DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510170107

川北松潘—甘孜盆地东缘晚三叠世物源与秦岭隆升——来自碎屑锆石和地球化学的约束

王一伟，陈永东*，凌 强，罗绍强，刘增达，徐 刚，唐 华，徐 琳

（四川省第十地质大队，四川 绵阳 621000）

摘要：限定松潘—甘孜盆地东缘在晚三叠世的构造属性及物源体系转换，是理解秦岭—松潘构造带演化的关键。本次对松潘—甘孜盆地东缘松潘县尼翁地区新都桥组碎屑岩进行碎屑锆石 U-Pb 定年与地球化学分析，以限定其物源与构造背景。碎屑锆石 U-Pb 年龄谱主要显示 2466 Ma、1886 Ma、924 ~ 809 Ma 和 435 Ma 四个峰值，综合表明其物源为华北板块南缘、北秦岭造山带及扬子板块北缘古老基底的多元混合。地球化学成分进一步揭示物源以上地壳长英质岩石为主，沉积于大陆岛弧与活动大陆边缘相结合的构造背景。最年轻的锆石加权平均年龄（287 ± 5）Ma 及缺乏二叠纪至三叠纪碎屑记录，限定了北秦岭造山带在晚三叠世已发生显著隆升并成为沉积屏障。本研究揭示了松潘—甘孜东缘晚三叠世多向物源汇聚的复杂过程，为重塑该时期盆地—造山带的耦合演化机制提供了关键的年代学与地球化学约束。

关键词：新都桥组；物源；构造背景；锆石 U-Pb；地球化学

中图分类号：P542；P512. 2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)02-0329-16

Late Triassic Provenance and Qinling Orogen Uplift along the Eastern Margin of the Songpan-Ganzi Basin, Northern Sichuan —Constraints from Detrital Zircon and Geochemistry

WANG Yiwei, CHEN Yongdong*, LING Qiang, LUO Shaoqiang, LIU Zengda, XU Gang, TANG Hua, XU Lin

(*The 10th Geological Brigade of Sichuan, Mianyang, Sichuan* 621000, *China*)

Abstract: Defining the tectonic attributes and provenance system transformation of the eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin during the Late Triassic is the key to understanding the evolution of the Qinling-Songpan tectonic belt. In this study, detrital zircon U-Pb dating and geochemical analysis were carried out on clastic rocks of the Xinduqiao Formation in the Niong area of Songpan County, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin, to constrain its provenance and tectonic setting. The detrital zircon U-Pb age spectra mainly show four age peaks at 2,466 Ma, 1,886 Ma, 924 - 809 Ma and 435 Ma, which comprehensively indicate that the provenance is a multi-source mixture of the southern margin of the North China Block, the North Qinling Orogenic Belt and the ancient basement of the northern margin of the Yangtze Block. Geochemical data further reveal that the provenance is dominated by upper crustal felsic rocks, and the

收稿日期：2025-10-17；**修回日期：**2026-03-20；**编辑：**赵宇。

基金项目：四川省地质局地质矿产专项项目（DZ-DZKC202408）；四川省地质局科技专项项目（SCDZ-KJXM202515）。

作者简介：王一伟，男，硕士研究生，高级工程师，1985 年出生，主要从事区域地质调查及矿产勘查工作。Email：190636690@qq. com。

***通信作者：**陈永东，男，高级工程师，1985 年出生，主要从事区域地质调查及矿产勘查工作。Email：4l8l68l24@qq. com。

引用格式：王一伟，陈永东，凌强，等. 川北松潘—甘孜盆地东缘晚三叠世物源与秦岭隆升——来自碎屑锆石和地球化学的约束［J］. 现代地质，2026，40（2）：329-344. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510170107.

WANG Yiwei, CHEN Yongdong, LING Qiang, et al. Late Triassic Provenance and Qinling Orogen Uplift along the Eastern Margin of the Songpan-Ganzi Basin, Northern Sichuan—Constraints from Detrital Zircon and Geochemistry ［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40 (2): 329-344. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202510170107.

sediments were deposited in a tectonic setting combining a continental island arc and an active continental margin. The weighted mean age of the youngest zircons population (287 ± 5) Ma, together with the absence of Permian to Triassic detrital records, indicates that the North Qinling Orogenic Belt had undergone significant uplift and become a sedimentary barrier during the Late Triassic. This study reveals the complex process of multi-directional provenance convergence in the eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin during the Late Triassic, and provides key chronological and geochemical constraints for reconstructing the coupling evolution mechanism of the basin-orogen system during this period.

Key words: Xinduqiao Formation; provenance; tectonic setting; zircon U-Pb; geochemistry

0 引 言

松潘—甘孜盆地作为青藏高原东缘的关键构造单元，记录了华北板块、扬子板块与羌塘块体碰撞拼贴的复杂过程[1]，其巨厚的中生代浅变质碎屑岩地层不仅是造山带与盆地耦合的纽带，更蕴含了古特提斯洋闭合、陆内造山及多期构造热事件的重要信息[2]。近年来，学者们通过碎屑锆石U-Pb年代学、岩石地球化学及沉积学方法，对盆地碎屑岩沉积时代、物源及构造属性展开深入研究[1-7]：秦宇龙等[1]揭示盆地南部晚三叠统碎屑锆石年龄谱存在1850 ~ 1539 Ma（华北克拉通）、983 ~ 707 Ma（扬子板块）、502 ~ 424 Ma（北秦岭）及281 ~ 231 Ma（东昆仑）多期年龄峰；Gong等[3]提出盆地中南部西康群物源涵盖秦岭—大别造山带、华北地块、东昆仑及羌塘地块，属典型的多源混杂体系；袁彦伟等[4]指出盆地中部晚三叠世沉积物主要接收东昆仑与北秦岭的陆壳物质；刘大明等[2]和周雄等[5]通过岩石学、地球化学研究，认为盆地南部晚三叠世碎屑岩来源于活动大陆边缘，物源区可能与康滇古陆、西昆仑、扬子地块西缘有关；刘祥等[6]研究认为南部沉积区西康群物源与华南板块和义敦地体有密切关联。

前人研究表明，甘孜—松潘盆地晚三叠统沉积物具有多向物源特性[7-9]，以往研究主要集中在盆地的中部和南部碎屑岩沉积区，对盆地东缘沉积区研究薄弱，盆地东缘晚三叠世物源特征缺乏系统研究，鲜少报道。考虑到松潘—甘孜盆地是一个超过25万 km^2的大型复理石盆地，跨度大。盆地中心区域和边缘区域的沉积物岩性组合、地层厚度、物质来源存在较大的差异，不同沉积区受到多个物源区共同输入，也存在物源差异。松潘—甘孜盆地东缘紧邻秦岭造山带与龙门山构造带，处于多陆块汇聚的关键构造部位，其沉积记录不仅响应秦岭晚三叠世隆升过程，还可能记录了龙门山初始隆升的物源信号，是揭示盆地—造山带耦合演化的关键窗口。基于上述分析，本研究选取松潘—甘孜盆地东缘松潘县尼翁地区晚三叠世新都桥组为研究对象，通过碎屑锆石U-Pb年龄、全岩岩石地球化学分析，开展系统物源研究，探讨晚三叠世新都桥组物源组成与构造控制，为盆山转换提供依据。

1 地质背景

松潘—甘孜造山带东接龙门山断裂带，北邻阿尼玛卿—勉略缝合带，西南以金沙江缝合带为界，构成扬子板块、华北板块与羌塘块体的三向汇聚区[10]。研究区位于造山带东缘松潘地区（图1），属巴颜喀拉地层区金川小区，区域上三叠世地层序列完整，依次出露菠茨沟组（T_1b）杂色板岩与薄层灰岩、三叠系杂谷脑组（$T_{1-2}z$）岩屑长石石英砂岩、侏倭组（T_3zw）砂岩与粉砂质板岩、新都桥组（T_3xd）板岩。新都桥组产双壳类化石 *Halobia* cf. *yunnanensis*，*H. convexa*，*H.* cf. *pluriradiata*，*H. substyriaca*，*H.* cf. *vietnamica*，*Posidonia* cf. *bittneri* 以及丝状藻、球粒藻等微古植物化石[11]，其时代属晚三叠世瑞替期。

研究区新都桥组划分为3个岩性段（图2）。第一岩性段为粉砂质板岩夹钙质石英砂岩，岩性以黄灰色粉砂质板岩为主（图3（a）），次为黄灰色—青灰色薄层状钙质石英砂岩，夹少量含碳泥质板岩；粉砂质板岩具强揉皱特征，砂岩局部铁质含量较高，岩石滴加5 %稀盐酸起泡剧烈，局部见钙质砂岩溶蚀后地表形成钙质泉华堆积，厚度253 m，与下伏侏倭组呈整合接触关系。第二岩性段为钙质石英砂岩夹粉砂质板岩（图3（b）-（c）），岩性组合以黄灰色钙质石英砂岩为主，次为粉砂质板岩，少量含碳泥质、砂质板岩；钙质砂岩局部自然裸露，微地貌形成陡崖或小山脊，厚度120 m。第三岩性段为粉砂质板岩夹钙质石英砂岩

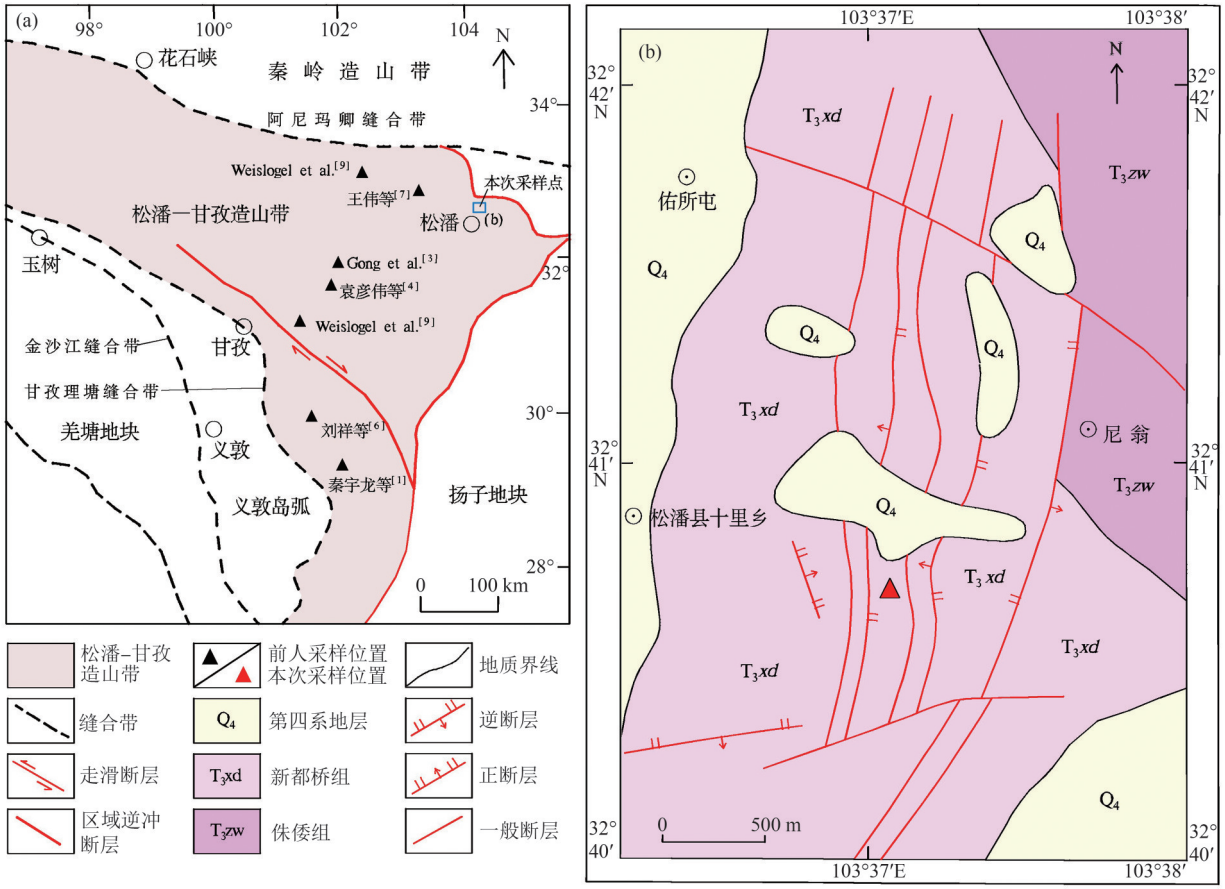


图 1　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区大地构造位置（a）（据刘祥等[6]修改）和地质简图（b）

