

# 湘中地区冷家溪群和板溪群锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及对华南新元古代构造演化的意义

孟庆秀<sup>1,2</sup> 张 健<sup>3</sup> 耿建珍<sup>3</sup> 张传林<sup>2</sup> 黄文成<sup>2</sup>

(1.成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059;2.南京地质矿产研究所,江苏 南京 210016;  
3.天津地质矿产研究所,天津 310170)

**摘要:**通过对江南造山带中段冷家溪群和板溪群凝灰岩及碎屑岩锆石 U-Pb 定年及系统的 Hf 同位素分析表明,冷家溪群沉积时代大致在 860~820 Ma,不整合在其上的板溪群沉积下限在 820 Ma 左右,这表明在江南造山带,晋宁造山运动之后,很快进入伸展裂解阶段。锆石的 Hf 同位素组成显示,在 850~800 Ma 之间,锆石 Hf 初始值表现出快速上升趋势,表明这一时期有显著的地幔物质加入。造成这一现象的原因,一方面是早期的岛弧岩浆岩(850~820 Ma,尤其是 I 型花岗岩)是碎屑物的主要来源,另一方面造山后快速裂解形成的壳幔混合岩浆物质(如凝灰岩)形成板溪群部分物质来源。结合本研究和前人的研究成果,表明新元古代板块俯冲、拼合以及拼合后由于板片的拆沉引起的快速裂解(plate-rift model)是江南造山带形成的比较合理的地球动力学模型。

**关键词:**江南造山带;冷家溪群;板溪群;锆石 U-Pb 年龄;Hf 同位素;地球动力学背景

**中图分类号:** P597;P534.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)01-0191-26

## 1 引言

华南地区处于欧亚板块和太平洋板块交接处,由扬子、华夏、印支等 3 个较小的地块经过了多期次拼合、裂解以及板内造山等作用形成现今的构造格局。最近 20 年,华南地区中元古代晚期—新元古代构造演化以及相关的地球动力学背景,是国际研究热点。部分学者通过构造-岩石-地层研究、结合岩相-古地理年代学研究,认为中元古代末—新元古代早期扬子与华夏发生拼合,形成统一的华南板块(1.0~0.9 Ga,大致与格林威尔造山运动相当),并成为 Rodinia 超大陆的一部分。但也有一些学者认为,华南晋宁运动持续到 820~800 Ma,和格林威尔造山事件在时间上至少相差 0.2 Ga。对于华南新元古代中晚期的地球动力学背景,目前至少有三种完全不同的认识:地幔柱-裂解模式(plume-rift)<sup>[1-5]</sup>、板片-

岛弧模式(slab-arc model)<sup>[6-13]</sup>和板块裂解模式(plate-rift model)<sup>[14-15]</sup>。上述分析表明,目前对于华南地区新元古代构造演化还远远没有获得统一认识。

江南造山带的四堡群、梵净山群、冷家溪群及双桥山群和上溪群被认为是中元古代的变质地层<sup>[7]</sup>。这也是 Li 等<sup>[17-18]</sup>提出的最根本的证据之一(图 1-a)。但最近几年,大量锆石 U-Pb 定年的结果,使我们对这些地层单元需要进行重新认识<sup>[12,19-27]</sup>。新的资料表明,上述地层最年轻的锆石 U-Pb 年龄集中在 860~822 Ma<sup>[12,14,19-27]</sup>。而这些地层单元的沉积下限可以用侵入于其中的 825 Ma 左右的花岗岩进行限制。另外,在其上覆地层峡江群、丹洲群、板溪群、落可崇组及历口群中,获得了大量高精度的火山岩锆石 U-Pb 年龄,这些年龄主要集中在 815~767 Ma<sup>[4,26-28]</sup>。这些年龄同样对下伏地层的沉积时代给予了限制。

在本项研究中,笔者报道了江南造山带中段冷

收稿日期:2012-12-05;改回日期:2013-01-10

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(1212011121097,12120111210130)资助。

作者简介:孟庆秀,女,1979 年生,硕士,构造地质学方向;E-mail:mqxxqm@126.com。

通讯作者:张传林,E-mail:zchuanlin@yahoo.com.cn。

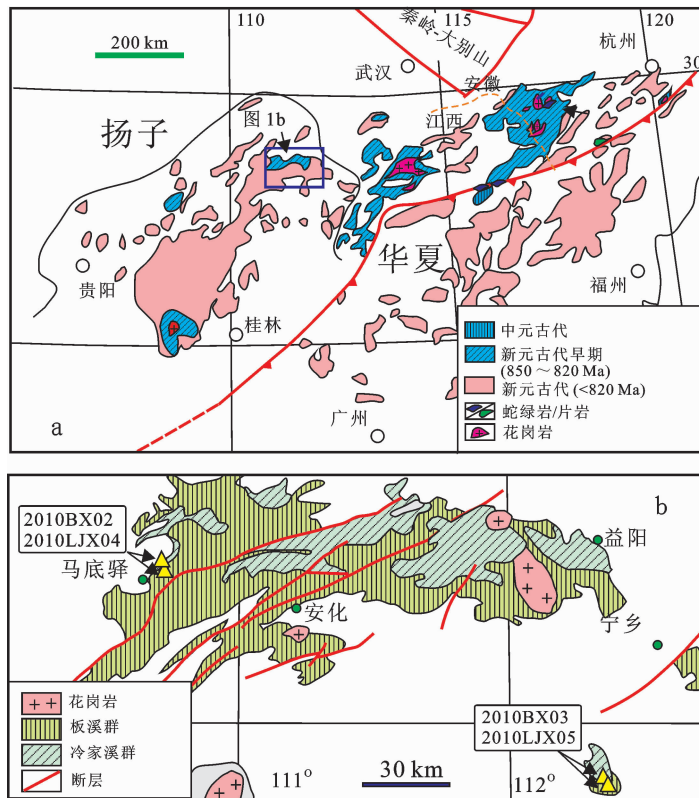


图1 江南造山带地质略图(a)及冷家溪群和板溪群分布图(b)  
(湖南地质矿产局,1991,b中黄色三角为采样点)

Fig.1 (a) Sketch geological map of the Jiangnan orogenic belt; (b) Geological map showing the distribution of Lengjiaxi Group and Banxi Group in the middle of the Jiangnan orogenic belt (modified after Hunan Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991) (The yellow triangle marks the sampling location)

家溪群、板溪群火山岩及碎屑岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成。一方面为了更好地制约华南新元古代造山事件发生的准确时间,另一方面,为探索华南新元古代大陆地壳生长以及相关的地球动力学背景提供新的证据。

## 2 区域地质概况

在江南造山带中段,广泛分布一套浅变质、强变形的类复理石沉积组合,以陆源碎屑岩为主,局部夹有少量的火山岩。这套地层被命名为冷家溪群,大致与江西的双桥山群、皖南地区的溪口群以及桂北地区四堡群、梵净山群等相当(图 1-b)。在冷家溪群之上,以高角度不整合覆盖了一套火山-沉积岩系。这套火山-沉积岩几乎没有变质作用,且变形极微弱,被命名为板溪群,大致相当于贵州地区的下江群、广西地区的丹洲群和皖南地区的历口群(湖南地质矿产局,1991)。在早期的研究中,依据这一不整合面,

前人提出了“武陵运动”概念,大致和广义的晋宁运动相当。

冷家溪群主要为一套灰色、灰绿色绢云母板岩、条带状板岩、粉砂质板岩与岩屑杂砂岩、凝灰质砂岩组成复理石韵律特征的浅变质岩系。地层普遍发生褶皱变形,褶皱构造主要表现为强烈的紧闭线状褶皱<sup>[7]</sup>。板溪群以明显的角度不整合覆盖在冷家溪群之上(图 2-a),在板溪群的底部往往发育底砾岩(图 2-b)。板溪群几乎没有变质变形,仅在局部发育宽缓的褶皱构造。在岩石组合上,板溪群主要为一套成熟度较低的碎屑岩,局部发育双峰式火山岩及凝灰岩<sup>[29]</sup>。

## 3 样品采集与测试方法

用于测年的样品一共 4 个:板溪群 2 个(10BX02,10BX03),冷家溪群 2 个(10LJX04,10LJX05)。详细的采样位置、岩石类型及地理坐标见图 1-b 和表 1。样品破碎后手工淘洗分离出重砂,

表 1 锆石 U-Pb 定年样品采样位置及岩石特征和对应地层单元

Table 1 Petrological feature, corresponding stratigraphic unit and sampling sites for zircon U-Pb ages

样品号	经纬度	岩石类型	主要矿物组合	对应地层单元
10BX02	N28°25'42.33",E110°39'53.43"	变质不等粒岩 屑砂岩	石英(45%±)岩屑(40%~45% 变硅 泥质 10%±	板溪群横路冲组
10BX03	N27°23'54.38",E112°17'28.86"	变质中细粒长 石岩屑砂岩	石英(45%±), 岩屑(35%~40%), 变 硅泥质 10~15%	板溪群架枧田组
10LJX04	N28°25'42.33",E110°39'53.43"	变质砂质泥岩	砂粒(25%~30%),变泥质(70%~75%) 蚀变斜长石(50%~55%)	冷家溪群黄浒洞组
10LJX05	N27°23'44.04",E112°18'34.51"	变质细中粒岩 屑砂岩	退变辉石(45%~50%) 石英(40%±)岩屑(45%~50%)变泥 质 10%±	冷家溪群

经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石(均大于 1000 粒)。选取代表性锆石(大于 200 粒)制靶后通过透射光和反射光照相,并在中国地质科学院地质研究所离子探针中心对锆石进行了阴极发光照相对锆石内部结构进行研究。部分样品采用扫描电镜对锆石的表面结构进行了分析。在此基础上,在天津地质矿产研究所采用 LA-MC-ICP-MS 技术对上述 4 件样品进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素测试分析。分析方法见文献[31,32]。所有碎屑岩的锆石 Hf 同位素测试点均位于经过年龄测试的目标锆石,大部分凝灰岩样品锆石 Hf 同位素测试点也经过了年龄测试,尽管有极少数测试点位于没有经过年龄测试的锆石(仅限于凝灰岩样品),但这些锆石和经过年龄测试的锆石无论在结构和形态上完全一致。U-Pb 年龄测试及 Hf 同位素测试结果分别见表 2 和表 3

## 4 测试结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

采自冷家溪群的顶部 1 件凝灰岩样品(2010LJX05)中,绝大多数锆石呈长柱状晶体,长轴一般在 100~200  $\mu\text{m}$ ,部分可达到 250  $\mu\text{m}$ ,长短轴之比为 2~3,大部分锆石无色透明,部分呈浅粉红色、浅棕色。从锆石表面结构分析,大部分锆石呈自形柱状,大约有 1/3 的锆石具有显著磨圆特征,表明它们可能是经过搬运再沉积的锆石或是捕获锆石。在 CL 图象中,所有锆石都具有显著的生长环带,与酸性岩浆结晶所形成的锆石特征一致。对该样品的 110 粒锆石进行的 107 次分析表明,它们的 U、Th、Pb 含量变化大,但所有分析的点都具有大于 0.1 的 Th/U 比值,变化范围为 0.1~0.5,推测绝大多数锆石是来自酸性岩浆的结晶。在 110 件分析结果中,极少

数测试点表现出轻微的放射性 Pb 丢失,而绝大部分测点具有一致的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  表面年龄,它们均位于谐和线上。从年龄分布看,排除 Pb 丢失的测点,其他测试点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分布在 810 Ma 至 2.7 Ga 之间,有 2 个测点的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄在 3.6 Ga 以上,是本次测试获得的最古老的锆石。通过锆石的 CL 图象以及透反射光照片分析,其中获得最年轻一组年龄的锆石,均为自形岩浆锆石,且具有一致的谐和年龄,获得其算术平均值为  $(825\pm 4)\text{Ma}$ (图 3-a)。笔者推测这一年龄代表了冷家溪群晚期的沉积时间。

