

doi:10.3969/j.issn.0563-5020.2016.01.000

锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 模式年龄 对印支地块基底的限定*

王超^{1,2} 王世锋² 莫亚思^{1,2}

(1. 中国科学院青藏高原研究所 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质力学所 北京 100010)

摘要 印支地块的板块构造归属不仅对特提斯演化研究有重要意义,对探讨新生代青藏高原及周缘板块的陆内变形同样至关重要。我们近期的研究工作表明,本区的花岗岩主要是印支期旧特提斯闭合的产物,少数花岗岩与加里东期构造活动有关。花岗岩内锆石 Lu-Hf 二阶段模式年龄主要聚集在 1.8~1.6 Ga,此外在 1.4~1.2 Ga 有另一峰值区。老挝北部花岗岩峰值区与印支地块内其它地区的锆石 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 二阶段模式年龄峰值相似,表明印支地块内部有稳定的基底组成。老挝花岗岩年龄峰值与昌都—思茅地块的年龄峰值近于一致,同时,由于奠边府构造带不具有缝合带的属性且两个地块有相似的古生代暖水动物群,我们认为印支地块与昌都—思茅地块可能为同一陆块,这个联合陆块与华南陆块在 Rodinia 超大陆时期可能是一体的,因为他们的峰值区在 4.0~3.5 Ga, 2.0~1.8 Ga, 1.4~1.2 Ga 的 3 个峰值区完全重合。

关键词 老挝 花岗岩 U-Pb 年龄 Lu-Hf 二阶段模式年龄 Rodinia

中图分类号:P588, P597 **文献标识码**: A **文章编号**: 0563-5020(2016)01- -18

印支地块与思茅地块、华南地块以及 Sibumasu 地块是构成东南亚地块的几个主要的微板块,古生代末期—中生代中期,它们随着中特提斯洋的张开和古特提斯的闭合汇聚成一体(Metcalf, 1996, 2002, 2013)。关于其汇聚的时间,方式及汇聚的边界,随着研究的深入认识也不同以往,如发生在印支地块南端昆嵩地体(Kontum massif)的印支运动,最初 Fromaget(1934)认为其为印支地块内部由地层不整合接触体现出的造山运动,到现在逐渐被认为其为华南地块与印支地块在二叠纪末期沿 Song Ma 缝合带产生由东向西的俯冲及随后的碰撞造山(Lepvrier et al., 2004, 2008; Faure et al., 2014; Wang et al., 2015)。相应的,印支地块与华南地块的边界,也由越南与中国接壤的 Song Chay 缝合带(哀牢山—红河断裂通过处)向西移动到 Song Ma 缝合带(图 1)。这样,作为了解印支地块窗口的研究程度较高的越南地区,其主体变为华南地块的一部分。同样的,以奠边府缝合带为界的印支地块与思茅地块的关系,对新生代青藏高原的形成演化具有重要的

* 中国地质调查局地质调查项目(编号: 12120115000701, 1212011120182)和国家自然科学基金项目(编号: 41172192, 40672142)资助。

王超,男,1988年2月生,博士研究生,构造地质学专业。E-mail: wangchao@itpcas.ac.cn

王世锋,男,1970年2月生,博士,研究员,构造地质学专业。本文通讯作者。E-mail: wsf@cags.ac.cn

2015-09-10 收稿, 2015-12-01 改回。

构造意义, 根据 Tapponnier et al. (1982) 的块体逃逸理论, 渐新世—中新世期间, 印支地块沿哀牢山—红河断裂向东南挤出 500~700 km, 其证据之一是以错开的莫边府缝合带与金沙江缝合带做为错断标志物的 (Leloup et al., 1995)。然而, 近年来的构造年代学, 岩石年代学及地球化学研究表明 (Lin et al., 2009; Roger et al., 2014; Wang et al., 2015), 莫边府缝合带只是扬子地块与印支地块陆陆碰撞时期才活动的一条构造带, 它不是板块之间的缝合带。由此, 昌都—思茅地块与印支地块在特提斯演化中是一个整体 (Liu et al., 2012; Faure et al., 2014; Wang et al., 2015)。如果这种认识是正确的, 那么, 现今的昌都—思茅—印支地块呈哑铃型 (见图 1), 其蜂腰部分位于东构造结向东挤出部位。可见印支地块在新生代的陆内变形是以塑形变形为特征的, 而不是逃逸模式描述的刚性块体的变形特征。因此, 了解印支地块本身的特征, 以及它与相邻地块的相互关系, 包括其基底构成特征以及其特提斯演化历史, 对于理解新生代青藏高原隆升历史及其隆升对周缘块体的影响至关重要。然而, 由于一些原因, 我们对做为印支地块主体的老挝地区的地质认识是极其有限的。近年来, 我们对老挝地区进行了多次地质考察, 取得了大量的有意义的研究成果, 这对我们认识印支板块的基底组成、特提斯构造演化和新生代经历的构造变形意义重大。本文展示的是该研究的部分成果。

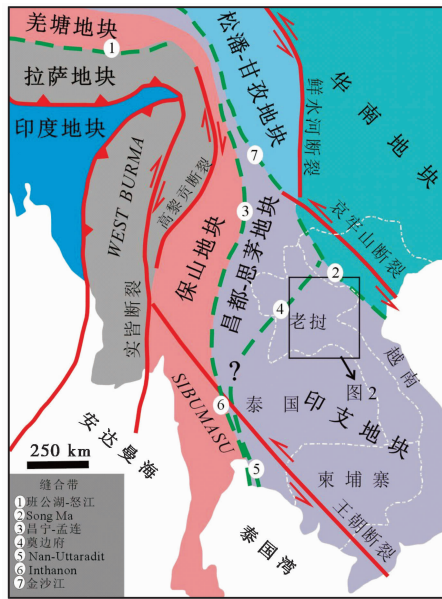


图 1 东南亚板块构造示意图

Fig. 1 The tectonic map of the Southeast Asia

1 地质背景

研究区位于老挝北部川圹高原, 平均海拔为 2 000 m 左右, 行政区域归属分别为中部的川圹省, 北部的华潘省和东部的波里坎赛省。研究区北西侧为莫边府构造带 (图 2), 正西为 Nan-Uttaruddit 蛇绿岩带, 它们一起曾被认为是印支地块与 Sibumasu—保山地块的分界带 (Hutchison, 1975; Barr and MacDonald, 1987; Barr et al., 2000), 近几年

