.*，2021；向忠金等，2021）。凭祥酸性岛弧火山岩形成时代在 246—228 Ma，其锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 −4.9～−18.6 之间，Hf 同位素地壳模式年龄 T_{DM}^{C} 平均值为 1.86 Ga（Gan *et al.*，

2021；夏磊等，2022），与斑脱岩 Hf 同位素表现不一致（图 6-c）。

东昆仑东段在三叠纪的火山活动主要发生在 252—212 Ma，区域内出露有安山岩、英安岩、流纹岩等火山岩和石英闪长岩等侵入岩（Ding *et al.*，2014；Xiong *et al.*，2014；Li *et al.*，2015b；Xia *et al.*，2015；Ren *et al.*，2016；封锽等，2022）。这些中三叠世岩浆岩主要表现为俯冲相关的弧岩浆岩特征，表明在岩浆上升过程中与地壳发生混染作用（Xiong *et al.*，2014；Xia *et al.*，2015；Ren *et al.*，2016；周红智，2019；任海东等，2023）。前人锆石 Hf 同位素研究表明（图 6-d），东昆仑东段三叠纪岩浆岩的物源以中元古代壳源物质重熔为主，这与下地壳变质基底（即小庙群，Ch*x*）的年龄一致（Li *et al.*，2015b；封锽等，2022）。其中，东昆仑东段鄂拉山地区岩浆活动发育广泛，其高峰期集中于 250—230 Ma（Ren *et al.*，2016；周红智，2019；任海东等，2023）。

鄂拉山地区印支早期岩浆活动与特提斯分支洋盆俯冲碰撞的背景相关。本次研究系统整理了区域典型岩体的地球化学数据，包括鄂拉山口流纹岩（246—242 Ma；周红智，2019）、满丈岗花岗闪长岩（244±3 Ma；Ren *et al.*，2016）、德亥龙闪长岩（237 ± 3 Ma；Ren *et al.*，2016）、南戈滩闪长岩（243 ± 3 Ma；Xia *et al.*，2015）。在原岩判别图（图 7）中，这些岩石样品几乎都分布在高钾钙碱性范围内，属于中-酸性岩；在微量元素蛛网图上（图 3-a），这些样品表现出轻稀土富集、重稀土亏损的稀土元素配分模式，并且具有明显的负 Eu 异常。锆石 Hf 同位素特征显示 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值集中在 -5~2 之间，$^{176}Hf/^{177}Hf$值为 0.282400~0.282771，均值为 0.282596（图 5）。

对比研究区天井山组斑脱岩的地球化学特征，发现其与鄂拉山地区印支早期岩浆岩具有高度相似性：二者同属于高钾钙碱性岩；在球粒陨石标准化稀土配分曲线中二者均表现为轻稀土元素富集、重稀土亏损，具有相似的右倾分布特征（图 3-a，3-b）；此外，在微量元素蛛网图中显示具有相对富集 Rb、Th、La、Pb 等元素及相对亏损 Nb、Ta、Ti 等元素的特征（图 3-a，3-b）（Li *et al.*，2015a；2015b；封锽等，2022；陈加杰等，2024）。斑脱岩样品的 Nb/Ta 均值为 6.41，显著低于大陆上地壳均值（Nb/Ta = 11.44；Rudnick and Gao，2003），表明其源区可能具有发育在俯冲带的岛弧岩浆特征（邵凤丽，2017），与该时期形成鄂拉山地区印支早期岩浆岩的构造背景相似。斑脱岩样品锆石 Hf 同位素特征与该时期东昆仑东段出露的岩浆岩相似，$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值均集中在 -4~2 之间（图 5-a），$^{176}Hf/^{177}Hf$值介于 0.282565~0.282657 之间，T_{DM}^{C}年龄峰值均为 1.3 Ga（图 6-d，6-e）（Ding *et al.*，2014；Xiong *et al.*，2014；Li *et al.*，2015b；Xia *et al.*，2015；Ren *et al.*，2016；封锽等，2022）。综上，扬子地块西北缘天井山组斑脱岩的火山物质与东昆仑东段岩浆岩具有相同的源区成分，两者可能具有相似的基底性质和构造亲缘关系。

4.3 斑脱岩形成对区域构造演化的启示

前文讨论表明，这套斑脱岩的火山物质可能来源于东昆仑造山带。作为秦祁昆中央造山系的核心构成单元和古特提斯构造域的关键组成部分，东昆仑造山带记录了多期次构造-岩浆活动的演化历史（Xiong *et al.*，2014；陈加杰等，2024）。区域岩浆活动具有显著的阶段性特征，集中发育于二叠纪—三叠纪（约 262—185 Ma）及早古生代（约 537—413 Ma），完整记录了特提斯构造域 2 次重要的构造-岩浆旋回（马昌前等，2015；钟世华等，2025）。其中，早古生代岩浆事件（约 500—420 Ma）与原特提斯洋昆中洋的俯冲闭合过程密切相关，表现为岛弧型钙碱性火山岩和 S 型花岗岩组合，反映了古大洋板片南向俯冲引发的壳幔相互作用及大陆弧岩浆响应（马昌前等，2015；王晨，2024）。晚古生代—早中生代岩浆活动（约 260—200 Ma）则对应古特提斯阿尼玛卿洋的俯冲闭合，形成以高钾钙碱性花岗岩和镁铁质岩墙群为特征的后碰撞伸展环境的岩浆组合，标志着南昆仑地块与北侧陆块最终碰撞拼贴的完成（马昌前等，2015；钟世华等，2025）。这 2 次旋回完整揭示了从大洋俯冲消减到陆陆碰撞的构造体制转换过程。其中，昆中蛇绿混杂岩带与阿尼玛卿缝合带作为关键构造单元，分别保存了原特提斯和古特提斯洋闭合的构造证据，二者共同构建了青藏高原北缘多期次增生造山的复合构造叠置体系，为解析特提斯构造域多阶段演化的动力学机制提供了关键地质约束（Dong *et al.*，2018；吴福元等，2020；董云鹏等，