Fig. 1　Tectonic location （a） （modified after Liu[6]） and simplified geological map （b） of the Niong area in the eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

（图3（d）），岩性组合以粉砂质板岩为主，次为黄灰色—青灰色薄层状钙质石英砂岩，夹少量含碳泥质板岩，研究区内未见顶，厚度大于210 m。

2　样品采集和分析

采样地点位于阿坝州松潘县尼翁矿区内（图1），对矿区出露的晚三叠世新都桥组采集了1件碎屑锆石U-Pb定年样品和15件微量元素分析样品，定年样坐标为103°37′9.8″，32°40′44.8″，样品岩性有粉砂质（碳质）板岩、变质钙质石英砂岩。采样时去除表面风化层，采集新鲜岩石，样品具有代表性。其中碎屑锆石U-Pb分析样品采自第二岩性段（图2），岩性为变质砂岩（图3（d）），具变余砂状结构及显微鳞片粒状变晶结构（图3（e）-（f）），块状构造，变余碎屑占比约75%，由石英、长石、岩屑组成，变晶矿物占比25%，由绢云母、铁白云石等组成；石英（60%）呈无色，压扁次棱角状、次圆状、棱角状，粒径为0.1～0.3 mm左右；长石（4%）呈无色，板状、次棱角状，粒径为0.1～0.3 mm，可见正长石、斜长石；岩屑（9%）一般有泥岩岩屑、绢云岩屑、板岩岩屑等；绢云母（5%）呈无色带灰色调，显微鳞片状，粒径为0.01～0.03 mm；铁白云石（15%）呈无色，半自形粒状或他形粒状，粒径为0.06～0.1 mm；方解石（3%）无色，他形粒状，粒径为0.03～0.06 mm，茜素红染红。

锆石矿物的分选与制靶在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成，样品的处理过程包括对样品进行清洗晾干，破碎至60～80目，通过重砂法分选获得锆石颗粒，在双目镜下挑选出晶形良好的锆石颗粒，用环氧树脂固定锆石颗粒，使用UNIPOL-1200M设备进行抛光处理，使用OLYMPUS CX43光学显微镜进行透反射拍照，使用TESCAN Mira3 LMH设备进行阴极发光拍照，最后完成锆石制靶工作。

锆石U-Pb定年在南京宏创地质勘查技术服务有限公司微区分析实验室完成，使用仪器型号是Agilent 8900型电感耦合等离子体质谱仪，产自美

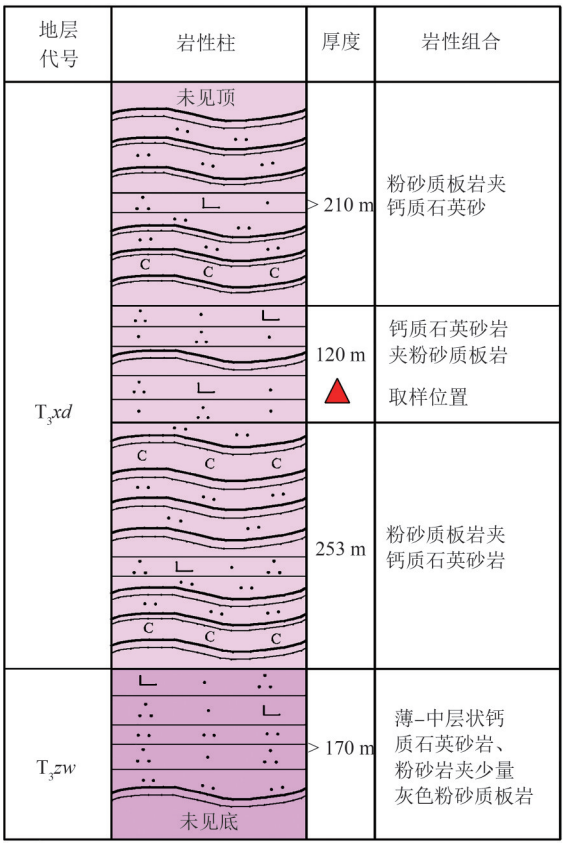


图2 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组地质剖面特征

Fig. 2 Characteristics of the geological section of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

国 Agilent Technologies 公司；激光剥蚀平台采用 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统，产自美国 Applied Spectra 公司。对锆石颗粒进行预处理，去除表面污染，之后在束斑直径 30 μm、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 3 J/cm^2 的激光条件下分析样品，获得初始锆石年龄数据。使用锆石 91500 作为校正标样，GJ-1 作为监测标样，对仪器和数据进行验证，本次实验过程中测定的 91500 校正标样年龄为（1061.5 ± 3.2） Ma，GJ-1 监测标样年龄为（604 ± 6）Ma，校正标样和监测标样所测年龄在不确定范围内与推荐值（1065.4 ± 0.6） Ma[12] 和（608.5 ± 1.5）Ma[13] 一致，因此，本次获得的年龄数据有效。在数据处理时，剔除谐和度小于 90% 的锆石年龄数据，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄大于等于 1000 Ma 的锆石采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄数据，年龄小于 1000 Ma 的锆石采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄数据。在 Excel 中采用 Isoplot 程序，生成锆石 U-Pb 年龄谐和图；在 IsoplotR 程序中完成锆石 KDE 图。

样品微量元素分析是在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。首先用球磨机将样品加工成 200 目粉末，型号是南大仪器 QM-QX 全方位行星式球磨机；微量元素采用酸溶消解 ICP-MS 内标法，稀土元素采用过氧化钠熔融—碱滤分离 ICP-MS 测定法，测量仪器是电感耦合等离子体质

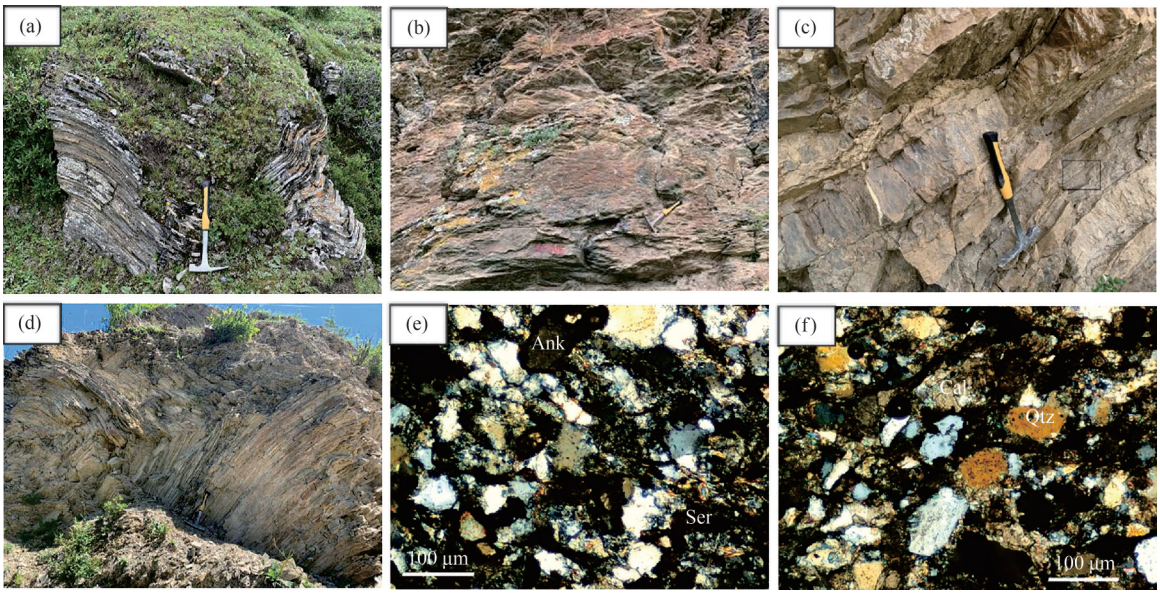


图3 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组岩石特征及其镜下照片（正交偏光）

Fig. 3 Petrological characteristics and microphotographs (cross-polarized light) of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

(a)第一岩性段板岩；(b)、(c)第二岩性段钙质砂岩及取样位置；(d)第三岩性段板岩；(e)、(f)变质砂岩显微镜下照片；Ank—铁白云石；Ser—绢云母；Cal—方解石；Qtz—石英

谱（美国 Agilent7900 ICP-MS 仪器）测定，精度 RSD < 3%。

3　测试结果

3.1　锆石形态及年龄特征

样品中碎屑锆石颗粒以次圆状、次棱角状为主，大部分锆石具有残缺、磨边痕迹，锆石长度 45 ~ 160 μm 不等。在透射光下呈灰白色、透明色居多，其次为浅褐色、黄绿色；在阴极发光图像（CL）中，大部分锆石具振荡环带特征，与岩浆成因锆石特征一致（图 4），少量锆石颗粒见裂隙和继承性锆石存在。

实验累计测试 100 点，其中 19 号锆石颗粒在后期的变质事件中发生过 Pb 丢失，22 号锆石颗粒谐和度太低（小于 90%），对物源分析无意义，本次碎屑锆石所测年龄数据有效点为 98 点，其结果见表 1 。锆石 w（Th）为 9.52×10^{-6} ~ 434.18×10^{-6}，w（U）为 31.12×10^{-6} ~ 1397.25×10^{-6}，Th/U 比值范围在 0.03 ~ 1.62 之间。通常来说，岩浆成因锆石 Th/U 值普遍大于 0.4，变质成因锆石

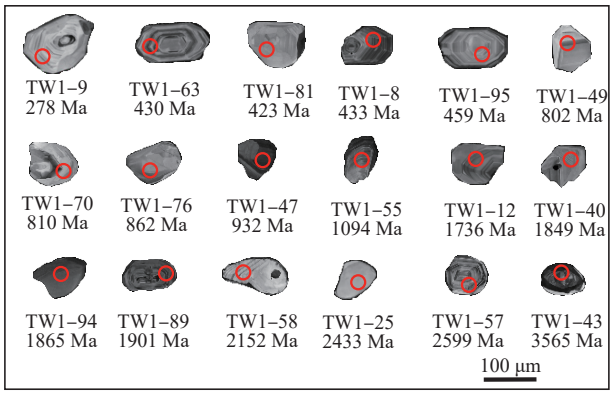


图 4　代表性碎屑锆石颗粒阴极发光（CL）图像

Fig. 4　Cathodoluminescence （CL） images of representative detrital zircon grains

Th/U 值小于 0.1，获得新都桥组碎屑锆石 Th/U 值小于 0.1 的有 4 颗（TW1-3、TW1-52、TW1-78、TW1-98），Th/U 值大于 0.1 的锆石有 94 颗（表 1），占比 96%；碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化曲线为左倾斜，表现为 LREE 亏损、HREE 富集、负 Eu 异常和正 δCe 异常（图 5），绝大多数的锆石显示岩浆成因特征。

