

引用格式: 刘卓洋, 芦刚, 唐若宸, 王长城, 邓宾, 刘重江, 杨荣军, 金鑫. 川西地区上三叠统须家河组凝灰岩对同期岩浆活动的约束[J/OL]. 沉积学报, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.031. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.031. [LIU ZhuoYang, LU Gang, TANG RuoChen, WANG ChangCheng, DENG Bin, LIU ChongJiang, YANG RongJun, JIN Xin. Dating Constraints on Coeval Magmatic Activity of Tuffs from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan, China[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550. 2025.031. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038. 2025.031.]

川西地区上三叠统须家河组凝灰岩测年对同期岩浆活动的约束

刘卓洋¹, 芦刚¹, 唐若宸¹, 王长城¹, 邓宾¹, 刘重江¹, 杨荣军², 金鑫³

1. 成都理工大学能源学院, 成都 610059

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

摘要 【目的】川西前陆盆地晚三叠世作为印支运动的重要构造演化阶段, 其同期形成的沉积地层不仅完整保存了盆地构造演化的地质记录, 同时蕴含了该时期火山活动的关键信息。通过分析地层中凝灰岩的物质来源, 可为揭示盆地周缘造山带在印支期的构造—岩浆活动规律提供重要依据。【方法】选取川西前陆盆地鸡冠山剖面须家河组凝灰岩作为研究对象, 通过岩石学、地球化学以及锆石 U-Pb 同位素定年技术等方法, 揭示了该套凝灰岩层的沉积时代以及其岩浆的物质源区。【结果】凝灰岩锆石 U-Pb 定年结果为 213.5 Ma 与 208.5 Ma, 属于晚三叠世诺利—瑞替期, 凝灰岩稀土元素配分曲线显示轻稀土元素富集, 重稀土元素呈较平坦的右倾型分布模式, 具有较强的 Eu 负异常; 原始地幔标准化微量元素蛛网图显示相对富集大离子亲石元素 (Rb, Ba 等), 亏损高场强元素 (Ta 等), 均与大陆下地壳表现出相似的配分模式。锆石 Hf 元素显示岩浆分别来自混染地壳与亏损地幔。【结论】研究区凝灰岩的火山物质与松潘—甘孜地体的晚三叠世安山岩来源于同一期岩浆活动, 且该岩浆活动与板块双向俯冲下大陆地壳熔融密切相关。

关键词 川西前陆盆地; 须家河组; 凝灰岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学特征

第一作者简介 刘卓洋, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, E-mail: lzydiagnosis@foxmail.com

通讯作者 芦刚, 男, 副教授, 沉积学, E-mail: lugang19@cdut.edu.cn

中图分类号: P542.2 文献标志码: A

0 引言

火山活动与板块构造活动密切相关, 火山活动喷发形成的凝灰岩记录了火山活动相关的信息。通过研究凝灰岩的形成年代与地球化学特征, 不仅可以揭示火山活动的物质来源, 还能对该时期周缘造山带构造演化和岩浆活动研究提供相关证据 (李祥辉等, 2016; 冉波等, 2016; Jin *et al.*, 2022; Jiang *et al.*, 2023; 陈俞超等, 2024)。晚三叠世是川西前陆盆地初始形成过程中的一个关键时期 (李勇等, 2011), 起始于中三叠世末期的印支运动使得扬子板块与周缘板块呈剪刀式的汇聚拼合 (许志琴等, 2012), 古特提斯洋分支甘孜

一理塘洋的闭合（吉让寿等，1990）。印支运动被广泛定义为与古特提斯洋闭合有关的早中生代构造事件。研究表明，位于西部的印支造山系形成于“多洋盆、多地体、多岛弧、多俯冲、多碰撞”的复杂构造背景（许志琴等，2012）。在增生造山的基础上，随着新特提斯洋盆的打开与古特提斯洋盆的闭合，在三叠纪完成中国大陆印支碰撞造山过程，形成巨型造山拼贴体，同时对川西前陆盆地演化产生了重要影响（刘树根等，2009；李勇等，2014）。此次构造事件深刻影响了川西前陆盆地构造和沉积格局，造成了晚三叠世沉积发生由海向陆的关键转变（刘树根等，2009）。而川西前陆盆地的须家河组就在此构造背景下形成，但其源区来源复杂，从须一段到须六段经历了不同的物源沉积，同一层段在不同地区也有较大的差异。因此，厘清川西前陆盆地火山夹层凝灰岩所记录的构造演化活动与其同期岩浆活动之间的关系至关重要。

川西前陆盆地周缘的晚三叠世岩浆岩主要集中分布在以下三处：南秦岭造山带（210~221 Ma）（Dong *et al.*, 2011）、松潘—甘孜地体（203~221 Ma）（蔡宏明等，2010），其中安山岩 1 处（206~212 Ma）（李祥辉等，2016）、义敦岛弧带（216~245 Ma）（Reid *et al.*, 2007）。目前已公开报道的晚三叠世川西前陆盆地凝灰岩有 3 处：江油含增剖面上三叠统天井山组与马鞍塘组的分界线（ T_{2t}/T_{3m} , 238 Ma）（Jin *et al.*, 2022）；宣汉七里峡须家河组须五段凝灰岩（ 205.9 ± 1.5 Ma）（陈俞超等，2024）；崇州鸡冠山须家河组须五段凝灰岩（ T_{3x}^5 中，212.5 Ma）（Jiang *et al.*, 2023）。然而，目前对川西地区须家河组凝灰岩的喷发来源尚不明确。因此，本文以川西前陆盆地上三叠统须家河组凝灰岩作为研究对象，通过对凝灰岩进行锆石 U-Pb 测年，结合地球化学和锆石 Hf 同位素数据，分析须家河组凝灰岩的物质来源。在此基础上，通过元素地球化学指标反推岩浆源区的地壳厚度，进一步揭示源区的构造演化过程，旨在明确川西前陆盆地的物质来源以及晚三叠世印支运动构造演化过程。

1 地质背景

研究区位于扬子板块西缘（图 1a, b）。在研究区周缘，主要发育的地质构造带包括北边的秦岭造山带，南边的扬子板块；西边以松潘—甘孜地体为主，西南边发育有羌塘地块、义敦岛弧、拉萨地块、康滇古陆等（图 1b）。四川盆地东北一隅发育米仓山隆起带和大巴山断褶带，其中大巴山褶皱带为三级断褶带；西北部发育有松潘—甘孜褶皱带，为二级基底褶皱带；盆地中部地区发育有川中古隆起平缓带；南部发育川南低陡构造带；东南方向为川湘坳陷褶皱带，整体呈 NE-SW 展布（罗良等，2015；李洪奎等，2019）。本文

研究工区位于川西地区龙门山前缘带，在构造上位于龙门山大断裂带前缘的褶皱带（图 1c）。龙门山褶皱带的演化过程从印支期开始发育，至喜马拉雅期形成，整体上呈 NE—SW 展布（李勇等，2010）。晚三叠世川西前陆盆地受到印支运动的影响，盆地构造环境从拉伸环境逐渐往挤压环境过渡（何登发等，2016），盆地西侧的龙门山不断抬升，导致盆地整体呈东高西低的特点，海水从盆地东侧往西侧退去，盆地内的沉积环境也由海相沉积转变成陆相沉积（Tan *et al.*, 2013）。

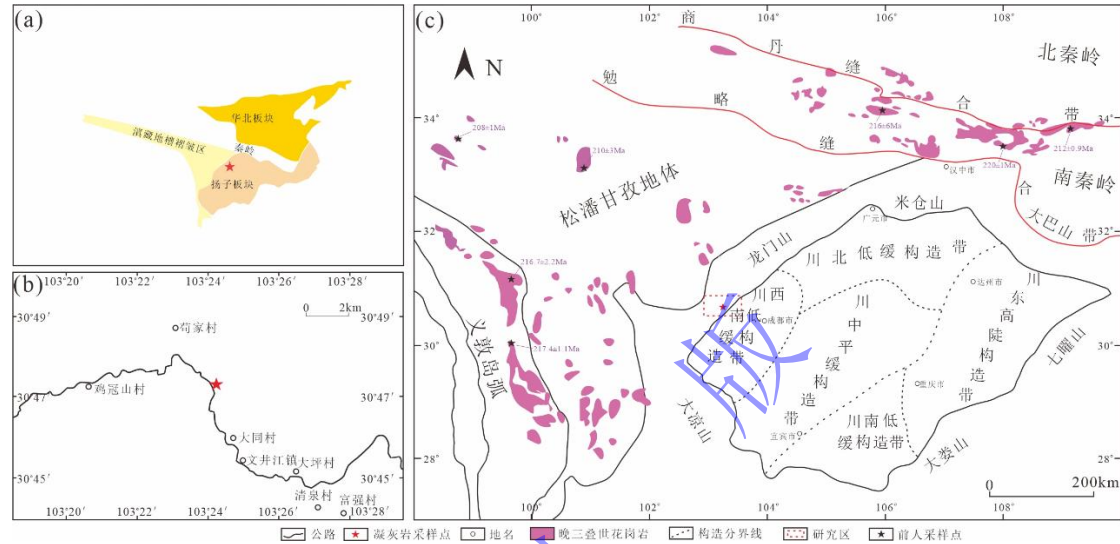


图 1 研究区地质简图及研究区位置图（据卢雨潇等，2022；薄尚尚等，2024 修改）

(a) 板块构造图；(b) 地理位置图；(c) 区域地质图

Fig.1 Geological map and location of the study area (modified from Lu *et al.*, 2022; Bo *et al.*, 2024)

(a) tectonic plate map of China; (b) geographical location map; (c) study area geological map

本次研究剖面为鸡冠山剖面（ $30^{\circ}49' 38''$ N, $103^{\circ}24' 3''$ E），位于川西前陆盆地崇州市文景江镇苟家坪背斜上，该背斜核部与两翼均出露上三叠统须家河组。此剖面的须家河组地层其顶界与下侏罗统白田坝组接触，底界覆盖于中三叠统雷口坡组之上。该组岩性组合以砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层为主，局部夹有泥砾质夹层，并保存有丰富的植物化石（图 2）。基于岩性特征，该地层可以划分为 5 个层段（王永栋等，2010），须一、须三和须五段主要由粉砂岩、泥岩与煤构成，富含植物化石，指示洪泛平原—湖泊相沉积体系；须二和须四段则以中—粗粒砂岩为主体，发育水平层理、板状交错层理及槽状交错层理等沉积构造，反映辫状河三角洲沉积环境（郑荣才等，2009）。