2022）。

区域地质演化研究表明，东昆仑造山带晚古生代—早中生代构造岩浆活动可划分为俯冲（277—240 Ma）、同碰撞（240—230 Ma）和后碰撞（230—200 Ma）等 3 个阶段（Ren *et al.*, 2016；陈国超等，2020）。东昆仑中晚三叠岩浆活动记录显示，同碰撞阶段花岗岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值由正转负，反映了壳源成分的逐步主导（Ding *et al.*, 2014；Xiong *et al.*, 2014；Li *et al.*, 2015b；Xia *et al.*, 2015；Ren *et al.*, 2016；封铿等，2022），与研究区斑脱岩锆石 Hf 同位素指示岩浆在上升侵位过程中经历了壳源物质混染的特征吻合。

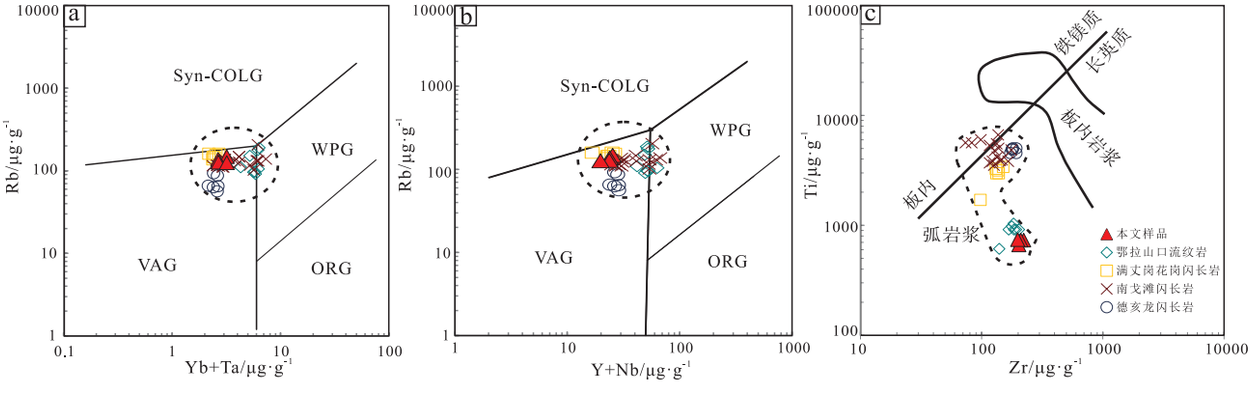
基于（Yb+Ta）-Rb、（Y+Nb）-Rb 和 Zr-Ti 判别图解（图 8），对天井山组斑脱岩和该时期东昆仑东段花岗岩的构造背景进行判别。结果显示，本研究的斑脱岩锆石 Hf 同位素特征及构造环境判别结果与东昆仑鄂拉山地区同期岩浆岩的构造属性高度吻合，两者投点均接近或分布同碰撞花岗岩区域，进一步支持研究区斑脱岩的形成与东昆仑碰撞相关的岩浆活动存在成因联系（Ren *et al.*, 2016；周红智，2019）。综合来看，天井山组斑脱岩的源岩浆可能为东昆仑东段同碰撞背景下壳幔混合作用的产物，其物质迁移过程受控于区域构造体制转换及深部动力学机制。

这一时期的沉积记录也支持上述构造背景的转变。例如，东昆仑东段在 240—230 Ma 期间侵入岩出露较少，可能与东昆仑地块进入同碰撞构造阶段有关（e.g., Xiong *et al.*, 2014；陈国超，2018）。中三叠世东昆仑地区的浅海相闹仓坚沟组和海陆过渡相希里可特组之间发育微角度不整合面，反映了局部差异性洋陆碰撞导致的构造隆升事件（李瑞保等，2012；陈国超等，2020）。同时，希里可特组地层部分缺失并逐渐被陆相碎屑沉积的八宝山组覆盖，表明该区域由海相沉积环境向陆相沉积盆地转化，进一步揭示了中三叠世末期洋壳俯冲消减结束，东昆仑地区进入大规模碰撞造山隆升阶段（李瑞保等，2012；Dong *et al.*, 2018）。上述沉积记录的转变，结合区域地球化学与同位素示踪结果，共同指示了古特提斯洋闭合后东昆仑地块由俯冲向陆-陆碰撞转换的构造过程（陈国超等，2018；张明东等，2018）。

因此，扬子地块西北缘天井山组斑脱岩的岩浆-构造信息，可能记录了古特提斯分支洋盆（阿尼玛卿洋盆）向北俯冲闭合的过程，为扬子地块西北缘与东昆仑造山带的构造-岩浆耦合关系提供了关键证据。在这一过程中，东昆仑造山带于 ~238 Ma 发生了洋陆转换，巴颜喀拉地块和松潘—甘孜地块与东昆仑地块已开始陆陆碰撞（图 9-a），这一演化过程为斑脱岩火山物质的形成提供了构造背景支持。

4.4　斑脱岩的岩石成因和沉积环境判别

在地质历史时期，火山物质在海相碱性环境中经沉积成岩及蚀变作用等地质过程转化形成斑脱岩（Su *et al.*, 2003；周明忠等，2007；张迪等，2025）。天井山组主要分布于四川盆地西北部（刘



a—（Yb+Ta）-Rb 判别图解，据 Pearce 等（1984）修改；b—（Y+Nb）-Rb 判别图解，据 Pearce 等（1984）修改；c—Zr-Ti 判别图解，据 Pearce（1982）修改，图中东昆仑东段（满丈岗和德亥龙）数据引自 Ren 等（2016）；南戈滩数据引自 Xia 等（2015）；鄂拉山口流纹岩数据引自周红智（2019）。WPG：板内花岗岩；VAG：火山弧花岗岩；Syn-COLG：同碰撞花岗岩；ORG：大洋中脊花岗岩；OA：洋弧；AMC：活动陆缘；WPVZ：板内火山带

图 8　扬子地块西北缘天井山组斑脱岩构造环境判别图解

Fig. 8　Tectonic setting discrimination diagrams of bentonite from the Tianjingshan Formation in northwestern margin of Yangtze Block