表 1　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组碎屑锆石 U-Pb 同位素定年结果

Table 1　U-Pb isotopic dating results of detrital zircons from the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

点号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值及误差						t/Ma					
	Pb	^{232}Th	^{238}U		^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ
TW1-1	180.00	77.04	504.82	0.15	5.5409	0.0724	0.3424	0.0040	0.1165	0.0007	1905	11	1897	19	1902	11
TW1-2	117.60	107.39	277.75	0.39	5.4625	0.0252	0.3414	0.0011	0.1147	0.0005	1895	4	1893	5	1872	8
TW1-3	90.56	16.79	531.53	0.03	1.5196	0.0095	0.1557	0.0007	0.0699	0.0004	937	4	933	4	922	12
TW1-4	78.90	155.83	352.01	0.44	1.9458	0.0127	0.1845	0.0007	0.0756	0.0005	1096	4	1092	4	1080	14
TW1-5	41.19	238.60	184.83	1.29	1.4418	0.0147	0.1513	0.0007	0.0683	0.0007	904	6	908	4	872	20
TW1-6	147.40	134.33	291.04	0.46	6.9332	0.0557	0.3838	0.0018	0.1294	0.0008	2101	7	2094	9	2086	11
TW1-7	79.04	53.69	352.49	0.15	2.1816	0.0189	0.1981	0.0008	0.0791	0.0007	1174	6	1165	4	1166	18
TW1-8	51.21	434.18	557.72	0.78	0.5363	0.0051	0.0696	0.0003	0.0557	0.0005	435	3	433	2	422	21
TW1-9	4.28	49.09	76.64	0.64	0.3350	0.0108	0.0440	0.0004	0.0559	0.0019	291	8	278	2	224	87
TW1-10	111.29	138.75	180.45	0.77	10.1942	0.0759	0.4626	0.0024	0.1592	0.0012	2451	7	2451	11	2443	12
TW1-11	148.55	51.24	386.14	0.13	5.5396	0.0401	0.3449	0.0021	0.1161	0.0006	1908	6	1910	10	1894	10
TW1-12	98.46	141.85	248.48	0.57	4.5206	0.0280	0.3076	0.0011	0.1066	0.0006	1733	5	1729	5	1736	11
TW1-13	132.90	91.39	311.59	0.29	5.2790	0.0368	0.3363	0.0016	0.1144	0.0008	1864	6	1868	8	1870	11
TW1-14	21.30	21.91	72.15	0.30	2.7434	0.0445	0.2341	0.0019	0.0858	0.0014	1335	12	1355	10	1322	30
TW1-15	42.45	30.06	93.99	0.32	5.3512	0.0899	0.3422	0.0023	0.1147	0.0019	1873	14	1897	11	1864	30
TW1-16	9.53	78.94	91.71	0.86	0.5533	0.0215	0.0721	0.0007	0.0559	0.0021	442	14	449	4	356	85
TW1-17	28.77	146.75	144.87	1.01	1.3118	0.0187	0.1388	0.0007	0.0689	0.0010	847	8	838	4	862	31
TW1-18	644.93	120.86	1212.01	0.10	9.1222	0.0333	0.4231	0.0017	0.1577	0.0004	2351	4	2274	8	2429	4
TW1-20	55.66	279.04	329.43	0.85	1.1428	0.0101	0.1271	0.0005	0.0652	0.0006	774	5	771	3	770	19
TW1-21	35.69	315.77	416.99	0.76	0.5433	0.0083	0.0700	0.0004	0.0562	0.0007	440	5	436	3	443	29
TW1-23	22.31	21.03	53.25	0.39	5.3752	0.0582	0.3373	0.0017	0.1155	0.0012	1875	9	1873	8	1871	20
TW1-24	19.15	136.74	181.78	0.75	0.6079	0.0113	0.0769	0.0005	0.0576	0.0011	482	7	478	3	460	43
TW1-25	71.14	55.49	129.87	0.43	9.2525	0.0480	0.4229	0.0016	0.1582	0.0008	2362	5	2273	7	2433	8

（续）表1 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组碎屑锆石U-Pb同位素定年结果

（Continued）Table 1 U-Pb isotopic dating results of detrital zircons from the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

点号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值及误差						*t*/Ma					
	Pb	^{232}Th	^{238}U		^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ
TW1-26	17.73	83.56	240.32	0.35	0.5115	0.0127	0.0669	0.0006	0.0552	0.0013	417	9	417	4	389	53
TW1-27	38.61	84.12	94.38	0.89	4.6066	0.0563	0.3103	0.0020	0.1070	0.0012	1747	10	1742	10	1739	21
TW1-28	136.14	55.14	335.81	0.16	5.6155	0.0264	0.3487	0.0012	0.1160	0.0005	1918	4	1928	6	1892	8
TW1-29	130.86	433.60	267.81	1.62	4.5038	0.0267	0.3082	0.0011	0.1053	0.0005	1732	5	1732	6	1715	9
TW1-30	41.96	55.49	100.11	0.55	5.0251	0.0392	0.3256	0.0014	0.1112	0.0008	1821	7	1817	7	1811	13
TW1-31	102.71	64.61	261.74	0.25	5.2853	0.0277	0.3347	0.0013	0.1140	0.0006	1867	5	1861	6	1861	10
TW1-32	114.07	61.94	296.57	0.21	5.3377	0.0298	0.3389	0.0013	0.1134	0.0006	1874	5	1881	7	1855	9
TW1-33	36.02	275.96	369.76	0.75	0.5667	0.0086	0.0720	0.0003	0.0569	0.0008	455	6	448	2	467	31
TW1-34	64.75	126.45	293.81	0.43	1.8924	0.0123	0.1809	0.0006	0.0758	0.0005	1077	4	1072	3	1083	13
TW1-35	172.76	69.04	423.53	0.16	5.3616	0.0290	0.3367	0.0016	0.1154	0.0006	1878	5	1871	8	1883	9
TW1-36	75.27	92.06	163.54	0.56	5.5214	0.0424	0.3408	0.0015	0.1180	0.0009	1902	7	1890	7	1920	13
TW1-37	60.26	68.77	330.03	0.21	1.4865	0.0119	0.1547	0.0007	0.0699	0.0005	923	5	927	4	916	14
TW1-38	97.62	411.31	394.50	1.04	2.0151	0.0191	0.1877	0.0010	0.0782	0.0007	1119	7	1109	5	1146	18
TW1-39	56.42	103.91	118.32	0.88	6.3973	0.0672	0.3757	0.0030	0.1245	0.0013	2030	9	2055	14	2016	18
TW1-40	51.74	81.01	117.29	0.69	5.1495	0.0380	0.3314	0.0013	0.1135	0.0008	1842	6	1845	7	1849	13
TW1-41	19.80	207.82	209.41	0.99	0.5231	0.0091	0.0687	0.0003	0.0556	0.0010	425	6	428	2	395	40
TW1-42	92.00	230.55	426.76	0.54	1.5947	0.0145	0.1630	0.0007	0.0721	0.0006	967	6	973	4	984	17
TW1-43	863.89	266.35	899.43	0.30	31.9498	0.1731	0.7348	0.0040	0.3193	0.0011	3548	5	3550	15	3565	5
TW1-44	102.85	205.63	1397.25	0.15	0.5024	0.0036	0.0657	0.0003	0.0561	0.0004	413	2	410	2	447	15
TW1-45	59.97	126.69	178.31	0.71	3.2507	0.0206	0.2541	0.0009	0.0942	0.0006	1469	5	1459	5	1506	12
TW1-46	8.71	75.11	104.14	0.72	0.4395	0.0286	0.0600	0.0011	0.0552	0.0037	362	21	375	7	383	146
TW1-47	119.79	179.03	625.36	0.29	1.5190	0.0120	0.1556	0.0006	0.0717	0.0006	937	5	932	3	971	16
TW1-48	73.39	70.72	174.82	0.40	5.9798	0.0893	0.3534	0.0038	0.1238	0.0015	1971	13	1950	18	2008	22
TW1-49	34.34	140.11	199.54	0.70	1.2263	0.0118	0.1326	0.0006	0.0680	0.0007	811	5	802	3	847	21
TW1-50	75.05	217.29	282.02	0.77	2.1926	0.0157	0.2005	0.0009	0.0798	0.0006	1177	5	1178	5	1182	15
TW1-51	226.76	177.05	507.91	0.35	5.3119	0.0459	0.3393	0.0020	0.1152	0.0009	1870	7	1883	10	1881	14
TW1-52	18.69	13.07	241.74	0.05	0.5427	0.0074	0.0705	0.0004	0.0560	0.0008	439	5	439	2	421	31
TW1-53	58.14	151.98	144.88	1.05	3.9076	0.0303	0.2867	0.0012	0.0991	0.0007	1615	6	1625	6	1603	14
TW1-54	45.94	103.66	128.47	0.81	3.6826	0.0349	0.2776	0.0015	0.0968	0.0009	1567	7	1581	7	1558	16
TW1-55	20.83	85.24	79.08	1.08	1.8441	0.0839	0.1723	0.0027	0.0785	0.0035	1051	29	1025	15	1094	90
TW1-56	59.55	84.23	132.21	0.64	4.9709	0.0654	0.3222	0.0028	0.1122	0.0012	1816	10	1800	13	1828	20
TW1-57	114.80	63.64	177.68	0.36	12.1532	0.0596	0.5027	0.0018	0.1745	0.0007	2615	5	2625	8	2599	7
TW1-58	60.73	68.70	116.85	0.59	7.3585	0.0472	0.3956	0.0018	0.1345	0.0008	2154	6	2148	8	2152	10
TW1-59	42.40	141.68	144.61	0.98	2.2751	0.0421	0.2017	0.0015	0.0815	0.0015	1201	13	1184	8	1211	37
TW1-60	180.67	370.76	916.60	0.40	1.4855	0.0140	0.1530	0.0007	0.0705	0.0006	924	6	918	4	937	18
TW1-61	39.63	48.37	99.15	0.49	4.7119	0.0787	0.3106	0.0024	0.1092	0.0018	1766	14	1743	12	1774	30
TW1-62	202.75	68.67	329.13	0.21	10.6830	0.0499	0.4708	0.0018	0.1636	0.0007	2495	4	2487	8	2494	8
TW1-63	44.25	214.81	531.72	0.40	0.5330	0.0043	0.0691	0.0003	0.0557	0.0005	433	3	430	2	430	20
TW1-64	194.25	73.11	493.77	0.15	5.1479	0.0481	0.3286	0.0025	0.1127	0.0009	1843	8	1831	12	1841	15
TW1-65	115.95	202.81	163.26	1.24	10.3370	0.0890	0.4611	0.0037	0.1613	0.0013	2464	8	2444	16	2466	14
TW1-66	26.00	271.50	261.91	1.04	0.5457	0.0083	0.0706	0.0004	0.0556	0.0008	440	6	440	2	415	35
TW1-67	40.44	96.16	137.13	0.70	2.6227	0.0219	0.2254	0.0010	0.0844	0.0007	1305	6	1310	5	1289	16
TW1-68	69.06	163.16	364.94	0.45	1.6365	0.0108	0.1642	0.0006	0.0723	0.0004	986	4	980	3	991	12
TW1-69	4.16	43.83	65.46	0.67	0.3622	0.0121	0.0494	0.0004	0.0538	0.0019	309	9	311	3	126	86
TW1-70	24.81	85.38	145.50	0.59	1.2323	0.0152	0.1339	0.0006	0.0668	0.0008	812	7	810	3	816	26