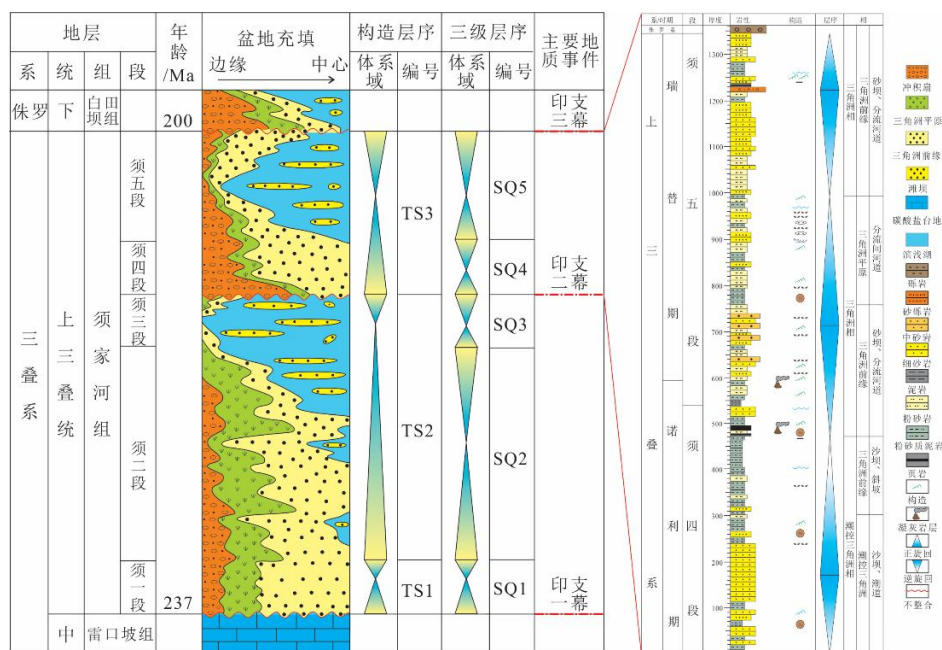


图2 鸡冠山剖面须家河组综合柱状图 (据郑荣才等, 2009; 陈杨, 2011 修改)

Fig.2 Comprehensive columnar section of the Xujiahe Formation in the Jiguan Mountain profile (modified from Zheng *et al.*, 2009; Chen, 2011)

2 凝灰岩层位与样品

本次研究的凝灰岩样品 ($30^{\circ}47'17''N$, $103^{\circ}24'0''E$) 采自鸡冠山剖面须四段顶部与须五段底部, 地层岩性以灰色和深灰色泥岩为主, 可见部分灰白色细粒砂岩。剖面上发育有两套薄层凝灰岩 (厚 2~2.5 cm) (图 3), 凝灰岩颜色为橙黄色和土黄色, 整体较为松散 (图 3a, d), 显微镜下观察凝灰岩样品, 可见中晶屑物质主要为斜长石, 呈现次棱角状与条带状, 分布杂乱 (图 3b, c)。凝灰质脱玻化严重, 且多数被黏土质交代, 呈似流动构造 (图 3e, f)。

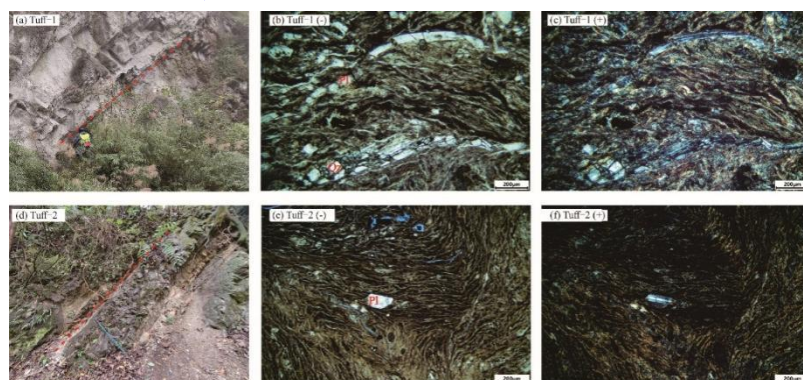


图3 川西前陆盆地鸡冠山剖面凝灰岩特征

(a) 凝灰岩野外露头照片, Tuff-1; (b) 镜下呈现次棱角状与条带状特征, Tuff-1, 单偏光; (c) 镜下呈现似流动构造特征, Tuff-1, 正交偏光; (d) 凝灰岩野外露头照片, Tuff-2; (e) 镜下呈现次棱角状与条带状特征, Tuff-2, 单偏光; (f) 镜下呈现似流动构造特征, Tuff-2, 正交偏光

Fig.3 Characteristics of tuff in the Jiguan Mountain profile of the foreland basin, western Sichuan

(a) field photographs of tuff outcrop, Tuff-1; (b) subangular and banded features under microscope, Tuff-1, plane-polarized light (PPL); (c) flow-like structural features under microscope, Tuff-1, cross-polarized light (XPL); (d) field photographs of tuff outcrop, Tuff-2; (e) subangular and banded features under microscope, Tuff-2, PPL; (f) flow-like structural features under microscope, Tuff-2, XPL

3 分析方法

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

本次研究凝灰岩样品的锆石 LA-ICP-MS 定年在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成。对样品实施机械破碎与重力分选，通过显微观察筛选出晶形完整、透明度高的单颗粒锆石，经环氧树脂镶嵌—抛光处理制备成分析靶样，之后采用锆石阴极发光（CL）显微镜下观察，依据振荡环带发育程度优选微区测试点位（图 4），分析锆石样品 U-Pb 年龄。仪器配置方面，采用美国应用光谱公司 Resolution LR 型 193 nm 激光剥蚀系统，配备安捷伦 7900 型四极杆质谱仪完成锆石 U-Pb 同位素比值测定及微量元素含量分析。选取 He 为剥蚀过程中样品的载气（流量为 0.65 L/min），锆石的微量元素含量的标定采用标准参考物质 NIST610 为外部标准计算、Si 为内部标准计算。本次分析实验中，激光斑束的直径为 29 μm ，激光能量强度为 3.5 J/cm²，激光剥蚀的深度为 30~40 μm ，激光频率为 8 Hz，剥蚀时间为 45 s。采用 ICP-MSDataCal 软件对锆石样品测点 U-Pb 的表面年龄、Pb 同位素比值和微量元素的含量计算处理。采用 Isoplot 软件（Ludwig, 2003）对锆石年龄协和图、年龄加权平方图进行绘制。凝灰岩样品 LA-ICP-MS U-Pb 数据分析结果见表 1。

3.2 全岩主微量元素测试

凝灰岩样品的全岩主微量元素测试在成都谱谱检测技术有限公司进行。样品主元素和微量元素分析测试分别在电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES、美国 PE 5300V），电感耦合等离子体质谱仪（Agilent Technologies 7700 Series ICP-MS）上进行。凝灰岩样品的全岩主微量元素数据分析结果见附表 1、2、3。

3.3 X 射线衍射测试

X 射线衍射测试是在成都谱谱检测技术有限公司进行。样品经过 200 目过筛后，采用日本理学 Rigaku XRD/Rigaku Ultima IV 仪器进行测试。凝灰岩样品的全岩分析和黏土分析测试结果见附表 4、5。

3.4 锆石 Hf 同位素测试

凝灰岩锆石样品的 Hf 同位素分析是在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石样品的 Lu-Hf 同位素测试采用的多接收质谱 MC-ICP-MS（Neptune Plus），激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司的相干 193 nm 准分子激光剥蚀系统（Geolas HD）。测试采用的激光斑

束为 44 μm ，激光能量强度为 10.0 J/cm²，频率为 8 Hz。测试期间，锆石 Hf 同位素数据以标准参考物质 91500、GJ-1 和 Plesovice 进行分析和校正，采用 ICP-MSDataCal 软件对锆石样品的 Hf 同位素进行计算处理。锆石 Hf 同位素测试数据结果见表 2。

4 测试结果

4.1 锆石阴极（CL）特征

锆石颗粒多呈现自型晶，晶体形态完整，呈现短柱状或长柱状，粒径在 100~150 μm 之间（图 4），大部分锆石具明显的振荡环带且无明显磨圆。

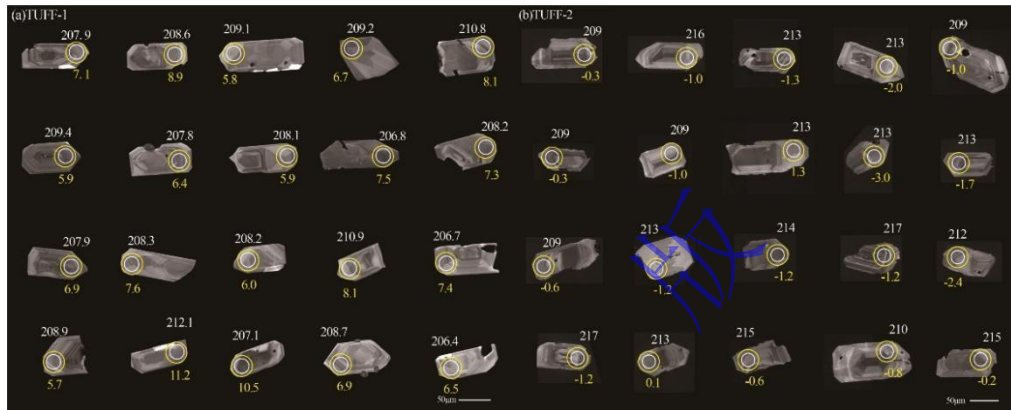


图 4 样品锆石阴极发光图像

圆圈代表激光剥蚀位置，白字为年龄（Ma），黄字为 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值

Fig.4 Cathodoluminescence images of zircon samples

Circles are the testing positions; white numbers are ages (Ma); yellow numbers are $\epsilon\text{Hf}(t)$ values