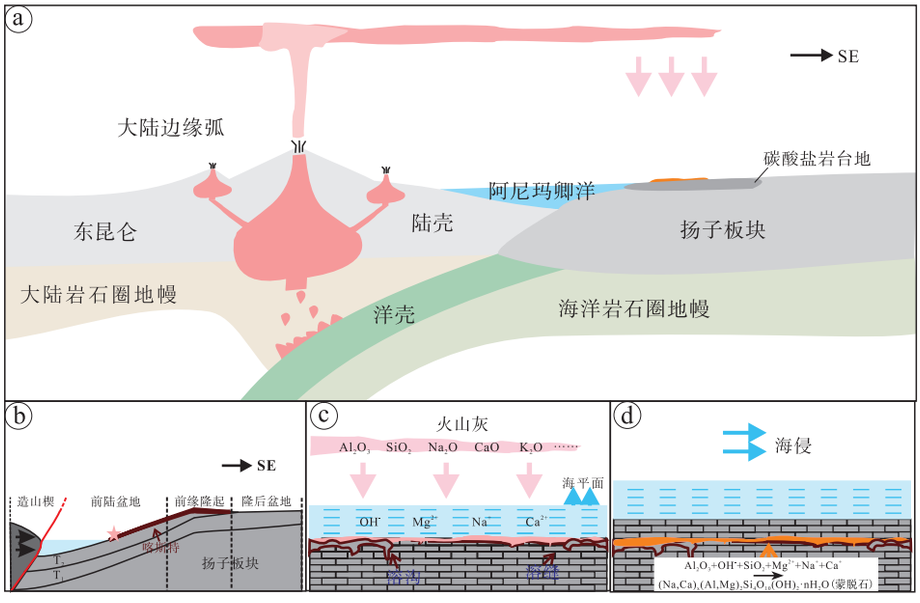


图 9 扬子地块西北缘天井山组斑脱岩形成模式（据李勇等，2011；Xiong *et al.*，2014；Xia *et al.*，2015；有修改）

Fig. 9 Formation model of bentonite layer from the Tianjingshan Formation, northwestern margin of Yangtze Block (modified from Li *et al.*, 2011; Xiong *et al.*, 2014; Xia *et al.*, 2015)

持恒等，2015）。三叠纪早期，川西北地区位于扬子地块被动大陆边缘，经历了多次海侵与海退事件（林良彪等，2007）。自中三叠世开始，该地区以海退为主，发育了咸化局限台地（Chen *et al.*，1995；冯增昭等，1997；林良彪等，2007）。天井山组属于碳酸盐岩台地沉积，主要包括台地边缘浅滩亚相、开阔台地亚相、局限台地亚相和蒸发台地亚相，沉积特征受到海平面变化和海底地形的控制（刘持恒等，2015）。Jin 等（2022）对研究剖面中的天井山组进行了沉积微相分析，认为其沉积环境整体属于局限台地潮坪沉积，同时斑脱岩样品的微量元素特征表现出 Ce 负异常特征（δCe 为 0.83～1.00，均值为 0.91）。综上所述，天井山组的沉积背景为典型的海相环境。结合斑脱岩样品中富含蒙脱石及少量高岭石的矿物组合特征（表 1），推测天井山组近顶部的斑脱岩形成于海相咸水环境，并经历了海水的蚀变作用。

结合区域地质背景，天井山组近顶部斑脱岩的形成机制可能如下：在中三叠世末期，火山喷发活动产生的火山物质经一定距离的搬运与分选后，沉积于局限台地的喀斯特界面凹陷处（图 9-a，9-b）。在初始沉积期，火山物质固结程度较低，但随着海侵事件的发生，火山碎屑与海水发生水岩反应，即火山玻璃在碱性海水环境下发生脱玻、水化和结晶作用，Si-O 和 Al-O 键逐渐向稳定的四面体和八面体层状结构转化（图 9-c，9-d）（任磊夫，1992）。在此过程中，火山玻璃和长石中的铝硅酸盐结构遭受化学风化破坏，释放出 Na^+ 和 Ca^{2+} 等金属离子，这些离子可进入蒙脱石层间，替换原有的阳离子（如 H^+ 或其他金属离子）（何宏平，2001），并且海水在蒙脱石的形成过程中起到了关键作用，其较高的 pH 值及富含碱土元素（如 Na、Ca 和 Mg 等），为蒙脱石层间水的形成提供了必要条件，并促进 Al 和 Mg 进入蒙脱石的八面体结构（Harder，1972；宋慈安和王林江，1997）。同时，由于海侵增强了沉积环境中流体对流作用，降低了体系中的 Si 浓度，从而进一步促进了蒙脱石的生成（McCarty *et al.*，2009），最终形成富含蒙脱石的斑脱岩。

5 结论

1）基于野外观察、岩石学与黏土矿物学研究，确证扬子地块西北缘中三叠统天井山组近顶部的黏土岩为富含蒙脱石的斑脱岩。该斑脱岩形成于海相咸水环境，火山灰沉积后遭受碱性海水蚀变作用（如脱玻化与层间阳离子置换），最终形成富蒙脱石斑脱岩。

2）地球化学研究显示，该套斑脱岩具有 Rb、Th 等大离子亲石元素相对于 Nb、Sr 等高场强元素富集的特征，与弧火山岩相似；源岩浆性质初步判定为酸性岩浆，具有高钾钙碱性的特征。其锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -2.35 ~ 0.95 之间，均值为 -0.14，地壳模式年龄（T_{DM}^{C}）介于 1.21—1.41 Ga 之间，显示出壳幔混合源的特点，推测其火山物质来源于东昆仑东段三叠纪末期的火山活动。