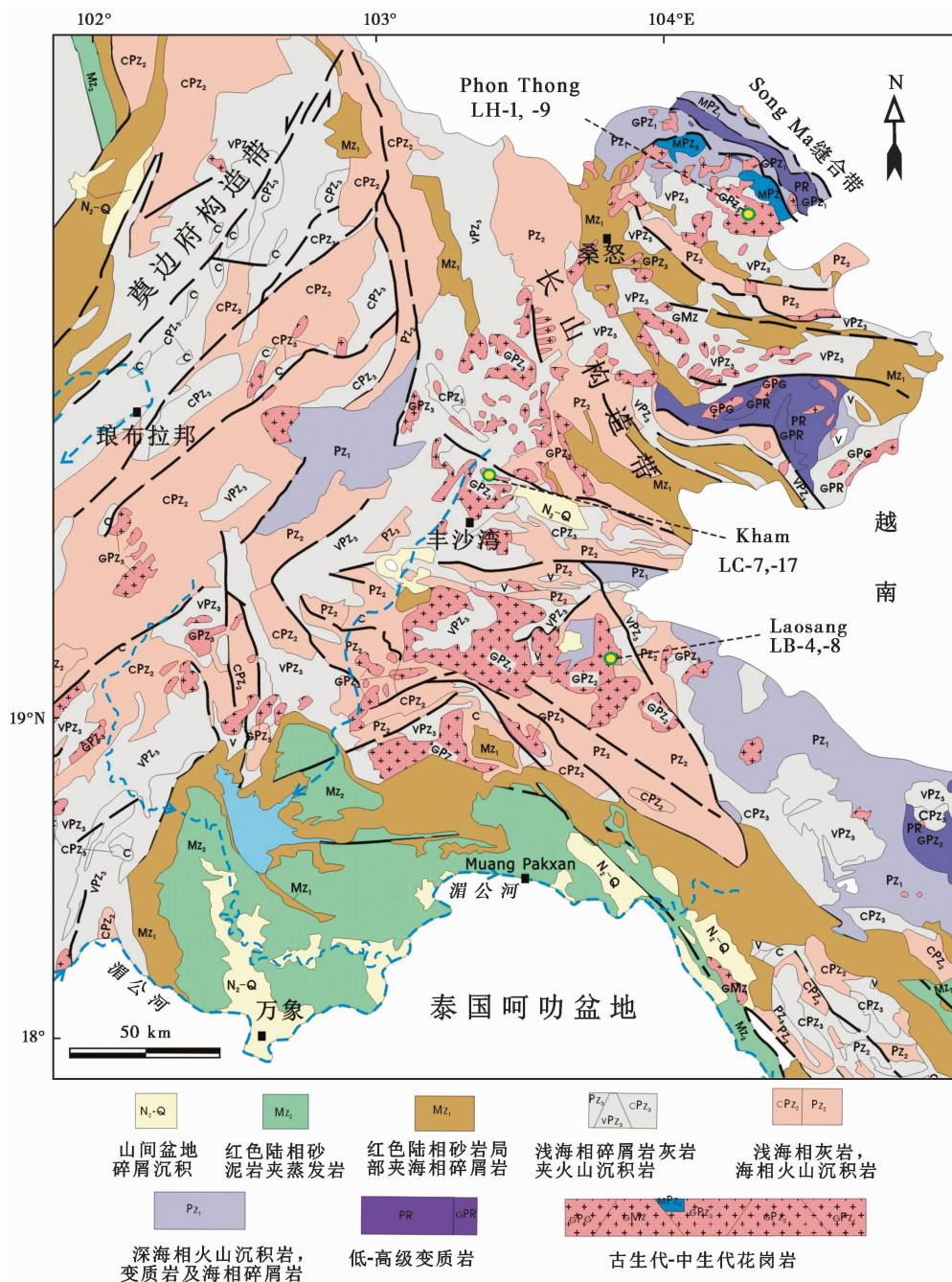


图 2 老挝中北部地区构造地质简图(据 DGM, 1991)

Fig. 2 Simple geological map of the central-North Laos

逐渐被认为是弧后洋壳残留物, 两大陆块的真正分界在更西侧的 Inthanon—昌宁—孟连缝合带(Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2013; 图 1)。研究区东北侧为长山构造带 (Truong Son) 和 Song Ma 缝合带, 出露的地层主要为二叠系海相灰岩和火山沉积岩, 少

量古生代变质岩以及代表蛇绿岩套的混杂堆积,中生代地层则主要出露于研究区南部的万象地区(DMG, 1991;图2)。花岗岩大面积分部于长山构造带以西地区,Wang et al. (2015)认为本区的花岗岩主要为250~230 Ma期间华南板块向西俯冲于印支板块之下形成的I型花岗岩,少量的花岗岩属于加里东期,反映更早期的板块运动特征。

2 样品实验流程

我们在川圻省 Kham 岩体、华潘省的 Phon Thong 岩体和波里坎赛省的 Laosang 岩体分别采集了 LC-7、LC-17、LH-1、LH-9、LB-4 和 LB-8 的 6 块样品,这些花岗岩样品都是中-粗粒钾长花岗岩,含钾长石 $45\pm 5\%$ 、石英 $35\pm 5\%$ 、斜长石 $10\pm 5\%$ 、黑云母 $7\pm 2\%$ 和少量的次级矿物(如磁铁矿,磷灰石和锆石等)。在实验室对这 6 块样品进行了锆石 U-Pb 测年和锆石 Lu-Hf 同位素比值分析。实验流程如下:

锆石的分选采用重液和磁选方法在河北省地质队实验室完成。运用阴极发光图像来观测锆石颗粒的内部结构并选取合适的点位用以分析研究。U、Th、Pb 和 Lu 同位素原位测定在中国科学院青藏高原研究所 LA-ICP-MS 进行,详细分析方法见 Li et al. (2009)。锆石标样与锆石样品以 1:3 比例交替测定。U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice(337 Ma; Sláma et al., 2008)校正获得,以标准样品 Qinghu(159.5 Ma; Li et al., 2009)作为未知样监测数据的精确度。同位素比值及年龄误差均为 1σ 。数据处理采用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2001)。表 1 为锆石 U-Pb 年龄数据。

在锆石 U-Pb 定年的基础上,选择谐和度较好的年龄点,在与年龄点环带趋势一致的微区圈定 Hf 同位素点位。锆石 Hf 同位素分析利用 Neptune Plusma II 多接收等离子质谱仪和 NWR193UC 193 nm 激光取样系统上进行,仪器详细步骤参见 Liu et al.(2015)。激光剥蚀斑束直径一般为 60 μm ,每一测点包含有 10 s 预剥蚀,45 s 剥蚀和 30 s 的清洗时间。样品测试过程中以 91500 作为标样,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282\ 286\pm 12(2\sigma, n=21)$ 。

3 实验结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

样品 LC-7 和 LC-18 来自 Kham 岩体,锆石呈 80~120 μm 的无色透明的短柱状,CL 图像显示锆石一般具有发光的核部(低 U)以及晶形较好的岩浆岩振荡环带(图 3)。测试结果显示年龄数据一致。LC-7 中 18 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均年龄为 247 ± 1.2 Ma, LC-18 中 19 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均年龄为 254.7 ± 1.2 Ma 年龄(表 1),样品 LC-7 的 Th/U 比值为 0.45~0.75,样品 LC-18 的 Th/U 比值为 0.47~0.78,指示典型岩浆岩来源。由于这些数据来自锆石核部和边缘,254.7~247 Ma 代表了该岩体的侵入时间。

样品 LH-9 来自 Phon Thong 岩体,其中的锆石为浅黄至透明,自形晶,棱柱状。CL 图像显示锆石一般具有发光的核部(低 U)以及晶形较好的岩浆岩振荡环带(图 2),颗粒通常长为 100~180 μm ,宽为 50~80 μm 。19 个测试点的年龄值范围在 263 ± 5 Ma ~ 212 ± 5 Ma 之间(表 1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均年龄为 248.1 ± 1.3 Ma(图 3b)。Th/U 比值为 0.38~0.78,指示典型岩浆岩来源。248 Ma 代表了 Phon Thong 岩体的侵入时间。

表 1 老挝北部地区花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据表

Table 1 LA-ICPMS U-Pb zircon age data for granites from northern Laos

样品号	$Pb_{rad}/\times 10^{-6}$	$^{232}Th/\times 10^{-6}$	$^{238}U/\times 10^{-6}$	U-Th-Pb 同位素比值				年龄/Ma												
				Th/U		$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{235}U$		$^{207}Pb/^{238}U$		$^{206}Pb/^{238}U$								
				$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ						
LC-7-1	14.01	202.36	311.01	0.65	0.05144	0.00193	0.2798	0.01011	0.03946	0.00038	0.00973	0.00018	261	65	250	8	249	2	196	4
LC-7-2	19.29	201.82	447.03	0.45	0.0514	0.00156	0.27785	0.00803	0.03922	0.00034	0.01037	0.00019	259	50	249	6	248	2	209	4
LC-7-3	11.71	133.14	267.4	0.50	0.05135	0.00194	0.27701	0.01008	0.03914	0.00037	0.0112	0.00022	257	66	248	8	248	2	225	4
LC-7-4	14.89	174.56	338.79	0.52	0.05141	0.00202	0.28026	0.01059	0.03955	0.0004	0.01075	0.00023	259	68	251	8	250	2	216	5
LC-7-5	10.86	169.07	248.57	0.68	0.05092	0.0021	0.26922	0.01075	0.03835	0.00038	0.01076	0.00019	237	74	242	9	243	2	216	4
LC-7-8	16.31	256.72	369.52	0.69	0.05151	0.00166	0.28877	0.0089	0.04067	0.00037	0.01087	0.00017	246	55	245	7	245	2	207	3
LC-7-10	15.68	265.39	353.63	0.75	0.05154	0.00171	0.27656	0.00879	0.03893	0.00036	0.01018	0.00019	252	69	250	8	250	2	197	4
LC-7-11	15.84	182.18	379.27	0.48	0.05109	0.00153	0.27186	0.00777	0.0386	0.00032	0.01071	0.00016	265	56	248	7	246	2	205	4
LC-7-12	17.35	215.83	404.85	0.53	0.05137	0.00238	0.27411	0.01238	0.03871	0.0004	0.01095	0.00022	245	51	244	6	244	2	215	3
LC-7-13	6.43	90.45	149.66	0.60	0.05151	0.00216	0.28901	0.0117	0.0407	0.00042	0.01153	0.00027	257	85	246	10	245	2	220	4
LC-7-15	7.01	57.55	159.83	0.36	0.05095	0.00191	0.26666	0.00958	0.03797	0.00039	0.01035	0.00018	245	144	249	17	249	4	225	11
LC-7-17	12.66	138.99	290.92	0.48	0.05136	0.00231	0.28313	0.01232	0.03999	0.00045	0.01211	0.00031	268	119	250	14	248	4	216	8
LC-7-19	17.55	198.36	392.67	0.51	0.05131	0.00184	0.27589	0.00949	0.039	0.00036	0.01155	0.00023	247	75	249	9	249	3	228	5
LC-7-20	11.64	110.75	271.1	0.41	0.05132	0.00083	0.2944	0.00412	0.04162	0.00028	0.01376	0.00016	255	62	247	8	247	2	232	5
LC-7-25	16.60	183.32	396.39	0.46	0.0509	0.00143	0.26923	0.00716	0.03837	0.00031	0.01148	0.00016	236	46	242	6	243	2	231	3
LC-7-27	10.85	112.22	246.97	0.45	0.05137	0.00191	0.28025	0.01006	0.03957	0.00037	0.01138	0.00023	257	65	251	8	250	2	229	5
LC-7-33	16.92	182.89	396.13	0.46	0.05095	0.00161	0.27512	0.00828	0.03917	0.00035	0.01105	0.00019	239	53	247	7	248	2	222	4
LC-7-34	18.55	247.38	409.6	0.60	0.05114	0.00134	0.27684	0.00679	0.03927	0.00031	0.01125	0.00014	247	42	248	5	248	2	226	3
LC-18-1	34.39	491.65	740.77	0.66	0.05107	0.00149	0.28197	0.00779	0.04005	0.00035	0.01107	0.00016	244	47	252	6	253	2	223	3
LC-18-2	16.21	208.57	352.54	0.59	0.05427	0.00512	0.29826	0.02748	0.03987	0.00088	0.01173	0.00059	382	168	265	21	252	5	236	12
LC-18-6	10.46	119.15	232.64	0.51	0.05153	0.00263	0.28149	0.01403	0.03963	0.00043	0.01225	0.0003	265	95	252	11	251	3	246	6
LC-18-7	21.77	268.83	482.62	0.56	0.05167	0.00199	0.28399	0.0105	0.03987	0.00041	0.01114	0.00023	271	66	254	8	252	3	224	5
LC-18-16	22.95	272.23	503.7	0.54	0.05175	0.0019	0.2901	0.0102	0.04067	0.0004	0.0112	0.00022	274	63	259	8	257	2	225	4