（续）表 1　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组碎屑锆石 U-Pb 同位素定年结果

（Continued）Table 1　U-Pb isotopic dating results of detrital zircons from the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

点号	含量/10^{-6}			Th/U	同位素比值及误差						t/Ma					
	Pb	^{232}Th	^{238}U		^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ	^{207}Pb/^{235}U	1σ	^{206}Pb/^{238}U	1σ	^{207}Pb/^{206}Pb	1σ
TW1-71	12.83	94.58	147.25	0.64	0.5350	0.0094	0.0682	0.0004	0.0574	0.0011	436	6	425	2	467	42
TW1-72	45.86	272.76	201.41	1.35	1.4789	0.0145	0.1519	0.0006	0.0710	0.0007	920	6	911	4	949	20
TW1-73	18.37	167.67	198.27	0.85	0.5415	0.0089	0.0694	0.0003	0.0570	0.0009	437	6	433	2	457	36
TW1-74	75.47	122.82	165.56	0.74	5.1770	0.0668	0.3292	0.0020	0.1150	0.0015	1847	11	1834	10	1872	25
TW1-75	41.82	150.65	247.09	0.61	1.1618	0.0200	0.1283	0.0012	0.0672	0.0012	781	9	778	7	830	36
TW1-76	29.03	104.44	166.85	0.63	1.3694	0.0210	0.1431	0.0009	0.0702	0.0011	873	9	862	5	926	30
TW1-77	18.39	150.31	198.48	0.76	0.5448	0.0095	0.0702	0.0003	0.0572	0.0010	439	6	437	2	441	43
TW1-78	44.04	22.62	642.48	0.04	0.4743	0.0045	0.0636	0.0003	0.0548	0.0005	394	3	397	2	393	20
TW1-79	113.49	194.89	248.05	0.79	5.7982	0.0401	0.3530	0.0017	0.1210	0.0008	1945	6	1949	8	1968	12
TW1-80	17.48	182.56	184.83	0.99	0.5317	0.0085	0.0680	0.0003	0.0578	0.0009	431	6	424	2	469	37
TW1-81	11.89	139.66	140.40	0.99	0.5183	0.0136	0.0679	0.0006	0.0570	0.0015	422	9	423	3	502	56
TW1-82	86.90	125.47	629.30	0.20	1.2457	0.0133	0.1338	0.0010	0.0690	0.0007	821	6	810	5	893	20
TW1-83	74.81	175.74	343.76	0.51	1.6765	0.0285	0.1651	0.0012	0.0752	0.0013	997	11	985	6	1055	37
TW1-84	68.39	98.35	354.52	0.28	1.6242	0.0112	0.1643	0.0005	0.0728	0.0005	978	4	980	3	1003	13
TW1-85	136.59	73.39	372.89	0.20	4.8084	0.0245	0.3115	0.0011	0.1135	0.0005	1786	4	1748	5	1853	8
TW1-86	12.17	47.68	62.85	0.76	1.3626	0.0230	0.1470	0.0008	0.0682	0.0011	869	10	884	5	843	35
TW1-87	60.24	137.20	1109.94	0.12	0.3557	0.0027	0.0488	0.0002	0.0536	0.0004	309	2	307	1	343	17
TW1-88	25.41	43.76	62.31	0.70	4.5713	0.0626	0.3060	0.0019	0.1095	0.0016	1740	12	1724	9	1777	27
TW1-89	181.06	144.79	430.75	0.34	5.4264	0.0253	0.3420	0.0011	0.1166	0.0005	1889	4	1896	5	1901	7
TW1-90	4.82	9.52	31.12	0.31	1.1869	0.0343	0.1342	0.0012	0.0657	0.0019	776	16	811	7	611	72
TW1-91	284.50	142.06	453.77	0.31	11.2012	0.0646	0.4671	0.0024	0.1743	0.0007	2539	5	2471	11	2600	7
TW1-92	18.19	122.67	204.11	0.60	0.5397	0.0079	0.0707	0.0004	0.0558	0.0008	438	5	441	2	412	33
TW1-93	19.18	109.08	219.46	0.50	0.5441	0.0079	0.0717	0.0003	0.0555	0.0008	441	5	446	2	396	34
TW1-94	118.14	226.60	251.43	0.90	5.2786	0.0273	0.3364	0.0011	0.1142	0.0005	1865	5	1869	5	1865	9
TW1-95	19.19	135.58	200.48	0.68	0.5681	0.0088	0.0738	0.0004	0.0560	0.0009	455	6	459	2	430	37
TW1-96	178.86	148.05	441.18	0.34	5.1759	0.0360	0.3296	0.0015	0.1137	0.0007	1848	6	1836	7	1865	9
TW1-97	249.04	130.40	655.64	0.20	5.4767	0.0346	0.3360	0.0018	0.1181	0.0007	1896	5	1867	8	1931	10
TW1-98	106.52	55.97	596.80	0.09	1.7360	0.0138	0.1708	0.0008	0.0741	0.0006	1021	5	1016	4	1037	17
TW1-99	116.54	80.20	293.15	0.27	5.4888	0.0445	0.3436	0.0016	0.1156	0.0008	1897	7	1904	7	1886	12
TW1-100	25.87	61.70	59.90	1.03	5.0385	0.0705	0.3246	0.0027	0.1132	0.0017	1821	12	1811	13	1854	25

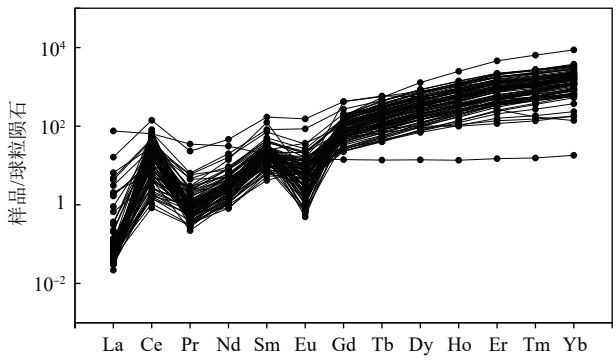


图 5　碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 5　Chondrite-normalized Rare Earth Element (REE) distribution patterns of detrital zircons

所测锆石谐和度普遍大于 95% 以上，锆石的 ^{207}Pb/^{235}U 和 ^{206}Pb/^{238}U 谐和图见图 6（a）。在 98 颗锆石中，测得最年轻的锆石年龄为 278 Ma，最古老的锆石年龄为 3565 Ma，锆石年龄数据自然分布区间为 3565 Ma（1 颗，占比 1%）、2429 ~ 2600 Ma（7 颗，占比 7%）、1506 ~ 2152 Ma（38 颗，占比 39%）、771 ~ 1322 Ma（29 颗，占比 29%）、278 ~ 478 Ma（24 颗，占比 24%），构成四个年龄段区，形成了 2 个主峰值年龄和 2 个次峰值年龄，分别是 2466 Ma（次峰）、1886 Ma（主峰）、924 Ma 和 809 Ma（次峰）、435 Ma（主峰），锆石年龄谱见图 6（b）。

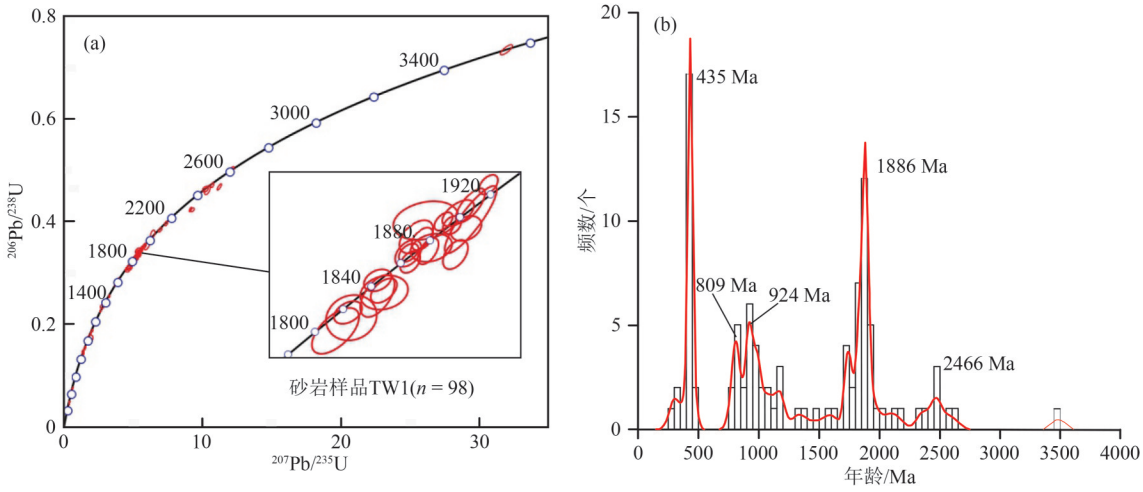


图6 碎屑锆石U-Pb年龄谐和图（a）和频谱图（b）

Fig. 6 U-Pb age concordia diagrams（a）and age spectra diagrams（b）of detrital zircons

松潘—甘孜盆地南部新都桥组年龄谱以1.86 Ga、768 Ma、439 Ma和241 Ma为主（图7（a）），中部新都桥组年龄谱以2.5 Ga、1.86 Ga、796 Ma、368 Ma和274 Ma为主（图7（b）），松潘—甘孜盆地晚三叠世年龄谱以2400 ~ 2530 Ma、1830 ~ 1900 Ma、750 ~ 800 Ma、430 Ma和250 Ma为主（图7（c））；与松潘—甘孜盆地已发表的晚三叠世（新都桥组）碎屑锆石数据（图7）对比显示，松潘—甘孜盆地东缘新都桥组与中部、南部乃至整个盆地具有相似的年龄谱特征（如2.5 Ga，1.86 Ga，435 Ma，809 Ma），又具有其独特的年龄谱特征，主要表现为缺失了241 ~ 274 Ma（二叠纪至三叠纪）锆石年龄谱，924 Ma（青白口纪）锆石年龄谱增多。这一现象暗示了松潘—甘孜盆地东缘物源体系与盆地内部及南部的多向物源汇聚模式存在一定差异。