4.2 锆石 U-Pb 年龄特征

通过 LA-ICP-MS 测试对凝灰岩样品锆石的测定点进行分析，选定的测试点多数位于锆石的振荡环带部，少部分处于锆石核部。剔除谐和度小于 90%和大于 110%的无效数据，得到 Tuff-1 和 Tuff-2 各自的 U-Pb 年龄有效数据（表 1）。将剔除后的数据进行 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和图投图，Tuff-1 的 30 个数据点均匀分布在谐和线附近， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄处于瑞替阶和诺利阶（206.4~212.1 Ma），加权平均年龄为（208.5 $\pm$ 1.4）Ma（MSWD=0.13，图 5a，b）；Tuff-2 的 46 个数据点均匀分布在谐和线附近， $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄处于诺利阶（206.4~212.1 Ma），加权平均年龄为（213.5 $\pm$ 1.1）Ma（MSWD=0.41，图 5c，d）。

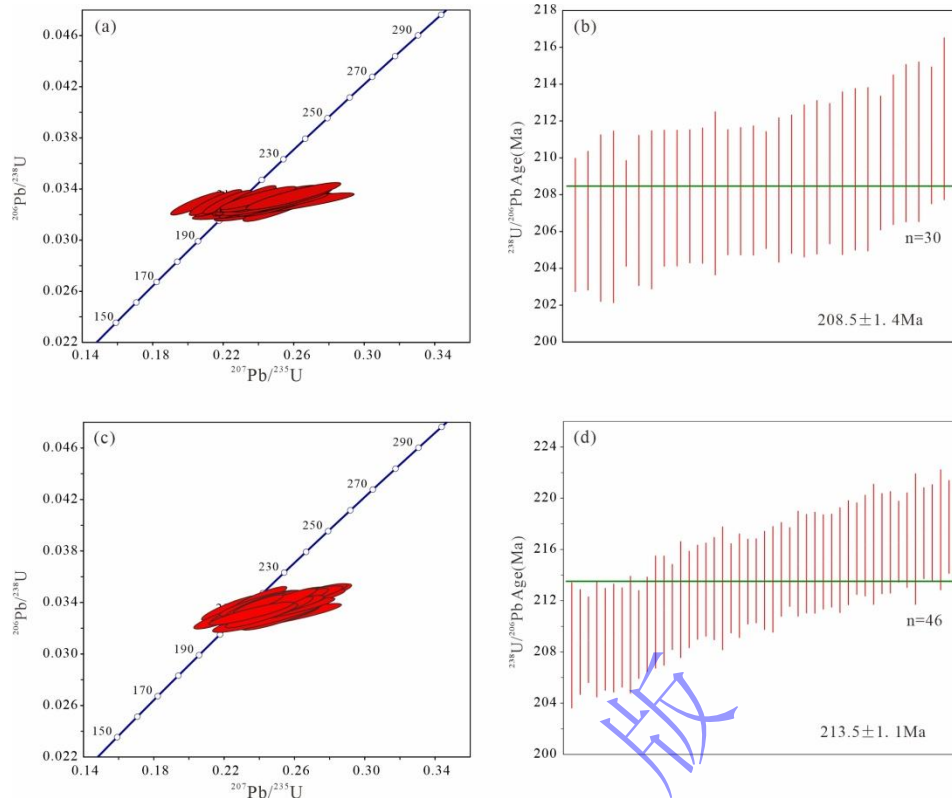


图5 须家河组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均图

(a, b) Tuff-1; (c, d) Tuff-2

Fig.5 Zircon U-Pb ages concordia diagrams and weighted average plot of tuff in the Xujiahe Formation

4.3 凝灰岩全岩地球化学特征

凝灰岩样品全岩主量元素、微量元素和稀土元素含量见附表 1、2、3。测试结果表明 Tuff-1 样品的 SiO_2 含量为 53.73%， K_2O 和 Na_2O 的含量分别为 4.08% 和 0.25%， CaO 含量为 0.90%， Al_2O_3 含量为 23.33%， TFe_2O_3 为 2.87%，烧失量为 12.71%，其余主量元素含量较低；Tuff-2 样品的 SiO_2 含量为 52.86%， K_2O 和 Na_2O 的含量分别为 5.53% 和 0.09%， CaO 含量为 0.69%， Al_2O_3 含量为 22.91%， TFeO 为 5.48%，烧失量为 10.36%，其余主量元素含量也较低。凝灰岩样品稀土元素球粒陨石标准化配分蛛网图（图 6a）总体表现为明显的右倾分布，轻稀土元素较富集，重稀土元素分布较平坦，具有较强的 Eu 负异常（ $\delta\text{Eu}=0.326$ ）；微量元素原始地幔标准化蛛网图（图 6b）显示，样品高场强元素 Ta 强烈亏损，大离子亲石元素 Rb, Ba 等相对富集。

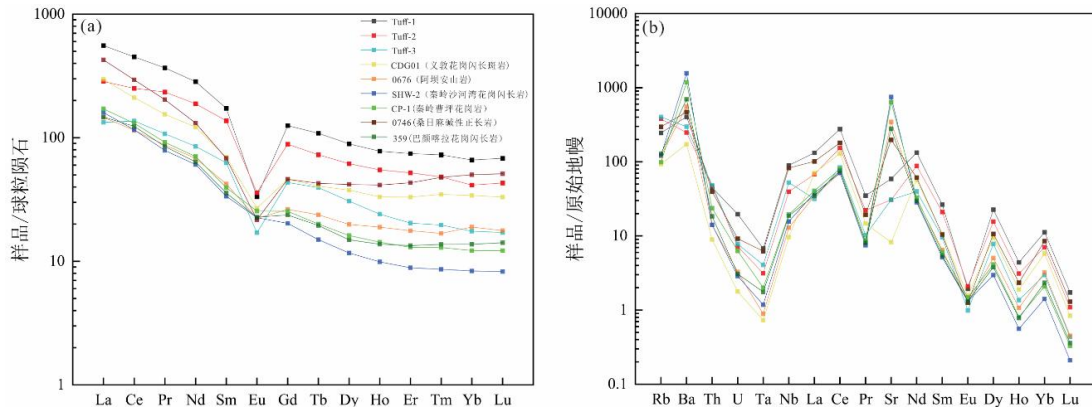


图6 (a) 球粒陨石标准化稀土分配曲线图; (b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

球粒陨石标准化值数据及原始地幔标准化值引自文献 (Sun and McDonough, 1989), 义敦岛弧数据引自文献 (施洛, 2017), 阿坝、桑日麻和巴颜喀拉数据引自文献 (蔡宏明, 2010), 秦岭数据引自文献 (弓虎军等, 2009)

Fig.6 (a) Chondrite-normalized REE distribution curves; (b) primitive mantle-normalized trace

Element spider diagrams: chondrite-normalized values and primitive mantle-normalized values from reference (Sun and McDonough, 1989); data for the Yidun Island Arc from reference (Shi, 2017); data for Aba, Sangrima, and Bayan Har from reference (Cai, 2010); data for the Qinling Mountains from reference (Gong *et al.*, 2009)

4.4 凝灰岩岩石矿物特征

凝灰岩样品的 X 射线衍射测试结果表明, Tuft-1 和 Tuft-2 的全岩矿物和黏土矿物组分有一定差别。Tuft-1 的石英含量为 4.7%, 斜长石含量为 0.7%, 方解石含量为 0.5%, 黏土矿物含量为 94.1%; Tuft-2 的石英含量为 10.6%, 黏土矿物含量为 89.4%。Tuft-1 的高岭石含量为 22%, 伊/蒙混层含量为 78%; Tuft-2 的高岭石含量为 1%, 伊/蒙混层含量为 99%。

4.5 凝灰岩 Hf 同位素特征

须家河组凝灰岩样品中的锆石 Hf 同位素测定结果见表 2。结果表明凝灰岩锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 559~0.282 963, 平均值为 0.282 722; $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值均小于 0.002, 显示锆石在形成后积累放射性 Hf 较低, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.000 729~0.001 963, 平均值 0.001 346。

Tuft-1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282 811~0.282 963, 平均值为 0.282 856, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.001 039~0.001 918, 平均值为 0.001 540, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 5.7~11.2, 平均值为 7.0, 一阶段的模式年龄 (T_{DM1}) 为 416~638 Ma 之间, 平均模式年龄为 571 Ma, 二阶段的模式年龄 (T_{DM2}) 在 492~794 Ma 之间, 平均模式年龄为 706 Ma。

Tuft-2 的比值介于 0.282 559~0.282 679, 平均值为 0.282 619, Tuft-2 的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.000 729~0.001 963, 平均值为 0.001 220, 一阶段的模式年龄 (T_{DM1}) 在 806~990 Ma 之间, 平均模式年龄为 901 Ma, 二阶段的模式年龄 (T_{DM2}) 在 1 046~1 286 Ma 之间, 平均模式年龄为 1 172 Ma。

5 讨论

5.1 凝灰岩的岩浆源区

锆石因其稳定性、精确性以及适用性，被常用于年代学的研究中（张成立等，2009）。利用锆石的 U-Pb 年龄数据可以初步认识该时期对应的构造热事件，通过与邻区锆石的 U-Pb 年龄数据进行对比可以大致判断凝灰岩的源区（王平等，2022）。根据凝灰岩样品 Tuff-1 和 Tuff-2 的 U-Pb 年龄数据，建立须家河组凝灰岩时空分布图（图 7），将凝灰岩锆石 U-Pb 年龄数据与松潘—甘孜地体、义敦岛弧以及秦岭造山带地区的岩浆岩年龄值进行对比研究，其中松潘—甘孜地体的岩浆活动期次集中在 202~217 Ma（蔡宏明，2010；王鹏等，2023），义敦岛弧的岩浆活动期次集中在 202~224 Ma（施洺，2017），秦岭造山带的岩浆活动期次集中在 210~227 Ma（弓虎军等，2009；刘巍等，2020）。结果表明研究区凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄范围介于 208~213 Ma 与松潘—甘孜地体的安山岩年龄值最为接近，这表明研究区凝灰岩的源区可能与松潘—甘孜地体为同一期构造活动。