3）斑脱岩记录的火山活动可能反映了古特提斯分支洋盆（阿尼玛卿洋盆）北向俯冲闭合、松潘—甘孜地块与昆仑—柴达木地块南缘进入同碰撞阶段的地质过程。

参考文献（References）

陈国超，裴先治，李瑞保，李佐臣，刘成军，陈有炘，裴磊，李小兵. 2018. 东昆仑东段可日正长花岗岩年龄和岩石成因对东昆仑中三叠世构造演化的制约. 岩石学报，34(3)：567-585.［Chen G C，Pei X Z，Li R B，Li Z C，Liu C J，Chen Y X，Pei L，Li X B. 2018. Age and lithogenesis of Keri syenogranite from eastern part of East Kunlun Orogenic Belt：constraint on the Middle Triassic tectonic evolution of East Kunlun. Acta Petrologica Sinica，34(3)：567-585］

陈国超，裴先治，李瑞保，李佐臣，裴磊，刘成军，陈有炘，王盟，高峰，魏均启. 2020. 东昆仑造山带东段晚古生代—早中生代构造岩浆演化与成矿作用. 地学前缘，27(4)：33-48.［Chen G C，Pei X Z，Li R B，Li Z C，Pei L，Liu C J，Chen Y X，Wang M，Gao F，Wei J Q. 2020. Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonic-magmatic evolution and mineralization in the eastern section of the East Kunlun Orogenic Belt. Earth Science Frontiers，27(4)：33-48］

陈虹. 2010. 扬子地块周缘中生代构造变形与演化. 中国地质科学院博士学位论文：1-14.［Chen H. 2010. The Mesozoic structural deformation and evolution around the Yangtze Block. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences：1-14］

陈加杰，冷成彪，付乐兵，赵旭，邢浩. 2024. 东昆仑德龙花岗岩成因及对古特提斯洋演化的制约. 地球科学，49(2)：560-576.［Chen J J，Leng C B，Fu L B，Zhao X，Xing H. 2024. Genesis of Delong granite in East Kunlun Orogen and its implication on the evolution of Paleo-Tethys Ocean. Earth Science，49(2)：560-576］

陈莉，王立全，王保弟，刘函. 2013. 滇西云县—景谷火山弧带官房铜矿床成因：流体包裹体及年代学证据. 岩石学报，29(4)：1279-1289.［Chen L，Wang L Q，Wang B D，Liu H. 2013. Genesis of the Guanfang copper deposit in the Yunxian-Jinggu volcanic arc，western Yunnan：evidences from fluid inclusions and geochronology. Acta Petrologica Sinica，29(4)：1279-1289］

董云鹏，惠博，孙圣思，杨钊，张菲菲，何登峰，孙娇鹏，史小辉. 2022. 中国中央造山系原—古特提斯多阶段复合造山过程. 地质学报，96(10)：3426-3448.［Dong Y P，Hui B，Sun S S，Yang Z，Zhang F F，He D F，Sun J P，Shi X H. 2022. Multiple orogeny and geodynamics from proto-Tethys to paleo-Tethys of the Central China Orogenic Belt. Acta Geologica Sinica，96(10)：3426-3448］

方小玉，彭头平，范蔚茗，高剑峰，刘兵兵，张靖祎. 2017. 义敦地块中—晚三叠世中酸性侵入岩起源及其地质意义探讨. 地球化学，46(5)：413-434.［Fang X Y，Peng T P，Fan W M，Gao J F，Liu B B，Zhang J Y. 2017. Origin of the Middle-Late Triassic intermediate-acid intrusive rocks in the Yidun terrane and its geological significance. Geochimica，46(5)：413-434］

封铿，李瑞保，裴先治，李佐臣，刘成军，裴磊，陈有炘，陈国超，杨再兵. 2022. 东昆仑造山带波洛斯太地区晚三叠世中酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及地质意义. 地球科学，47(4)：1194-1216.［Feng K，Li R B，Pei X Z，Li Z C，Liu C J，Pei L，Chen Y X，Chen G C，Yang Z B. 2022. Zircon U-Pb chronology，geochemistry and geological significance of Late Triassic intermediate-acid volcanic rocks in Boluositai area，East Kunlun Orogenic Belt. Earth Science，47(4)：1194-1216］

冯增昭，鲍志东，吴胜和，李永铁，王国力. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 地质科学，32(2)：212-220.［Feng Z Z，Bao Z D，Wu S H，Li Y T，Wang G L. 1997. Lithofacies palaeogeography of the Early and Middle Triassic of South China. Chinese Journal of Geology，32(2)：212-220］

葛孟春，江元生，冯庆来，谢德凡. 2002. 滇西北金沙江斜向碰撞—走滑造山带的确定. 地学前缘，9(4)：430.［Ge M C，Jiang Y S，Feng Q L，Xie D F. 2002. Determination of the oblique collision and strike-slip orogen of Jinshajiang，northwest Yunnan. Earth Science Frontiers，9(4)：430］

何宏平. 2001. 粘土矿物与金属离子作用研究. 北京：石油工业出版社，2-96.［He H P. 2001. Interaction of Clay Minerals with Metal Ions. Beijing：China Petroleum Industry Press，2-96］

胡艳华，孙卫东，丁兴，汪方跃，凌明星，刘健. 2009. 奥陶纪—志留纪边界附近火山活动记录：来华南周缘钾质斑脱岩的信息. 岩石学报，25(12)：3298-3308.［Hu Y H，Sun W D，Ding X，Wang F Y，Ling M X，Liu J. 2009. Volcanic event at the Ordovician-Silurian boundary：the message from K-bentonite of Yangtze Block. Acta Petrologica Sinica，25(12)：3298-3308］

李瑞保，裴先治，李佐臣，刘战庆，陈国超，陈有炘，魏方辉，高景民，刘成军，裴磊. 2012. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应. 地学前缘，19(5)：244-254.［Li R B，Pei X Z，Li Z C，Liu Z Q，Chen G C，Chen Y X，Wei F H，Gao J M，Liu C J，Pei L. 2012. Geological characteristics of Late Paleozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun. Earth Science Frontiers，19(5)：244-254］

李勇，苏德辰，董顺利，颜照坤，贺佩，闫亮. 2011. 龙门山前陆盆地底部不整合面：被动大陆边缘到前陆盆地的转换. 岩石学报，27(8)：2413-2422.［Li Y，Su D C，Dong S L，Yan Z K，He P，Yan L. 2011. The recognition of the basal unconformity in the Longmenshan foreland basin：transition from passive continent margin to foreland basin. Acta Petrologica Sinica，27(8)：2413-2422］