续表 1

样品号	Pb _{rad} / × 10 ⁻⁶	²³² Th/ × 10 ⁻⁶	²³⁸ U/ × 10 ⁻⁶	U-Th-Pb 同位素比值				年龄/Ma												
				Th/U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th								
				²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ					
LC-18-18	10.21	139.5	218.84	0.64	0.05185	0.0031	0.28728	0.01673	0.04019	0.00055	0.01215	0.00034	279	109	256	13	254	3	244	7
LC-18-19	10.49	155.83	221.95	0.70	0.05282	0.0037	0.29163	0.01993	0.04005	0.00064	0.01212	0.00039	321	127	260	16	253	4	243	8
LC-18-20	26.63	327.73	585.4	0.56	0.05095	0.00178	0.2831	0.00948	0.04031	0.00039	0.01153	0.00022	239	59	253	8	255	2	232	4
LC-18-21	6.74	94.7	146.31	0.65	0.05362	0.0062	0.29652	0.03358	0.04012	0.00103	0.01109	0.00066	355	209	264	26	254	6	223	13
LC-18-22	19.30	264.28	419.12	0.63	0.05186	0.00194	0.28555	0.01023	0.03994	0.0004	0.01183	0.00022	279	64	255	8	252	2	238	4
LC-18-23	9.29	97.28	208.52	0.47	0.05165	0.00263	0.2866	0.01419	0.04025	0.00049	0.01195	0.00035	270	91	256	11	254	3	240	7
LC-18-24	6.59	99.4	136.17	0.73	0.05156	0.00298	0.28809	0.01627	0.04053	0.00049	0.01285	0.00029	266	108	257	13	256	3	258	6
LC-18-25	22.69	291.73	493.19	0.59	0.05118	0.00144	0.284	0.00755	0.04026	0.00034	0.01212	0.00017	249	46	254	6	254	2	243	3
LC-18-26	12.82	190.31	272.06	0.70	0.05139	0.00256	0.28409	0.01374	0.0401	0.00049	0.01217	0.00028	258	89	254	11	253	3	244	6
LC-18-27	26.05	388.4	539.22	0.72	0.05162	0.0016	0.29102	0.00856	0.04089	0.00037	0.01246	0.00018	269	51	259	7	258	2	250	4
LC-18-32	15.09	166.67	330.56	0.50	0.05132	0.00164	0.28877	0.00878	0.04081	0.00036	0.01258	0.00021	255	54	258	7	258	2	253	4
LC-18-33	11.98	188.44	240.23	0.78	0.06264	0.00229	0.3519	0.01234	0.04075	0.00041	0.01331	0.00021	501	117	281	12	256	3	252	2
LC-18-35	6.07	59.58	137.21	0.43	0.05169	0.00354	0.28733	0.01928	0.04032	0.00058	0.0124	0.00047	272	128	256	15	255	4	249	9
LH-9-1	14.04	195.69	297.62	0.66	0.05138	0.00263	0.28363	0.01412	0.04005	0.00051	0.01141	0.00029	258	91	254	11	253	3	229	6
LH-9-2	9.74	128.77	221.06	0.58	0.05116	0.00241	0.27227	0.01247	0.03861	0.00044	0.01084	0.00025	248	85	245	10	244	3	218	5
LH-9-4	21.43	310.64	481.89	0.64	0.05105	0.00143	0.27268	0.00724	0.03875	0.00033	0.01073	0.00014	243	45	245	6	245	2	216	3
LH-9-6	19.75	272.05	420.04	0.65	0.05112	0.00231	0.27143	0.01188	0.03853	0.00044	0.01053	0.00023	246	80	244	9	244	3	212	5
LH-9-8	16.78	224.89	378.38	0.59	0.05123	0.00218	0.27989	0.01152	0.03964	0.00043	0.01068	0.00023	251	75	251	9	251	3	215	5
LH-9-9	9.21	131.25	207.59	0.63	0.05122	0.00291	0.27415	0.0152	0.03884	0.00051	0.01059	0.00029	251	104	246	12	246	3	213	6
LH-9-13	13.14	140.89	285.38	0.49	0.05189	0.0037	0.28616	0.01991	0.04002	0.00066	0.01273	0.00048	281	129	256	16	253	4	256	10
LH-9-14	11.61	132.24	264.26	0.50	0.05127	0.00199	0.27776	0.01041	0.03931	0.00039	0.01225	0.00024	253	68	249	8	249	2	246	5
LH-9-18	21.98	275.31	500.74	0.55	0.05123	0.00134	0.27501	0.00678	0.03896	0.00032	0.01185	0.00015	251	41	247	5	246	2	238	3
LH-9-21	7.89	68.42	179.21	0.38	0.05173	0.00291	0.28115	0.01546	0.03945	0.0005	0.01218	0.00039	273	103	252	12	249	3	245	8
LH-9-23	14.07	205.94	307.56	0.67	0.05105	0.00193	0.2798	0.01016	0.03978	0.0004	0.01143	0.0002	243	65	250	8	251	2	230	4