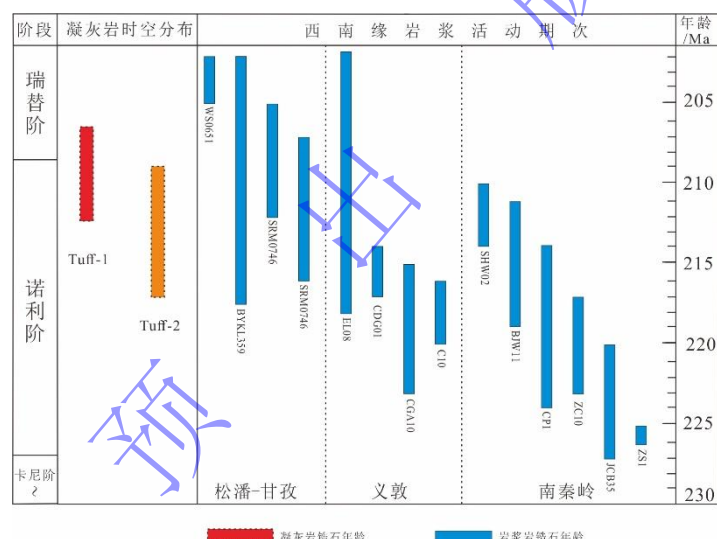


图 7 须家河组凝灰岩时空分布图

松潘—甘孜年龄数据引自文献（蔡宏明，2010；王鹏等，2023），义敦年龄数据引自文献（施洺，2017），南秦岭年龄数据引自文献（弓虎军等，2009；刘巍等，2020）

Fig.7 Spatiotemporal distribution map of tuff in the Xujiahe Formation

Data for Songpan-Garzê from references (Cai, 2010; Wang *et al.*, 2023); data for Yidun from reference (Shi, 2017); data for South Qinling from references (Gong *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020)

表 1 须家河组凝灰岩样品锆石 LA-ICP-MSU-Pb 同位素定年结果

Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic dates for tuff from the Xujiahe Formation

测点	Pb/ $\times 10^{-6}$	Th/ $\times 10^{-6}$	U/ $\times 10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		rho	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1 σ	比值	1 σ		Age/Ma	1 σ	Age/Ma	1 σ
Tuff-1-01	55.46	615.41	1 165.46	0.239	0.010	0.033	0.000 6	0.416	217.3	8.4	206.4	3.6
Tuff-1-02	65.55	769.53	1 283.70	0.248	0.015	0.033	0.000 6	0.311	225.3	12.1	206.6	3.8
Tuff-1-03	42.74	406.49	851.45	0.248	0.022	0.033	0.000 7	0.246	225.2	18.3	206.7	4.5
Tuff-1-04	77.65	917.26	1 536.11	0.252	0.014	0.033	0.000 7	0.407	228.5	11.6	206.8	4.7
Tuff-1-05	151.83	2 098.47	2 752.16	0.249	0.010	0.033	0.000 5	0.339	225.6	8.5	207.0	2.9
Tuff-1-06	84.99	939.05	1 573.83	0.244	0.023	0.033	0.000 7	0.209	221.4	19.2	207.1	4.1
Tuff-1-07	72.91	923.72	1 354.50	0.248	0.031	0.033	0.000 7	0.171	225.1	24.9	207.2	4.3
Tuff-1-08	46.53	500.66	986.71	0.220	0.011	0.033	0.000 6	0.358	201.8	9.3	207.8	3.7

Tuff-1-09	56.01	578.99	1 139.52	0.252	0.015	0.033	0.000 6	0.313	228.2	11.8	207.8	3.7
Tuff-1-10	53.72	615.20	1 132.40	0.236	0.011	0.033	0.000 6	0.379	215.0	9.1	207.9	3.6
Tuff-1-11	48.06	466.10	975.15	0.241	0.013	0.033	0.000 6	0.322	219.0	11.0	207.9	3.7
Tuff-1-12	82.90	1 076.00	1 652.38	0.232	0.010	0.033	0.000 7	0.521	211.8	8.0	208.1	4.4
Tuff-1-13	46.82	502.27	973.03	0.250	0.014	0.033	0.000 5	0.305	226.2	11.1	208.1	3.4
Tuff-1-14	37.00	375.87	743.18	0.250	0.019	0.033	0.000 6	0.221	226.8	15.6	208.2	3.5
Tuff-1-15	49.21	522.24	975.25	0.246	0.012	0.033	0.000 6	0.345	223.4	10.0	208.2	3.5
Tuff-1-16	116.98	1 476.88	2 170.55	0.247	0.012	0.033	0.000 5	0.316	224.3	9.9	208.2	3.2
Tuff-1-17	47.81	517.34	1 022.11	0.246	0.012	0.033	0.000 6	0.397	223.2	9.7	208.3	3.9
Tuff-1-18	53.67	609.75	1 138.53	0.205	0.010	0.033	0.000 6	0.368	189.0	8.6	208.6	3.8
Tuff-1-19	56.19	633.87	1 181.47	0.230	0.010	0.033	0.000 7	0.443	210.2	8.7	208.7	4.1
Tuff-1-20	90.55	1 219.83	1 784.37	0.215	0.010	0.033	0.000 7	0.438	197.7	8.3	208.9	4.2
Tuff-1-21	57.54	678.27	1 178.24	0.222	0.009	0.033	0.000 6	0.447	203.4	7.7	209.1	3.8
Tuff-1-22	48.32	525.24	1 010.90	0.233	0.013	0.033	0.000 7	0.389	212.6	10.6	209.2	4.4
Tuff-1-23	64.61	808.35	1 311.94	0.233	0.012	0.033	0.000 7	0.419	212.5	9.8	209.4	4.4
Tuff-1-24	53.11	590.88	1 065.48	0.250	0.021	0.033	0.000 7	0.260	226.9	16.9	209.4	4.5
Tuff-1-25	69.13	846.83	1 419.66	0.232	0.011	0.033	0.000 6	0.371	212.2	9.1	209.7	3.7
Tuff-1-26	86.01	471.38	2 078.76	0.246	0.014	0.033	0.000 7	0.339	223.6	11.7	210.4	4.1
Tuff-1-27	53.02	611.46	1 107.81	0.234	0.011	0.033	0.000 7	0.455	213.3	8.7	210.8	4.3
Tuff-1-28	47.28	503.39	910.01	0.246	0.019	0.033	0.000 7	0.278	223.5	15.1	210.9	4.4
Tuff-1-29	40.75	402.03	875.23	0.239	0.014	0.033	0.000 6	0.297	218.0	11.9	211.2	3.7
Tuff-1-30	49.00	512.17	913.19	0.260	0.018	0.033	0.000 7	0.305	234.4	14.5	212.1	4.4
Tuff-2-01	151.42	2 264.87	3 724.58	0.221	0.009	0.033	0.000 6	0.448	202.4	8.0	209.0	4.0
Tuff-2-02	68.18	797.08	1 838.76	0.247	0.014	0.033	0.000 6	0.320	224.1	11.8	215.0	4.0
Tuff-2-03	131.95	1 716.25	3 215.36	0.236	0.009	0.034	0.000 6	0.427	215.0	7.7	216.1	3.6
Tuff-2-04	102.40	1 195.94	2 489.14	0.250	0.012	0.033	0.000 6	0.335	226.2	10.1	209.4	3.5
Tuff-2-05	100.32	1 352.73	2 517.87	0.224	0.011	0.033	0.000 6	0.387	205.2	9.2	212.9	4.0
Tuff-2-06	46.76	478.98	1 242.87	0.245	0.014	0.033	0.000 7	0.324	222.7	12.0	213.2	4.1
Tuff-2-07	166.32	2 299.09	3 697.81	0.265	0.009	0.034	0.000 6	0.505	239.0	7.8	216.5	3.9
Tuff-2-08	64.62	720.03	1 671.30	0.250	0.014	0.033	0.000 7	0.385	226.4	11.7	209.3	4.6
Tuff-2-09	66.23	701.32	1 673.17	0.260	0.014	0.033	0.000 6	0.323	234.5	11.9	214.9	3.9
Tuff-2-10	100.55	1 734.48	2 322.32	0.223	0.013	0.033	0.000 7	0.344	204.4	11.1	209.1	4.2
Tuff-2-11	109.07	1 325.69	2 673.36	0.254	0.021	0.032	0.000 7	0.234	229.7	17.6	208.8	4.1
Tuff-2-12	66.46	724.74	1 744.37	0.246	0.013	0.033	0.000 7	0.369	223.1	10.6	214.9	4.1
Tuff-2-13	67.02	656.16	1 804.10	0.255	0.012	0.032	0.000 5	0.333	230.9	10.2	209.0	3.4
Tuff-2-14	67.73	803.82	1 819.85	0.235	0.011	0.033	0.000 5	0.326	214.3	9.4	213.5	3.3
Tuff-2-15	61.81	662.14	1 610.69	0.255	0.015	0.033	0.000 6	0.301	230.8	12.6	213.6	3.9
Tuff-2-16	61.02	589.27	1 477.45	0.262	0.020	0.034	0.000 8	0.311	236.3	16.3	216.8	5.1
Tuff-2-17	93.74	1 128.55	2 401.93	0.241	0.010	0.033	0.000 6	0.412	219.5	8.3	215.1	3.7
Tuff-2-18	86.03	1 016.77	2 182.43	0.253	0.015	0.032	0.000 7	0.364	229.1	12.3	209.0	4.5
Tuff-2-19	65.47	671.12	1 588.99	0.265	0.016	0.034	0.000 8	0.348	238.5	13.5	217.5	4.7
Tuff-2-20	163.38	2 358.76	3 744.31	0.247	0.008	0.033	0.000 5	0.459	223.7	7.1	211.5	3.4
Tuff-2-21	56.48	606.06	1 400.06	0.245	0.020	0.032	0.000 8	0.281	222.6	17.0	208.5	4.9
Tuff-2-22	66.67	719.01	1 701.64	0.262	0.018	0.034	0.000 7	0.278	235.9	14.6	215.8	4.1
Tuff-2-23	92.16	1 178.31	2 336.48	0.244	0.013	0.033	0.000 7	0.393	222.1	10.8	211.1	4.4
Tuff-2-24	100.76	1 248.02	2 503.23	0.237	0.013	0.033	0.000 6	0.303	216.2	10.7	213.0	3.5
Tuff-2-25	78.16	885.50	1 820.30	0.256	0.013	0.034	0.000 6	0.333	231.8	11.0	217.3	3.8
Tuff-2-26	86.21	1 113.80	2 166.33	0.236	0.013	0.033	0.000 7	0.350	215.4	11.4	211.2	4.3
Tuff-2-27	72.46	774.12	1 774.35	0.256	0.018	0.033	0.000 6	0.259	231.3	14.5	212.1	3.8
Tuff-2-28	130.89	1 723.23	3 065.82	0.256	0.014	0.033	0.000 5	0.279	231.2	11.7	213.6	3.3
Tuff-2-29	27.57	329.31	634.53	0.243	0.020	0.033	0.000 8	0.279	221.0	16.4	213.0	4.8
Tuff-2-30	54.19	574.35	1 353.36	0.255	0.021	0.034	0.000 8	0.259	230.4	17.6	216.4	4.7
Tuff-2-31	106.88	1 291.52	2 637.50	0.238	0.011	0.033	0.000 6	0.374	216.7	9.1	214.4	3.7
Tuff-2-32	151.89	2 131.56	3 570.45	0.239	0.008	0.034	0.000 6	0.523	217.8	7.0	216.6	4.0
Tuff-2-33	118.50	1 472.03	2 766.27	0.262	0.011	0.034	0.000 6	0.393	236.1	9.4	216.7	3.7
Tuff-2-34	155.90	2 047.67	3 677.88	0.241	0.010	0.034	0.000 6	0.409	218.9	8.2	217.8	3.6
Tuff-2-35	62.36	693.57	1 565.69	0.247	0.019	0.033	0.000 7	0.276	224.5	15.9	212.1	4.6
Tuff-2-36	93.50	1 072.05	2 268.94	0.257	0.011	0.034	0.000 6	0.391	231.9	8.9	217.3	3.6
Tuff-2-37	173.67	2 718.81	4 166.22	0.248	0.012	0.033	0.000 6	0.353	225.3	10.0	215.0	3.7
Tuff-2-38	61.58	691.60	1 549.35	0.244	0.014	0.033	0.000 6	0.294	221.7	12.0	212.7	3.7
Tuff-2-39	153.86	2 269.07	3 510.00	0.248	0.010	0.034	0.000 5	0.357	224.6	8.4	216.6	3.2
Tuff-2-40	125.54	1 728.13	3 056.07	0.237	0.011	0.033	0.000 7	0.405	216.2	9.5	213.7	4.2
Tuff-2-41	142.50	1 968.91	3 394.24	0.255	0.010	0.033	0.000 6	0.428	230.5	8.4	212.9	3.7
Tuff-2-42	80.09	924.29	2 080.78	0.254	0.012	0.034	0.000 6	0.378	229.6	10.1	216.3	4.0
Tuff-2-43	55.38	608.39	1 516.91	0.241	0.013	0.033	0.000 6	0.335	219.5	11.2	209.1	3.9
Tuff-2-44	146.31	2 071.26	3 331.62	0.239	0.009	0.033	0.000 5	0.373	218.0	7.7	214.6	3.1
Tuff-2-45	154.60	2 349.98	3 622.65	0.235	0.015	0.033	0.000 6	0.266	214.6	13.0	210.2	3.7
Tuff-2-46	83.96	1 106.07	2 013.16	0.240	0.014	0.033	0.000 7	0.319	218.0	12.0	215.2	4.1