2010LJX04 号样品是 1 件碎屑岩样品,其锆石特征与 2010BX03 接近一致,大约有一半的锆石具有磨圆特征,而另一半锆石均为自形柱状晶体。大部分锆石无色透明,有少量的呈粉红色。在对该样品的 107 粒锆石分析中,部分测试点有显著的放射性成因 Pb 丢失,但大部分测试点具有一致的表面年龄,获得的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄主要分布在 850 Ma 至 2.6 Ga,只有 1 个测点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄为 808 Ma,造成该点年龄偏离的原因尚不清楚,可能不具备明确的地质含义(属于小概率事件,离群年龄)。笔者注意到大约一半的测点具有一致的谐和年龄,获得平均值为  $(867\pm 2)\text{Ma}$ ( $N=54$ ,  $\text{MSWD}=1.09$ )(图 3-b)。这一年龄制约了冷家溪群的沉积下限。

采自板溪群底部靠近不整合面附近的 1 件凝灰岩样品(2010BX02),其锆石主要为无色透明短柱状晶体,长轴一般在 100~200  $\mu\text{m}$ ,长短轴之比为 2~3,其锆石显示明显的岩浆结晶锆石特征,该样品的谐和年龄为  $(820\pm 3)\text{Ma}$ 。另一件碎屑岩样品(2012BX03)中的锆石以自形柱状晶体为主,大部分无色透明,只有少量呈现粉红色。在 CL 图象中,所

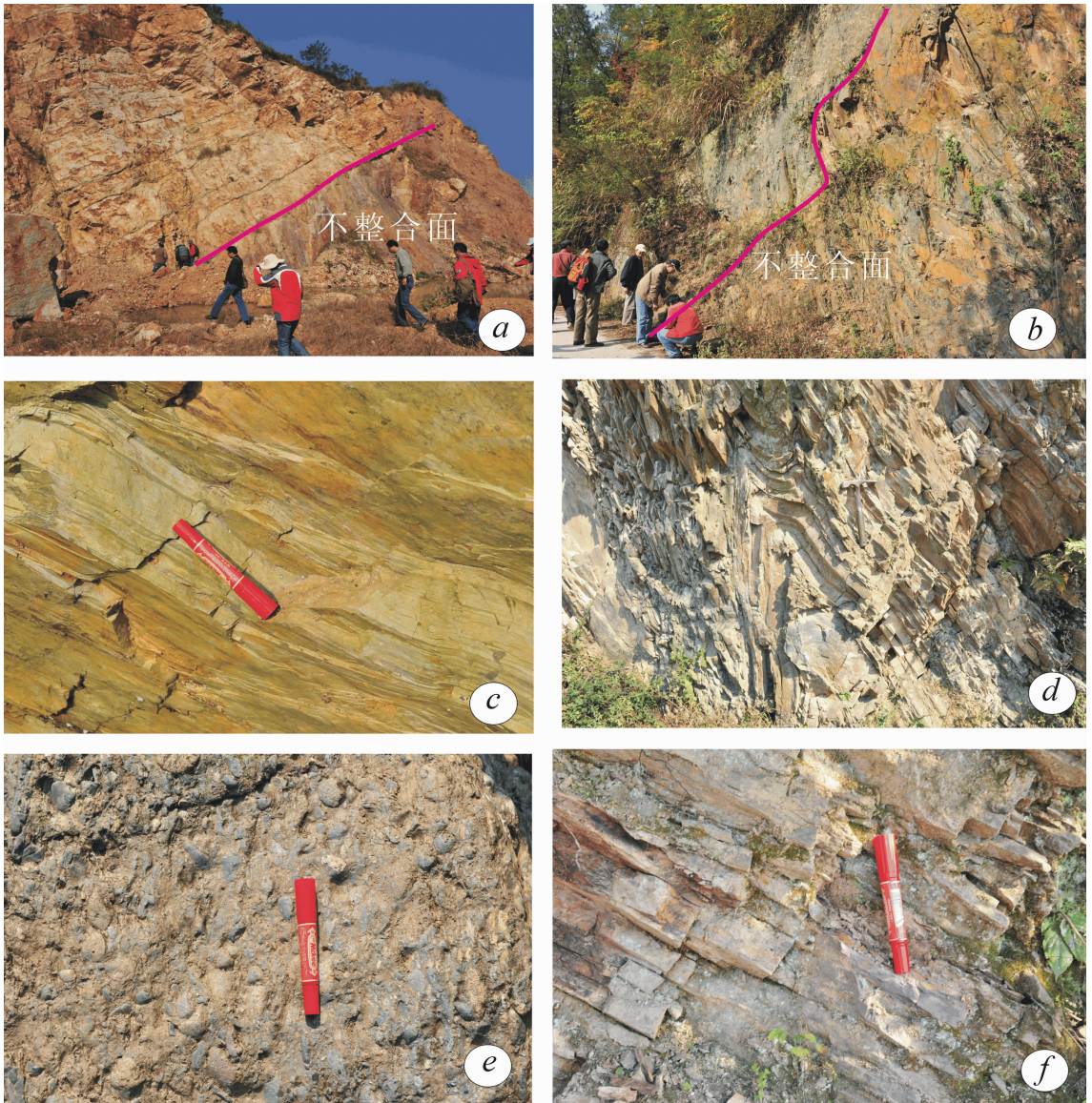


图 2 冷家溪群和板溪群不整合面、板溪群底砾岩及露头变形特征

a, b—板溪群以高角度不整合在冷家溪群之上; c—冷家溪群凝灰岩; d—冷家溪群中发育的紧闭褶皱构造;  
e—板溪群底砾岩; f—板溪群原始层理, 变形微弱

Fig.2 Field photos showing the unconformity between Lengjiaxi Group and Banxi Group, the basal conglomerate at the base of Lengjiaxi Group and the deformation features of Lengjiaxi Group and Banxi Group  
a, b—Banxi Group high-angle unconformably overlies Lengjiaxi Group; c—Tuff layer of Lengjiaxi Group; d—Tight folding deformation of Lengjiaxi Group, e—Basal conglomerate at the base of Banxi Group; e—Sedimentary bedding of Banxi Group, assuming slight deformation

有锆石均显示明显的结晶环带结构, 为酸性岩浆结晶锆石。对该样品 107 粒锆石分析中, 大部分测试点具有一致的谐和年龄,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄分布在 790 Ma 至 2.9 Ga 之间, 而最年轻一组锆石获得的平均年龄为  $(797 \pm 3)$  Ma (图 4-d,  $N=29$ ,  $\text{MSWD}=1.5$ )。

#### 4.2 Hf 同位素特征

笔者对上述 4 件样品进行了锆石 Hf 同位素测

试, 测试结果及相关参数的计算结果见表 3。根据锆石的 CL 特征判断绝大多数锆石应从酸性岩浆结晶形成, 因此, 在锆石的  $T_{\text{DM}}\text{Hf}$  计算中, 笔者采用了两阶段模式, 对不同的测试点采用的年龄选择, 如果是谐和年龄, 采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄, 如果具有显著的 Pb 丢失, 则采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄计算相关参数。

从计算结果分析, 板溪群和冷家溪群锆石 (无论

表 2 冷家溪、板溪群凝灰岩样品锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果  
 Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS dating results of tuff samples from Lengjiaxi and Banxi Group

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$
							Age /Ma	Age/Ma	Age/Ma			
2010BX02												
1	81	84	0.1382	1.06	1.280	1.16	834	9	837	10	843	9
2	212	260	0.1388	0.96	1.268	1.02	838	8	831	9	813	7
3	44	41	0.1348	1.16	1.237	1.32	815	9	817	11	822	14
4	140	102	0.1405	1.09	1.299	1.13	847	9	845	10	841	9
5	459	327	0.1271	0.95	1.176	0.92	771	7	790	7	842	6
6	45	36	0.5551	0.99	15.84	1.00	2846	28	2867	29	2882	4
7	79	148	0.1352	0.88	1.238	0.94	818	7	818	8	818	7
8	70	63	0.2026	0.99	2.216	1.04	1189	12	1186	12	1181	8
9	93	81	0.1384	1.09	1.282	1.18	836	9	838	10	842	10
10	339	137	0.1345	1.01	1.242	1.05	813	8	820	9	837	7
11	138	95	0.1172	1.03	1.223	1.52	714	7	811	12	1087	20
12	419	449	0.1331	0.93	1.232	0.94	805	7	815	8	842	5
13	418	362	0.1356	0.97	1.245	1.04	820	8	821	9	824	5
14	117	92	0.1329	1.04	1.268	1.05	804	8	831	9	904	9
15	204	171	0.1378	1.00	1.300	1.06	832	8	846	9	882	6
16	1124	805	0.1211	1.07	1.146	1.08	737	8	775	8	887	4
17	200	269	0.1372	0.97	1.273	0.98	829	8	834	8	848	5
18	876	502	0.1146	1.10	1.172	1.22	699	8	788	10	1046	8
19	1331	555	0.0666	1.12	0.716	1.62	416	5	548	9	1147	24
20	263	170	0.0912	1.03	0.959	1.06	562	6	683	7	1102	7
21	86	231	0.1443	1.01	1.438	1.35	869	9	905	12	994	12
22	204	133	0.4875	1.30	11.35	1.48	2560	33	2552	38	2546	6
23	331	272	0.1339	0.92	1.232	0.96	810	7	815	8	829	6
24	556	305	0.1341	1.01	1.303	0.99	811	8	847	8	942	6
25	519	260	0.1359	0.89	1.274	0.94	821	7	834	8	869	6
26	53	75	0.1388	1.01	1.299	1.06	838	8	845	9	863	10
27	239	176	0.1381	0.98	1.276	1.01	834	8	835	8	839	6
28	262	165	0.1353	1.00	1.267	0.99	818	8	831	8	865	7
29	185	230	0.1406	0.95	1.321	1.00	848	8	855	9	873	8
30	224	170	0.1412	1.12	1.316	1.12	851	10	853	10	855	7
31	353	361	0.1349	1.06	1.317	1.08	816	9	853	9	951	6
32	132	90	0.1336	1.06	1.238	1.15	808	9	818	9	845	10
33	61	51	0.1358	0.96	1.263	1.09	821	8	829	9	852	12
34	260	251	0.1374	1.02	1.277	1.03	830	8	835	9	850	6
35	204	168	0.1351	0.92	1.245	0.96	817	8	821	8	833	6
36	544	378	0.1322	1.03	1.234	1.05	800	8	816	9	859	6
37	121	118	0.1353	1.03	1.280	1.12	818	8	837	9	887	8
38	84	87	0.1446	0.98	1.393	1.06	870	9	886	9	924	10
39	58	44	0.1392	1.17	1.302	1.32	840	10	847	11	864	16