续表 1

样品号	Pb _{rad} / × 10 ⁻⁶	²³² Th/ × 10 ⁻⁶	²³⁸ U/ × 10 ⁻⁶	U-Th-Pb 同位素比值				年龄/Ma												
				Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th							
														²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
LH-9-24	9.76	114.12	217.82	0.52	0.05107	0.00207	0.27947	0.01097	0.03972	0.0004	0.0131	0.00025	244	72	250	9	251	2	263	5
LH-9-25	17.50	207.95	357.96	0.58	0.05104	0.00211	0.28005	0.01121	0.03983	0.00043	0.01294	0.00025	243	72	251	9	252	3	260	5
LH-9-26	14.03	161.01	315.54	0.51	0.05109	0.00195	0.27608	0.01015	0.03923	0.00039	0.0125	0.00023	245	66	248	8	248	2	251	5
LH-9-28	12.97	153.63	299.75	0.51	0.05129	0.00166	0.27273	0.00843	0.0386	0.00036	0.01203	0.0002	254	54	245	7	244	2	242	4
LH-9-31	30.41	499.61	641.16	0.78	0.05165	0.00237	0.28025	0.01243	0.03939	0.00048	0.01193	0.00024	270	79	251	10	249	3	240	5
LH-9-33	13.82	187.25	306.19	0.61	0.05136	0.00172	0.27856	0.00896	0.03938	0.00036	0.01218	0.00018	257	57	250	7	249	2	245	4
LH-9-34	11.77	141.85	266.82	0.53	0.05131	0.00185	0.27649	0.0096	0.03912	0.00037	0.01267	0.00021	255	62	248	8	247	2	254	4
LH-9-35	10.01	108.12	231.43	0.47	0.05114	0.00212	0.27609	0.01107	0.0392	0.0004	0.01245	0.00026	247	74	248	9	248	2	250	5
LB-4-2	52.33	211.03	676.04	0.31	0.05625	0.00138	0.53764	0.01218	0.06933	0.00055	0.01985	0.00037	462	36	437	8	432	3	397	7
LB-4-6	22.41	112.97	294.21	0.38	0.05504	0.0013	0.51267	0.01108	0.06757	0.00051	0.01802	0.00029	414	35	420	7	421	3	361	6
LB-4-8	40.14	184.18	489.7	0.38	0.05706	0.00114	0.5711	0.01012	0.07261	0.00051	0.01999	0.00027	432	42	423	9	421	3	394	4
LB-4-11	25.09	124.31	301.05	0.41	0.05617	0.00137	0.56543	0.01269	0.07302	0.00057	0.02077	0.00033	462	36	437	8	432	3	397	7
LB-4-13	41.79	567.28	456.58	1.24	0.05664	0.00124	0.53985	0.01076	0.06914	0.00051	0.01667	0.00015	478	31	438	7	431	3	334	3
LB-4-16	62.77	224.03	848.53	0.26	0.05511	0.00086	0.51294	0.00659	0.06752	0.00042	0.01916	0.00021	417	18	420	4	421	3	384	4
LB-4-17	21.44	169.02	262.48	0.64	0.05506	0.00129	0.51299	0.01104	0.06758	0.00051	0.01971	0.00023	415	35	420	7	422	3	395	5
LB-4-19	19.98	223.69	226.63	0.99	0.05538	0.00156	0.51444	0.01356	0.06739	0.00057	0.01957	0.00023	428	44	421	9	420	3	392	5
LB-4-20	30.56	150.29	404.53	0.37	0.05516	0.00132	0.50983	0.01119	0.06704	0.00051	0.01937	0.00031	419	35	418	8	418	3	388	6
LB-4-21	19.00	102.53	238.58	0.43	0.05579	0.00239	0.53298	0.02201	0.0693	0.00082	0.02079	0.00058	444	71	434	15	432	5	416	11
LB-4-26	22.44	149.08	277.11	0.54	0.05542	0.00119	0.52489	0.01019	0.06871	0.00049	0.02046	0.00024	429	30	428	7	428	3	409	5
LB-4-27	33.43	455.37	354.65	1.28	0.0555	0.00151	0.51667	0.01315	0.06753	0.00057	0.01967	0.0002	432	42	423	9	421	3	394	4
LB-4-28	18.04	105.18	223.01	0.47	0.05625	0.00139	0.53628	0.01226	0.06916	0.00054	0.02211	0.00031	462	37	436	8	431	3	442	6
LB-4-31	28.21	239.55	334.52	0.72	0.05563	0.00129	0.52642	0.0112	0.06865	0.00052	0.02016	0.00022	438	34	429	7	428	3	403	4
LB-4-33	21.98	141.33	274.27	0.52	0.05545	0.00141	0.52501	0.01237	0.06869	0.00055	0.02007	0.00029	430	38	428	8	428	3	402	6
LB-4-34	32.17	193.25	417.86	0.46	0.05547	0.00121	0.5133	0.01011	0.06713	0.00049	0.01905	0.00025	431	31	421	7	419	3	381	5

续表 1

样品号	$Pb_{\text{rad}} / \times 10^{-6}$	$^{232}\text{Th} / \times 10^{-6}$	$^{238}\text{U} / \times 10^{-6}$	U-Th-Pb 同位素比值				年龄/Ma												
				Th/U	$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb} / ^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb} / ^{232}\text{Th}$	1σ									
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ									
LB-4-35	45.44	524.09	514.82	1.02	0.05513	0.00094	0.51132	0.00751	0.06729	0.00044	0.01937	0.00013	417	21	419	5	420	3	388	3
LB-8-1	59.19	109.34	262.03	0.42	0.05599	0.00146	0.50208	0.01222	0.06508	0.00052	0.02112	0.00036	452	40	413	8	406	3	422	7
LB-8-3	92.84	171.71	380.73	0.45	0.05546	0.00109	0.50178	0.00883	0.06565	0.00045	0.02115	0.00025	431	27	413	6	410	3	423	5
LB-8-5	93.69	171.59	624.59	0.27	0.05447	0.00086	0.48524	0.00642	0.06465	0.00041	0.02128	0.00024	391	18	402	4	404	2	426	5
LB-8-6	69.70	129.24	261.12	0.49	0.05471	0.00129	0.48417	0.01057	0.06422	0.00047	0.02036	0.00028	400	36	401	7	401	3	407	6
LB-8-8	71.58	133.04	209.05	0.64	0.05759	0.00155	0.51099	0.01289	0.06439	0.00052	0.02084	0.0003	393	86	400	12	401	3	401	2
LB-8-11	66.62	122.15	416.96	0.29	0.05494	0.0011	0.497	0.0089	0.06564	0.00046	0.02122	0.00032	410	27	410	6	410	3	424	6
LB-8-13	71.12	130.28	476.62	0.27	0.05493	0.00099	0.48822	0.00776	0.06449	0.00043	0.02054	0.00029	409	24	404	5	403	3	411	6
LB-8-17	352.99	663.06	926.79	0.72	0.0562	0.0008	0.50152	0.00578	0.06475	0.0004	0.00741	0.00007	460	15	413	4	404	2	149	1
LB-8-18	115.92	216.79	183.13	1.18	0.05519	0.00182	0.4908	0.0154	0.06453	0.00058	0.02041	0.00026	420	54	405	10	403	4	408	5
LB-8-21	115.92	212.77	701.64	0.30	0.05494	0.00081	0.4947	0.00597	0.06533	0.00041	0.02097	0.00021	410	16	408	4	408	2	419	4
LB-8-22	85.31	158.69	237.98	0.67	0.05503	0.00124	0.49691	0.01025	0.06551	0.00047	0.02091	0.00023	413	33	410	7	409	3	418	5
LB-8-23	99.40	185.02	266.48	0.69	0.05501	0.00135	0.49962	0.01137	0.0659	0.0005	0.02051	0.00025	413	37	411	8	411	3	410	5
LB-8-28	72.52	131.9	568.17	0.23	0.05486	0.00086	0.49507	0.00652	0.06548	0.00041	0.02346	0.00028	407	18	408	4	409	2	469	6
LB-8-29	85.62	157.62	431.75	0.37	0.05431	0.00096	0.4831	0.00749	0.06453	0.00042	0.0235	0.00026	384	23	400	5	403	3	469	5
LB-8-31	88.10	163.36	278.55	0.59	0.05494	0.00121	0.49628	0.00996	0.06554	0.00047	0.02352	0.00026	410	32	409	7	409	3	470	5

$Pb_{\text{rad}} = 0.241 \times ^{206}\text{Pb} + 0.221 \times ^{207}\text{Pb} + 0.524 \times ^{208}\text{Pb}$; $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U} = (e^{\lambda_{235}t} - 1) / \lambda_{235}$, decay constant of ^{235}U . 同位素和年龄均经过普通 Pb 校正, 方法参照 Andersen(2002). 文章中

所以引用的年龄均为 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 年龄。另注: 删除线表示该点数据未参与加权平均年龄的计算。

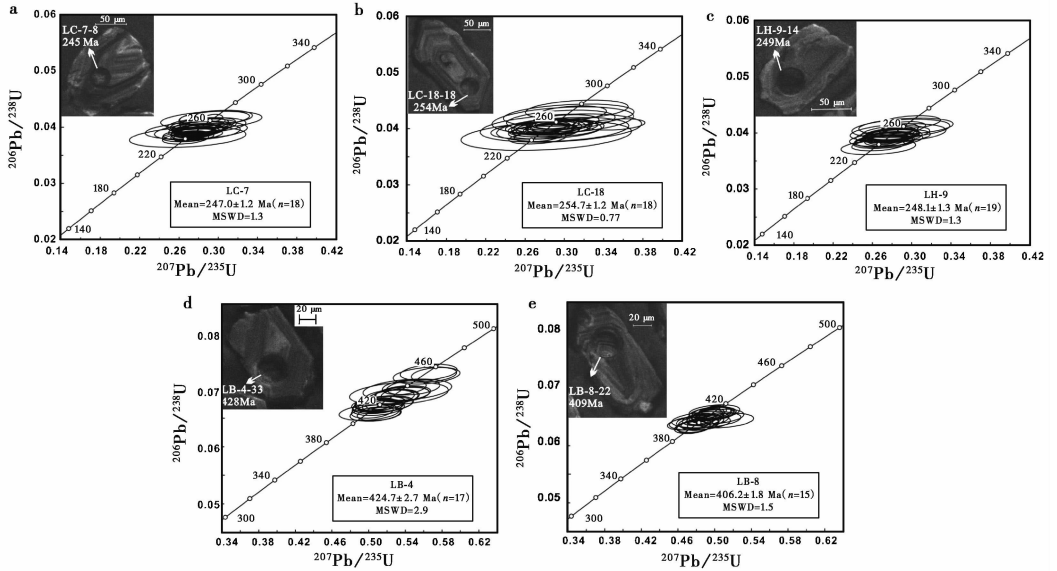


图 3 老挝北部花岗岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 Zircon age concordia diagrams of granites from North Laos