林良彪,陈洪德,张长俊. 2007. 四川盆地西北部中三叠世雷口坡期岩相古地理. 沉积与特提斯地质,27(3):51-58. [Lin L B, Chen H D, Zhang C J. 2007. Sedimentary facies and palaeogeography of northwestern Sichuan Basin during the Leikoupoan (Middle Triassic). Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 27(3): 51-58]

刘持恒,胡作维,李云,罗文. 2015. 江油含增地区中三叠统雷口坡组—天井山组界线沉积微相分析. 岩性油气藏,27(1):66-73. [Liu C H, Hu Z W, Li Y, Luo W. 2015. Sedimentary microfacies analysis of the Middle Triassic Leikoupo Formation-Tianjingshan Formation boundary in Hanzeng area, Jiangyou. Lithologic Reservoirs, 27(1): 66-73]

刘嘉麒,孙春青,游海涛. 2018. 全球火山灰年代学研究概述. 中国科学:地球科学,48(1):1-29. [Liu J Q, Sun C Q, You H T. 2018. An overview of global tephrochronology. Scientia Sinica (Terrae), 48(1): 1-29]

芦云飞,孟万斌,冯明石,张春光,王峻,王潇,张叶. 2020. 峨眉山中三叠统绿豆岩特征及其沉积环境指示. 矿物岩石地球化学通报,39(3):626-636. [Lu Y F, Meng W B, Feng M S, Zhang C G, Wang J, Wang X, Zhang Y. 2020. Characteristics of the Middle Triassic mung beans rock in the Mount Emei area and their implications for sedimentary environment. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 39(3): 626-636]

罗志立. 1998. 四川盆地基底结构的新认识. 成都理工学院学报,25(2):191-200. [Luo Z L. 1998. New recognition of basement in Sichuan Basin. Journal of Chengdu University of Technology, 25(2): 191-200]

马昌前,熊富浩,尹烁,王连训,高珂. 2015. 造山带岩浆作用的强度和旋回性:以东昆仑古特提斯花岗岩类岩基为例. 岩石学报,31(12):3555-3568. [Ma C Q, Xiong F H, Yin S, Wang L X, Gao K. 2015. Intensity and cyclicity of orogenic magmatism: an example from a paleo-Tethyan granitoid batholith, eastern Kunlun, northern Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Petrologica Sinica, 31(12): 3555-3568]

马圣钞,王登红,孙艳,李超,钟海仁. 2019. 中国西南部 T_1/T_2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义. 地球科学,44(2):427-440. [Ma S C, Wang D H, Sun Y, Li C, Zhong H R. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of Lower-Middle Triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium deposit. Earth Science, 44(2): 427-440]

覃小锋,王宗起,张英利,潘罗忠,胡贵昂,周府生. 2011. 桂西南早中生代酸性火山岩年代学和地球化学:对钦—杭结合带西南段构造演化的约束. 岩石学报,27(3):794-808. [Qin X F, Wang Z Q, Zhang Y L, Pan L Z, Hu G A, Zhou F S. 2011. Geochronology and geochemistry of Early Mesozoic acid volcanic rocks from Southwest Guangxi: constraints on tectonic evolution of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 794-808]

任海东,王涛,潘彤,王建国. 2023. 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素组分特征、物源演变规律及其构造背景. 西北地质,56(6):95-112. [Ren H D, Wang T, Pan T, Wang J G. 2023. Nd-Hf isotopic characteristics, evolution trend and tectonic setting of Triassic magmatic rocks in the eastern segment of East Kunlun Orogeny. Northwestern Geology, 56(6): 95-112]

任磊夫. 1992. 粘土矿物与粘土岩. 北京:地质出版社,1-231. [Ren L F. 1992. Clay Minerals and Mudstones. Beijing: Geological Publishing House, 1-231]

邵凤丽. 2017. 东昆仑造山带三叠纪花岗岩类和流纹岩类的成因:洋壳到陆壳的转化. 中国科学院海洋研究所博士学位论文:48-120. [Shao F L. 2017. Petrogenesis of Triassic granitoids and rhyolites in the East Kunlun Orogenic Belt and their tectonic implications. Doctoral dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science: 48-120]

宋慈安,王林江. 1997. 湖南临澧膨润土矿蒙脱石的矿物化学及成因. 桂林工学院学报,17(4):340-348. [Song C A, Wang L J. 1997. Mineral chemistry and genetics of montmorillonite in Linli bentonite deposit, Hunan. Journal of Guilin University of Technology, 17(4): 340-348]

王晨. 2024. 滇西南地区原特提斯洋构造-岩浆演化的动力学过程:早古生代火成岩的证据. 吉林大学博士学位论文:29-160. [Wang C. 2024. Geodynamic processes of tectono-magmatic evolution of the Proto-Tethys Ocean in southwestern Yunnan: evidence from Early Paleozoic igneous rocks. Doctoral dissertation of Jilin University: 29-160]

王登红,陈毓川,江彪,黄凡,王岩,李华芹,侯可军. 2020. 中国三叠纪大陆成矿体系. 地学前缘,27(2):45-59. [Wang D H, Chen Y C, Jiang B, Huang F, Wang Y, Li H Q, Hou K J. 2020. Preliminary study on the Triassic continental mineralization system in China. Earth Science Frontiers, 27(2): 45-59]

魏君奇,王晓地,庄晓,刘云华. 2008. 澜沧江缝合带吉岔蛇纹岩中闪长岩和俄咱辉长岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报,24(6):1297-1301. [Wei J Q, Wang X D, Zhuang X, Liu Y H. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of diorite among Jicha serpentine and Eza grabbro from Lancangjiang belt, Yunnan Province and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 24(6): 1297-1301]

吴冰,金鑫,时志强,Nereo Preto,杜怡星. 2018. 川西北地区中三叠统顶部溶蚀型喀斯特特征及地质意义. 古地理学报,20(1):133-146. [Wu B, Jin X, Shi Z Q, Preto N, Du Y X. 2018. Characteristics and geological significance of corrosion karst at the top of Middle Triassic in northwestern Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(1): 133-146]