续表 2

Spot	Th/( $\mu\text{g/g}$ )	U/( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
				1 $\sigma$		1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$
40	120	143	0.1333	1.08	1.481	1.08	806	9	923	10	1212	16
41	64	582	0.1412	1.05	1.310	1.06	852	9	850	9	847	5
42	128	84	0.1337	0.86	1.240	0.99	809	7	819	8	844	11
44	46	42	0.1345	1.01	1.278	1.13	814	8	836	9	896	13
45	203	162	0.1348	0.99	1.317	1.03	815	8	853	9	953	10
46	410	323	0.1358	0.95	1.459	0.92	821	8	913	8	1145	6
47	17	26	0.1370	0.94	1.288	1.07	828	8	841	9	875	15
48	465	298	0.1274	1.04	1.179	1.06	773	8	791	8	841	7
49	98	98	0.1432	1.02	1.366	1.06	863	9	875	9	904	9
50	46	54	0.3746	1.03	6.543	1.05	2051	21	2052	22	2053	5
51	150	130	0.1351	0.96	1.242	0.99	817	8	820	8	827	9
52	144	96	0.1381	0.97	1.275	1.00	834	8	835	8	838	8
53	214	155	0.1336	0.93	1.232	0.98	808	8	815	8	834	7
54	300	232	0.1344	0.89	1.240	0.92	813	7	819	8	835	6
55	238	320	0.1344	1.00	1.237	1.03	813	8	818	8	831	6
56	233	120	0.1299	0.81	1.223	0.92	788	6	811	7	875	10
57	49	79	0.1339	0.81	1.246	0.92	810	7	822	8	854	10
58	71	79	0.1458	0.96	1.392	1.08	877	8	885	10	906	10
59	97	56	0.1391	0.96	1.314	1.03	840	8	852	9	883	11
60	94	112	0.1352	1.06	1.244	1.12	817	9	821	9	830	10
61	249	277	0.1338	0.90	1.232	0.94	809	7	815	8	832	6
62	951	346	0.1280	0.75	1.214	0.80	777	6	807	6	891	6
63	71	120	0.1402	0.72	1.330	0.80	846	6	859	7	892	8
64	73	60	0.1326	0.70	1.529	1.93	803	6	942	18	1283	35
65	271	199	0.1389	0.96	1.345	1.07	838	8	865	9	935	7
66	48	51	0.1393	0.88	1.310	0.99	841	7	850	8	874	12
67	35	31	0.1351	1.00	1.269	1.18	817	8	832	10	872	14
68	26	31	0.1358	1.10	1.275	1.29	821	9	835	11	872	16
69	237	197	0.1369	0.93	1.278	0.96	827	8	836	8	860	7
70	26	29	0.1363	0.93	1.285	1.11	824	8	839	9	881	16
71	120	114	0.1341	0.86	1.242	0.95	811	7	820	8	844	9
72	104	128	0.1367	0.88	1.260	0.96	826	7	828	8	832	8
73	48	47	0.1329	0.88	1.242	1.03	804	7	820	8	863	12
74	62	68	0.1356	0.92	1.270	0.99	820	8	832	8	866	9
75	86	125	0.1350	0.98	1.259	1.06	817	8	827	9	857	9
76	188	273	0.1400	0.89	1.299	0.92	845	7	845	8	846	6
77	89	89	0.1371	0.95	1.281	1.04	828	8	837	9	861	9
78	53	66	0.1367	0.93	1.269	1.03	826	8	832	9	848	10
79	198	273	0.1372	0.91	1.263	0.96	829	8	829	8	831	6
80	98	172	0.1373	0.89	1.363	1.09	830	7	873	10	985	10
81	164	86	0.1319	0.95	1.230	1.01	799	8	814	8	858	9

续表 2

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age/Ma	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Age/Ma	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age/Ma	1 $\sigma$
82	188	302	0.1366	0.90	1.263	0.92	825	7	829	8	840	6
83	110	114	0.1371	0.88	1.469	0.99	828	7	918	9	1139	14
84	102	124	0.1388	1.01	1.299	1.06	838	8	845	9	866	8
85	273	140	0.1356	1.42	1.406	1.58	820	12	891	14	1073	10
86	185	118	0.1388	0.93	1.311	0.97	838	8	851	8	884	8
88	89	134	0.1395	0.99	1.308	1.04	842	8	849	9	868	8
89	246	306	0.1402	0.88	1.300	0.90	846	7	846	8	844	6
90	154	231	0.1388	0.91	1.277	0.94	838	8	835	8	829	6
91	77	105	0.1328	0.89	1.296	0.99	804	7	844	8	951	8
92	611	187	0.1391	0.94	1.280	0.97	839	8	837	8	830	7
93	134	213	0.1371	0.73	1.273	0.76	828	6	834	6	848	6
94	154	128	0.1330	0.71	1.234	0.78	805	6	816	6	846	8
95	44	43	0.1356	0.90	1.294	0.96	820	7	843	8	906	12
96	167	239	0.1345	0.81	1.239	0.86	813	7	819	7	833	6
97	338	193	0.1340	0.86	1.237	0.91	811	7	817	7	836	6
98	25	62	0.1361	0.83	1.272	0.91	823	7	833	8	862	10
99	49	90	0.1446	0.86	2.325	1.46	871	7	1220	18	1905	24
100	150	152	0.1357	1.07	1.271	1.03	820	9	833	9	867	10
101	492	349	0.1352	0.65	1.259	0.68	817	5	827	6	854	5
102	436	195	0.1333	0.51	1.248	0.60	806	4	822	5	866	8
103	43	57	0.1541	0.86	1.519	0.92	924	8	938	9	972	11
104	274	121	0.1338	0.59	1.236	0.70	809	5	817	6	838	8
105	384	186	0.1376	0.67	1.275	0.69	831	6	835	6	844	6
106	148	153	0.1373	0.69	1.292	0.76	829	6	842	6	876	7
107	114	130	0.1378	0.76	1.279	0.83	832	6	836	7	847	7
108	96	115	0.1344	0.65	1.275	0.72	813	5	835	6	893	8
109	158	152	0.1341	0.63	1.250	0.65	811	5	824	5	856	7
110	81	84	0.1382	1.06	1.280	1.16	834	9	837	10	843	9
2010BX03												
1	434	377	0.1312	1.06	1.186	1.10	795	8	794	6	791	7
2	171	147	0.3273	0.99	5.128	1.04	1825	16	1841	9	1858	6
3	48	76	0.4651	1.12	10.35	1.13	2462	23	2466	10	2472	5
4	65	37	0.3523	1.17	6.030	1.25	1946	20	1980	11	2017	12
5	114	187	0.4690	1.09	10.51	1.10	2479	22	2481	10	2483	4
6	210	103	0.4624	0.99	10.26	1.03	2450	20	2459	10	2466	4
7	69	47	0.4662	0.95	10.61	0.96	2467	19	2490	9	2510	5
8	147	77	0.4606	1.06	10.59	1.09	2442	22	2487	10	2525	4
9	44	44	0.4587	1.05	10.29	1.08	2434	21	2461	10	2485	10
10	138	116	0.4631	1.59	10.00	1.56	2453	32	2435	14	2421	4
11	1615	782	0.1269	3.19	1.738	3.23	770	23	1023	21	1613	9
12	95	100	0.3669	1.20	6.348	1.22	2015	21	2025	11	2036	6

续表 2

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
			$1\sigma$	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$		
13	70	60	0.3334	1.08	5.208	1.10	1855	17	1854	9	1854	7
14	146	75	0.2966	1.16	4.286	1.17	1674	17	1691	10	1722	6
15	66	35	0.4643	1.23	10.31	1.22	2459	25	2463	11	2469	7
16	163	211	0.4707	0.95	10.46	0.99	2487	20	2476	9	2478	4
18	128	166	0.1309	1.19	1.223	1.21	793	9	811	7	863	9
19	372	138	0.3668	1.06	6.281	1.10	2014	18	2016	10	2017	4
20	24	14	0.2997	1.57	4.386	1.61	1690	23	1710	13	1739	13
21	15	16	0.4647	2.16	10.82	2.17	2460	44	2507	20	2547	11
22	186	180	0.4640	1.30	10.74	1.30	2457	27	2501	12	2536	5
23	443	366	0.1312	1.16	1.280	1.17	794	9	837	7	954	7
24	165	90	0.4660	1.03	10.52	1.05	2466	21	2482	10	2495	4
25	33	22	0.2769	1.91	4.177	2.17	1576	27	1669	18	1791	22
26	166	79	0.1313	1.18	1.255	1.38	795	9	826	8	911	17
27	306	281	0.4684	1.05	11.05	1.03	2477	22	2527	10	2569	4
28	605	240	0.1359	1.06	1.273	1.13	821	8	834	6	866	9
29	98	99	0.1326	1.01	1.223	1.09	803	8	811	6	835	11
30	70	27	0.3642	1.21	6.222	1.18	2002	21	2008	10	2017	9
31	192	65	0.3590	1.10	6.215	1.15	1978	19	2007	10	2037	6
32	117	58	0.4682	0.96	10.03	1.03	2476	20	2437	10	2405	7
33	65	47	0.4053	1.20	8.749	1.42	2194	22	2312	13	2418	12
34	192	176	0.1332	0.87	1.233	0.94	806	7	816	5	843	7
35	46	146	0.3576	0.89	6.199	0.91	1971	15	2004	8	2040	10
36	176	117	0.1337	0.90	1.258	0.96	809	7	827	5	880	5
37	1150	348	0.1315	1.02	1.218	1.07	797	8	809	6	843	8
38	294	241	0.4631	0.84	10.41	0.86	2453	17	2472	8	2500	3
39	60	47	0.2998	1.02	4.354	1.16	1690	15	1704	10	1721	3
40	69	220	0.4719	0.95	11.61	0.99	2492	20	2573	9	2639	4
41	61	54	0.2823	0.92	4.086	0.97	1603	13	1651	8	1717	7
42	36	36	0.1306	0.89	1.190	1.22	792	7	796	7	811	19
43	83	188	0.4675	0.79	11.13	0.86	2473	16	2534	8	2584	4
44	35	31	0.3521	0.97	6.320	1.09	1945	16	2021	10	2102	8
45	90	75	0.4584	0.78	10.32	0.79	2433	16	2464	7	2490	4
46	110	77	0.4068	0.83	8.138	0.96	2200	16	2247	9	2287	4
47	102	70	0.3629	0.76	6.204	0.81	1996	13	2005	7	2015	6
48	108	125	0.4622	0.73	10.48	0.77	2449	15	2478	7	2502	4
49	89	53	0.1297	0.90	1.238	1.20	786	7	818	7	906	10
50	73	38	0.1322	0.86	1.692	1.02	800	6	1005	6	1488	15
51	67	46	0.2848	0.91	4.139	1.02	1615	13	1662	8	1722	5
52	62	31	0.4641	0.88	10.67	0.95	2458	18	2494	9	2526	9
53	117	104	0.1331	0.79	1.212	0.93	806	6	806	5	809	9
54	32	45	0.4432	0.99	9.344	0.99	2365	20	2372	9	2381	7



续表 2

Spot	Th/( $\mu\text{g/g}$ )	U/( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
				1 $\sigma$		1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$
55	23	21	0.2967	1.19	4.546	1.21	1675	18	1739	10	1833	13
56	103	64	0.4068	1.00	8.412	1.0	2200	19	2276	10	2346	5
57	100	56	0.1316	0.98	1.217	1.17	797	7	808	7	839	11
58	90	65	0.4579	0.87	10.42	0.93	2430	18	2472	9	2507	10
59	170	68	0.4126	0.80	8.625	0.83	2227	15	2299	8	2365	4
60	5	12	0.3273	1.52	5.428	1.57	1825	24	1889	13	1969	14
62	146	72	0.1320	0.99	1.223	1.06	799	7	811	6	856	11
63	70	132	0.4668	0.96	11.15	0.98	2469	20	2535	9	2589	5
64	102	174	0.5703	0.86	17.53	0.92	2909	20	2965	9	3002	3
65	121	113	0.4624	0.87	11.05	0.87	2450	18	2528	8	2590	4
66	184	226	0.4637	0.98	10.42	1.00	2456	20	2473	9	2487	8
67	55	58	0.1323	0.90	1.265	1.01	801	7	830	6	922	15
68	85	66	0.4052	0.81	7.899	0.84	2193	15	2220	8	2244	6
69	377	218	0.1324	0.90	1.219	0.89	801	7	809	5	831	3
70	191	137	0.4598	0.85	10.37	0.85	2439	17	2468	8	2494	6
71	57	34	0.3575	0.99	5.882	1.05	1970	17	1959	9	1946	7
72	49	23	0.3521	0.97	6.114	1.01	1944	16	1992	9	2044	9
73	80	22	0.3581	1.00	6.128	1.02	1973	17	1994	9	2017	8
74	89	54	0.3541	0.84	6.070	0.86	1954	14	1986	7	2020	6
75	113	36	0.1321	1.09	1.267	1.30	800	8	831	7	920	20
76	113	56	0.2943	0.92	4.242	0.97	1663	13	1682	8	1706	7
77	149	76	0.1322	0.90	1.232	1.16	800	7	815	7	857	16
78	340	128	0.4655	0.90	10.25	0.96	2464	18	2458	9	2452	4
79	209	67	0.3494	0.92	6.301	0.98	1932	15	2019	9	2109	6
80	48	33	0.4050	1.01	8.477	1.07	2192	19	2283	10	2366	6
81	118	45	0.1318	1.32	1.227	1.48	798	10	813	8	857	19
82	91	40	0.1217	0.89	1.131	1.11	740	6	768	6	854	19
83	78	51	0.3534	0.95	6.085	0.98	1951	16	1988	9	2028	1
84	319	187	0.1306	0.92	1.287	0.96	791	7	840	5	972	12
85	330	159	0.1304	0.93	1.214	1.03	790	7	807	6	854	3
86	134	51	0.1292	1.01	1.204	1.19	783	7	802	7	857	14
87	50	28	0.2807	1.01	4.090	1.09	1595	14	1652	9	1728	40
88	205	101	0.3548	1.05	6.122	1.10	1958	18	1993	10	2031	4
89	163	253	0.2690	1.06	4.142	1.10	1536	15	1663	9	1828	0
90	60	49	0.5589	1.17	15.70	1.31	2862	27	2859	13	2854	6
91	36	15	0.3597	1.33	6.217	1.46	1981	23	2007	13	2035	10
92	68	62	0.1331	0.99	1.289	1.25	805	7	841	7	1000	14
93	90	72	0.4611	0.91	10.38	0.93	2444	18	2469	9	2491	4
94	53	40	0.1301	1.04	1.234	1.42	788	8	816	8	894	25
95	17	51	0.1341	1.86	1.338	1.65	811	14	862	10	1006	30
96	45	48	0.3513	0.93	5.965	0.99	1941	16	1971	9	2003	5