样品 LB-4 和 LB-8 来自 Laosang 岩体, 锆石为浅粉红或无色, 棱柱状, 长约为 80~150 μm , 具有明显的振荡环带 (图 3)。LB-4 中 17 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均年龄为 424.7 ± 2.7 Ma, LB-8 中 15 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的平均年龄为 406.2 ± 1.8 Ma 年龄 (表 1) 样品 LB-4 的 Th/U 比值为 0.26~1.24, 样品 LB-8 的 Th/U 比值为 0.27~1.28, 指示典型岩浆岩来源。由于这些数据来自锆石核部和边缘, 424.7~407 Ma 代表了该岩体的侵入时间。

3.2 Lu-Hf 二阶段模式年龄

样品 LC-8 的 20 颗锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 349~0.282 728 之间 (见表 2), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值 0.282 483, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 0~-9.6 之间, 平均值为 -4.8; 地壳模式年龄 T_{DM}^{C} 变化范围在 1.97~1.03 Ga 之间, 加权平均值为 1.58 Ga (图 4)。

样品 LC-18 的 17 颗锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 466~0.282 670 之间 (见表 2), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值 0.282 536, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 2~-5 之间, 17 个样品中 2 个为正值, 其余均为负值, 平均值 -2.8; 地壳模式年龄 T_{DM}^{C} 变化范围在 1.66~1.15 Ga 之间, 加权平均值 1.46 Ga (图 4)。

样品 LH-1 的 20 颗锆石 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 424~0.282 624 之间 (附表 2, LH-1 的 U-Pb 年龄数据见 Wang et al., 2015[⊕]), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值

⊕ Wang S, Mo Y, Wang C et al. 2015. Paleotethyan evolution of the Indochina Block as deduced from granites in northern Laos. Submit to Gondwana Research.

表2 老挝北部地区花岗岩 Lu-Hf 同位素比值
Table 2 Hf isotopic data for zircons from the granite complex

样品号	年龄 /Ma	$^{176}\text{Yb}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Lu}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Hf}/$ ^{177}Hf	2σ	$^{176}\text{Hf}/$ $^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	THfDM ₁	T_{DM}^{C}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LC-7-1	249	0.043336	0.000837	0.282496	0.000030	0.282492	-9.8	-4.4	1.065	1.559	-0.975
LC-7-2	250	0.080719	0.001575	0.282735	0.000049	0.282728	-1.3	3.9	0.744	1.027	-0.953
LC-7-3	243	0.079260	0.001514	0.282415	0.000045	0.282408	-12.6	-7.5	1.199	1.750	-0.954
LC-7-4	255	0.043296	0.000879	0.282597	0.000029	0.282593	-6.2	-0.7	0.924	1.328	-0.974
LC-7-5	245	0.051381	0.001022	0.282533	0.000032	0.282528	-8.5	-3.3	1.018	1.480	-0.969
LC-7-6	257	0.067689	0.001375	0.282469	0.000042	0.282462	-10.7	-5.3	1.119	1.620	-0.959
LC-7-7	250	0.069767	0.001334	0.282506	0.000037	0.282500	-9.4	-4.1	1.065	1.540	-0.960
LC-7-8	244	0.050372	0.000953	0.282418	0.000030	0.282414	-12.5	-7.3	1.176	1.736	-0.971
LC-7-9	245	0.057292	0.001270	0.282485	0.000043	0.282479	-10.2	-5.0	1.092	1.590	-0.962
LC-7-10	249	0.056401	0.001088	0.282467	0.000032	0.282462	-10.8	-5.5	1.113	1.626	-0.967
LC-7-11	240	0.035726	0.000726	0.282430	0.000032	0.282427	-12.1	-6.9	1.153	1.710	-0.978
LC-7-12	248	0.004006	0.000053	0.282452	0.000013	0.282451	-11.3	-5.9	1.104	1.650	-0.998
LC-7-13	249	0.053323	0.001017	0.282426	0.000039	0.282421	-12.2	-6.9	1.168	1.716	-0.969
LC-7-14	247	0.042459	0.000860	0.282622	0.000032	0.282618	-5.3	0.0	0.888	1.276	-0.974
LC-7-15	263	0.051394	0.001007	0.282311	0.000029	0.282306	-16.3	-10.7	1.328	1.965	-0.970
LC-7-16	255	0.055364	0.001041	0.282526	0.000035	0.282521	-8.7	-3.3	1.028	1.490	-0.969
LC-7-17	242	0.033819	0.000650	0.282498	0.000030	0.282495	-9.7	-4.5	1.057	1.557	-0.980
LC-7-18	243	0.067839	0.001348	0.282356	0.000042	0.282349	-14.7	-9.6	1.278	1.881	-0.959
LC-7-19	250	0.040565	0.000817	0.282555	0.000030	0.282552	-7.7	-2.3	0.981	1.424	-0.975
LC-7-20	251	0.048026	0.000923	0.282459	0.000032	0.282455	-11.1	-5.7	1.119	1.641	-0.972
LC-18-1	252	0.070711	0.001298	0.282480	0.000042	0.282474	-10.3	-5.0	1.101	1.598	-0.961
LC-18-2	259	0.060523	0.001108	0.282568	0.000032	0.282563	-7.2	-1.7	0.970	1.393	-0.967
LC-18-3	249	0.041962	0.000834	0.282534	0.000027	0.282530	-8.4	-3.1	1.012	1.474	-0.975
LC-18-5	251	0.053572	0.000998	0.282532	0.000029	0.282527	-8.5	-3.1	1.019	1.478	-0.970
LC-18-6	268	0.097458	0.001768	0.282551	0.000080	0.282542	-7.8	-2.3	1.013	1.434	-0.947
LC-18-7	253	0.072971	0.001399	0.282566	0.000048	0.282559	-7.3	-2.0	0.981	1.404	-0.958
LC-18-8	243	0.048753	0.000913	0.282581	0.000026	0.282577	-6.8	-1.6	0.948	1.372	-0.972
LC-18-9	244	0.067462	0.001235	0.282456	0.000035	0.282450	-11.2	-6.0	1.132	1.655	-0.963
LC-18-10	245	0.046683	0.000869	0.282543	0.000035	0.282539	-8.1	-2.9	0.999	1.455	-0.974
LC-18-12	254	0.076681	0.001371	0.282492	0.000041	0.282486	-9.9	-4.5	1.085	1.569	-0.959
LC-18-13	253	0.090638	0.001573	0.282473	0.000050	0.282466	-10.6	-5.3	1.118	1.614	-0.953
LC-18-14	255	0.064442	0.001537	0.282483	0.000033	0.282476	-10.2	-4.9	1.103	1.591	-0.954
LC-18-15	254	0.043571	0.000810	0.282560	0.000027	0.282556	-7.5	-2.0	0.974	1.410	-0.976
LC-18-16	256	0.062918	0.001183	0.282529	0.000044	0.282523	-8.6	-3.2	1.028	1.484	-0.964
LC-18-17	254	0.113919	0.002062	0.282680	0.000047	0.282670	-3.2	2.0	0.833	1.153	-0.938
LC-18-19	258	0.095059	0.001692	0.282559	0.000039	0.282550	-7.5	-2.2	0.999	1.421	-0.949
LC-18-20	256	0.088248	0.001551	0.282624	0.000043	0.282616	-5.2	0.1	0.903	1.275	-0.953
LH-1-1	250	0.087671	0.001470	0.282536	0.000038	0.282529	-8.4	-3.1	1.026	1.475	-0.956
LH-1-2	256	0.053331	0.000958	0.282475	0.000024	0.282470	-10.5	-5.1	1.098	1.603	-0.971
LH-1-3	245	0.076847	0.001396	0.282510	0.000036	0.282504	-9.3	-4.1	1.060	1.534	-0.958