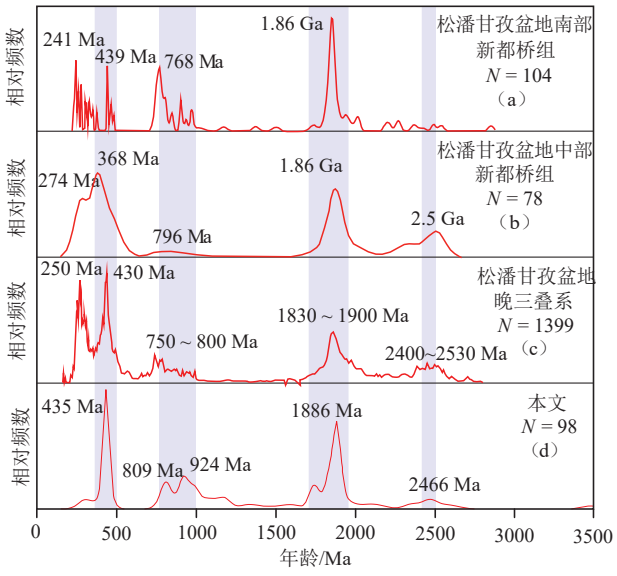


图7 松潘—甘孜盆地晚三叠世碎屑锆石U-Pb年龄谱

Fig. 7 U-Pb age spectra of detrital zircons from the Late Triassic in the Songpan-Ganzi Basin

（a）数据来源刘祥等[6]；（b）数据来源Gong等[3]；（c）数据来源袁彦伟等[4]；（d）本次数据

3.2 微量和稀土元素特征

松潘县尼翁地区新都桥组微量元素分析结果见表2，与Rudnick和Gao[14]典型上地壳元素值相比较（表2），大离子亲石元素Rb相对富集，Ba和Sr相对亏损；高场强元素Nb、Ta、Th和U维持稳定，Zr和Hf相对亏损；过渡族元素Ni和Cr相对富集，Sc、V和Co维持稳定。上地壳标准化蛛网图（图8（a））总体呈不规则锯齿状，各样品微量元素曲线基本一致，指示各样品具有相似或相同的物源属性。

松潘县尼翁地区新都桥组稀土元素分析结果见表3-4，稀土元素ΣREE为120.2×10^{-6} ~ 206.5×10^{-6}，平均值为161.2×10^{-6}，ΣLREE为108.0×10^{-6} ~ 185.0×10^{-6}，平均值为144.5×10^{-6}，ΣHREE为12.2×10^{-6} ~ 21.6×10^{-6}，平均值为16.7，LREE/HREE值为7.6 ~ 10.2，平均值为8.7，属轻稀土元素富集型。δEu为0.48 ~ 0.70，平均值为0.61，具负铕异常；δCe为0.93 ~ 0.98，平均值为0.95；$(La/Sm)_N$为3.7 ~ 4.3，平均值为3.9；$(La/Yb)_N$为8.3 ~ 10.7，平均值为9.2；$(Sm/Nd)_N$为0.5 ~ 0.6，平均值为0.6；$(Gd/Yb)_N$为1.5 ~ 1.7，平均值为1.6。稀土元素球粒陨石标准化分布型式图（图8b）呈右倾斜，各样品的稀土元素曲线基本一致，指示各样品具有相似或相同的物源属性。

表 2　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组微量元素（10^{-6}）分析结果

Table 2　Trace element analysis results (10^{-6}) of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

样品编号	样品名称	V	Cr	Co	Ni	Sc	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U
XD1	板岩	117.5	81.3	14.2	43.2	13.4	31.3	100.8	19.1	134.7	213.0	112.5	11.3	8.8	337.5	3.5	0.9	20.4	13.0	3.7
XD2	粉砂质板岩	143.4	109.2	14.7	55.6	13.1	38.3	106.7	25.1	166.8	83.2	132.8	13.4	9.6	401.2	4.0	1.2	24.9	15.5	3.2
XD3	板岩	133.3	97.5	15.8	45.8	15.9	29.1	113.2	22.5	168.8	173.3	112.5	11.3	18.0	409.8	3.4	1.0	16.4	13.3	3.0
XD4	板岩	72.0	58.8	1.9	8.5	7.5	19.7	55.3	13.5	78.6	73.8	189.7	9.5	4.1	227.7	5.3	0.9	17.0	9.9	2.3
XD5	板岩	116.5	85.1	15.4	41.1	14.1	25.6	104.2	19.7	135.5	199.4	104.0	9.8	7.7	352.2	3.0	0.8	18.5	11.3	2.5
XD6	板岩	131.7	113.3	14.7	59.4	16.4	29.9	118.6	22.9	151.2	99.3	127.6	11.4	8.2	400.5	3.8	1.0	20.5	13.0	2.8
XD7	钙质石英砂岩	117.3	87.7	13.9	37.6	14.5	29.6	112.6	20.0	140.9	128.5	166.8	15.2	7.8	373.6	4.7	1.2	21.6	15.6	3.4
XD8	钙质石英砂岩	145.5	104.5	16.1	49.3	16.8	31.2	121.7	24.4	169.2	97.8	125.0	12.4	9.1	401.2	3.6	1.0	31.1	13.4	3.0
XD9	钙质石英砂岩	129.2	91.0	16.4	44.6	15.6	25.7	116.6	21.6	144.9	132.9	102.8	10.5	8.0	361.7	2.9	0.9	17.9	11.6	2.6
XD10	板岩	100.9	74.0	19.8	40.2	12.3	23.0	97.0	17.7	120.7	124.8	112.5	11.0	5.3	315.6	3.2	0.9	19.7	11.9	2.6
XD11	板岩	131.1	97.6	15.3	44.5	13.8	29.9	123.5	22.5	154.8	170.9	122.9	13.3	8.8	363.6	3.6	1.1	14.6	13.6	2.8
XD12	板岩	94.6	62.6	10.9	29.8	12.8	16.5	94.0	16.3	106.2	115.6	119.5	10.2	7.2	264.2	3.3	0.8	26.4	10.7	2.4
XD13	粉砂质板岩	118.0	84.1	19.0	47.0	14.3	25.7	110.1	20.1	143.6	145.7	103.3	10.6	9.6	351.8	3.0	0.9	18.6	11.6	2.7
XD14	粉砂质板岩	120.1	88.9	15.9	43.8	15.2	31.1	111.4	21.1	143.3	132.0	144.4	14.3	10.1	354.4	4.1	1.2	30.5	15.2	3.5
XD15	粉砂质板岩	148.4	102.1	16.6	56.8	17.4	41.7	128.3	24.0	167.3	120.5	131.7	13.8	9.4	390.9	3.7	1.0	24.3	14.3	3.1
平均值		121.3	89.2	14.7	43.1	14.2	28.5	107.6	20.7	141.8	134.0	127.2	11.9	8.8	353.7	3.7	1.0	21.5	12.9	2.9
上地壳		138.0	73.0	16.7	34.0	13.7	27.0	72.0	17.5	84.0	320.0	193.0	12.0	4.9	628.0	5.3	0.9	17.0	10.7	2.8
平均值/上地壳		0.9	1.2	0.9	1.3	1.0	1.1	1.5	1.2	1.7	0.4	0.7	1.0	1.8	0.6	0.7	1.1	1.3	1.2	1.0

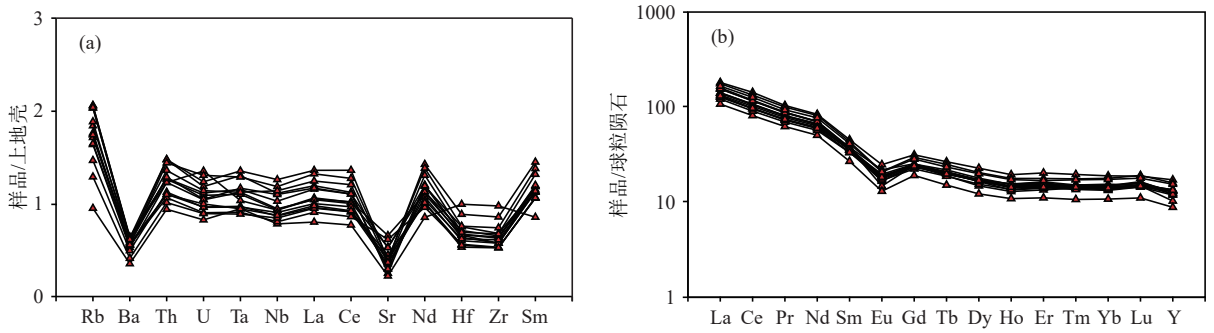


图 8　尼翁地区新都桥组微量元素上地壳标准化蛛网图（a）和稀土元素球粒陨石标准化分布型式图（b）

Fig. 8　Upper continental crust-normalized trace element spider diagram and chondrite-normalized rare earth element distribution pattern diagram of the Xinduqiao Formation in Niong area

（a）上地壳数据来源 Rudnick 和 Gao [14]；（b）球粒陨石数据来源 Sun 和 McDonough [15]

4　讨　论

4.1　年龄对物源的约束

本次碎屑锆石研究获得四个主要年龄段以及形成的峰值年龄，其峰值年龄分别是 2466 Ma（古元古代初）、1886 Ma（古元古代末）、924 Ma 与 809 Ma（新元古代）及 435 Ma（古生代）。松潘—甘孜盆地东缘分布有东昆仑、华北板块、扬子板块和秦岭造山带等构造单元，这些构造单元是潜在物源区。本文收集了潜在物源区已发表的锆石 U-Pb 数据年龄谱图（图 9），借助不同构造单元形成的年龄谱，将有助于分析松潘地区晚三叠世碎屑物源。

古元古代初峰值年龄是 2466 Ma，其和年龄谱峰值形态（图 9）与北秦岭、扬子板块北缘相似。古元古代为扬子板块基底形成时期，该年龄谱的碎屑锆石与扬子板块北缘早元古代基底岩浆有关联，如扬子板块西北缘鱼洞子群变质杂岩中的普遍存在约 2.5 Ga 的岩浆记录 [18-19]；在扬子北缘的陡岭杂岩、木子店花岗质片麻岩、北大别贾庙花

表3 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组稀土元素（10^{-6}）分析结果

Table 3 Rare Earth Element (REE) analysis results (10^{-6}) of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

样品编号	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
XD1	板岩	32.8	64.7	7.5	30.0	5.3	1.1	5.0	0.8	4.3	0.9	2.6	0.4	2.5	0.4	20.1
XD2	粉砂质板岩	37.2	71.1	8.2	32.3	5.4	1.0	4.9	0.7	3.7	0.7	2.2	0.4	2.3	0.4	15.9
XD3	板岩	33.1	64.5	7.6	30.8	5.6	0.8	4.9	0.8	4.2	0.8	2.5	0.4	2.5	0.4	19.4
XD4	板岩	25.1	49.0	5.8	23.2	4.1	0.7	3.9	0.6	3.1	0.6	1.8	0.3	1.8	0.3	13.7
XD5	板岩	28.4	54.7	6.5	26.2	5.0	1.1	4.8	0.7	4.2	0.8	2.4	0.4	2.3	0.4	20.3
XD6	板岩	32.6	63.6	7.5	30.6	5.3	0.9	4.9	0.8	4.3	0.9	2.7	0.4	2.6	0.4	20.9
XD7	钙质石英砂岩	42.3	86.1	9.7	38.6	6.8	1.4	6.4	1.0	5.7	1.1	3.3	0.5	3.2	0.5	26.5
XD8	钙质石英砂岩	36.1	70.0	8.2	32.6	5.6	1.1	5.0	0.7	4.2	0.8	2.4	0.4	2.4	0.4	19.1
XD9	钙质石英砂岩	30.0	58.1	6.8	27.4	5.1	1.0	4.5	0.7	3.9	0.8	2.3	0.3	2.2	0.4	18.4
XD10	板岩	31.2	61.4	7.3	29.1	5.3	1.0	4.7	0.7	4.2	0.8	2.4	0.4	2.3	0.4	20.4
XD11	板岩	36.4	70.1	8.1	32.4	5.7	1.3	5.1	0.7	4.1	0.8	2.3	0.4	2.5	0.4	18.7
XD12	板岩	29.7	58.0	6.9	28.2	5.4	1.1	5.1	0.8	4.5	0.9	2.5	0.4	2.4	0.4	20.9
XD13	粉砂质板岩	30.6	58.6	7.0	27.5	5.0	1.0	4.9	0.7	4.2	0.8	2.3	0.4	2.4	0.4	20.6
XD14	粉砂质板岩	41.2	80.6	9.4	37.5	6.5	1.2	6.0	0.9	5.1	1.0	2.9	0.4	3.0	0.5	24.7
XD15	粉砂质板岩	38.8	76.3	8.8	35.5	6.2	1.2	5.7	0.9	5.0	1.0	2.7	0.4	2.9	0.4	23.9
平均值		33.7	65.8	7.7	30.8	5.5	1.1	5.1	0.8	4.3	0.8	2.5	0.4	2.5	0.4	20.2