续表 2

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
			$1\sigma$	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$		
97	106	110	0.1309	0.87	1.210	1.00	793	7	805	6	839	12
98	55	56	0.4586	1.06	10.39	1.08	2433	21	2470	10	2502	5
99	25	32	0.3528	1.16	6.062	1.15	1948	20	1985	10	2028	7
100	143	163	0.4610	0.79	10.17	0.84	2444	16	2450	8	2455	4
101	192	177	0.1287	0.71	1.179	0.84	780	5	791	5	822	9
102	167	45	0.4024	0.73	8.253	0.86	2180	14	2259	8	2332	9
103	134	116	0.1303	0.72	1.179	0.90	790	5	791	5	794	10
104	91	79	0.3600	0.74	6.165	0.81	1982	13	2000	7	2017	4
105	80	148	0.2813	0.62	3.786	0.69	1598	9	1590	6	1589	7
106	35	21	0.3513	1.08	5.972	1.10	1941	18	1972	10	2006	8
107	68	68	0.4586	0.82	10.38	0.86	2434	17	2469	8	2498	5
2010LJX04												
1	194	290	0.1438	1.04	1.348	1.10	866	8	867	6	878	8
2	300	296	0.1438	1.14	1.343	1.21	866	9	865	7	861	12
3	1075	673	0.1341	1.37	1.384	1.26	811	10	882	7	1133	10
4	77	159	0.1425	1.29	1.368	1.40	859	10	875	8	917	11
5	115	90	0.1417	1.10	1.347	1.43	854	9	866	8	894	16
6	97	94	0.2989	0.93	4.181	1.00	1686	14	1670	8	1650	7
7	493	386	0.1441	1.16	1.404	1.18	868	9	891	7	948	6
8	117	77	0.1815	1.07	1.924	1.25	1075	11	1089	8	1120	14
9	282	311	0.1438	1.05	1.527	1.21	866	8	941	7	1120	10
10	617	127	0.1478	1.02	1.471	1.22	889	8	918	7	991	15
11	171	117	0.1427	1.09	1.391	1.13	860	9	885	7	952	13
12	279	120	0.1438	1.37	1.438	1.62	866	11	905	10	1011	17
13	201	181	0.3357	1.01	5.269	1.02	1866	16	1864	9	1861	4
14	761	439	0.1434	1.24	1.345	1.38	864	10	865	8	878	7
15	104	83	0.1440	0.84	1.346	0.99	867	7	866	6	865	11
16	172	206	0.3340	1.04	5.256	1.07	1858	17	1862	9	1866	5
17	453	205	0.1860	1.04	2.591	1.12	1100	11	1298	8	1643	7
18	464	235	0.1438	1.09	1.372	1.16	866	9	877	7	906	11
19	78	67	0.1430	1.36	1.448	1.53	862	11	909	9	1028	25
20	104	43	0.4904	1.25	11.15	1.33	2573	27	2536	12	2505	12
21	427	422	0.1430	1.07	1.356	1.13	861	9	870	7	892	9
22	133	223	0.2885	0.88	3.918	0.91	1634	13	1617	7	1596	204
23	88	153	0.1441	0.93	1.374	0.99	868	8	878	6	906	13
24	41	135	0.1441	0.87	1.376	0.96	868	7	879	6	909	11
25	129	448	0.3335	0.80	5.352	0.84	1855	13	1877	7	1902	4
26	490	250	0.1672	1.14	3.231	1.65	997	11	1465	13	2224	18
27	167	256	0.1434	0.91	1.349	0.95	864	7	867	6	876	3
28	350	567	0.1417	0.83	1.354	0.95	854	7	869	6	906	12
29	52	63	0.1413	0.90	1.298	1.10	852	7	845	6	828	15

续表 2

Spot	Th/( $\mu\text{g/g}$ )	U/( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
			$1\sigma$	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$		
30	784	1033	0.3080	0.97	7.730	1.02	1731	15	2200	9	2673	9
31	352	225	0.1451	1.30	1.416	1.34	874	11	896	8	950	11
32	86	68	0.1458	1.15	1.360	1.29	877	9	872	8	857	14
33	129	70	0.3117	1.24	4.542	1.26	1749	19	1739	10	1728	41
34	425	364	0.2795	1.17	3.764	1.19	1589	16	1585	10	1589	5
35	859	743	0.1322	1.33	1.238	1.33	801	10	818	7	865	7
36	667	228	0.1459	1.24	1.415	1.25	878	10	895	7	939	7
37	422	322	0.1457	1.31	1.369	1.35	877	11	876	8	872	11
38	215	501	0.1485	1.44	1.403	1.46	893	12	890	9	883	14
39	96	88	0.1477	1.42	1.402	1.52	888	12	890	9	900	13
40	429	329	0.1451	2.21	1.382	2.16	874	18	881	13	902	18
41	374	225	0.3088	1.39	4.565	1.35	1735	21	1743	11	1754	7
42	136	152	0.3090	1.31	4.574	1.31	1736	20	1745	11	1755	8
43	606	148	0.1441	1.11	1.346	1.13	868	9	866	7	863	9
44	392	324	0.1431	1.48	1.447	1.57	862	12	909	9	1022	10
45	270	152	0.1431	1.09	1.338	1.14	862	9	862	7	863	9
46	2590	912	0.2135	1.00	5.028	1.44	1247	11	1824	12	2565	15
47	89	159	0.1474	0.92	1.398	0.98	886	8	888	6	900	8
48	103	144	0.3366	0.92	5.280	0.96	1870	15	1866	8	1861	6
49	130	82	0.2173	0.97	4.271	1.72	1268	11	1688	14	2258	23
50	101	172	0.1460	0.92	1.375	1.00	879	8	878	6	880	8
51	202	250	0.1442	1.83	1.460	1.87	869	15	914	11	1028	13
52	99	169	0.1447	1.02	1.367	1.09	871	8	875	6	887	8
53	101	127	0.4927	1.14	11.06	1.16	2582	24	2528	11	2487	9
54	428	176	0.1887	1.61	4.696	2.82	1114	16	1766	24	2661	40
55	356	268	0.1408	0.98	1.333	1.00	849	8	860	6	900	7
56	190	259	0.1430	0.91	1.327	0.98	862	7	857	6	856	7
57	55	36	0.1450	1.05	1.541	1.41	873	9	947	9	1128	21
58	123	129	0.1448	0.98	1.617	1.12	872	8	977	7	1233	13
59	628	792	0.2276	1.03	2.696	1.06	1322	12	1327	8	1339	5
60	278	491	0.1435	1.02	1.399	1.04	865	8	889	6	950	11
61	654	625	0.1438	1.28	1.346	1.39	866	10	866	8	865	7
62	199	221	0.1438	0.97	1.336	1.05	866	8	862	6	850	9
63	735	447	0.1445	0.94	1.383	1.00	870	8	882	6	922	7
64	71	26	0.1933	1.31	2.195	1.58	1139	14	1180	11	1257	19
65	467	217	0.1438	0.99	1.349	1.10	866	8	867	6	872	9
66	460	223	0.1437	1.14	1.493	1.13	866	9	927	7	1080	8
67	499	463	0.1231	1.04	2.365	1.34	749	7	1232	10	2221	17
68	93	135	0.1449	1.11	1.372	1.25	872	9	877	7	889	9
69	274	364	0.1474	0.97	1.390	1.05	887	8	885	6	880	7
70	138	580	0.1391	1.59	1.310	1.59	839	12	850	9	880	5

续表 2

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
				1 $\sigma$		1 $\sigma$	Age /Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$
71	205	244	0.1434	0.86	1.339	0.93	864	7	863	5	861	8
72	704	595	0.2877	0.84	4.029	0.87	1630	12	1640	7	1654	4
73	100	192	0.1425	1.13	1.347	1.19	859	9	866	7	889	9
74	154	216	0.1422	1.26	1.441	1.23	857	10	906	7	1031	3
75	561	564	0.1341	0.92	1.258	0.96	811	7	827	5	872	6
76	223	422	0.1435	1.65	1.355	1.71	864	13	870	10	883	8
77	114	267	0.1440	0.86	1.347	0.97	868	7	866	6	865	7
78	229	343	0.1432	1.02	1.500	1.21	863	8	930	7	1100	8
79	153	147	0.2834	1.24	3.773	1.27	1608	18	1587	10	1561	6
80	80	36	0.2880	1.17	4.128	1.23	1631	17	1660	10	1698	10
81	406	579	0.1423	0.95	1.626	1.12	858	8	980	7	1265	9
82	139	222	0.4865	1.48	12.24	1.48	2555	31	2623	14	2676	4
83	331	296	0.1429	0.83	1.420	1.02	861	7	897	6	987	10
84	161	168	0.1429	0.73	1.338	0.82	861	6	862	5	866	9
85	296	114	0.1430	0.76	1.346	0.86	862	6	866	5	877	5
86	194	221	0.1435	0.88	1.335	0.94	865	7	861	5	854	8
87	284	197	0.1435	1.31	1.395	1.55	865	11	887	9	943	19
88	120	115	0.1429	0.84	1.330	0.92	861	7	859	5	854	5
89	416	474	0.1447	0.85	1.353	0.92	871	7	869	5	865	7
90	117	214	0.3345	0.85	5.300	0.90	1860	14	1869	8	1880	5
91	680	431	0.3830	0.72	8.939	0.90	2090	13	2332	8	2550	8
92	345	251	0.4601	0.81	11.03	0.83	2440	16	2526	8	2596	3
93	744	452	0.1362	1.03	1.663	1.13	823	8	994	7	1394	12
94	118	170	0.1453	0.71	1.351	0.84	875	6	868	5	850	7
95	621	446	0.1563	0.87	2.779	1.49	936	8	1350	11	2083	17
96	339	462	0.1970	0.65	2.089	0.69	1159	7	1145	5	1120	5
97	177	211	0.4885	0.73	11.13	0.78	2564	16	2534	7	2510	4
98	258	188	0.1449	1.06	1.434	1.90	872	9	903	11	961	19
99	320	339	0.3043	0.82	4.245	0.85	1713	12	1683	7	1656	4
100	135	94	0.2117	0.78	2.352	0.86	1238	9	1228	6	1213	7
101	198	179	0.3084	0.80	4.515	0.88	1733	12	1734	7	1800	5
102	100	126	0.4968	0.89	11.35	0.92	2600	19	2552	9	2517	5
103	114	73	0.2948	0.84	4.117	0.88	1665	12	1658	7	1650	7
104	194	187	0.3631	1.16	5.673	1.20	1997	20	1927	10	1854	7
105	43	59	0.1433	1.26	1.378	1.39	863	10	879	8	924	16
106	194	381	0.1421	0.91	1.375	1.03	857	7	878	6	933	9
107	330	213	0.1335	0.93	1.268	1.01	808	7	831	6	896	9
2010LJX05												
1	79	35	0.5066	0.97	13.45	1.04	2642	26	2712	28	2765	4
2	58	93	0.4602	0.93	10.08	0.96	2440	23	2442	23	2444	4
3	552	563	0.1258	0.99	1.156	0.98	764	8	780	8	827	6