续表 2

样品号	年龄 /Ma	$^{176}\text{Yb}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Lu}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Hf}/$ ^{177}Hf	2σ	$^{176}\text{Hf}/$ $^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	THfDM ₁	T_{DM}^{C}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LH-1-4	251	0.076164	0.001365	0.282462	0.000035	0.282456	-11.0	-5.7	1.127	1.638	-0.959
LH-1-5	243	0.059127	0.001127	0.282452	0.000042	0.282446	-11.3	-6.2	1.135	1.664	-0.966
LH-1-6	244	0.054005	0.000907	0.282543	0.000033	0.282538	-8.1	-2.9	1.001	1.457	-0.973
LH-1-7	240	0.053609	0.000917	0.282428	0.000038	0.282424	-12.2	-7.0	1.162	1.717	-0.972
LH-1-8	247	0.075574	0.001296	0.282535	0.000034	0.282529	-8.4	-3.2	1.023	1.477	-0.961
LH-1-9	244	0.056188	0.001027	0.282481	0.000032	0.282476	-10.3	-5.1	1.091	1.598	-0.969
LH-1-10	248	0.051017	0.000887	0.282513	0.000031	0.282509	-9.1	-3.8	1.042	1.520	-0.973
LH-1-11	246	0.076559	0.001328	0.282549	0.000036	0.282543	-7.9	-2.7	1.004	1.446	-0.960
LH-1-12	255	0.056919	0.001001	0.282481	0.000033	0.282476	-10.3	-4.9	1.091	1.590	-0.970
LH-1-13	256	0.067997	0.001195	0.282518	0.000034	0.282512	-9.0	-3.6	1.043	1.508	-0.964
LH-1-14	258	0.091138	0.001555	0.282632	0.000038	0.282624	-5.0	0.4	0.891	1.255	-0.953
LH-1-15	250	0.057634	0.001011	0.282439	0.000030	0.282435	-11.8	-6.4	1.149	1.686	-0.970
LH-1-16	251	0.059063	0.001150	0.282550	0.000048	0.282544	-7.9	-2.5	0.997	1.439	-0.965
LH-1-17	246	0.058277	0.001049	0.282598	0.000027	0.282593	-6.2	-0.9	0.927	1.334	-0.968
LH-1-18	250	0.053930	0.000955	0.282494	0.000027	0.282490	-9.8	-4.5	1.070	1.563	-0.971
LH-1-19	245	0.047772	0.000875	0.282457	0.000025	0.282453	-11.1	-5.9	1.120	1.648	-0.974
LH-1-20	257	0.058347	0.001035	0.282478	0.000030	0.282473	-10.4	-4.9	1.096	1.596	-0.969
LH-9-1	253	0.070716	0.001322	0.282327	0.000050	0.282321	-15.7	-10.4	1.317	1.939	-0.960
LH-9-2	244	0.075246	0.001398	0.282489	0.000043	0.282483	-10.0	-4.9	1.090	1.582	-0.958
LH-9-3	254	0.079037	0.001508	0.282482	0.000040	0.282475	-10.2	-4.9	1.103	1.593	-0.955
LH-9-4	245	0.054557	0.001069	0.282502	0.000033	0.282497	-9.6	-4.4	1.063	1.550	-0.968
LH-9-5	239	0.059237	0.001184	0.282521	0.000036	0.282516	-8.9	-3.8	1.039	1.511	-0.964
LH-9-6	244	0.068948	0.001272	0.282441	0.000034	0.282435	-11.7	-6.6	1.155	1.690	-0.962
LH-9-7	248	0.040636	0.000763	0.282390	0.000031	0.282386	-13.5	-8.2	1.210	1.795	-0.977
LH-9-8	251	0.061546	0.001150	0.282456	0.000041	0.282450	-11.2	-5.9	1.130	1.651	-0.965
LH-9-9	246	0.070465	0.001328	0.282461	0.000036	0.282455	-11.0	-5.8	1.128	1.644	-0.960
LH-9-10	254	0.085691	0.001588	0.282564	0.000044	0.282557	-7.4	-2.0	0.989	1.410	-0.952
LH-9-11	237	0.061186	0.001129	0.282390	0.000043	0.282385	-13.5	-8.5	1.222	1.806	-0.966
LH-9-12	249	0.054476	0.001019	0.282491	0.000033	0.282486	-9.9	-4.6	1.077	1.571	-0.969
LH-9-13	241	0.055705	0.001192	0.282429	0.000027	0.282423	-12.1	-7.0	1.169	1.717	-0.964
LH-9-14	248	0.070200	0.001405	0.282510	0.000038	0.282503	-9.3	-4.1	1.061	1.534	-0.958
LH-9-15	258	0.061883	0.001183	0.282516	0.000033	0.282510	-9.1	-3.6	1.046	1.512	-0.964
LH-9-17	249	0.054367	0.001052	0.282491	0.000037	0.282486	-9.9	-4.6	1.077	1.571	-0.968
LH-9-18	252	0.058936	0.001140	0.282408	0.000043	0.282403	-12.9	-7.5	1.197	1.757	-0.966
LH-9-19	252	0.082188	0.001538	0.282444	0.000043	0.282437	-11.6	-6.3	1.158	1.680	-0.954
LB-4-1	432	0.102853	0.001615	0.282507	0.000038	0.282494	-9.4	-0.3	1.071	1.436	-0.951
LB-4-2	413	0.102563	0.001595	0.282607	0.000053	0.282595	-5.8	2.8	0.928	1.222	-0.952
LB-4-4	395	0.113523	0.001811	0.282530	0.000055	0.282516	-8.6	-0.4	1.044	1.411	-0.945
LB-4-5	405	0.120840	0.002026	0.282115	0.000039	0.282099	-23.2	-14.9	1.646	2.335	-0.939
LB-4-6	438	0.106958	0.001837	0.282468	0.000038	0.282453	-10.8	-1.6	1.133	1.525	-0.945

续表 2

样品号	年龄 /Ma	$^{176}\text{Yb}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Lu}/$ ^{177}Hf	$^{176}\text{Hf}/$ ^{177}Hf	2σ	$^{176}\text{Hf}/$ $^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	THfDM ₁	T_{DM}^{C}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
LB-4-8	454	0.084202	0.001446	0.282350	0.000029	0.282338	-14.9	-5.4	1.289	1.772	-0.956
LB-4-12	421	0.098107	0.001649	0.282393	0.000035	0.282380	-13.4	-4.6	1.235	1.700	-0.950
LB-4-13	422	0.101087	0.001430	0.282456	0.000070	0.282445	-11.2	-2.3	1.138	1.553	-0.957
LB-4-14	410	0.110341	0.001824	0.282380	0.000063	0.282365	-13.9	-5.4	1.260	1.738	-0.945
LB-4-15	420	0.097810	0.001628	0.282456	0.000037	0.282443	-11.2	-2.4	1.144	1.558	-0.951
LB-4-16	418	0.093496	0.001639	0.282433	0.000031	0.282420	-12.0	-3.2	1.177	1.610	-0.951
LB-4-17	436	0.093462	0.001590	0.282148	0.000038	0.282135	-22.1	-12.9	1.580	2.236	-0.952
LB-4-18	416	0.073932	0.001267	0.282503	0.000032	0.282493	-9.5	-0.7	1.067	1.448	-0.962
LB-4-19	445	0.155966	0.002682	0.282485	0.000056	0.282463	-10.1	-1.1	1.135	1.498	-0.919
LB-4-20	428	0.108751	0.001862	0.282393	0.000036	0.282378	-13.4	-4.5	1.241	1.698	-0.944
LB-8-01	400	0.046966	0.000889	0.282430	0.000028	0.282423	-12.1	-3.5	1.158	1.615	-0.973
LB-8-02	410	0.109054	0.002059	0.282352	0.000047	0.282336	-14.8	-6.4	1.307	1.803	-0.938
LB-8-03	395	0.055587	0.001066	0.282365	0.000032	0.282357	-14.4	-6.0	1.255	1.768	-0.968
LB-8-04	401	0.087310	0.001583	0.282406	0.000045	0.282394	-13.0	-4.6	1.214	1.681	-0.952
LB-8-05	387	0.072243	0.001372	0.282329	0.000029	0.282319	-15.7	-7.5	1.316	1.857	-0.959
LB-8-06	401	0.106366	0.002050	0.282232	0.000044	0.282217	-19.1	-10.8	1.479	2.076	-0.938
LB-8-07	395	0.078704	0.001508	0.282323	0.000045	0.282311	-15.9	-7.6	1.330	1.869	-0.955
LB-8-08	410	0.123864	0.002398	0.282417	0.000051	0.282398	-12.6	-4.2	1.225	1.664	-0.928
LB-8-09	400	0.072256	0.001412	0.282378	0.000033	0.282367	-13.9	-5.5	1.248	1.741	-0.957
LB-8-10	418	0.103935	0.001986	0.282356	0.000049	0.282340	-14.7	-6.1	1.300	1.790	-0.940
LB-8-11	412	0.140564	0.002682	0.282343	0.000061	0.282322	-15.2	-6.8	1.343	1.833	-0.919
LB-8-12	395	0.106927	0.002061	0.282511	0.000057	0.282495	-9.2	-1.1	1.079	1.457	-0.938
LB-8-13	404	0.108199	0.002089	0.282335	0.000040	0.282319	-15.5	-7.1	1.334	1.847	-0.937
LB-8-15	399	0.079428	0.001553	0.282304	0.000039	0.282292	-16.6	-8.2	1.358	1.910	-0.953
LB-8-17	436	0.090483	0.001764	0.282359	0.000045	0.282345	-14.6	-5.5	1.287	1.768	-0.947
LB-8-18	396	0.065516	0.001252	0.282395	0.000032	0.282385	-13.3	-5.0	1.220	1.703	-0.962
LB-8-19	419	0.092240	0.001786	0.282424	0.000044	0.282410	-12.3	-3.6	1.195	1.633	-0.946
LB-8-20	398	0.113072	0.002131	0.282486	0.000071	0.282470	-10.1	-1.9	1.117	1.513	-0.936
LB-8-21	409	0.074762	0.001372	0.282406	0.000044	0.282396	-12.9	-4.3	1.207	1.672	-0.959
LB-8-22	403	0.179155	0.003465	0.282392	0.000067	0.282366	-13.4	-5.5	1.299	1.741	-0.896
LB-8-23	411	0.103235	0.001953	0.282411	0.000059	0.282396	-12.8	-4.3	1.219	1.670	-0.941
LB-8-24	409	0.090238	0.001762	0.282399	0.000044	0.282386	-13.2	-4.7	1.230	1.694	-0.947