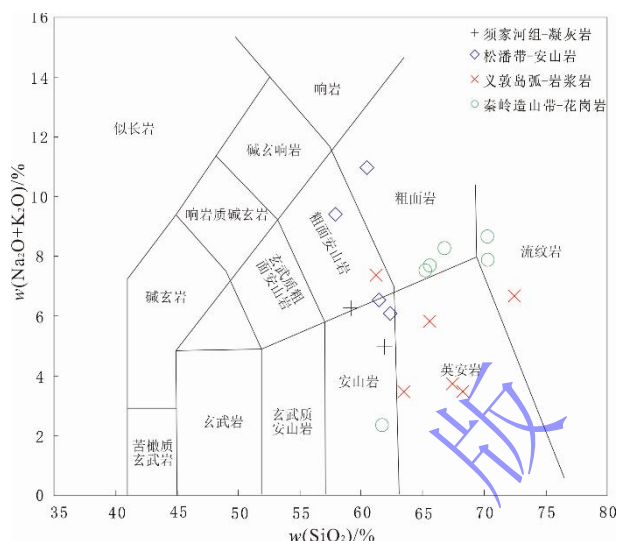
表 2 须家河凝灰岩样品锆石 Lu-Hf 同位素分析表

Table 2 Zircon Lu-Hf isotope analysis of tuff from the Xujiahe Formation

测点	Age/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}(0)}$	$\epsilon_{\text{Hf}(t)}$	T_{DM1}	T_{DM2}	$\delta_{\text{Lu/Hf}}$
Tuff-1-01	208	0.282 849	0.001 659	0.069 140	2.7	7.1	581	719	-0.95
Tuff-1-02	209	0.282 811	0.001 177	0.046 960	1.4	5.8	628	790	-0.96
Tuff-1-03	209	0.282 835	0.001 187	0.046 995	2.2	6.7	594	743	-0.96
Tuff-1-04	211	0.282 877	0.001 597	0.065 996	3.7	8.1	540	663	-0.95
Tuff-1-05	209	0.282 814	0.001 491	0.061 544	1.5	5.9	630	788	-0.96
Tuff-1-06	208	0.282 829	0.001 593	0.065 676	2.0	6.4	610	760	-0.95
Tuff-1-07	208	0.282 816	0.001 680	0.069 275	1.5	5.9	630	786	-0.95
Tuff-1-08	208	0.282 852	0.001 039	0.044 258	2.8	7.3	567	709	-0.97

Tuff-1-09	208	0.282 844	0.001 633	0.066 195	2.5	6.9	588	729	-0.95
Tuff-1-10	208	0.282 863	0.001 425	0.060 093	3.2	7.6	558	691	-0.96
Tuff-1-11	208	0.282 819	0.001 622	0.068 149	1.7	6.0	624	778	-0.95
Tuff-1-12	211	0.282 878	0.001 918	0.080 512	3.8	8.1	543	663	-0.94
Tuff-1-13	207	0.282 858	0.001 676	0.069 501	3.0	7.4	569	702	-0.95
Tuff-1-14	209	0.282 812	0.001 796	0.076 073	1.4	5.7	638	794	-0.95
Tuff-1-15	212	0.282 963	0.001 650	0.069 831	6.8	11.2	416	492	-0.95
Tuff-1-16	209	0.282 843	0.001 449	0.059 693	2.5	6.9	587	730	-0.96
Tuff-1-17	206	0.282 834	0.001 581	0.063 261	2.2	6.5	601	748	-0.95
Tuff-2-01	209	0.282 640	0.001 484	0.057 417	-4.7	-0.3	878	1130	-0.96
Tuff-2-02	215	0.282 613	0.000 850	0.034 728	-5.6	-1.0	900	1175	-0.97
Tuff-2-03	209	0.282 635	0.001 431	0.058 811	-4.8	-0.4	883	1139	-0.96
Tuff-2-04	213	0.282 609	0.001 063	0.041 214	-5.8	-1.3	912	1187	-0.97
Tuff-2-05	213	0.282 585	0.000 840	0.033 141	-6.6	-2.0	940	1231	-0.97
Tuff-2-06	209	0.282 620	0.001 510	0.059 405	-5.4	-1.0	907	1170	-0.95
Tuff-2-07	209	0.282 639	0.001 307	0.050 973	-4.7	-0.3	875	1131	-0.96
Tuff-2-08	209	0.282 619	0.001 009	0.040 663	-5.4	-1.0	897	1168	-0.97
Tuff-2-09	213	0.282 679	0.000 729	0.029 214	-3.3	-1.3	806	1046	-0.98
Tuff-2-10	214	0.282 559	0.001 353	0.052 598	-7.5	-3.0	990	1286	-0.96
Tuff-2-11	215	0.282 596	0.001 450	0.057 469	-6.2	-1.7	939	1213	-0.96
Tuff-2-12	209	0.282 629	0.001 163	0.047 706	-5.1	-0.6	886	1149	-0.96
Tuff-2-13	212	0.282 614	0.001 307	0.052 813	-5.6	-1.1	910	1178	-0.96
Tuff-2-14	209	0.282 629	0.000 967	0.038 914	-5.0	-0.6	881	1147	-0.97
Tuff-2-15	216	0.282 651	0.001 180	0.048 739	-4.3	0.3	855	1103	-0.96
Tuff-2-16	217	0.282 610	0.001 308	0.052 451	-5.7	-1.2	916	1185	-0.96
Tuff-2-17	213	0.282 609	0.000 773	0.028 948	-5.8	-1.2	904	1183	-0.98
Tuff-2-18	214	0.282 611	0.001 450	0.059 917	-5.7	-1.2	919	1186	-0.96
Tuff-2-19	217	0.282 607	0.001 271	0.052 600	-5.8	-1.2	920	1190	-0.96
Tuff-2-20	212	0.282 577	0.000 785	0.029 800	-6.9	-2.4	950	1247	-0.98
Tuff-2-21	217	0.282 608	0.001 189	0.049 347	-5.8	-1.2	917	1188	-0.96
Tuff-2-22	215	0.282 626	0.001 345	0.055 744	-5.2	-0.6	895	1154	-0.96
Tuff-2-23	213	0.282 652	0.001 963	0.082 802	-4.3	0.1	872	1109	-0.94
Tuff-2-24	215	0.282 628	0.001 400	0.058 532	-5.1	-0.6	893	1150	-0.96
Tuff-2-25	210	0.282 624	0.001 611	0.063 669	-5.2	-0.8	903	1162	-0.95
Tuff-2-26	215	0.282 636	0.000 976	0.040 180	-4.8	-0.2	872	1132	-0.97

单纯通过锆石的 U-Pb 测年来说明凝灰岩的源区是不够的，因此可以利用凝灰岩地球化学元素特征来分析其母岩浆构成成分（弓虎军等，2009；蔡宏明等，2010；施涖，2017；陈俞超等，2024）。根据凝灰岩样品的地球化学元素数据和前人对义敦岛弧、松潘—甘孜地体以及秦岭造山带研究样品的地化数据，进行 TAS 图解投点（图 9）。结果表明，研究区须家河组凝灰岩样品的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量相对较高， SiO_2 含量较高，TAS 图解主要落在粗面安山岩范围内，岩性为中性—中酸性（图 8）；松潘甘孜的 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量和 SiO_2 含量