表4 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组稀土元素特征值

Table 4 Characteristic values of Rare Earth Elements (REE) of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

样号	岩性	特征值									
		REE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe	$(La/Sm)_N$	$(La/Yb)_N$	$(Sm/Nd)_N$	$(Gd/Yb)_N$
XD1	板岩	158.1	141.4	16.7	8.4	0.62	0.96	3.9	8.9	0.5	1.6
XD2	粉砂质板岩	170.6	155.3	15.3	10.2	0.60	0.94	4.3	10.7	0.5	1.7
XD3	板岩	159.0	142.5	16.5	8.6	0.48	0.94	3.7	9.0	0.6	1.6
XD4	板岩	120.2	108.0	12.2	8.8	0.57	0.94	3.9	9.4	0.5	1.7
XD5	板岩	137.7	121.8	16.0	7.6	0.67	0.93	3.6	8.4	0.6	1.7
XD6	板岩	157.4	140.6	16.8	8.4	0.56	0.94	3.9	8.5	0.5	1.5
XD7	钙质石英砂岩	206.5	185.0	21.6	8.6	0.65	0.98	3.9	9.0	0.5	1.6
XD8	钙质石英砂岩	169.9	153.6	16.3	9.4	0.61	0.94	4.0	10.0	0.5	1.7
XD9	钙质石英砂岩	143.3	128.2	15.1	8.5	0.61	0.94	3.7	9.1	0.6	1.6
XD10	板岩	151.2	135.3	15.9	8.5	0.60	0.95	3.7	9.2	0.6	1.7
XD11	板岩	170.1	153.9	16.2	9.5	0.70	0.94	4.0	10.0	0.5	1.7
XD12	板岩	146.2	129.3	16.9	7.7	0.65	0.94	3.5	8.3	0.6	1.7
XD13	粉砂质板岩	145.8	129.7	16.0	8.1	0.64	0.93	3.8	8.7	0.6	1.7
XD14	粉砂质板岩	196.1	176.3	19.8	8.9	0.58	0.95	4.0	9.3	0.5	1.6
XD15	粉砂质板岩	185.7	166.7	19.1	8.7	0.60	0.96	3.9	9.0	0.5	1.6
平均值		161.2	161.2	16.7	8.7	0.61	0.95	3.9	9.2	0.6	1.6

岗片麻岩具有2.6～2.4 Ga的岩浆记录[20-22]。获得大于3.1 Ga的年龄数据为3565Ma（古太古代），CL图像显示为继承锆石特征，暗示沉积物中包含了古老克拉通物质，该单颗粒锆石年龄数据与扬子板块北缘大别山木子店片麻杂岩年龄（3653 Ma，3701 Ma）[23]接近，据此可排除北秦岭造山带。表明古元古代初锆石碎屑来自于扬子板块北缘。

古元古代末峰值年龄是1886 Ma，在锆石谐和图和频谱图中（图5（b）），锆石年龄数据呈集中分布状态，暗示该年龄段的锆石碎屑来源于同一物源区。其年龄峰值形态（图9）与华北板块南缘一致，峰值年龄（1886 Ma）与华北地块南缘普遍

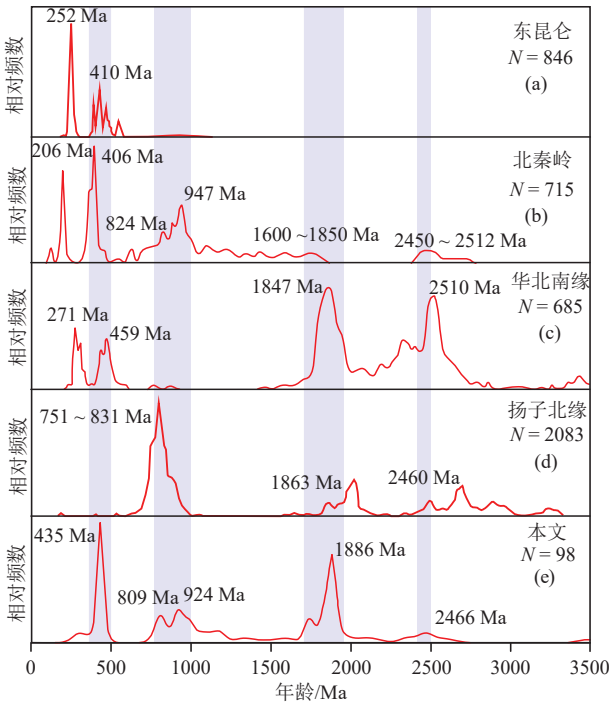


图 9　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组潜在物源区碎屑锆石 U-Pb 年龄分布图

Fig. 9　U-Pb age distribution diagrams of detrital zircons from potential provenance areas of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

（a）数据来源王嘉琦等[16]；（b）—（d）数据来源袁彦伟等[4]和吴晓贺等[17]；（e）本文数据

发生 1.9 Ga 的吕梁期构造—岩浆事件高度吻合[24]，邓小芹等[25]研究认为在华北克拉通造山运动结束之后，华北板块南缘在 1.84 Ga 发生整体伸展的岩浆—热事件，有大量 A 型岩浆侵位活动。表明古元古代末锆石碎屑来自于华北板块南缘。

新元古代年龄数据为 1322 ~ 771Ma，在锆石谐和图和频谱图中（图 5（a）、（b）），年龄谱跨度大，集中分布特征不明显，并形成两个次峰年龄，分别是 924 Ma 和 809 Ma，暗示其可能存在多个物源区。华北板块晚元古代岩浆活动不明显，不属于潜在物源区。北秦岭造山带中广泛记录了新元古代构造—岩浆热事件，如武关岩群火山岩（1243 Ma）、松树沟杂岩（1084 ~ 1030 Ma）以及主要的新元古代岩浆活动（960 ~ 840 Ma）[26-27]，与本次获得的锆石年龄数据（1322 ~ 1037 Ma）及次峰年龄（924 Ma）一致，宫相宽等[28]研究认为北秦岭造山带新元古代岩浆活动主要集中在 979 ~ 914 Ma，小于 840Ma 的岩浆岩在北秦岭造山带中很少出露，说明北秦岭造山带是潜在物源区之一。研究区东侧扬子板块北缘普遍发育晚元古代 Rodinia 超大陆裂解相关的新元古代岩浆活动事件（905 ~ 793 Ma），如轿子顶花岗岩（793 Ma）、刘家坪大滩岩体（826 Ma）、碧口微地块中酸性侵入岩（844 ~ 821 Ma）及汉南杂岩（905 ~ 794 Ma）、黄陵杂岩（855 ~ 794 Ma）等[29-31]，与本次次峰年龄（809 Ma）较吻合，表明扬子板块北缘亦是潜在物源区之一。综合认为新元古代锆石碎屑来源于北秦岭造山带和扬子板块北缘，属混合物源。

古生代峰值年龄是 435 Ma，在锆石谐和图和频谱图（图 5（b））中，锆石年龄数据呈高度集中分布状态，暗示该年龄段的锆石碎屑来源于同一物源区；其年龄谱峰值形态与北秦岭造山带显著一致（图 9）。北秦岭造山带于加里东期发生了勉略洋盆俯冲—碰撞造山过程，发育强烈构造—岩浆事件，基岩中普遍存在 500 ~ 400 Ma 岩浆侵入体[32-34]，尽管东昆仑造山带发育二叠纪—三叠纪及早古生代岩浆岩（年龄范围为 201 ~ 533 Ma[16]），但晚三叠世松潘—甘孜洋盆东侧的秦岭洋发生自东向西的闭合，导致携带北秦岭古生代碎屑物质的海水向西退却[4, 9, 35]，因此，北秦岭是更合理的物源区。此外，北秦岭加里东期岩浆侵位年龄与本区碎屑锆石主峰值年龄（435 Ma）高度吻合（图 9），进一步表明古生代锆石碎屑主要源自北秦岭造山带。

按照谢鸿森等[36]碎屑锆石最大沉积年龄计算原理，选取了 3 颗最年轻锆石（TW1-9、TW1-69、TW1-87）计算加权平均年龄为（287 ± 5）Ma，作为地层的最大沉积年龄（MDA），说明了松潘—甘孜盆地东缘晚三叠世新都桥组地层中缺失早二叠世（小于 287 Ma）以后的碎屑锆石。

以上碎屑锆石年龄谱分析表明，松潘—甘孜盆地东缘晚三叠世新都桥组物源主要来自于华北板块、北秦岭造山带，其次是扬子板块北缘，沉积地层中缺失早二叠世（小于 287 Ma）以后的碎屑锆石。

4.2　地球化学对物源的约束

部分微量元素会随着岩浆岩的持续演化而逐渐富集，La、Th、Zr 元素倾向赋存于长英质火成岩中，Sc、Co 元素在铁镁质岩石中较为富集[2, 37-38]。Wronkiewicz 等[39]研究认为沉积物中 Cr、Zr 元素可代表铬铁矿（基性岩）和锆石（酸性岩）的含量，Cr/Zr 比值可示踪物源区基岩，一

般认为高 Cr/Zr 比值反映物源区以基性岩为主，低 Cr/Zr 比值反映物源区以酸性岩为主，尼翁地区新都桥组的 Cr/Zr 比值为 0.3 ~ 0.9，平均值为 0.7，小于 1，表明新都桥组物源区基岩以酸性长英质岩石为主；新都桥组的 Zr/Hf 比值为 32.1 ~ 36.2，平均值为 34.6，靠近古地壳酸性花岗岩 Zr/Hf 值（~ 33）[37]；Th/Sc 比值为 0.64 ~ 0.94，平均值为 0.93，与上地壳 Th/Sc 值（0.97）接近，表明新都桥组物源区基岩以上地壳长英质岩石为主。此外，尼翁地区新都桥组大部分微量元素（Nb、Ta、Th、U、Sc、V、Co）与典型上地壳元素值差异不大，暗示物源区与上地壳相关。Floyd 等[40]研究认为中酸性岩比基性岩有更高的 La/Sc 值、更低的 Co/Th 值，利用 La/Sc、Co/Th 可以示踪物源区基岩类型。在 Co/Th-La/Sc 二元图解（图 10（a））中，14 件样品集中落在长英质火山岩北侧，1 件样品落入空白区；在 La/Th-Hf 二元图解中（图 10（b）），12 样品主要落入长英质源区内，3 件样品落入长英质源区西侧边缘，表明尼翁地区新都桥组物源区基岩主要是酸性长英质岩类，物源区可能与大陆弧或碰撞带环境有关。