续表 2

Spot	Th/( $\mu\text{g/g}$ )	U/( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
			$1\sigma$	$1\sigma$	Age /Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	$1\sigma$	Age/Ma	
4	63	122	0.3480	0.75	5.498	0.83	1925	14	1900	16	1873	5
5	157	70	0.1400	0.62	2.134	0.88	845	5	1160	10	1808	9
6	233	220	0.1371	0.87	1.255	0.90	828	7	825	7	817	6
7	412	352	0.1361	0.96	1.296	0.98	822	8	844	8	900	6
8	84	96	0.1371	0.93	1.276	0.97	828	8	835	8	853	9
9	146	108	0.4591	0.97	10.08	1.00	2436	24	2442	25	2448	4
10	70	64	0.3268	1.02	5.118	1.04	1823	19	1839	19	1857	6
11	213	302	0.1394	0.96	1.296	1.04	841	8	844	9	850	6
12	39	51	0.1351	1.10	1.278	1.43	817	9	836	12	886	18
13	64	75	0.3501	1.01	5.779	1.02	1935	20	1943	20	1952	5
14	63	102	0.4252	0.81	8.696	0.83	2284	19	2307	19	2327	4
15	154	114	0.1400	0.85	1.306	0.95	845	7	848	8	858	8
16	283	110	0.1384	0.70	1.281	0.77	836	6	837	6	841	8
17	310	352	0.2793	0.76	3.856	0.79	1588	12	1605	13	1627	4
18	103	71	0.1345	0.90	1.255	1.09	814	7	826	9	858	13
19	117	185	0.3391	0.99	5.297	1.04	1882	19	1868	19	1853	4
20	104	53	0.4709	0.78	10.85	0.82	2487	19	2510	21	2529	4
21	145	130	0.1351	0.89	1.260	0.98	817	7	828	8	857	8
22	83	95	0.1365	0.81	1.271	0.90	825	7	833	7	854	10
23	149	154	0.7621	1.18	36.49	1.20	3652	43	3680	44	3695	3
24	61	111	0.3353	0.94	5.436	0.96	1864	17	1891	18	1920	4
25	178	204	0.1325	0.90	1.222	0.96	802	7	811	8	835	7
26	91	66	0.1355	0.93	1.262	0.97	819	8	829	8	856	10
27	92	86	0.1359	1.06	1.298	1.07	821	9	845	9	908	12
28	87	226	0.5027	1.08	12.36	1.11	2625	28	2632	29	2638	3
29	270	217	0.1371	0.86	1.272	0.98	829	7	833	8	846	9
30	236	213	0.1369	1.04	1.261	1.09	827	9	829	9	832	7
31	244	221	0.3148	1.01	4.678	1.04	1764	18	1763	18	1762	4
32	54	68	0.1988	0.97	2.196	1.02	1169	11	1180	12	1200	8
33	105	113	0.1382	1.05	1.290	1.12	834	9	841	9	859	8
34	57	61	0.1982	1.03	2.167	1.10	1166	12	1171	13	1180	8
35	120	114	0.1399	1.13	1.308	1.24	844	10	849	10	863	9
36	183	392	0.2328	1.19	2.810	1.19	1349	16	1358	16	1372	4
37	52	238	0.1405	1.28	1.319	1.32	848	11	854	11	870	8
38	63	92	0.4218	1.24	8.208	1.30	2269	28	2254	29	2241	5
39	147	120	0.4060	1.12	7.654	1.13	2197	25	2191	25	2186	4
40	331	269	0.2528	0.97	3.150	1.01	1453	14	1445	15	1434	4
41	151	120	0.2009	1.34	2.201	1.39	1180	16	1181	16	1184	7
42	347	394	0.1343	1.10	1.298	1.21	813	9	845	10	930	9
43	109	107	0.1368	1.16	1.293	1.22	826	10	843	10	886	8
44	24	34	0.1386	1.27	1.307	1.38	837	11	849	12	879	15

续表 2

Spot	Th/( $\mu$ g/g)	U/( $\mu$ g/g)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
				1 $\sigma$		1 $\sigma$	Age /Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$
45	207	201	0.1384	1.08	1.292	1.11	836	9	842	9	860	6
46	74	71	0.4078	1.18	7.904	1.19	2205	26	2220	26	2234	5
47	244	214	0.1390	1.11	1.311	1.19	839	9	851	10	881	8
48	62	51	0.4053	1.23	7.659	1.24	2194	27	2192	27	2190	5
49	50	42	0.1381	1.16	1.319	1.26	834	10	854	11	907	13
50	33	39	0.3312	1.25	5.236	1.28	1844	23	1859	24	1874	6
51	77	90	0.1390	1.20	1.298	1.69	839	10	845	14	861	18
52	68	110	0.1378	0.99	1.287	1.05	832	8	840	9	861	8
53	166	89	0.4702	0.80	10.87	0.81	2484	20	2512	20	2535	4
54	256	178	0.1400	0.96	1.302	1.08	845	8	846	9	851	8
55	61	44	0.1331	0.84	1.252	0.98	805	7	824	8	875	12
56	112	86	0.1390	0.79	1.309	0.87	839	7	850	7	878	8
57	259	240	0.1363	1.08	1.266	1.13	824	9	830	9	849	7
58	205	135	0.2777	0.82	3.818	0.88	1580	13	1597	14	1619	5
59	123	97	0.2708	0.79	3.663	0.83	1545	12	1563	13	1588	5
60	108	78	0.2578	0.80	4.183	0.84	1478	12	1671	14	1922	5
61	136	301	0.1272	1.01	1.223	0.96	772	8	811	8	920	6
62	75	71	0.3558	2.48	9.868	3.04	1962	49	2422	74	2835	9
63	818	672	0.1097	0.60	1.075	0.64	671	4	741	5	960	5
64	108	119	0.1331	0.66	1.240	0.74	806	5	819	6	855	8
65	316	131	0.2560	0.61	3.471	0.68	1469	9	1521	10	1593	5
66	107	78	0.1350	0.76	1.323	0.92	816	6	856	8	959	9
67	48	63	0.3277	0.79	5.105	0.85	1827	14	1837	16	1848	5
68	246	199	0.2706	0.70	3.613	0.75	1544	11	1552	12	1564	4
69	231	246	0.1375	0.70	1.277	0.76	831	6	835	6	848	6
70	422	180	0.1901	0.71	2.037	0.76	1122	8	1128	9	1139	6
71	102	112	0.1355	0.77	1.251	0.81	819	6	824	7	836	9
72	197	198	0.1336	0.72	1.224	0.78	809	6	812	6	820	7
73	164	93	0.2741	0.70	3.709	0.71	1562	11	1573	11	1589	5
74	42	67	0.6691	0.74	27.90	0.89	3302	24	3416	30	3483	6
75	177	160	0.1366	0.86	1.281	0.92	825	7	837	8	869	7
76	643	322	0.1328	0.90	1.305	1.37	804	7	848	12	965	11
77	68	93	0.1362	0.84	1.263	0.91	823	7	829	8	846	9
78	125	74	0.1388	0.88	1.288	0.95	838	7	840	8	848	10
79	575	320	0.1408	0.80	1.300	0.84	849	7	846	7	838	6
80	76	67	0.1397	0.96	1.337	1.08	843	8	862	9	911	13
81	108	66	0.2406	0.76	3.067	0.81	1390	11	1424	11	1476	8
82	158	223	0.1403	0.73	1.553	0.71	846	6	952	7	1204	7
83	79	84	0.1371	0.76	1.289	0.74	828	6	841	6	875	10
84	298	233	0.1365	0.95	1.351	0.91	825	8	868	8	978	8
85	387	221	0.3561	0.63	5.916	0.66	1963	12	1964	13	1964	4

续表 2

Spot	Th/( $\mu\text{g/g}$ )	U/( $\mu\text{g/g}$ )	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
			Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$	Age/Ma	1 $\sigma$		
86	104	73	0.7405	0.62	34.64	0.62	3572	22	3628	22	3660	3
87	47	50	0.1350	0.77	1.262	0.94	816	6	829	8	863	12
88	59	106	0.1931	0.70	2.144	0.77	1138	8	1163	9	1210	7
89	434	241	0.1406	0.81	1.323	0.84	848	7	856	7	876	7
90	59	99	0.1338	0.74	1.255	0.83	810	6	826	7	870	10
91	121	211	0.3122	0.86	4.525	0.91	1752	15	1736	16	1716	4
92	86	110	0.1337	0.75	1.233	0.83	809	6	816	7	835	9
93	69	112	0.3967	0.89	7.769	0.98	2154	19	2205	22	2252	4
94	146	64	0.4146	0.77	8.300	0.79	2236	17	2264	18	2290	4
95	235	352	0.142	0.78	1.324	0.80	859	7	856	7	850	5
96	57	88	0.1352	0.85	1.394	1.08	817	7	887	10	1063	13
97	149	146	0.4273	0.84	9.482	0.85	2294	19	2386	20	2466	3
98	94	86	0.2686	0.86	3.661	0.92	1534	13	1563	14	1603	6
99	143	122	0.1363	0.91	1.259	1.03	824	7	828	8	838	9
100	105	84	0.1193	1.22	1.199	1.19	726	9	800	10	1012	11
101	208	183	0.1408	0.90	1.328	0.98	849	8	858	8	882	8
102	89	87	0.1242	0.95	1.231	2.22	755	7	815	18	983	37
103	42	77	0.3657	0.91	6.457	0.96	2009	18	2040	20	2072	5
104	101	168	0.3874	0.79	7.013	0.76	2111	17	2113	16	2115	4
105	99	106	0.2421	0.96	3.010	0.97	1398	13	1410	14	1429	5
106	97	81	0.1962	1.00	2.162	1.09	1155	12	1169	13	1195	7
107	245	168	0.1360	0.77	1.277	0.79	822	6	835	7	871	6
108	68	62	0.1354	0.80	1.337	0.89	819	7	862	8	974	10
109	71	116	0.1353	0.83	1.257	0.89	818	7	826	7	850	7
110	168	122	0.1335	0.82	1.235	0.87	808	7	817	7	841	8

注:  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  的同位素比值的误差是百分比误差(相对误差),同位素表面年龄的误差是绝对误差(单位是 Ma)。

是凝灰岩中的锆石还是碎屑岩中的锆石)表现出一定的差异。冷家溪群的锆石 Hf 模式年龄集中分布在 1.5~3.5 Ga, 少量在 3.5 Ga 以上, 在 1.8 Ga、2.5 Ga 和 3.0 Ga 出现明显的峰值。而板溪群的锆石 Hf 模式年龄, 分布在 1.0~4.0 Ga 之间, 并在 1.2 Ga、1.8 Ga、3.0 Ga、3.5 Ga 出现统计峰值, 个别样品的 Hf 模式年龄甚至达到了 4.3 Ga。在 Hf 初始值方面, 冷家溪群和板溪群表现出一致的 Hf 初始值(图 5-c,d), 最显著的特征是年龄在 800~860 Ma 的锆石, Hf 同位素变化大, 从 -20 到 +15 之间, 出现一个快速的 Hf 初始值上升。这与前人做的大量统计结果一致<sup>[3]</sup>。