松潘安山岩数据引自文献(蔡宏明, 2010; 王鹏等, 2023), 义敦岛弧岩浆岩数据引自文献(施洛, 2017), 秦岭花岗岩数据引自文献(弓虎军等, 2009; 刘巍等, 2020)

Fig.8 Parent rock discrimination diagram of tuff in the Xujiahe Formation (modified from Le Bas *et al.*, 1986) data for Songpan andesite from references (Cai, 2010; Wang *et al.*, 2023); data for Yidun Island Arc magmatic rocks from reference (Shi, 2017); data for Qinling granites from references (Gong *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020)

锆石高场强元素 Hf 具有稳定的化学性质，能在火山灰的蚀变作用过程中保留，可以利用锆石的 Hf 同位素比值特征来反映凝灰岩的源区以及岩浆来源（吴福元等，2007；张成立等，2009；弓虎军等，2009；蔡宏明，2010；田和明等，2014；施滔，2017）。利用研究区凝灰岩样品和义敦岛弧、松潘—甘孜地体以及秦岭造山带的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值，建立锆石 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解（图 8）。从图中可看出，研究区凝灰岩样品 Tuff-1 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为正值介于 5.7~11.2，分析岩浆成分主要来源亏损地幔；Tuff-2 的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -3~-0.3，表明岩浆中混染了部分熔融地壳组分。义敦岛弧的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -15.3~25.1；松潘—甘孜地体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -3.6~11.1；秦岭造山带的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -11.3~1.6。将须家河组凝灰岩与义敦岛弧、松潘—甘孜地体以及秦岭造山带地区侵入岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值进行对比研究，发现研究区凝灰岩样品 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与松潘—甘孜地体相似，表明松潘—甘孜地体的晚三叠安山岩可能与研究区凝灰岩来源于同一期岩浆活动。

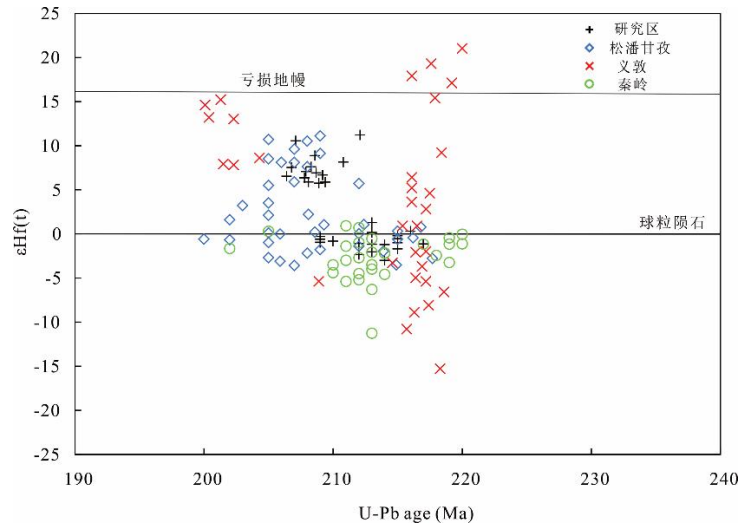


图9 须家河组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解

松潘岩体数据引自文献（蔡宏明，2010；王鹏等，2023），义敦岛弧岩体数据引自文献（施滔，2017），秦岭岩体数据引自文献（弓虎军等，2009；刘巍等，2020）

Fig.9 Zircon U-Pb ages and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ for tuff in the Xujiahe Formation

Data for Songpan rock mass from references (Cai, 2010; Wang *et al.*, 2023); data for Yidun Island Arc rock mass from reference (Shi, 2017); data for Qinling rock mass from references (Gong *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020)

5.2 凝灰岩源区地壳厚度恢复

La 在地壳中含量丰富，对地幔中的熔融反应敏感，Yb 在地壳中含量则较低，且在熔融反应过程中不易分配到熔体中，因此，岩浆岩的 La/Yb 值与岩浆来源的深度有一定的相关性，通过建立凝灰岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值与地壳厚度变化的相关方程（1），可以估算造山带当时的地壳厚度（Profeta *et al.*, 2015）。

$$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = (0.98 \pm 0.19) \times e^{(0.047 \pm 0.005) \times dm} \quad (1)$$

有学者研究认为松潘—甘孜地体在晚三叠时期发生了地层拆沉作用（蔡宏明等，2010），拆沉作用是指增厚的岩石圈根部由于重力不稳定性而发生沉降进入到软流圈的过程，为地幔物质上涌提供了通道（时章亮等，2009）。还有学者认为松潘—甘孜地体的中生代花岗岩的形成与俯冲有关，主要为松潘—甘孜地体向义敦岛弧俯冲（Chen *et al.*, 2017; Deschamps *et al.*, 2017）。本文对义敦岛弧岩浆岩、松潘—甘孜地体安山岩以及秦岭造山带花岗岩和此次研究的须家河组凝灰岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值进行了相关计算，得到对应地区不同年代的地壳厚度。结果表明，须家河组凝灰岩起源于厚度约为 42~46 km 的陆壳，且未发生明显的厚度变化。前人研究结果表明，松潘—甘孜地体安山岩和埃达克质岩起源于厚度约 43~52 km 的陆壳熔融，且 220~205 Ma 期间地壳厚度未发生明显增厚（李成祥等，2023），这也表明松潘—甘孜地体未发生显著的加厚地层拆沉作用（Zhan *et al.*, 2018）。通过地壳厚度对比分析，进一步验证了松潘—甘孜地体的晚三叠安山岩与研究区凝灰岩可能为同一时期的

岩浆活动。

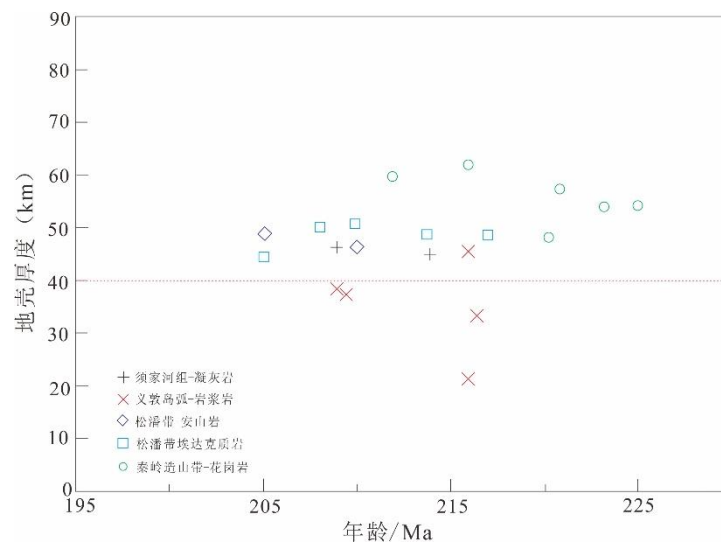


图 10 地壳厚度与锆石年龄关系图

义敦岛弧岩浆岩数据引自文献(施洛, 2017), 松潘安山岩和埃达克质岩数据引自文献(蔡宏明, 2010; 李成祥等, 2023; 王鹏等, 2023), 秦岭花岗岩数据引自文献(弓虎军等, 2009; 刘巍等, 2020)

Fig.10 Relationship between crustal thickness and zircon age

Data for Yidun Island Arc magmatic rocks from reference (Shi, 2017); data for Songpan andesite and adakitic rocks from references (Cai, 2010; Li *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023); data for Qinling granites from references (Gong *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020)

5.3 凝灰岩源区火山活动分析

火山活动与构造作用密切相关, 而岩样地球化学特征的变化也与构造作用环境相关。因此, 可以通过分析岩样的地化特征来解释构造环境的变化, 进而分析火山活动特征(王建强等, 2017)。高场强元素 Ta 可用于指示俯冲作用、地幔熔融深度和构造环境, 而大离子亲石元素 Th 则用于判别岩浆源区和壳幔相互作用。根据敦岛弧岩浆岩、松潘—甘孜地体安山岩以及秦岭造山带花岗岩和研究区须家河组凝灰岩的相关地化特征, 建立 Th/Ta 与 Yb 图解(图 11a)和 Th/Yb 与 Ta/Yb 图解(图 11b)。结果显示, 须家河凝灰岩样品全部落入两幅图解的活动大陆边缘, 而松潘—甘孜地体安山岩大部分同样也落入图解的活动大陆边缘。虽然本文松潘—甘孜地体构造环境表现为活动大陆边缘(王国灿和张攀, 2019), 但其并不是由单一构造活动形成的地质体, 实际上是由古特提斯大洋和周缘以陆壳为基底的前陆盆地两部分构成。松潘—甘孜地体的主体部分为古特提斯大洋, 主要由增生楔杂岩组成, 上部发育以安山岩为主的增生弧, 部分地区还残留着古特提斯洋盆和洋壳残片。而周缘前陆盆地为秦岭弧地体与扬子地块相互碰撞形成的产物(夏磊等, 2017)。因此, 与松潘—甘孜地体晚三叠世的安山岩同一期中性—中酸性的岩浆活动形成的火山灰在川西前陆盆地沉积形成凝灰岩。

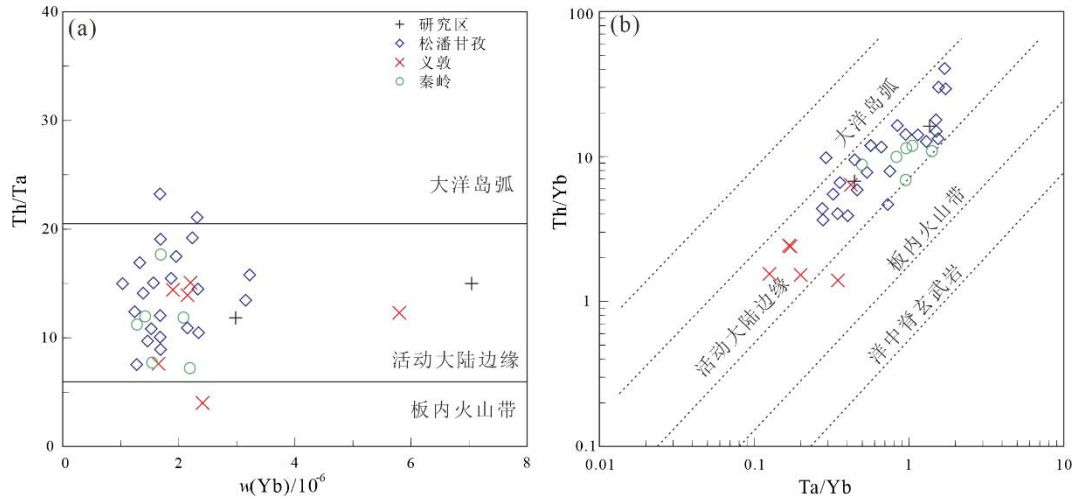


图 11 构造环境判定图 (据 Gorton and Schandl, 2000 修改)