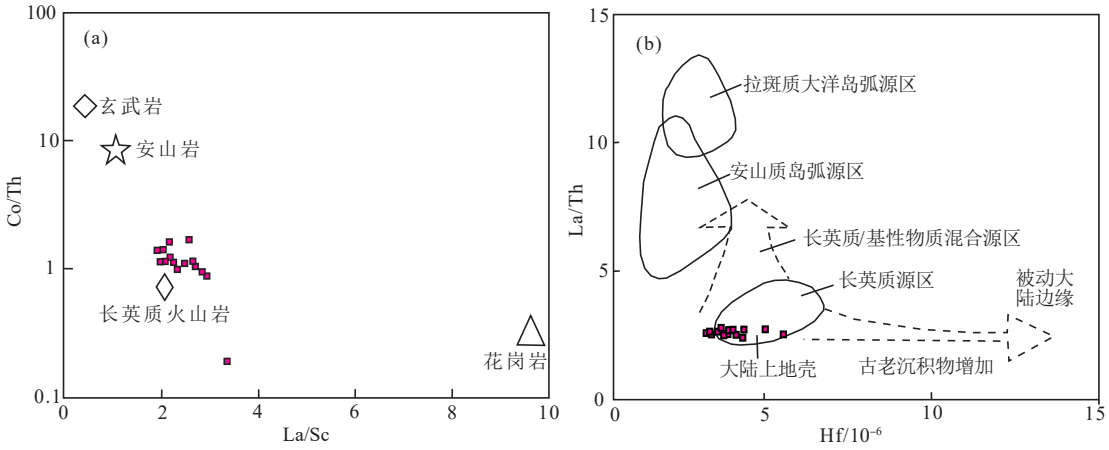


图 10 松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组物源区岩石判别图（底图据文献［34］修改）

Fig. 10 Provenance rock discrimination diagrams of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin（Base map modified after reference［34］）

稀土元素在风化、搬运和沉积成岩过程中相对稳定，是良好的物源示踪剂。Wang 等[41]研究认为中酸性长英质岩石 ∑LREE/∑HREE 值较高，表现为轻稀土富集，$(La/Yb)_N$ 值较高[42]；δEu 为负异常，一般小于 0.9[43]。尼翁地区新都桥组岩石属轻稀土富集性，$(La/Yb)_N > 1$，δEu 平均值为 0.6，指示物源区为长英质岩石或成熟上地壳物质。

以上地球化学分析表明，松潘—甘孜盆地东缘晚三叠世新都桥组物源区以长英质岩石为主。

4.3 地球化学对构造背景的约束

沉积物中高场强元素（Th、U、Zr）和部分过渡族元素（Sc、Co）在沉积演化过程中具有稳定性，这些稳定元素记录了原岩信息，可用于分析沉积物物源区构造环境[44-45]。尼翁地区新都桥组 Th 平均值为 12.9×10^{-6}，U 平均值为 2.9×10^{-6}，Zr 平均值为 127×10^{-6}，Sc 平均值为 14.2×10^{-6}，Co 平均值为 14.7×10^{-6}，Sc/Cr 比值为 0.14，Th/U 比值为 4.4，Zr/Th 比值为 9.84，Th/Sc 比值为 0.91（表 5），绝大部分微量元素及比值（Th、U、Sc、Co、Th/U、Th/Sc）与大陆岛弧环境吻合；在 Th-Sc-La 判别图（图 11（a））中，样品集中分布在大陆岛弧区；在 Sc-Zr-Th 判别图（图 11（b））中，样点集中分布在大陆岛弧区及边缘，微量元素特征支持新都桥组物源区为大陆岛弧环境。

沉积岩中稀土元素化学性质稳定，它是解密构造环境的关键地球化学指标。尼翁地区新都桥组的 La 平均值为 33.7×10^{-6}，Ce 平均值为 65.8×10^{-6}，REE 平均值为 161.2×10^{-6}，La/Yb 平均值为 13.5，$(La/Yb)_N$ 平均值为 9.2，LREE/HREE 平均值为 8.7，δEu 平均值为 0.61。由表 6 可见，稀土元素及特征值（La、LREE/HREE、$(La/Yb)_N$、La/Yb、δEu）与活动大陆边缘一致，其他（Ce、REE）与大陆岛弧环境一致，暗示存在多物源环境。

结合微量元素和稀土元素特征，松潘—甘孜

表 5　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组微量元素对比特征

Table 5　Comparative characteristics of trace elements of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

构造背景	微量元素含量(10^{-6})					特征值			
	Th	U	Zr	Sc	Co	Sc/Cr	Th/U	Zr/Th	Th/Sc
新都桥组平均值	12.9	2.9	127	14.2	14.7	0.14	4.4	9.84	0.91
洋内岛弧	2.3	1.1	96	19.5	18.0	0.57	2.1	48.0	0.15
陆内岛弧	11.1	2.5	229	14.8	12.0	0.32	4.6	21.5	0.85
活动大陆边缘(安第斯型)	18.8	3.9	179	8.0	10.0	0.30	4.8	9.50	2.59
被动大陆边缘	16.7	3.2	298	6.0	5.0	0.16	5.6	19.1	3.06

注：对比数据来源 [46-47]

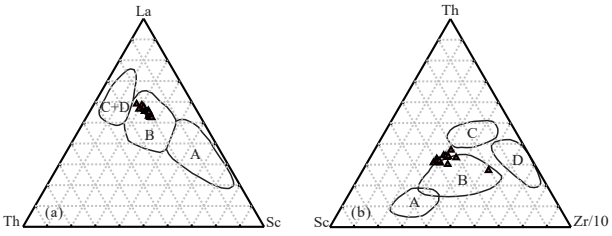


图 11　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组物源区构造背景判别图（底图据文献［38］修改）

Fig. 11　Tectonic setting discrimination diagrams of provenance areas of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin (Base map modified after reference［38］)

A. 大洋岛弧；B. 大陆岛弧；C. 活动大陆边缘；D. 被动大陆边缘

盆地东缘晚三叠世新都桥组物源区构造背景为大陆岛弧和活动大陆边缘，具多物源环境。这一“混合”信号与碎屑锆石所揭示的多陆块物源供给高度吻合。

4.4　地质意义

本次研究获得的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱与地球化学数据，揭示了松潘—甘孜盆地东缘新都桥组的物质来源，为理解晚三叠世古地理格局及其控制的多陆块汇聚沉积响应提供了关键约束。松潘—甘孜盆地东缘沉积演化受控于周边三大构造单元（华北板块南缘、扬子板块北缘和北秦岭造山带）的多期次构造—岩浆事件。在晚三叠世新都桥组沉积物中识别出多期构造热事件记录，2466 Ma 记录了扬子板块北缘的基底形成事件，表明扬子板块在古元古代初已存在稳定的克拉通基底；1886 Ma 与华北板块南缘吕梁期构造—岩浆事件（1.9 Ga）吻合，记录了华北板块南缘在早元古代末经历地壳增生和改造事件；924 Ma 和 809 Ma 与新元古代 Rodinia 超大陆裂解事件相关，反映了新元古代时期多块体相互作用的复杂构造背景；435 Ma 与北秦岭加里东期勉略洋盆的俯冲—碰撞事件对应，响应了早古生代北秦岭造山带的构造—岩浆活动。这些时空异质的构造热记录证实，松潘—甘孜盆地东缘的沉积演化与古特提斯洋闭合及陆块碰撞过程存在动力学成因联系，其沉积物源并非来自单一物源，而是华北板块南缘、扬子板块北缘和北秦岭造山带三大构造单元物质组成的“混合物”，这与相邻盆地多物源混合的物源示踪结果一致[48]，可能反映了特提斯构造域周缘盆地多物源汇聚的共性规律。

晚三叠世新都桥组碎屑锆石物源组成显示多陆块混合输入特征，进一步细分为北秦岭造山带和华北板块南缘碎屑锆石占比为 83%（主要物源

表 6　松潘—甘孜盆地东缘尼翁地区新都桥组稀土元素对比特征

Table 6　Comparative characteristics of Rare Earth Elements (REE) of the Xinduqiao Formation in Niong area, eastern margin of the Songpan-Ganzi Basin

构造背景	微量元素含量(10^{-6})		特征值				
	La	Ce	REE	La/Yb	$(La/Yb)_N$	LREE/HREE	δEu
新都桥组平均值	33.7	65.8	161.2	13.5	9.2	8.7	0.61
洋内岛弧	8.00 ± 1.7	19 ± 3.7	58 ± 10	4.2 ± 1.3	2.8 ± 0.9	3.8 ± 0.9	1.04 ± 0.11
陆内岛弧	27.00 ± 4.5	59 ± 8.2	146 ± 20	11 ± 3.6	7.5 ± 2.5	7.7 ± 1.7	0.79 ± 0.13
活动大陆边缘(安第斯型)	37.00	78.00	186.0	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	39.00	85.00	210.0	15.9	10.8	8.5	0.56

注：对比数据来源 [46-47]

区），扬子板块北缘碎屑锆石占比为17%（次要物源区），这种不平衡的物源贡献模式，暗示着当时存在一个重要的古地理控制因素。而最年轻碎屑锆石加权平均年龄为（287 ± 5）Ma，意味着地层中完全缺失二叠纪至三叠纪的年轻物质，包括扬子板块西缘的晚二叠纪峨眉山玄武岩[49]、昆仑造山带晚三叠世岩浆岩[50-51]、川西义敦岛弧岩浆岩[52]以及松潘—甘孜造山带内晚三叠世花岗岩[53-54]等物质，这一“年轻物质缺失”现象表明，在晚三叠世新都桥组沉积时期，这些潜在的年轻物源区与盆地东缘沉积区之间的物源通道已被有效阻隔，结合本研究物源以北秦岭和华北为主的特征，推测北秦岭造山带在晚三叠世已发生显著的构造隆升，成为一个重要的地理屏障或剥蚀区，这为北秦岭造山带的主碰撞造山时限（印支期）提供了有力的沉积响应证据，与前人对秦岭造山带在印支期发生强烈构造隆升[55-56]认识一致。该隆升带一方面自身被快速剥蚀，为前陆盆地提供了主要碎屑；另一方面，它与可能同期初始隆升的龙门山构造带[57-58]共同构成了一道古地貌屏障系统，有效地阻挡了来自扬子板块内部及西缘的大量碎屑物质向盆地东缘的输送。因此，松潘—甘孜盆地东缘在晚三叠世表现为一个典型的、物源供给受限的“屏障型前陆盆地”，其沉积记录被周缘古老陆块的剥蚀物质所主导。

5 结 论

（1）松潘县尼翁地区晚三叠世新都桥组碎屑锆石年龄谱呈现四个主要峰值：2466 Ma、1886 Ma、924 ~ 809 Ma和435 Ma，分别对应扬子板块北缘基底事件、华北板块南缘吕梁期构造—岩浆事件、扬子北缘与北秦岭新元古代裂解事件、北秦岭加里东期造山事件，物源为华北板块、北秦岭造山带和扬子板块北缘的混合输入。

（2）地球化学特征表明物源区基岩以上地壳长英质岩石为主，形成于大陆岛弧与活动大陆边缘相结合的构造背景。

（3）最年轻锆石加权平均年龄287 Ma指示地层中缺失二叠纪至三叠纪年轻物质，支持北秦岭造山带在晚三叠世已发生显著构造隆升，使松潘—甘孜盆地东缘成为物源供给受限的屏障型前陆盆地。

致谢：感谢两位匿名审稿专家和责任编辑的细致审读和宝贵建议。

参考文献：

[1] 秦宇龙，李名则，熊昌利，等. 川西甲基卡地区侏倭组沉积物源分析——来自碎屑锆石U-Pb年龄证据[J]. 地质学报，2020，94(8)：2400 - 2409.