## 5 讨论

从笔者获得的年代学测试结果分析, 冷家溪群

的沉积时代大致可以确定在 860~820 Ma 之间。这与高林志等获得的年龄一致<sup>[29]</sup>。而板溪群最下部的凝灰岩年龄也在 820 Ma 左右。在另一露头, 靠近板溪群底部的碎屑岩最年轻锆石年龄为 800 Ma 左右, 这表明, 板溪群在不同地区接受沉积的年龄不一致。笔者获得的测年结果, 结合前人的测试分析以及板溪群以显著的角度不整合在冷家溪群之上的地质事实, 表明在冷家溪群发生褶皱变形不久, 江南造山带中段就发生了裂解并接受沉积。这与在江南造山带东段观察到的结果一致<sup>[32]</sup>。

Li 等<sup>[1,17]</sup>提出的“四堡造山”概念是建立在板溪群、丹洲群分别不整合在冷家溪群和四堡群之上这一事实并认为冷家溪群和四堡群属于中元古代沉积地层这一前提之上的。很显然, 笔者的测试结果及最

表 3 冷家溪群及板溪群锆石 Hf 同位素组成  
Table 3 Lengjiaxi Group and Banxi Group zircon Hf isotopic composition

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}$ / $^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}$ / $^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}$ / $^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}$ /Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
09Q2-1.xls	735	0.029935	0.000783	0.282077	0.000000	0.282066	-24.6	-8.8	1646	2806	-0.98
H\HF\10BX02-1.xls	834	0.0432	0.0010	0.281740	0.000004	0.281724	-36.5	-18.7	2122	3745	-0.97
H\HF\10BX02-2.xls	838	0.0310	0.0009	0.282225	0.000009	0.282210	-19.4	-1.4	1447	2217	-0.97
H\HF\10BX02-3.xls	815	0.0558	0.0012	0.282307	0.000003	0.282288	-16.4	0.9	1343	2001	-0.96
H\HF\10BX02-4.xls	847	0.0334	0.0008	0.282160	0.000002	0.282147	-21.7	-3.4	1532	2404	-0.98
H\HF\10BX02-6.xls	2846	0.0214	0.0005	0.281066	0.000004	0.281039	-60.3	2.7	3003	3206	-0.99
H\HF\10BX02-7.xls	818	0.0239	0.0006	0.282234	0.000004	0.282225	-19.0	-1.3	1422	2198	-0.98
H\HF\10BX02-8.xls	1189	0.0237	0.0005	0.282130	0.000000	0.282118	-22.7	3.2	1563	2045	-0.98
H\HF\10BX02-10.xls	813	0.0564	0.0013	0.282252	0.000003	0.282232	-18.4	-1.2	1424	2182	-0.96
H\HF\10BX02-11.xls	714	0.0735	0.0017	0.282492	0.000000	0.282469	-9.9	5.0	1096	1562	-0.95
H\HF\10BX02-12.xls	805	0.0489	0.0012	0.282251	0.000000	0.282233	-18.4	-1.3	1421	2189	-0.96
H\HF\10BX02-13.xls	820	0.0628	0.0016	0.282137	0.000008	0.282113	-22.5	-5.2	1596	2547	-0.95
H\HF\10BX02-14.xls	804	0.0339	0.0011	0.282292	0.000004	0.282276	-17.0	0.2	1359	2056	-0.97
H\HF\10BX02-15.xls	832	0.0626	0.0017	0.282596	0.000001	0.282570	-6.2	11.2	947	1086	-0.95
H\HF\10BX02-16.xls	737	0.1367	0.0030	0.282521	0.000020	0.282479	-8.9	5.9	1094	1499	-0.91
H\HF\10BX02-17.xls	829	0.0438	0.0011	0.282214	0.000007	0.282196	-19.7	-2.1	1471	2274	-0.97
H\HF\10BX02-18.xls	788	0.0537	0.0014	0.282273	0.000057	0.282253	-17.6	-1.0	1396	2148	-0.96
H\HF\10BX02-19.xls	1147	0.2883	0.0065	0.282339	0.000007	0.282199	-15.3	5.1	1510	1846	-0.80
H\HF\10BX02-20.xls	1102	0.0478	0.0013	0.282276	0.000003	0.282249	-17.5	5.9	1389	1745	-0.96
H\HF\10BX02-21.xls	869	0.0432	0.0011	0.282151	0.000082	0.282134	-21.9	-3.4	1556	2418	-0.97
H\HF\10BX02-22.xls	2560	0.0314	0.0007	0.281073	0.000008	0.281037	-60.1	-4.0	3013	3591	-0.98
H\HF\10BX02-23.xls	834	0.0703	0.0017	0.282256	0.000000	0.282230	-18.2	-0.8	1432	2160	-0.95
H\HF\10BX02-24.xls	810	0.0526	0.0014	0.282238	0.000000	0.282217	-18.9	-1.8	1447	2234	-0.96
H\HF\10BX02-26.xls	838	0.0344	0.0008	0.282251	0.000012	0.282239	-18.4	-0.4	1405	2127	-0.98
H\HF\10BX02-28.xls	848	0.0454	0.0013	0.282233	0.000003	0.282213	-19.1	-1.1	1449	2197	-0.96
H\HF\10BX02-29.xls	848	0.0425	0.0011	0.282166	0.000001	0.282148	-21.4	-3.4	1538	2400	-0.97
H\HF\10BX02-31.xls	808	0.0212	0.0007	0.282204	0.000032	0.282194	-20.1	-2.6	1466	2309	-0.98
H\HF\10BX02-33.xls	800	0.0601	0.0015	0.282172	0.000003	0.282150	-21.2	-4.4	1544	2458	-0.95
H\HF\10BX02-34.xls	835	0.0385	0.0011	0.282390	0.000007	0.282374	-13.5	4.3	1221	1705	-0.97
H\HF\10BX02-35.xls	817	0.0448	0.0013	0.282240	0.000003	0.282221	-18.8	-1.5	1438	2211	-0.96
H\HF\10BX02-36.xls	818	0.0452	0.0012	0.282272	0.000001	0.282254	-17.7	-0.3	1390	2105	-0.96
H\HF\10BX02-37.xls	820	0.0427	0.0011	0.282277	0.000001	0.282259	-17.5	0.0	1382	2086	-0.97
H\HF\10BX02-39.xls	806	0.0183	0.0005	0.282253	0.000002	0.282245	-18.3	-0.9	1394	2150	-0.98
H\HF\10BX02-40.xls	850	0.0541	0.0014	0.282038	0.000006	0.282015	-26.0	-8.0	1730	2815	-0.96
H\HF\10BX02-41.xls	809	0.0292	0.0008	0.282265	0.000011	0.282252	-17.9	-0.5	1388	2123	-0.97
H\HF\10BX02-42.xls	814	0.0310	0.0008	0.282538	0.000003	0.282526	-8.3	9.3	1006	1250	-0.98
H\HF\10BX02-43.xls	815	0.0449	0.0013	0.282214	0.000006	0.282194	-19.7	-2.5	1477	2299	-0.96
H\HF\10BX02-44.xls	2501	0.0180	0.0005	0.281398	0.000007	0.281374	-48.6	6.7	2558	2631	-0.99
H\HF\10BX02-45.xls	863	0.0303	0.0009	0.282255	0.000002	0.282241	-18.3	0.3	1403	2087	-0.97



续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
H\HF\10BX02-47.xls	773	0.0678	0.0019	0.282166	0.000004	0.282138	-21.4	-5.4	1570	2530	-0.94
H\HF\10BX02-50.xls	821	0.0515	0.0016	0.282258	0.000000	0.282233	-18.2	-0.9	1427	2168	-0.95
H\HF\10BX02-54.xls	834	0.0387	0.0012	0.282264	0.000000	0.282245	-18.0	-0.2	1404	2114	-0.96
H\HF\10BX02-56.xls	810	0.0163	0.0005	0.282215	0.000008	0.282208	-19.7	-2.1	1444	2262	-0.99
H\HF\10BX02-60.xls	840	0.0500	0.0014	0.282550	0.000003	0.282528	-7.8	9.9	1005	1209	-0.96
H\HF\10BX02-61.xls	817	0.0276	0.0009	0.282234	0.000002	0.282221	-19.0	-1.5	1432	2212	-0.97
H\HF\10BX02-62.xls	817	0.0316	0.0010	0.282507	0.000002	0.282492	-9.4	8.1	1054	1352	-0.97
H\HF\10BX02-63.xls	841	0.0139	0.0005	0.282316	0.000005	0.282308	-16.1	2.2	1305	1904	-0.99
H\HF\10BX02-64.xls	821	0.0232	0.0006	0.282160	0.000008	0.282150	-21.6	-3.9	1526	2430	-0.98
H\HF\10BX02-66.xls	803	0.0549	0.0015	0.282306	0.000002	0.282283	-16.5	0.4	1355	2033	-0.95
H\HF\10BX02-67.xls	828	0.0404	0.0012	0.282224	0.000009	0.282205	-19.4	-1.8	1460	2247	-0.96
H\HF\10BX02-68.xls	845	0.0400	0.0012	0.282284	0.000001	0.282265	-17.3	0.7	1374	2034	-0.96
H\HF\10BX02-69.xls	817	0.0271	0.0008	0.282281	0.000003	0.282269	-17.4	0.2	1363	2059	-0.98
H\HF\10BX02-70.xls	820	0.0234	0.0008	0.282575	0.000000	0.282562	-7.0	10.7	954	1125	-0.98
H\HF\10BX02-71.xls	804	0.0320	0.0011	0.282558	0.000000	0.282542	-7.6	9.6	985	1212	-0.97
H\HF\10BX02-72.xls	811	0.0372	0.0010	0.282151	0.000008	0.282135	-22.0	-4.7	1555	2491	-0.97
H\HF\10BX02-73.xls	827	0.0598	0.0017	0.282581	0.000013	0.282554	-6.8	10.6	969	1143	-0.95
H\HF\10BX02-74.xls	836	0.0288	0.0008	0.282250	0.000002	0.282237	-18.5	-0.5	1408	2136	-0.98
H\HF\10BX02-75.xls	799	0.0290	0.0009	0.282204	0.000008	0.282190	-20.1	-2.9	1476	2331	-0.97
H\HF\10BX02-76.xls	829	0.0447	0.0013	0.282259	0.000002	0.282238	-18.1	-0.6	1415	2142	-0.96
H\HF\10BX02-77.xls	825	0.0391	0.0011	0.282197	0.000022	0.282180	-20.3	-2.7	1493	2330	-0.97
H\HF\10BX02-78.xls	804	0.0323	0.0010	0.282319	0.000004	0.282305	-16.0	1.2	1317	1964	-0.97
H\HF\10BX02-79.xls	838	0.0395	0.0010	0.282292	0.000009	0.282276	-17.0	0.9	1358	2011	-0.97
H\HF\10BX02-80.xls	813	0.0438	0.0012	0.281772	0.000001	0.281754	-35.4	-18.1	2087	3680	-0.96
H\HF\10BX03-1.xls	2510	0.0161	0.0005	0.281187	0.000003	0.281164	-56.1	-0.6	2840	3266	-0.99
H\HF\10BX03-2.xls	795	0.0683	0.0018	0.281881	0.000000	0.281854	-31.5	-15.0	1970	3392	-0.94
H\HF\10BX03-3.xls	2462	0.0045	0.0001	0.281206	0.000000	0.281200	-55.4	-0.4	2790	3219	-1.00
H\HF\10BX03-4.xls	1946	0.0245	0.0007	0.281230	0.000003	0.281204	-54.5	-12.1	2798	3888	-0.98
H\HF\10BX03-5.xls	1825	0.0174	0.0005	0.281373	0.000014	0.281357	-49.5	-9.4	2590	3578	-0.99
H\HF\10BX03-6.xls	2450	0.0159	0.0004	0.281118	0.000004	0.281097	-58.5	-4.4	2931	3553	-0.99
H\HF\10BX03-7.xls	2467	0.0193	0.0006	0.281282	0.000008	0.281255	-52.7	1.7	2719	3043	-0.98
H\HF\10BX03-8.xls	2442	0.0146	0.0004	0.281172	0.000004	0.281152	-56.6	-2.6	2856	3393	-0.99
H\HF\10BX03-9.xls	2434	0.0130	0.0004	0.280932	0.000002	0.280912	-65.1	-11.3	3177	4139	-0.99
H\HF\10BX03-10.xls	2453	0.0107	0.0003	0.281093	0.000013	0.281078	-59.4	-5.0	2954	3606	-0.99
H\HF\10BX03-12.xls	1674	0.0539	0.0019	0.281137	0.000001	0.281077	-57.8	-22.8	3017	4637	-0.94
H\HF\10BX03-13.xls	2459	0.0291	0.0008	0.281505	0.000009	0.281467	-44.8	9.0	2433	2399	-0.98
H\HF\10BX03-14.xls	2015	0.0106	0.0003	0.281104	0.000000	0.281091	-59.0	-14.5	2941	4144	-0.99
H\HF\10BX03-15.xls	1690	0.0094	0.0003	0.281327	0.000000	0.281318	-51.1	-13.9	2639	3875	-0.99
H\HF\10BX03-16.xls	1978	0.0306	0.0009	0.281362	0.000003	0.281328	-49.9	-7.0	2633	3463	-0.97
H\HF\10BX03-17.xls	2495	0.0256	0.0007	0.281142	0.000011	0.281108	-57.7	-3.0	2919	3460	-0.98
H\HF\10BX03-18.xls	793	0.0157	0.0005	0.282201	0.000000	0.282194	-20.2	-3.0	1464	2329	-0.98