(a) Th/Ta- $w(Yb)$ 判定图; (b) Th/Yb-Ta/Yb 判定图; 松潘岩体数据引自文献 (蔡宏明, 2010; Yuan *et al.*, 2010; 王鹏等, 2023), 义敦岛弧岩体数据引自文献 (施洛, 2017), 秦岭岩体数据引自文献 (弓虎军等, 2009; 刘巍等, 2020)

Fig.11 Tectonic environment determination diagram modified after (Gorton and Schandl, 2000)

(a) Th/Ta vs. $w(Yb)$ determination diagram; (b) Th/Yb vs. Ta/Yb determination diagram; data for Songpan rock mass from references (Cai, 2010; Yuan *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2023); data for Yidun Island Arc rock mass from reference (Shi, 2017); data for Qinling rock mass are cited from references (Gong *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2020)

综上所述, 在诺利晚期—瑞替早期, 松潘—甘孜地体向义敦岛弧和南秦岭造山带发生双向俯冲 (图 12), 同时发生岩石圈的拆沉作用, 地幔软流圈物质发生上涌 (曹锦山等, 2025)。之后, 松潘—甘孜地体的岩石圈完全拆沉, 此时构造背景为伸展构造 (周玉等, 2019), 地幔软流圈物质进一步发生上涌, 同时, 岩石圈地幔部分发生熔融形成火山岩。

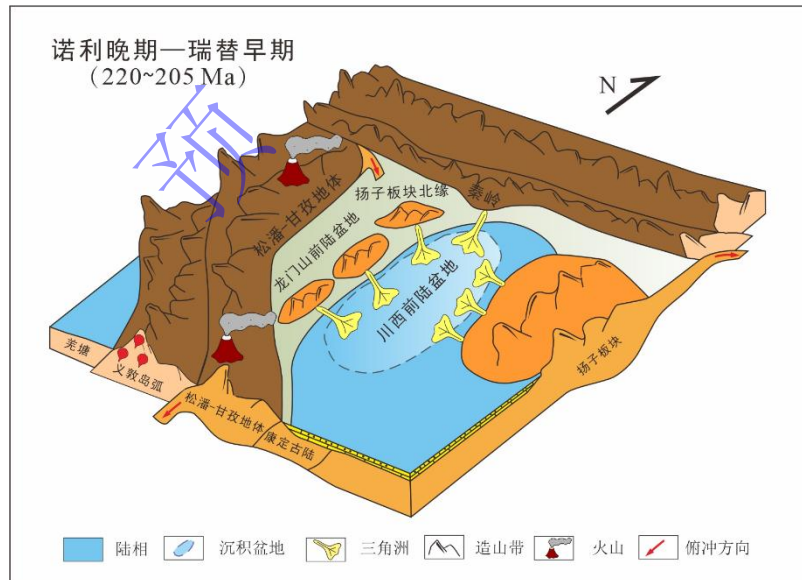


图 12 扬子板块西缘晚三叠世构造演化模式图 (据 Gou *et al.*, 2024 修改)

Fig.12 Tectonic evolution model of the western margin of the Yangtze Plate in the Upper Triassic (modified from Gou *et al.*, 2024)

6 结论

(1) 川西前陆盆地鸡冠山剖面须家河组凝灰岩源岩为粗面安山岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明其沉积年龄为 (208.5 ± 1.4) Ma 和 (213.5 ± 1.1) Ma。

(2) 须家河组凝灰岩全岩主、微量元素以及锆石微区元素等综合分析表明, 川西前陆盆地鸡冠山剖面须家河组凝灰岩的火山物质与松潘—甘孜地体的晚三叠统安山岩来源于同一期岩浆活动。

(3) 结合区域构造演化过程分析, 发现松潘—甘孜地体晚三叠世的火山作用与其双向俯冲有关, 其火山作用主要集中在诺利晚期—瑞替早期 ($220 \sim 205$ Ma), 两套火山灰在川西前陆盆地须家河组沉积并保存下来。

参考文献 (References)

- 薄尚尚, 田继先, 李曜良, 等. 2024. 川东北地区上三叠统须家河组物源分析[J]. 岩性油气藏, 36(2): 99-112. [Bo Shangshang, Tian Jixian, Li Yaoliang, et al. 2024. Provenance analysis of Upper Triassic Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 36(2): 99-112.]
- 蔡宏明, 张宏飞, 徐旺春, 等. 2010. 松潘带印支期岩石圈拆沉作用新证据: 来自火山岩岩石成因的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 40(11): 1518-1532. [Cai Hongming, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, et al. 2010. Petrogenesis of Indosinian volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt of the northeastern Tibetan Plateau: New evidence for lithospheric delamination[J]. Science China Earth Sciences, 40(11): 1518-1532.]
- 蔡宏明. 2010. 松潘—甘孜褶皱带印支期花岗岩类和火山岩类成因及深部作用[D]. 武汉: 中国地质大学, 5-53. [Cai Hongming. 2010. Petrogenesis of Indosinian granitoids and volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt: Constrains for deep geologic processes[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 5-53.]
- 曹锦山, 张新远, 欧阳光文, 等. 2025. 松潘—甘孜造山带南缘青海省秋智地区晚三叠世花岗岩体成因及构造背景[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 55(2): 483-502. [Cao Jinshan, Zhang Xinyuan, Ouyang Guangwen, et al. 2025. Petrogenesis and tectonic setting of Late Triassic granites in Qiuzhi area, Qinghai province, southern margin of Songpan-Garze orogenic belt[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 55(2): 483-502.]
- 陈杨. 2011. 川西晚三叠世前陆盆地的形成演化过程及油气勘探意义[D]. 成都: 成都理工大学, 41-64. [Chen Yang. 2011. The Formation of western Sichuan foreland basin and its significance in oil-gas exploration during Late Triassic[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 41-64.]
- 陈俞超, 金鑫, 张云望, 等. 2024. 川东北须家河组凝灰岩形成时代及其物源区研究[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版). <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20240913.1425.004>. [Chen Yuchao, Jin Xin, Zhang Yunwang, et al. 2024. Investigating the age and origin of tuff from the Xujiache Formation, northeast of Sichuan Basin[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20240913.1425.004>.]
- 弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(2): 248-264. [Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, et al. 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shahewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 248-264.]
- 何登发, 管树巍, 张水昌, 等. 2016. 上扬子克拉通北部晚古生代—中三叠世大陆边缘盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 51(2): 329-353. [He Dengfa, Guan Shuwei, Zhang Shuichang, et al. 2016. Formation and evolution of Later Paleozoic-Middle Triassic passive continental margin basin in the north part of Upper Yangtze Craton[J]. Chinese Journal of Geology, 51(2): 329-353.]
- 吉让寿, 秦德余, 高长林. 1990. 古东秦岭洋关闭和华北与扬子两地块拼合[J]. 石油实验地质, 12(4): 353-365. [Ji Rangshou, Qin Deyu, Gao Changlin. 1990. Closing of eastern Qinling palaeocean and collaging between the North China and Yangtze blocks[J].

Experiment Petroleum Geology, 12(4): 353-365.]

李成祥, 曾小慧, 周虎, 等. 2023. 巴颜喀拉中部三叠纪花岗岩类的岩石成因及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 47(6): 1413-1429. [Li Chengxiang, Zeng Xiaohui, Zhou Hu, et al. 2023. Petrogenesis and geological significance of Triassic granites in the central Bayanhar[J]. Geotectonica et Metallogenia, 47(6): 1413-1429.]

李洪奎, 李忠权, 龙伟, 等. 2019. 四川盆地纵向结构及原型盆地叠合特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(3): 257-267. [Li Hongkui, Li Zhongquan, Long Wei, et al. 2019. Vertical configuration of Sichuan Basin and its superimposed characteristics of the prototype basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 46(3): 257-267.]

李祥辉, 王成善, 刘树根, 等. 2016. 松潘—甘孜褶皱带复理石火山岩夹层时代及其地质意义[J]. 地质通报, 35(6): 879-886. [Li Xianghui, Wang Chengshan, Liu Shugen, et al. 2016. Chronology of the volcanic rock intercalations within the flysch of the Songpan-Ganzi folded belt and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 35(6): 879-886.]

李勇, 贺佩, 颜照坤, 等. 2010. 晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(4): 401-411. [Li Yong, He Pei, Yan Zhaokun, et al. 2010. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(4): 401-411.]

李勇, 苏德辰, 董顺利, 等. 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[J]. 岩石学报, 27(8): 2413-2422. [Li Yong, Su Dechen, Dong Shunli, et al. 2011. The recognition of the basal unconformity in the Longmenshan foreland Basin: Transition from passive continent margin to foreland Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2413-2422.]

李勇, 颜照坤, 苏德辰, 等. 2014. 印支期龙门山造山楔推进作用与前陆型礁滩迁移过程研究[J]. 岩石学报, 30(3): 641-654. [Li Yong, Yan Zhaokun, Su Dechen, et al. 2014. The advance of Longmen Shan orogenic wedge and migration of the foreland reef and shoal during the Indosinian orogeny, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 641-654.]

刘树根, 李智武, 曹俊兴, 等. 2009. 龙门山陆内复合造山带的四维结构构造特征[J]. 地质科学, 44(4): 1151-1180. [Liu Shugen, Li Zhiwu, Cao Junxing, et al. 2009. 4-D textural and structural characteristics of Longmen intracontinental composite orogenic belt, southwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 44(4): 1151-1180.]

刘巍, 郭丽爽, 廖延福, 等. 2020. 西秦岭中生代花岗岩锆石 U-Pb-Lu-Hf 同位素特征及地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 56(3): 436-448. [Liu Wei, Guo Lishuang, Liao Yanfu, et al. 2020. Zircon U-Pb-Lu-Hf isotopic characteristics and geological implications of Mesozoic granites in western Qinling[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 56(3): 436-448.]