[2] 刘大明，谭洪旗，朱志敏，等. 川西归宁地区西康群物源和构造背景：来自碎屑岩地球化学的约束[J]. 地质通报，2021，40(12)：2135 - 2148.

[3] GONG D X，WU C H，ZOU H，et al. Provenance analysis of Late Triassic turbidites in the eastern Songpan-Ganzi flysch complex：sedimentary record of tectonic evolution of the eastern Paleo-Tethys ocean[J]. Marine and Petroleum Geology，2021，128：104927.

[4] 袁彦伟，费光春，郑硌，等. 川西可尔因地区侏倭组变质沉积岩地球化学、碎屑锆石U-Pb年龄和Lu-Hf同位素特征及其地质意义[J]. 地球科学，2022，47(8)：2902 - 2924.

[5] 周雄，周玉，谭洪旗，等. 川西甲基卡地区西康群砂岩地球化学特征及对物源区、构造背景的指示[J]. 地质学报，2022，96(4)：1380 - 1404.

[6] 刘祥，詹琼窑，朱弟成，等. 松潘-甘孜褶皱带南部上三叠统物源及构造抬升：碎屑锆石年代学和Hf同位素证据[J]. 岩石学报，2021，37(11)：3513 - 3538.

[7] 王伟，李方林，鲍征宇. 松潘-甘孜盆地中、晚三叠世沉积物来源及演化的锆石U-Pb年代学制约[J]. 地质科技情报，2007，26(5)：35 - 44.

[8] ZHANG Y X，ZENG L，LI Z W，et al. Late Permian-Triassic siliciclastic provenance，palaeogeography，and crustal growth of the Songpan terrane，eastern Tibetan Plateau：evidence from U-Pb ages，trace elements，and Hf isotopes of detrital zircons[J]. International Geology Review，2015，57(2)：159 - 181.

[9] WEISLOGEL A L，GRAHAM S A，CHANG E Z，et al. Detrital zircon provenance from three turbidite depocenters of the Middle-Upper Triassic Songpan-Ganzi complex，central China：record of collisional tectonics，erosional exhumation，and sediment production[J]. Geological Society of America Bulletin，2010，122(11/12)：2041 - 2062.

[10] 陈伟伟，牟传龙，王启宇，等. 四川盆地西北部中侏罗统沙溪庙组物源：碎屑锆石U-Pb年代学的证据[J]. 沉积与特提斯地质，2024，44(3)：613 - 629.

[11] 李小状，陈世瑜，申玉连，等. 四川松潘地区东北寨式微细浸染型金矿成矿条件、成矿模式及远景预测研究报告[R]. 四川省川西北地质大队，1991.

[12] WIEDENBECK M，ALLÉ P，CORFU F，et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb，Lu-Hf，trace element and REE analyses[J]. Geostandards Newsletter，1995，19(1)：1 - 23.

[13] JACKSON S E，PEARSON N J，GRIFFIN W L，et al. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. Chemical Geology，2004，211(1/2)：47 - 69.

[14] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the continental crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 1 - 64.

[15] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C] // SAUNDERS A D, NORRY M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313 - 345.

[16] 王嘉琦, 施炜, 李宗星, 等. 柴达木盆地东北缘晚新生代构造隆升——来自碎屑锆石U-Pb年代学证据[J]. 地质论评, 2023, 69(6): 2391 - 2406.

[17] 吴晓贺,张聚全,段站站, 等. 华北克拉通中部营等岩体的成因及构造意义:锆石U-Pb年代学、岩石地球化学的约束[J]. 现代地质,2025, 39(3): 728 - 751.

[18] HUI B, DONG Y P, CHENG C, et al. Zircon U-Pb chronology, Hf isotope analysis and whole-rock geochemistry for the Neoarchean-Paleoproterozoic Yudongzi complex, northwestern margin of the Yangtze craton, China[J]. Precambrian Research, 2017, 301: 65 - 85.

[19] ZHOU G Y, WU Y B, LI L, et al. Identification of ca. 2.65 Ga TTGs in the Yudongzi complex and its implications for the early evolution of the Yangtze Block [J]. Precambrian Research, 2018, 314: 240 - 263.

[20] 胡娟, 刘晓春, 陈龙耀, 等. 扬子克拉通北缘约2.5Ga岩浆事件:来自南秦岭陡岭杂岩锆石U-Pb年代学和Hf同位素证据[J]. 科学通报, 2013, 58(34): 3579 - 3588.

[21] 田洋, 王伟, 金巍, 等. 大别贾庙新太古代花岗质岩石:对扬子克拉通形成与演化的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2219 - 2238.

[22] QIU X F, TONG X R, JIANG T, et al. Reworking of Hadean continental crust in the Dabie orogen: evidence from the Muzidian granitic gneisses[J]. Gondwana Research, 2021, 89: 119 - 130.

[23] 邱啸飞, 彭练红, 孔令耀, 等. 北大别构造带始太古代片麻岩的发现[J]. 地球科学, 2024, 49(11): 3960 - 3970.

[24] 王欣, 王雪, 陈建, 等. 华北克拉通大陆地壳的生长与演化: 来自锆石U-Pb年代学、微量元素以及Hf-O同位素证据[J]. 地质学报, 2025, 99 (7): 2463 - 2478.

[25] 邓小芹, 彭头平, 赵太平, 等. 华北克拉通南缘古元古代末(~1.84 Ga)垣头A-型花岗岩成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2019, 35(8): 2455 - 2469.

[26] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 165 - 173.

[27] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 107 - 112.

[28] 宫相宽, 陈丹玲, 任云飞, 等. 秦岭岩群东段马山口岩体年代学及岩石地球化学:对北秦岭新元古代早期构造演化的指示[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2001 - 2020.

[29] 杨再兵, 裴先治, 李瑞保, 等. 扬子西北缘碧口微地块南华系碎屑锆石物源示踪及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(1): 226 - 248.

[30] 李永攀, 原明考, 张建太, 等. 米仓山地块新元古代花岗类岩石成因及其对扬子克拉通西北缘大陆增生弧持续演化的制约[J/OL]. 地球学报, 1 - 21[2026-03-10]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3474.P.20250820.0958.002.html.

[31] 惠博, 董云鹏, 孙圣思, 等. 扬子板块北缘新元古代构造属性的岩浆事件制约[J]. 地质学报, 2022, 96(9): 3034 - 3050.

[32] 姚征, 张亚峰, 杨涛, 等. 北秦岭西段黄牛铺岩体锆石U-Pb年代学、岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2017,31(6):1157 - 1169.

[33] 李程昊, 陈正乐, 霍海龙, 等. 晚古生代秦岭造山带构造演化:西秦岭碎屑锆石U-Pb年代学的制约与启示[J]. 地质力学学报, 2025, 31 (4): 617 - 637.

[34] DONG Y, SANTOSH M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, central China[J]. Gondwana Research, 2016, 29(1): 1 - 40.

[35] DING L, YANG D, CAI F L, et al. Provenance analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi turbidites in northern Tibet: implications for the tectonic evolution of the eastern Paleo-Tethys ocean[J]. Tectonics, 2013, 32(1): 34 - 48.

[36] 谢鸿森, 王平, 陈玺赟, 等. 碎屑锆石最大沉积年龄限定地层年代: 原理、方法与应用[J]. 地层学杂志, 2025, 49(1): 103 - 122.

[37] 米雪, 刘学龙, 张世涛, 等. 滇东南白牛厂隐伏二长花岗岩岩石成因及对银多金属成矿作用的指示:来自地球化学、U-Pb年代学和Hf同位素的约束[J]. 现代地质, 2025,39 (4):1016 - 1038.

[38] 魏超凡, 张志杰, 万力, 等. 准噶尔盆地东南缘井井子沟组物源分析及构造-沉积学意义[J]. 现代地质, 2025,39(2): 327 - 350.

[39] WRONKIEWICZ D, CONDIE K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(9): 2401 - 2416.

[40] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones[J]. Journal of the Geological Society, 1987, 144(4): 531 - 542.

[41] WANG Z W, WANG J, FU X G, et al. Petrography and geochemistry of Upper Triassic sandstones from the Tumengela Formation in the Woruo Mountain area, north Qiangtang Basin, Tibet: implications for provenance, source area weathering, and tectonic setting[J]. Island Arc, 2017, 26(4): e12197.

[42] 黄道军, 王康乐, 张辉, 等. 鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组5号煤层地球化学特征及沉积环境指示——以S14井为例[J]. 现代地质,2026,40(1):140 - 153.

[43] 刘恒福, 徐云甫, 李善平. 三十九种元素的分组及元素地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017.

[44] ROSER B P, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5): 635 - 650.

[45] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92 (2): 181 - 193.

[46] BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 1983,91(6): 611 - 627.

[47] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 1985,45: 97 - 113.

[48] 陈柏臣, 潘东, 张佳慧, 等. 楚雄盆地中南部下白垩统高峰寺组沉积环境及物源分析[J]. 现代地质, 2025, 39(4): 1083 - 1097.

[49] 张宏辉, 吴亮, 李鸿, 等. 滇东北乌蒙山地区峨眉地幔柱活动与火山-沉积盆地的响应关系[J]. 现代地质, 2022, 36(1): 225 - 243.

[50] 任海东, 王涛, 潘彤, 等. 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[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 95 - 112.

[51] 鲁浩, 刘欢, 胡峰, 等. 西昆仑造山带东段中生代碰撞造山事件的记录:来自新疆温泉—胜利达坂一带三叠纪侵入岩年代学、地球化学的证据[J]. 现代地质, 2023,37(3):573 - 585.

[52] 乔伟, 马林, 王强, 等. 青海玉树地区晚三叠世富镁闪长岩成因及其对古特提斯洋演化的启示[J/OL]. 大地构造与成矿学, 1 - 20[2026-03-10]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1595.P.20250923.1636.004.html.

[53] 曹锦山, 张新远, 欧阳光文, 等. 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. 吉林大学学报(地球科学版),2025,55(2):483 - 502.

[54] 岳相元, 杨波, 周雄, 等. 川西地区热达门石英闪长岩锆石U-Pb年龄和岩石地球化学特征:岩石成因与构造意义[J]. 现代地质, 2019,33(5):1015 - 1024.

[55] 弓汶琪, 弓虎军, 王苏里, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组中期物源分析及其对秦岭造山带隆升作用的指示[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 118 - 134.

[56] 胡金鑫, 周小虎, 尤继元, 等. 西秦岭嘉陵江流域地貌特征及其构造意义[J]. 现代地质, 2025,39(6):1684 - 1701.

[57] 寇少磊, 刘基, 王占彬, 等. 后龙门山构造带辛家咀金矿床成矿流体特征及其演化:来自流体包裹体与H-O同位素的证据[J]. 现代地质, 2025,39(5):1193 - 1208.

[58] 闫心宇, 刘磊, 王小娟, 等. 川西北晚三叠世盆山耦合过程与古地理演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 1 - 23.