吴福元,李献华,郑永飞,高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报,23(2):185-220. [Wu F Y, Li X H, Zheng Y F, Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185-220]

吴福元,万博,赵亮,肖文交,朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报,36(6):1627-1674. [Wu F Y, Wan B, Zhao L, Xiao W J, Zhu R X. 2020. Tethyan geodynamics. Acta Petrologica Sinica, 36(6): 1627-1674]

夏磊，闫全人，向忠金，郑洪波，牛睿. 2022. 桂西南那坡盆地河口组沉凝灰岩的时代与来源及其大地构造意义. 岩石学报，38(3)：883-900. [Xia L, Yan Q R, Xiang Z J, Zheng H B, Niu R. 2022. Age and origin of tuffites from the Hekou Formation in the Napo Basin, Southwest Guangxi and its tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 38(3): 883-900]

向忠金，闫全人，夏磊，夏文静. 2021. 南盘江盆地南缘富宁—那坡地区早—中三叠世火山—沉积组合形成环境. 地质通报，40(1)：138-151. [Xiang Z J, Yan Q R, Xia L, Xia W J. 2021. The tectonic setting of the Early-Middle Triassic volcanic-sedimentary succession in Funing-Napo area, the south margin of Nanpanjiang Basin, South China. Geological Bulletin of China, 40(1): 138-151]

严镜，刘景显，蒲万峰，魏学平，李智斌. 2021. 西秦岭中—晚三叠世构造属性：来自将其那梁侵入杂岩体的年代学及地球化学证据. 现代地质，35(6)：1677-1690. [Yan J, Liu J X, Pu W F, Wei X P, Li Z B. 2021. Middle-Late Triassic tectonic attribute in West Qinling: evidence from geochronology and geochemistry of the Jiangqinaliang intrusive complex. Geoscience, 35(6): 1677-1690]

颜照坤，李勇，聂舟，任聪，邵崇建，董顺利，张代柱，叶婷婷. 2023. 印支期泸州—开江古隆起演化过程及其动力学机制. 地球科学，48(12)：4540-4557. [Yan Z K, Li Y, Nie Z, Ren C, Shao C J, Dong S L, Zhang D Z, Ye T T. 2023. Evolution process and dynamic mechanism of Luzhou-Kaijiang paleo-uplift during the Indosinian, China. Earth Science, 48(12): 4540-4557]

杨礼创，唐渊，祝向平，李勇，吴昊，吴波. 2025. 早中三叠世金沙江缝合带碰撞造山过程岩浆作用响应. 沉积与特提斯地质，45(1)：168-186. [Yang L C, Tang Y, Zhu X P, Li Y, Wu H, Wu B. 2025. Magmatism during collisional orogenic processes in Early-Middle Triassic Jinsha River suture zone. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(1): 168-186]

杨天南，薛传东，信迪，梁明娟，廖程. 2019. 西南三江造山带古特提斯弧岩浆岩的时空分布及构造演化新模型. 岩石学报，35(5)：1324-1340. [Yang T N, Xue C D, Xin D, Liang M J, Liao C. 2019. Paleotethyan tectonic evolution of the Sanjiang Orogenic Belt, SW China: temporal and spatial distribution pattern of arc-like igneous rocks. Acta Petrologica Sinica, 35(5): 1324-1340]

衣健，王璞珺，单玄龙，Carniel Roberto，武成智，王寒非，孙松，郭剑南. 2020. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积相特征. 岩石学报，36(11)：3346-3362. [Yi J, Wang P J, Shan X L, Roberto C, Wu C Z, Wang H F, Sun S, Guo J N. 2020. Facies variations in the pyroclastic density currents (PDCs) produced by the millennium eruption of the Changbaishan Tianchi volcano, NE China. Acta Petrologica Sinica, 36(11): 3346-3362]

张迪，周明忠，罗泰义，杨善进，张宗领，杨勇. 2025. 云南龙陵下花椒寨剖面公养河群上部钾质斑脱岩的发现及初步研究. 矿物学报，45(4)：760-772. [Zhang D, Zhou M Z, Luo T Y, Yang S J, Zhang Z L, Yang Y. 2025. Discovery and preliminary research of a K-bentonite in the upper Gongyanghe Group at the Xiahuajiaozhai section, Longling County, Yunnan Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 45(4): 760-772]

张浩然，姜华，陈志勇，苏旺. 2020. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述. 地质科技通报，39(5)：118-126. [Zhang H R, Jiang H, Chen Z Y, Su W. 2020. A review of the research status of Caledonian movement stages in Sichuan Basin and surrounding areas. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(5): 118-126]

张明东，马昌前，王连训，郝峰华，郑少杰，张磊. 2018. 后碰撞阶段的“俯冲型”岩浆岩：来自东昆仑瑙木浑沟晚三叠世闪长玢岩的证据. 地球科学，43(4)：1183-1206. [Zhang M D, Ma C Q, Wang L X, Hao F H, Zheng S J, Zhang L. 2018. Subduction-type magmatic rocks in post-collision stage: evidence from Late Triassic diorite-porphyrite of Naomuhungou area, East Kunlun Orogen. Earth Science, 43(4): 1183-1206]

赵东辉，平先权，郑建平，艾磊，邓昊. 2019. 西秦岭印支早期铁堂峡石英正长斑岩的地球化学特征及其地质意义. 地球科学，44(12)：4203-4221. [Zhao D H, Ping X Q, Zheng J P, Ai L, Deng H. 2019. Geochemistry and its geological significance of the quartz syenites in the Early Indosinian from the Tietang Gorge, West Qinling. Earth Science, 44(12): 4203-4221]

郑斌嵩. 2019. 晚二叠世—早三叠世鄂西海槽沉积演化及其大地构造意义：兼论华南 PTB 斑脱岩的来源. 中国地质大学博士学位论文：59-70. [Zheng B S. 2019. Sedimentary evolution of the western Hubei Trough and its tectonic implications: with discussions on the source of the PTB bentonite in South China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences: 59-70]