卢雨潇, 杨经绥, 许志琴, 等. 2022. 甘孜—理塘洋可能存在北向俯冲: 来自松潘—甘孜道孚—炉霍岩浆岩的证据[J]. 地质学报, 96(7): 2380-2402. [Lu Yuxiao, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. 2022. Possible northward subduction in the Ganzi-Litang ocean: Evidence from Dawu-Luhuo magmatic rocks in the Songpan-Ganzi orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 96(7): 2380-2402.]

罗良, 漆家福, 张明正. 2015. 四川盆地周缘冲断带构造演化及变形差异性研究[J]. 地质论评, 61(3): 525-535. [Luo Liang, Qi Jiafu, Zhang Mingzheng. 2015. Difference study on evolution and deformation of the fold-thrust belts surrounding Sichuan Basin[J]. Geological Review, 61(3): 525-535.]

冉波, 刘树根, 李智武, 等. 2016. 川西须家河组火山岩夹层时代及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(6): 727-736. [Ran Bo, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. 2016. Chronology of the pyroclastic layer from Xujiache Formation in the western Sichuan Basin and its geological significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(6): 727-736.]

施铭. 2017. 义敦岛弧带中生代岩浆岩锆石铪同位素特征[D]. 成都: 成都理工大学, 13-67. [Shi Ming. 2017. Isotopic characteristics and sources of zirconium heteriasis in Mesozoic magmatic rocks of Yidun Island[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 13-67.]

时章亮, 张宏飞, 蔡宏明. 2009. 松潘造山带马尔康强过铝质花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 34(4): 569-584. [Shi Zhangliang, Zhang Hongfei, Cai Hongming. 2009. Petrogenesis of strongly peraluminous granites in Markan area, Songpan fold belt and its tectonic implication[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 34(4): 569-584.]

田和明, 代世峰, 李大华, 等. 2014. 重庆南川晚二叠世凝灰岩的元素地球化学特征[J]. 地质论评, 60(1): 169-177. [Tian Heming, Dai Shifeng, Li Dahua, et al. 2014. Geochemical features of the Late Permian tuff in Nanchuan district, Chongqing, southwestern

China[J]. Geological Review, 60(1): 169-177.]

王国灿, 张攀. 2019. 蛇绿混杂岩就位机制及其大地构造意义新解: 基于残余洋盆型蛇绿混杂岩构造解析的启示[J]. 地球科学, 44(5): 1688-1704. [Wang Guocan, Zhang Pan. 2019. A new understanding on the emplacement of ophiolitic mélanges and its tectonic significance: Insights from the structural analysis of the remnant oceanic Basin-type ophiolitic mélanges[J]. Earth Science, 44(5): 1688-1704.]

王建强, 刘池洋, 李行, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地南部延长组长 7 段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. 沉积学报, 35(4): 691-704. [Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Li Hang, et al. 2017. Geochronology, potential source and regional implications of tuff intervals in Chang-7 member of Yanchang Formation, South of ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 35(4): 691-704.]

王鹏, 白建科, 王雁鹤, 等. 2023. 松潘-甘孜地块中西部晚三叠纪花岗岩体成因及其构造意义[J]. 西北地质, 56(5): 223-244. [Wang Peng, Bai Jianke, Wang Yanhe, et al. 2023. Petrogenesis and tectonic implication of Late-Triassic granitoids in the west-central part of Songpan-Ganze block[J]. Northwestern Geology, 56(5): 223-244.]

王平, 陈玺赞, 朱龙辰, 等. 2022. 碎屑锆石 U-Pb 年代学定量物源分析的基本原理与影响因素: 以现代河流砂为例[J]. 沉积学报, 40(6): 1599-1614. [Wang Ping, Chen Xiyun, Zhu Longchen, et al. 2022. Principles and biases of quantitative provenance analysis using detrital zircon U-Pb geochronology: Insight from modern river sands[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(6): 1599-1614.]

王永栋, 付碧宏, 谢小平, 等. 2010. 四川盆地陆相三叠系与侏罗系[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. [Wang Yongdong, Fu Bihong, Xie Xiaoping, et al. 2010. The Terrestrial Triassic and Jurassic Systems in the Sichuan Basin, China[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press.]

吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220. [Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, et al. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185-220.]

夏磊, 闫全人, 向忠金, 等. 2017. 松潘-甘孜地块中部晚三叠世安山质增生弧的确定及其意义[J]. 岩石学报, 33(2): 579-604. [Xia Lei, Yan Quanren, Xiang Zhongjin, et al. 2017. Late Triassic andesitic accretionary arc in the central Songpan-Ganzi terrane and its tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(2): 579-604.]

许志琴, 杨经绥, 李化启, 等. 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. 岩石学报, 28(6): 1697-1709. [Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Huaqi, et al. 2012. Indosinian collision-orogenic system of Chinese continent and its orogenic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1697-1709.]

张成立, 王晓霞, 王涛, 等. 2009. 东秦岭沙河湾岩体成因: 来自锆石 U-Pb 定年及其 Hf 同位素的证据[J]. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 453-465. [Zhang Chengli, Wang Xiaoxia, Wang Tao, et al. 2009. Origin of Shahewan granite intrusion in eastern Qinling: Evidences from zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 39(3): 453-465.]

郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征[J]. 地质论评, 55(4): 484-495. [Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. 2009. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 55(4): 484-495.]

周玉, 周雄, 张贻, 等. 2019. 川西长征穹窿高分异花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征: 对区域稀有金属成矿背景的限定[J]. 矿床地质, 38(4): 815-836. [Zhou Yu, Zhou Xiong, Zhang Yi, et al. 2019. Geochemistry, zircon geochronology and Lu-Hf isotopic characteristics of highly fractionated granite from Changzheng dome in western Sichuan and their constraint on mineralization setting of rare metal deposit[J]. Mineral Deposits, 38(4): 815-836.]

Chen J L, Xu J F, Ren J B, et al. 2017. Late Triassic E-MORB-like basalts associated with porphyry Cu-deposits in the southern Yidun continental arc, eastern Tibet: Evidence of slab-tear during subduction?[J]. Ore Geology Reviews, 90: 1054-1062.

Deschamps F, Duchêne S, de Sigoyer J, et al. 2017. Coeval mantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Ganze accretionary orogenic wedge (SW China)[J]. Journal of Petrology, 58(11): 2221-2256.

Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41(3): 213-237.

Gorton M P, Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. The Canadian Mineralogist, 38(5): 1065-1073.

- Gou M X, Lu G, Deng B, et al. 2024. Tectonic-paleogeographic evolution of the Late Triassic in the Sichuan Basin, SW China: Constraints from sedimentary facies and provenance analysis of the Xujiahe Formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 160: 106649.
- Jiang Z R, Ran B, Li Z W, et al. 2023. A Late Triassic depositional age for the Xujiahe Formation, Sichuan Basin: Implications for the closure of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 155: 106346.
- Jin X, Franceschi M, Martini R, et al. 2022. Eustatic sea-level fall and global fluctuations in carbonate production during the Carnian Pluvial Episode[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 594: 117698.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1-70.
- Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, et al. 2015. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs[J]. *Scientific Reports*, 5: 17786.
- Reid A, Wilson C J L, Shun L, et al. 2007. Mesozoic plutons of the Yidun Arc, SW China: U/Pb geochronology and Hf isotopic signature[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1/2/3/4): 88-106.
- 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.
- Tan X C, Xia Q S, Chen J S, et al. 2013. Basin-scale sand deposition in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan Basin, Southwest China: Sedimentary framework and conceptual model[J]. *Journal of Earth Science*, 24(1): 89-103.
- Yuan C, Zhou M F, Sun M, et al. 2010. Triassic granitoids in the eastern Songpan Ganzi Fold Belt, SW China: Magmatic response to geodynamics of the deep lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(3/4): 481-492.
- Zhan Q Y, Zhu D C, Wang Q, et al. 2018. Constructing the eastern margin of the Tibetan Plateau during the Late Triassic[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12): 10449-10459.

Dating Constraints on Coeval Magmatic Activity of Tuffs from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan, China

LIU ZhuoYang¹, LU Gang¹, TANG RuoChen¹, WANG ChangCheng¹, DENG Bin¹,
LIU ChongJiang¹, YANG RongJun², JIN Xin³

1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

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

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

Abstract: [Objective] The Upper Triassic epoch in the Western Sichuan Foreland Basin records a critical phase of the Indosinian Orogeny. The sedimentary strata formed during this period preserve the geological records of the tectonic evolution of the basin and contain key information about volcanic activity during that time. Analysis of the source materials of the tuff provides important information about the tectonic-magmatic activity patterns of the surrounding orogenic belts during the orogeny. [Methods] Tuff samples from the Xujia Formation in the

Jiguan Mountain section of the Western Sichuan Foreland Basin were selected as the research object. A combination of petrological analysis, geochemical characteristic analysis and zircon U-Pb isotopic dating techniques revealed the sedimentation age of the tuff layer and the source of its magma. **[Results]** Zircon U-Pb dating yielded ages of 213.5 Ma and 208.5 Ma, corresponding to the Upper Triassic Norian and Rhaetian stages. The rare earth element (REE) patterns of the tuffaceous rocks exhibit a right-trending distribution characterized by enriched light rare earth elements (LREEs) and relatively flat-line for heavy rare earth elements (HREEs), along with pronounced negative Eu anomalies. Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams show enrichment in large-ion lithophile elements (LILEs, e.g., Rb, Ba) and depletion in high-field-strength elements (HFSEs, e.g., Ta), consistent with the geochemical signatures of continental lower crust. Zircon Hf isotopic data indicate that the magmas originated from a mixture of crustal contamination and depleted mantle sources. **[Conclusion]** Building upon this foundation, and considering the regional distribution and formation age of Upper Triassic igneous rocks at the periphery of the Western Sichuan Foreland Basin, together with the geochemical characteristics of magmatic rocks, it was concluded that the volcanic tuff shares a common magmatic origin with the Upper Triassic andesite of the Songpan-Ganzi terrane. This magmatic activity is closely associated with the melting of continental crust due to bidirectional plate subduction.

Key words: western Sichuan foreland basin; Xujiahe Formation; tuff; zircon U-Pb dating; geochemical characteristics