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10^4 \times \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \}$,
 $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{m}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{m}}] \}$,
 $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = T_{\text{DM}} - (T_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{cc}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{cc}} - f_{\text{DM}})]$, $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$,
 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ and $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品的实测值;
 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033 2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}, 0} = 0.282 772$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038 4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283 25$;
 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{mean crust}} = 0.015$;
 $f_{\text{cc}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{mean crust}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; f_{s} 为锆石的 $f_{\text{Lu/Hf}}$, $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$;
 t = 结晶年龄

0.282 501, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 0.4~-7.0 之间, 20 个样品中 1 个为正值, 其余均为负值, 平均值-4.1; 地壳模式年龄 T_{DM}^{c} 变化范围在 1.26~1.69 Ga 之间, 加权平均值 1.54 Ga (图 4)。

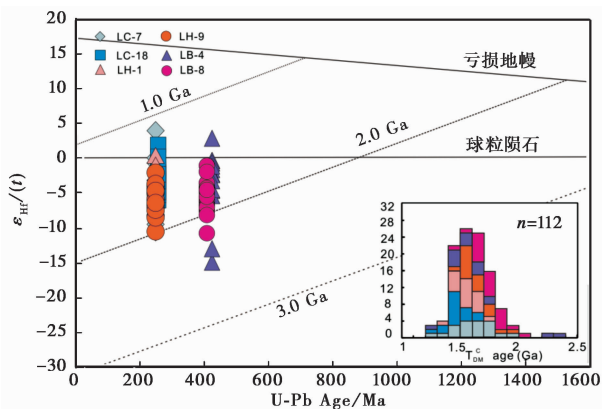


图 4 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -U-Pb 投点图

Fig. 4 Plot of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb ages for granites from northern Laos

样品 LH-9 的 18 颗锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 321~0.282 557 之间 (表 2), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值 0.282 456, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 -2.0~-10.4 之间, 20 个样品均为负值, 平均值-5.7; 地壳模式年龄 T_{DM}^{c} 变化范围在 1.94~1.41 Ga 之间, 加权平均值 1.64 Ga (图 4)。

样品 LB-4 的 15 颗锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 099~0.282 595 之间 (表 2), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值 0.282 401, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 2.8~-14.9 之间, 15 个样品中只有一个为正值, 其余均为负值, 平均值-3.8; 地壳模式年龄 T_{DM}^{c} 变化范围在 2.34~1.22 Ga 之间, 加权平均值 1.65 Ga (图 4)。

样品 LH-8 的 22 颗锆石的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) 的变化范围在 0.282 217~0.282 495 之间 (附表 2), Hf 同位素成分比较均一, 加权平均值 0.282 366, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围在 -1.1~-10.8 之间, 22 个样品均为负值, 平均值-5.5; 地壳模式年龄 T_{DM}^{c} 变化范围在 1.51~2.08 Ga 之间, 加权平均值 1.74 Ga (图 4)。

4 讨论与结论

4.1 印支地块基底特征及其与兰坪昌都地块的关系

由印支期花岗岩和加里东期花岗岩的 Lu-Hf 比值可以看到, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中在 -10~0 之间, 有少量显示正值, 表示花岗岩物质来源主要来自地壳, 少量地幔物质混入。其二阶段模式年龄集中在 2.0~1.5 Ga 之间, 与 Wang et al.(2015) 在本区早期的研究结果一致 (图 5a)。Lan et al.(2003) 总结的印支地块的锆石年龄及 Lu-Hf 二阶段模式年龄表明, 印支地块经历的第一次造山运动在 2.7~2.4 Ga 期间, 在 1.4~1.2 Ga 期间经历了另一次造山运动。我们在老挝的 Lu-Hf 比值数据遵循这一特征, 表明印支地块内

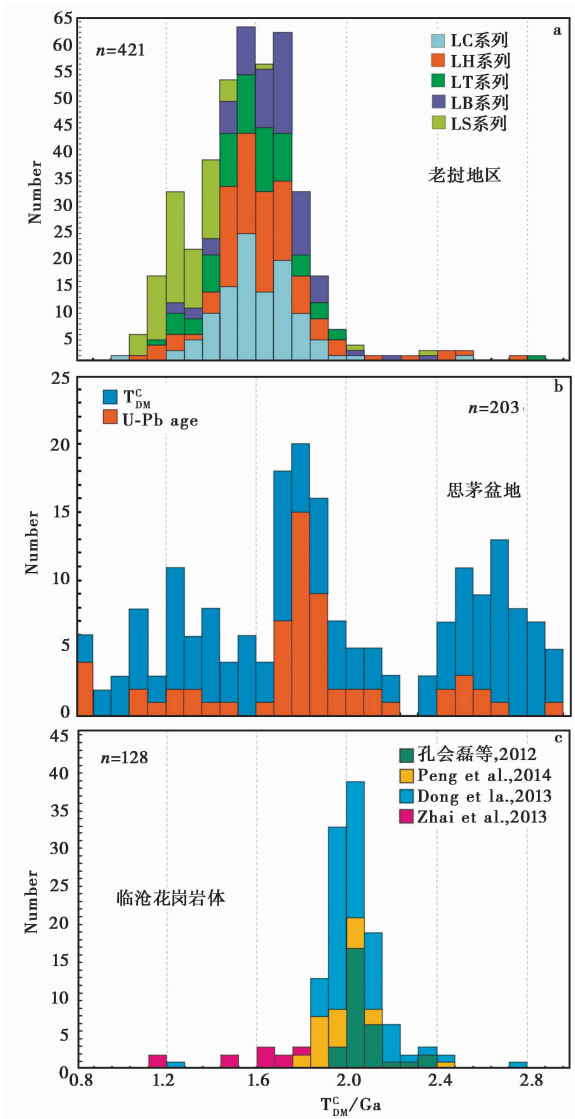


图5 老挝北部地区花岗岩 Lu-Hf 二阶段模式年龄直方图(a), 部分数据来自 wang et al.(2015); 思茅—昌都地块碎屑锆石 U-Pb 年龄及锆石 Lu-Hf 二阶段年龄直方图(b); 临沧花岗岩体锆石 Lu-Hf 二阶段模式年龄直方图(c)

Fig. 5 Zircon Lu-Hf T_{DM}^C histograms from granite massif

a. Laos; b. Simao Basin; c. Lincang

部有统一的物质来源。

过去曾认为莫边府构造带为分割印支地块与思茅—昌都地块的缝合带 (Sengör, 1979; Leloup et al., 1995), 近年来的工作已否认了这种说法 (Liu et al., 2012; Faure et al., 2014; Wang et al., 2015)。关于这两个地区的基底是否一体, 需要更多的岩石学、岩石地球化学及构造方面的工作来证实。地层及古生物证据表明昌都—思茅地块有与印

支地块相似的古生代暖水动物群 (Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2013), 表明这两个地块具有亲缘性, 思茅盆地中生代碎屑锆石 U-Pb 年龄数据有两个峰值区, 2.5~2.4 Ga 和 1.9~1.8 Ga (Wang et al., 2014), 与本文数据显示的峰值区吻合 (图 5b), 同时与印支地块泰国呵叻盆地沉积物有相似的年龄峰值 (Carter and Bristow, 2003)。Wang et al. (2014) 进一步指出思茅和呵叻盆地有相同的物源区, 其物源区应为华南地块秦岭造山带。而更西北端的北羌塘双湖附近, 该地块的花岗岩二阶段模式年龄在 1.8~1.6 Ga 区间 (Zhai et al., 2013), 与印支地块相同。碎屑锆石和花岗岩 Lu-Hf 数据表明印支地块与昌都—思茅地块具有相同的年龄峰值构成, 存在成为同一地块的可能性。思茅盆地由于发育中生代沉积盆地而鲜有基底露头出露, 现有为数不多的锆石 Lu-Hf 研究均集中在临沧花岗岩带以及更北的澜沧江缝合带一线。临沧花岗岩带在印支地块对应部分是 Sukhothai 地体 (Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2013), 已有的 Lu-Hf 和 Rb-Sr 比值显示, 临沧花岗岩二阶段模式年龄集中在 2.1~1.8 Ga (孔会磊等, 2012; Peng et al., 2014; Dong et al., 2013; 图 5c), 略早于印支地块的峰值, 这表明作为岛弧的临沧花岗岩体和 Sukhothai 岩体相对于昌都—思茅地块和印支地块有独特的演化史, 许多研究者认为它们均是在古特提斯闭合时拼贴在主陆块之上的 (Sone and Metcalfe, 2008; Metcalfe, 2013; Faure et al., 2014)。