续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
H\Hf\10BX03-19.xls	2547	0.0126	0.0004	0.281331	0.000002	0.281312	-51.0	5.5	2641	2763	-0.99
H\Hf\10BX03-20.xls	2536	0.0252	0.0007	0.281371	0.000002	0.281336	-49.5	6.1	2610	2705	-0.98
H\Hf\10BX03-21.xls	2495	0.0224	0.0007	0.281152	0.000001	0.281121	-57.3	-2.5	2901	3421	-0.98
H\Hf\10BX03-22.xls	2476	0.0257	0.0007	0.281173	0.000002	0.281139	-56.5	-2.3	2877	3389	-0.98
H\Hf\10BX03-23.xls	1978	0.0098	0.0003	0.281290	0.000001	0.281279	-52.4	-8.7	2688	3614	-0.99
H\Hf\10BX03-24.xls	795	0.0317	0.0010	0.282550	0.000002	0.282535	-7.9	9.2	994	1244	-0.97
H\Hf\10BX03-25.xls	2002	0.0147	0.0004	0.281146	0.000000	0.281131	-57.5	-13.4	2890	4040	-0.99
H\Hf\10BX03-26.xls	803	0.0315	0.0010	0.281722	0.000000	0.281707	-37.1	-20.0	2145	3839	-0.97
H\Hf\10BX03-27.xls	2511	0.0376	0.0012	0.280960	0.000000	0.280905	-64.1	-9.8	3199	4060	-0.97
H\Hf\10BX03-28.xls	809	0.0271	0.0009	0.282454	0.000000	0.282440	-11.3	6.1	1126	1527	-0.97
H\Hf\10BX03-29.xls	2433	0.0184	0.0005	0.281222	0.000042	0.281198	-54.8	-1.2	2797	3265	-0.98
H\Hf\10BX03-30.xls	1721	0.0350	0.0010	0.281476	0.000001	0.281444	-45.8	-8.7	2483	3444	-0.97
H\Hf\10BX03-31.xls	1603	0.0244	0.0007	0.281474	0.000000	0.281454	-45.9	-11.0	2466	3570	-0.98
H\Hf\10BX03-32.xls	797	0.0577	0.0016	0.281962	0.000001	0.281939	-28.6	-11.9	1843	3124	-0.95
H\Hf\10BX03-33.xls	2500	0.0138	0.0004	0.281238	0.000003	0.281219	-54.2	1.1	2766	3111	-0.99
H\Hf\10BX03-34.xls	806	0.0201	0.0006	0.282052	0.000003	0.282043	-25.5	-8.0	1673	2786	-0.98
H\Hf\10BX03-36.xls	2492	0.0137	0.0004	0.281182	0.000002	0.281162	-56.2	-1.1	2843	3297	-0.99
H\Hf\10BX03-37.xls	1945	0.0065	0.0002	0.281312	0.000004	0.281305	-51.6	-8.5	2652	3578	-0.99
H\Hf\10BX03-40.xls	2200	0.0266	0.0007	0.281089	0.000000	0.281059	-59.5	-11.5	2990	3999	-0.98
H\Hf\10BX03-41.xls	1996	0.0115	0.0003	0.281203	0.000000	0.281192	-55.5	-11.4	2805	3859	-0.99
H\Hf\10BX03-42.xls	2502	0.0216	0.0006	0.280888	0.000001	0.280861	-66.6	-11.6	3248	4207	-0.98
H\Hf\10BX03-43.xls	786	0.0268	0.0008	0.281828	0.000003	0.281816	-33.4	-16.5	1990	3522	-0.98
H\Hf\10BX03-44.xls	2526	0.0129	0.0003	0.280971	0.000002	0.280955	-63.7	-7.7	3118	3886	-0.99
H\Hf\10BX03-45.xls	2365	0.0221	0.0007	0.281321	0.000003	0.281291	-51.3	0.6	2673	3067	-0.98
H\Hf\10BX03-46.xls	1833	0.0346	0.0009	0.281488	0.000002	0.281458	-45.4	-5.7	2460	3254	-0.97
H\Hf\10BX03-47.xls	1615	0.0200	0.0005	0.281479	0.000013	0.281463	-45.7	-10.4	2451	3527	-0.98
H\Hf\10BX03-48.xls	2227	0.0189	0.0005	0.281168	0.000001	0.281146	-56.7	-7.7	2868	3695	-0.98
H\Hf\10BX03-49.xls	1825	0.0053	0.0002	0.281713	0.000010	0.281706	-37.4	3.0	2115	2494	-0.99
H\Hf\10BX03-50.xls	2507	0.0151	0.0004	0.281124	0.000002	0.281104	-58.3	-2.8	2921	3456	-0.99
H\Hf\10BX03-51.xls	797	0.0250	0.0007	0.281867	0.000011	0.281857	-32.0	-14.8	1931	3381	-0.98
H\Hf\10BX03-52.xls	2200	0.0314	0.0008	0.280986	0.000000	0.280953	-63.2	-15.2	3134	4324	-0.98
H\Hf\10BX03-53.xls	799	0.0384	0.0010	0.281735	0.000000	0.281720	-36.7	-19.6	2131	3806	-0.97
H\Hf\10BX03-54.xls	2469	0.0381	0.0010	0.281218	0.000002	0.281168	-55.0	-1.4	2841	3308	-0.97
H\Hf\10BX03-55.xls	800	0.0344	0.0009	0.282116	0.000013	0.282102	-23.2	-6.0	1598	2607	-0.97
H\Hf\10BX03-56.xls	2909	0.0185	0.0005	0.280838	0.000001	0.280810	-68.4	-3.9	3308	3822	-0.98
H\Hf\10BX03-57.xls	2909	0.0357	0.0009	0.281097	0.000003	0.281045	-59.2	4.4	2996	3107	-0.97
H\Hf\10BX03-58.xls	2450	0.0202	0.0006	0.281203	0.000003	0.281175	-55.5	-1.6	2828	3312	-0.98
H\Hf\10BX03-60.xls	801	0.0875	0.0019	0.282498	0.000000	0.282470	-9.7	7.0	1093	1445	-0.94
H\Hf\10BX03-62.xls	1973	0.0191	0.0004	0.281239	0.000016	0.281222	-54.2	-10.8	2768	3797	-0.99
H\Hf\10BX03-63.xls	1970	0.0199	0.0005	0.281232	0.000006	0.281213	-54.5	-11.2	2783	3830	-0.98
H\Hf\10BX03-65.xls	800	0.0413	0.0011	0.282153	0.000000	0.282137	-21.9	-4.8	1555	2500	-0.97

续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
H\HF\10BX03-66.xls	2433	0.0306	0.0008	0.281215	0.000000	0.281177	-55.0	-1.9	2828	3330	-0.97
H\HF\10BX03-67.xls	1663	0.0281	0.0006	0.281486	0.000001	0.281466	-45.5	-9.2	2448	3454	-0.98
H\HF\10BX03-69.xls	1932	0.0127	0.0003	0.281304	0.000007	0.281292	-51.9	-9.3	2673	3637	-0.99
H\HF\10BX03-70.xls	1951	0.0697	0.0018	0.281770	0.000001	0.281702	-35.4	5.7	2128	2342	-0.94
H\HF\10BX03-71.xls	1954	0.0193	0.0004	0.281189	0.000003	0.281172	-56.0	-13.0	2835	3975	-0.99
H\HF\10BX03-72.xls	790	0.1031	0.0025	0.281931	0.000001	0.281893	-29.7	-13.7	1937	3276	-0.92
H\HF\10BX03-73.xls	1595	0.0570	0.0014	0.281973	0.000001	0.281931	-28.3	5.7	1819	2096	-0.96
H\HF\10BX03-74.xls	2491	0.0119	0.0003	0.281247	0.000005	0.281234	-53.9	1.5	2745	3076	-0.99
H\HF\10BX03-75.xls	791	0.0182	0.0004	0.282515	0.000001	0.282508	-9.1	8.1	1029	1336	-0.99
H\HF\10BX03-76.xls	2541	0.0191	0.0005	0.281011	0.000001	0.280987	-62.3	-6.2	3078	3769	-0.98
H\HF\10BX03-77.xls	793	0.0226	0.0006	0.282031	0.000000	0.282022	-26.2	-9.0	1700	2868	-0.98
H\HF\10BX03-79.xls	793	0.0274	0.0008	0.282485	0.000000	0.282473	-10.2	6.9	1080	1446	-0.98
H\HF\10BX03-80.xls	2180	0.0210	0.0005	0.281105	0.000003	0.281085	-59.0	-11.0	2951	3946	-0.99
H\HF\10LJX04-1.xls	1075	0.0305	0.0008	0.281705	0.000000	0.281688	-37.7	-14.6	2160	3539	-0.98
H\HF\10LJX04-2.xls	1686	0.0393	0.0010	0.281863	0.000001	0.281831	-32.2	4.3	1952	2287	-0.97
H\HF\10LJX04-3.xls	811	0.0787	0.0019	0.282115	0.000012	0.282086	-23.2	-6.4	1643	2644	-0.94
H\HF\10LJX04-4.xls	854	0.0445	0.0011	0.282230	0.000003	0.282213	-19.2	-0.9	1446	2188	-0.97
H\HF\10LJX04-5.xls	859	0.1037	0.0024	0.282329	0.000000	0.282291	-15.7	2.0	1353	1935	-0.93
H\HF\10LJX04-6.xls	868	0.0359	0.0009	0.281945	0.000006	0.281930	-29.3	-10.6	1834	3058	-0.97
H\HF\10LJX04-7.xls	866	0.0223	0.0005	0.282073	0.000002	0.282065	-24.7	-5.9	1640	2637	-0.98
H\HF\10LJX04-8.xls	889	0.0448	0.0011	0.281879	0.000003	0.281861	-31.6	-12.6	1934	3246	-0.97
H\HF\10LJX04-9.xls	864	0.0693	0.0016	0.281963	0.000000	0.281937	-28.6	-10.5	1844	3042	-0.95
H\HF\10LJX04-10.xls	866	0.0518	0.0013	0.282263	0.000001	0.282243	-18.0	0.4	1406	2077	-0.96
H\HF\10LJX04-12.xls	1858	0.0441	0.0010	0.281422	0.000001	0.281388	-47.7	-7.6	2557	3438	-0.97
H\HF\10LJX04-13.xls	866	0.0471	0.0011	0.282295	0.000001	0.282276	-16.9	1.6	1357	1972	-0.97
H\HF\10LJX04-14.xls	2573	0.0223	0.0005	0.280864	0.000010	0.280841	-67.5	-10.6	3272	4174	-0.99
H\HF\10LJX04-15.xls	861	0.0285	0.0007	0.282048	0.000001	0.282037	-25.6	-7.0	1682	2732	-0.98
H\HF\10LJX04-16.xls	1634	0.0407	0.0011	0.281927	0.000004	0.281894	-29.9	5.3	1867	2159	-0.97
H\HF\10LJX04-17.xls	1855	0.0179	0.0005	0.281500	0.000006	0.281484	-45.0	-4.3	2418	3146	-0.99
H\HF\10LJX04-18.xls	852	0.0547	0.0014	0.282579	0.000000	0.282557	-6.8	11.2	964	1102	-0.96
H\HF\10LJX04-19.xls	1731	0.0499	0.0012	0.281120	0.000005	0.281081	-58.4	-21.4	2985	4550	-0.96
H\HF\10LJX04-20.xls	877	0.0711	0.0018	0.282557	0.000001	0.282527	-7.6	10.7	1007	1164	-0.94
H\HF\10LJX04-21.xls	1749	0.0459	0.0012	0.281803	0.000000	0.281763	-34.3	3.3	2046	2416	-0.96
H\HF\10LJX04-22.xls	877	0.0381	0.0011	0.282291	0.000002	0.282273	-17.0	1.7	1362	1969	-0.97
H\HF\10LJX04-23.xls	893	0.0419	0.0012	0.282045	0.000008	0.282025	-25.7	-6.7	1709	2728	-0.96
H\HF\10LJX04-24.xls	1268	0.0245	0.0007	0.282091	0.000006	0.282074	-24.1	3.4	1624	2078	-0.98
H\HF\10LJX04-25.xls	878	0.0299	0.0009	0.282137	0.000003	0.282122	-22.5	-3.6	1567	2441	-0.97
H\HF\10LJX04-26.xls	869	0.0792	0.0018	0.282139	0.000001	0.282109	-22.4	-4.3	1604	2494	-0.94
H\HF\10LJX04-27.xls	2501	0.0145	0.0005	0.281158	0.000007	0.281136	-57.1	-1.8	2877	3364	-0.99
H\HF\10LJX04-28.xls	871	0.0411	0.0012	0.282147	0.000002	0.282127	-22.1	-3.6	1569	2437	-0.96
H\HF\10LJX04-29.xls	1114	0.0450	0.0012	0.282057	0.000004	0.282032	-25.3	-1.5	1692	2413	-0.96
H\HF\10LJX04-30.xls	862	0.0386	0.0012	0.282337	0.000001	0.282317	-15.4	2.9	1302	1849	-0.96