钟世华，李三忠，丰成友，汤贺军，张勇，何书跃. 2025. 原特提斯和古特提斯碰撞岩浆和斑岩成矿：以东昆仑祁漫塔格地区为例. 地质通报，44(4)：511-533. [Zhong S H, Li S Z, Feng C Y, Tang H J, Zhang Y, He S Y. 2025. Proto-Tethys and Paleo-Tethys collisional magmas and porphyry mineralization: a case study of the Qimantagh area, East Kunlun Mountains. Geological Bulletin of China, 44(4): 511-533]

周红智. 2019. 青海省鄂拉山地区印支期岩浆演化及铜多金属成矿作用. 中国地质大学博士学位论文：85-202. [Zhou H Z. 2019. Indosinian magmatic evolution and copper polymetallic mineralization in the Erashan area, Qinghai Province. Doctoral dissertation of China University of Geosciences: 85-202]

周明忠，罗泰义，黄智龙，龙汉生，杨勇. 2007. 钾质斑脱岩的研究进展. 矿物学报，27(3)：351-359. [Zhou M Z, Luo T Y, Huang Z L, Long H S, Yang Y. 2007. Advances in research on K-bentonite. Acta Mineralogica Sinica, 27(3): 351-359]

Baresel B, Bucher H, Brosse M, Cordey F, Kuang G D, Schaltegger U. 2017. Precise age for the Permian-Triassic boundary in South China from high-precision U-Pb geochronology and Bayesian age-depth modeling. Solid Earth, 8(2): 361-378.

Bergstrom S M, Huff W D, Kolata D R, Melchin M J. 1997. Occurrence and significance of Silurian K-bentonite beds at Arisaig, Nova Scotia, eastern Canada. Canadian Journal of Earth Sciences, 34(12): 1630-1643.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63-114.

Chen J L, Xu J F, Ren J B, Huang X X, Wang B D. 2014. Geochronology and geochemical characteristics of Late Triassic porphyritic rocks from the Zhongdian arc, eastern Tibet, and their tectonic and metallogenic implications. Gondwana Research, 26(2): 492-504.

Chen S F, Wilson C J, Worley B A. 1995. Tectonic transition from the Songpan-garzê fold belt to the Sichuan Basin, south-western China. Basin Research, 7(3): 235-253.

Deng J, Wang Q F, Li G J, Santosh M. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. Earth-Science Reviews, 138: 268-299.

Ding Q F, Jiang S Y, Sun F Y. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of the Triassic granite and diorite dikes from the Wulonggou mining area in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: petrogenesis and tectonic implications. Lithos, 205: 266-283.

Dong Y P, He D F, Sun S S, Liu X M, Zhou X H, Zhang F F, Yang Z, Cheng B, Zhao G C, Li J H. 2018. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System. Earth-Science Reviews, 186: 231-261.

Faure M, Lin W, Chu Y, Lepvrier C. 2016. Triassic tectonics of the southern margin of the South China Block. Comptes Rendus Geoscience, 348(1): 5-14.

Feng M S, Meng W B, Zhang C G, Qing H R, Chi G X, Wang J, Peng Y W, Wen H G, Huang H. 2021. Geochronology and geochemistry of the 'green-bean rock' (GBR, a potassium-rich felsic tuff) in the western margin of the Yangtze platform, SW China: significance for the Olenekian-Anisian boundary and the Paleo-Tethys tectonics. Lithos, 382: 105922.

Gan C S, Wang Y J, Zhang Y Z, Qian X, Zhang A M. 2021. The assembly of the South China and IndoChina blocks: constraints from the Triassic felsic volcanics in the Youjiang Basin. Geological Society of America Bulletin, 133(9-10): 2097-2112.

Gao Q L, Zhang N, Xia W C, Feng Q L, Chen Z Q, Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J, Wang G Q, Wu S, Zhong W L, Sun X F. 2013. Origin of volcanic ash beds across the Permian-Triassic boundary, Daxiakou, South China: petrology and U-Pb age, trace elements and Hf-isotope composition of zircon. Chemical Geology, 360: 41-53.

Harder H. 1972. The role of magnesium in the formation of smectite minerals. Chemical Geology, 10: 31-39.

He B, Zhong Y T, Xu Y G, Li X H. 2014. Triggers of Permo-Triassic boundary mass extinction in South China: the Siberian traps or paleo-Tethys ignimbrite flare-up? Lithos, 204: 258-267.

He D F, Ma Y S, Li Y Q, Wu S L. 2019. New directions in an established gas play: promising dolomite reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin, China. AAPG Bulletin, 103(1): 1-29.

Hu Z C, Liu Y S, Gao S, Liu W G, Zhang W, Tong X R, Lin L, Zong K Q, Li M, Chen H H, Zhou L, Yang L. 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27(9): 1391-1399.

Huff W D. 2008. Ordovician K-bentonites: issues in interpreting and correlating ancient tephras. Quaternary International, 178(1): 276-287.

Huff W D. 2016. K-bentonites: a review. American Mineralogist, 101(1): 43-70.

Jin X, Franceschi M, Martini R, Shi Z Q, Gianolla P, Rigo M, Wall C J, Schmitz M D, Lu G, Du Y X, Huang X T, Preto N. 2022. Eustatic sea-level fall and global fluctuations in carbonate production during the Carnian Pluvial Episode. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117698.

Kiipli T, Hints R, Kallaste T, VerŠ E, Voolma M. 2017. Immobile and mobile elements during the transition of volcanic ash to bentonite: an example from the early Paleozoic sedimentary section of the Baltic Basin. Sedimentary Geology, 347: 148-159.

Kolata D R, Huff W D, Bergström S M. 1996. Ordovician K-bentonites of Eastern North America. Geological Society of America Special Paper, 313: 1-84.

Leat P T, Jackson S E, Thorpe R S, Stillman C J. 1986. Geochemistry of bimodal basalt-subalkaline/peralkaline rhyolite provinces within the Southern British Caledonides. Journal of the Geological Society, 143(2): 259-273.