4.2 印支地块与华南地块的关系

印支地块, 昌都—思茅地块与华南地块因为有相似的古生代暖水动物群而被古生物学家认为他们在特提斯演化中同属华南板块, 然而, 金沙江蛇绿岩带研究发现约 338 Ma 的洋壳成分 (Jian et al., 2008), 表明在晚古生代时期这两个板块之间存在洋盆, 而大量的 250~200 Ma 期间造山带证据也表明印支地块与华南地块是印支期才拼合在一起的。据李献华等 (2012) 总结的华南板块基底 U-Pb 年龄及 Lu-Hf 二阶段模式年龄特征显示其年龄峰值分别是: 约 2.5~2.3 Ga, 2.0~1.8 Ga 和 1.4 Ga, 与印支地块相似度极高, 表明在 Rodinia 超大陆阶段两者可能是一体的。Lan et al. (2003) 总结的印支地块的历史演化中, 2.6~2.4 Ga 是板块演化的第一个峰值, 板块缺少 4.0~3.5 Ga 这期代表华南地块最早演化时期的资料。然而, 近年在昌都地块玉树小莽岭地区, 何世平等 (2011) 首次报道了昌都地块 4.0 Ga 古老基底的存在, 并认为昌都地块和华南地块具有亲缘性。由此, 昌都—思茅—印支地块与华南地块有完全相同的 Lu-Hf 同位素峰值谱, 表明这两大陆块有相同的基底演化史。

4.3 结 论

老挝北部花岗岩的同位素数据表明印支地块在 1.8~1.6 Ga 时有一期重要的造山运动, 结合印支地块内其它相关数据, 印支地块陆核的形成经历了 2.5~2.3 Ga、2.0~1.6 Ga 和 1.5~1.2 Ga 的 3 个重要的发展期。印支地块的形成发展史与昌都思茅地块以及华南地块相似, 表明他们可能有统一的 Rodinia 基底。昌都—思茅地块与印支地块是一个地块的推论对印支地块在新生代经历大规模逃逸的假说是否成立有至关重要的影响。

参 考 文 献

- 何世平, 李荣社, 王超等. 2011. 青藏高原北羌塘昌都地块发现~4.0 Ga 碎屑锆石. 科学通报, **56**(8): 573—582.
- He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao et al. 2011. Discovery of ~4.0 Ga detrital zircons in the Changdu block, North Qiangtang, Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **56**(7): 647—658.
- 孔会磊, 董国臣, 莫宣学等. 2012. 滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束. 岩石学报, **28**(5): 1438—1452.
- Kong Huilie, Dong Guochen, Mo Xuanxue et al. 2012. Petrogenesis of Lincang granites in Sanjiang area of western Yunnan Province: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, **28**(5): 1438—1452.
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解—观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报, **31**(6): 543—559.
- Li Xianhua, Li Wuxian and He Bin. 2012. Building of the South China block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: Observations, interpretations and tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, **31**(6): 543—559.
- Barr S M and MacDonald A S. 1987. Nan River suture zone, northern Thailand. *Geology*, **15**(10): 907—910.
- Barr S M, MacDonald A S, Dunning G R et al. 2000. Petrochemistry, U-Pb (zircon) age, and palaeotectonic setting of the Lampang volcanic belt, northern Thailand. *Journal of the Geological Society*, **157**(3): 553—563.
- Carter A and Bristow C S. 2003. Linking hinterland evolution and continental basin sedimentation by using detrital zircon thermochronology: A study of the Khorat Plateau Basin, eastern Thailand. *Basin Research*, **15**(2): 271—285.
- Department of Geology and Mine, Lao P. D. R. (DGM), 1991. Geological and Mineral Occurrence Map. 1:1000000 scale. British Geological Survey and Department of Geology and Mines.
- Dong G C, Mo X X, Zhao Z D et al. 2013. Zircon U-Pb dating and the petrological and geochemical constraints on Lincang granite in western Yunnan, China: Implications for the closure of the Paleo-Tethys ocean. *Journal of Asian Earth Sciences*, **62**: 282—294.
- Faure M, Lepvrier C, Nguyen V et al. 2014. The South China block-Indochina collision: Where, when, and how? *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, **79**: 260—274.
- Fromaget J. 1934. Observations et réflexions sur la géologie stratigraphique et structurale de l'Indochine. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **4**(5): 101—164.
- Hutchison C S. 1975. Ophiolite in Southeast Asia. *Geological Society of America Bulletin*, **86**(6): 797—806.
- Jian P, Liu D Y and Sun X M. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, southwestern China: Geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, **32**(5—6): 371—384.
- Lan C Y, Chung S L, Van Long T et al. 2003. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints from the Kontum massif, central Vietnam on the crustal evolution of the Indochina block. *Precambrian Research*, **122**(1—4): 7—27.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P et al. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, **251**(1—4): 3—84.
- Lepvrier C, Maluski H, Van Tich V et al. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif); implications for the geodynamic evolution of Indochina. *Tectonophysics*, **393**(1—4): 87—118.
- Lepvrier C, Van Vuong N, Maluski H et al. 2008. Indosinian tectonics in Vietnam. *Comptes Rendus Geoscience*, **340**(2—3): 94—111.
- Li X, Liu Y, Li Q et al. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **10**(4): doi:10.1029/2009GC002400.
- Lin T H, Lo C H, Chung S L et al. 2009. Jurassic dextral movement along the Dien Bien Phu fault, NW Vietnam: Constraints

from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *The Journal of Geology*, **117**(2): 192—199.

- Liu D L, Shi R D, Ding L et al. 2015. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of Mesozoic granitoids in southern Qiangtang, Tibet: Implications for the subduction of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean. *Gondwana Research*, in Press; doi:10.1016/j.gr.2015.04.007.
- Liu J L, Tran M D, Tang Y et al. 2012. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Gondwana Research*, **122**(2): 628—644.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3. 00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. In: Berkeley Geochronology Center Special Publication 4.
- Metcalfe I. 1996. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes. *Geological Society of London Special Publication*, **106**(1): 97—122.
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and paleogeography of SE Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **20**(6): 551—566.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, **66**: 1—22.
- Peng T P, Zhao G C, Fan W M et al. 2014. Late Triassic granitic magmatism in the eastern Qiangtang, eastern Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for the tectonic evolution of the Paleo-Tethys. *Gondwana Research*, **27**(4): doi: 10.1016/j.jgr.2014.01.009.
- Roger F, Jolivet M, Maluski H et al. 2014. Emplacement and cooling of the Dien Bien Phu granitic complex: Implications for the tectonic evolution of the Dien Bien Phu fault (Truong Son belt, NW Vietnam). *Gondwana Research*, **26**(2): 785—801.
- Sengör A M C. 1979. Mid-Mesozoic closure of Permo-Triassic Tethys and its implications. *Nature*, **279**(5714): 590—593.
- Sláma J, Košler J, Condon D J et al. 2008. Plesovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, **249**(1—2): 1—35.
- Sone M and Metcalfe I. 2008. Parallel Tethyan suture in mainland Southeast Asia: New insights from Paleo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny. *Comptes Rendus Geoscience*, **340**(2—3): 166—179.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, **10**(12): 611—616.
- Wang L C, Liu C L, Gao X et al. 2014. Provenance and paleogeography of the Late Cretaceous Mengyejing Formation, Simao Basin, southeastern Tibetan Plateau: Whole-rock geochemistry, U-Pb geochronology, and Hf isotopic constraints. *Sedimentary Geology*, **304**: 44—58. ▲
- Zhai Q G, Jahn B M, Su L et al. 2013. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, **63**: 162—178.

Zircon U-Pb age and Lu-Hf ratios constraint the basement of the Indochina block

Wang Chao^{1,2} Wang Shifeng² Mo Yasi^{1,2}

(1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Nature of the Indochina blocks is not only important to Tethys study but also important to the Cenozoic deformation style of the Tibetan Plateau. There is little knowledge from the north Laos which locates inner of the Indochina. Our study shows most of the granites in north Laos are related to the closure of the Tethys, a few related to Caledonian orogeny. T_{DM}^C ages of zircon Lu-Hf in north Laos cluster around 1.8~1.6 Ga, other ages cluster around 1.4~1.2 Ga. The zircon U-Pb and T_{DM}^C age peaks in north Laos are similar to the ages got in other areas of Indochina block, indicating the same basement in the Indochina block. The age peaks are also similar to that of the Changdu-Simao peaks, indicating the possibility of the same basement of the Indochina-Simao untied block if the Dien Bien Phu belt between the blocks is not ophiolite suites. The united block should be the same basement with the Yangtze block in Rodinia era due to the same age peaks around 4.0–3.5 Ga, 2.0–1.8 Ga, and 1.4–1.2 Ga.

Key Words Laos, Granite, U-Pb age, Lu-Hf T_{DM}^C age, Rodinia