Lehrmann D J, Enos P, Payne J L. 2005. Permian and Triassic depositional history of the Yangtze platform and Great Bank of Guizhou in the Nanpanjiang Basin of Guizhou and Guangxi, South China. Albertiana, 33(1): 149-168.

Li B L, Zhi Y B, Zhang L, Ding Q F, Xu Q L, Zhang Y J, Qian Y, Wang G, Peng B, Ao C. 2015a. U-Pb dating, geochemistry, and Sr-Nd isotopic composition of a granodiorite porphyry from the Jiadanggen Cu-(Mo) deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinghai Province, China. Ore Geology Reviews, 67: 1-10.

Li C, Chen H H, Lang X H, Deng Y L, Wang Y T. 2024. Volcanic activity during the Early-Middle Triassic transition in the Sichuan Basin, South China: duration, evolution and implications. Geological Journal, 59(7): 2118-2135.

Li X W, Huang X F, Luo M F, Dong G C, Mo X X. 2015b. Petrogenesis and geodynamic implications of the Mid-Triassic lavas from East Kunlun, northern Tibetan Plateau. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 32-47.

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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. Journal of Petrology, 51(1-2): 537-571.

McCarty D K, Sakharov B A, Drits V A. 2009. New insights into smectite

illitization: a zoned K-bentonite revisited. American Mineralogist, 94(11-12): 1653-1671.

Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S(ed). Orogenic Andesites and Related Rocks. Chichester: John Wiley and Sons, 252-548.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 5(4): 956-983.

Ren H D, Wang T, Zhang L, Wang X X, Huang H, Feng C Y. 2016. Ages, sources and tectonic settings of the Triassic igneous rocks in the easternmost segment of the East Kunlun Orogen, central China. Acta Geologica Sinica(English Edition), 90(2): 641-668.

Rudnick R L, Gao S. 2003. The composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 3: 1-64.

Scotese C R. 2021. An atlas of Phanerozoic paleogeographic maps: the seas come in and the seas go out. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 49(1): 679-728.

Su W B, He L Q, Wang Y B, Gong S Y, Zhou H Y. 2003. K-bentonite beds and high-resolution integrated stratigraphy of the uppermost Ordovician Wufeng and the lowest Silurian Longmaxi formations in South China. Science in China (Series D): Earth Sciences, 46(11): 1121-1133.

Sun C Q, Plunkett G, Liu J Q, Zhao H L, Sigl M, McConnell J R, Pilcher J R, Vinther B, Steffensen J P, Hall V. 2014. Ash from Changbaishan Millennium eruption recorded in Greenland ice: implications for determining the eruption's timing and impact. Geophysical Research Letters, 41(2): 694-701.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London Special Publications, 42(1): 313-345.

Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental Crust: Its composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1-132.

Turekian K K, Wedepohl K H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. Geological Society of America Bulletin, 72(2): 175-191.

Wang B D, Wang L Q, Chen J L, Yin F G, Wang D B, Zhang W P, Chen L K, Liu H. 2014. Triassic three-stage collision in the Paleo-Tethys: constraints from magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi continental margin arc, SW China. Gondwana Research, 26(2): 475-491.

Wang B D, Wang L Q, Chen J L, Liu H, Yin F G, Li X B. 2017. Petrogenesis of Late Devonian-Early Carboniferous volcanic rocks in northern Tibet: new constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Tethyan Ocean. Gondwana Research, 41: 142-156.

Wang B Q, Zhou M F, Li J W, Yan D P. 2011. Late Triassic porphyritic intrusions and associated volcanic rocks from the Shangri-La region, Yidun terrane, Eastern Tibetan Plateau: adakitic magmatism and porphyry copper mineralization. Lithos, 127(1-2): 24-38.

Wang C M, Bagas L, Lu Y J, Santosh M, Du B, McCuaig T C. 2016. Terrane boundary and spatio-temporal distribution of ore deposits in the Sanjiang Tethyan Orogen: insights from zircon Hf-isotopic mapping. Earth-Science Reviews, 156(1): 39-65.

Wang M, Pei X Z, Li R B, Li Z C, Pei L, Chen Y X, Liu C J, Chen G C, Gao F, Li X B, Zhao S W. 2019. Early Indosinian high-$Mg^{\#}$ and high-Sr/Y ratio granodiorites in the Xia-he area, west Qinling, central China: petrogenesis and geodynamic implications. Lithos, 332: 162-174.

Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, Zhang Y H. 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies. Gondwana Research, 23(4): 1273-1305.

Wang Y J, Qian X, Cawood P A, Liu H C, Feng Q L, Zhao G C, Zhang Y H, He H Y, Zhang P Z. 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments. Earth-Science Reviews, 186(1): 195-230.

Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immoble elements. Chemical Geology, 20(4): 325-343.

Wu T, Xiao L, Wilde S A, Ma C Q, Zhou J X. 2017. A mixed source for the Late Triassic Garzê-Daocheng granitic belt and its implications for the tectonic evolution of the Yidun arc belt, eastern Tibetan Plateau. Lithos, 288: 214-230.

Xia R, Wang C M, Qing M, Li W L, Carranza E J M, Guo X D, Ge L S, Zeng G Z. 2015. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf-O isotopes for the Nan'getan granodiorites and mafic microgranular enclaves in the East Kunlun Orogen: record of closure of the Paleo-Tethys. Lithos, 234-235: 47-60.

Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, Liu B, Jiang H A. 2014. Reworking of old continental lithosphere: an important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau. Journal of the Geological Society, 171(6): 847-863.

Yang J H, Cawood P A, Du Y S, Huang H, Huang H W, Tao P. 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China. Sedimentary Geology, 261: 120-131.

Yang T N, Ding Y, Zhang H R, Fan J W, Liang M J, Wang X H. 2014. Two-phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau: evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China. Geological Society of America Bulletin, 126(11-12): 1654-1682.

Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. Earth-Science Reviews, 186(1): 262-286.

Zielinski R A. 1985. Element mobility during alteration of silicic ash to kaolinite: a study of tonstein. Sedimentology, 32(4): 567-579.

(责任编辑　张西娟；英文审校　刘贺娟)