续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
H\Hf\10LJX04-31.xls	1322	0.0398	0.0012	0.281927	0.000000	0.281897	-29.9	-1.6	1874	2562	-0.96
H\Hf\10LJX04-32.xls	865	0.0581	0.0017	0.282093	0.000000	0.282066	-24.0	-5.9	1663	2637	-0.95
H\Hf\10LJX04-33.xls	872	0.0348	0.0010	0.282270	0.000002	0.282253	-17.7	0.9	1388	2036	-0.97
H\Hf\10LJX04-34.xls	870	0.0750	0.0022	0.282213	0.000002	0.282177	-19.8	-1.8	1514	2279	-0.93
H\Hf\10LJX04-35.xls	866	0.0262	0.0008	0.281902	0.000011	0.281890	-30.8	-12.1	1887	3188	-0.98
H\Hf\10LJX04-36.xls	866	0.0318	0.0009	0.281850	0.000007	0.281835	-32.6	-14.1	1967	3358	-0.97
H\Hf\10LJX04-37.xls	866	0.0268	0.0009	0.281877	0.000040	0.281863	-31.6	-13.1	1926	3270	-0.97
H\Hf\10LJX04-38.xls	860	0.0153	0.0006	0.281717	0.000004	0.281708	-37.3	-18.7	2130	3762	-0.98
H\Hf\10LJX04-39.xls	872	0.0365	0.0011	0.282043	0.000001	0.282025	-25.8	-7.2	1707	2754	-0.97
H\Hf\10LJX04-40.xls	839	0.0387	0.0012	0.282054	0.000006	0.282036	-25.4	-7.5	1695	2765	-0.97
H\Hf\10LJX04-41.xls	1630	0.0672	0.0019	0.282248	0.000007	0.282188	-18.5	15.6	1455	1243	-0.94
H\Hf\10LJX04-42.xls	864	0.0788	0.0023	0.282218	0.000005	0.282181	-19.6	-1.8	1511	2276	-0.93
H\Hf\10LJX04-43.xls	857	0.0138	0.0005	0.282027	0.000000	0.282020	-26.3	-7.7	1701	2792	-0.99
H\Hf\10LJX04-44.xls	1631	0.0351	0.0011	0.281657	0.000000	0.281621	-39.4	-4.4	2246	3014	-0.97
H\Hf\10LJX04-45.xls	811	0.0250	0.0007	0.282079	0.000017	0.282068	-24.5	-7.0	1641	2701	-0.98
H\Hf\10LJX04-46.xls	868	0.1318	0.0041	0.282199	0.000006	0.282132	-20.3	-3.5	1619	2424	-0.88
H\Hf\10LJX04-47.xls	864	0.0615	0.0018	0.282194	0.000001	0.282165	-20.5	-2.4	1525	2327	-0.95
H\Hf\10LJX04-48.xls	863	0.0422	0.0012	0.282100	0.000003	0.282080	-23.8	-5.4	1634	2594	-0.96
H\Hf\10LJX04-49.xls	858	0.0315	0.0009	0.281715	0.000012	0.281700	-37.4	-19.0	2152	3789	-0.97
H\Hf\10LJX04-53.xls	862	0.0215	0.0006	0.281965	0.000006	0.281955	-28.5	-9.9	1794	2988	-0.98
H\Hf\10LJX04-54.xls	865	0.0585	0.0015	0.282150	0.000002	0.282125	-22.0	-3.8	1577	2452	-0.95
H\Hf\10LJX04-55.xls	861	0.0765	0.0022	0.282522	0.000005	0.282487	-8.8	8.9	1067	1311	-0.93
H\Hf\10LJX04-57.xls	861	0.0253	0.0007	0.282501	0.000012	0.282489	-9.6	9.0	1056	1304	-0.98
H\Hf\10LJX04-58.xls	871	0.0203	0.0007	0.282491	0.000000	0.282480	-9.9	8.9	1068	1320	-0.98
H\Hf\10LJX04-59.xls	865	0.0837	0.0022	0.282257	0.000000	0.282221	-18.2	-0.4	1451	2147	-0.93
H\Hf\10LJX04-60.xls	2440	0.0142	0.0004	0.281450	0.000003	0.281433	-46.7	7.4	2479	2530	-0.99
H\Hf\10LJX04-61.xls	936	0.1472	0.0038	0.281988	0.000007	0.281922	-27.7	-9.4	1919	2994	-0.89
H\Hf\10LJX04-68.xls	1713	0.0265	0.0007	0.281319	0.000003	0.281296	-51.4	-14.1	2679	3912	-0.98
H\Hf\10LJX04-69.xls	1733	0.0261	0.0007	0.281970	0.000005	0.281947	-28.4	9.4	1790	1863	-0.98
H\Hf\10LJX05-11.xls	2436	0.0222	0.0006	0.281179	0.000021	0.281150	-56.3	-2.8	2862	3409	-0.98
H\Hf\10LJX05-12.xls	1823	0.0132	0.0004	0.281446	0.000018	0.281434	-46.9	-6.7	2484	3342	-0.99
H\Hf\10LJX05-13.xls	817	0.0358	0.0010	0.282296	0.000002	0.282281	-16.8	0.7	1349	2021	-0.97
H\Hf\10LJX05-14.xls	845	0.0233	0.0007	0.282502	0.000002	0.282491	-9.5	8.7	1053	1319	-0.98
H\Hf\10LJX05-15.xls	836	0.0109	0.0003	0.282438	0.000014	0.282433	-11.8	6.5	1132	1516	-0.99
H\Hf\10LJX05-17.xls	1882	0.0167	0.0005	0.281361	0.000005	0.281344	-49.9	-8.6	2606	3541	-0.99
H\Hf\10LJX05-20.xls	817	0.0189	0.0006	0.282512	0.000000	0.282503	-9.2	8.5	1036	1317	-0.98
H\Hf\10LJX05-21.xls	825	0.0270	0.0007	0.282502	0.000000	0.282490	-9.6	8.3	1055	1348	-0.98
H\Hf\10LJX05-23.xls	1864	0.0165	0.0005	0.281538	0.000012	0.281521	-43.6	-2.7	2367	3017	-0.99
H\Hf\10LJX05-24.xls	3652	0.0193	0.0006	0.280379	0.000006	0.280338	-84.6	-3.4	3924	4273	-0.98
H\Hf\10LJX05-25.xls	821	0.0297	0.0009	0.282350	0.000003	0.282337	-14.9	2.7	1270	1840	-0.97
H\Hf\10LJX05-26.xls	819	0.0194	0.0005	0.282486	0.000002	0.282478	-10.1	7.7	1071	1395	-0.98
H\Hf\10LJX05-27.xls	829	0.0379	0.0012	0.282521	0.000006	0.282503	-8.9	8.8	1039	1303	-0.97

续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
H\HF\10LJX05-28.xls	1764	0.0302	0.0008	0.281550	0.000004	0.281522	-43.2	-5.0	2374	3148	-0.97
H\HF\10LJX05-29.xls	1169	0.0382	0.0010	0.282190	0.000006	0.282168	-20.6	4.5	1498	1913	-0.97
H\HF\10LJX05-30.xls	2625	0.0077	0.0002	0.281163	0.000006	0.281153	-56.9	1.7	2853	3150	-0.99
H\HF\10LJX05-31.xls	834	0.0366	0.0011	0.282513	0.000001	0.282496	-9.2	8.7	1049	1319	-0.97
H\HF\10LJX05-32.xls	1166	0.0499	0.0012	0.282107	0.000000	0.282080	-23.5	1.3	1624	2194	-0.96
H\HF\10LJX05-34.xls	1349	0.0714	0.0018	0.282062	0.000000	0.282017	-25.1	3.2	1711	2151	-0.95
H\HF\10LJX05-35.xls	848	0.0433	0.0010	0.282219	0.000004	0.282202	-19.6	-1.4	1460	2230	-0.97
H\HF\10LJX05-36.xls	2269	0.0210	0.0005	0.281147	0.000023	0.281124	-57.5	-7.6	2898	3708	-0.98
H\HF\10LJX05-38.xls	813	0.0449	0.0014	0.282254	0.000002	0.282233	-18.3	-1.1	1424	2178	-0.96
H\HF\10LJX05-39.xls	1453	0.0349	0.0008	0.282050	0.000032	0.282028	-25.5	5.9	1685	1980	-0.98
H\HF\10LJX05-40.xls	1180	0.0396	0.0010	0.282111	0.000025	0.282088	-23.4	2.0	1609	2150	-0.97
H\HF\10LJX05-41.xls	837	0.0188	0.0005	0.282040	0.000093	0.282032	-25.9	-7.7	1684	2779	-0.99
H\HF\10LJX05-43.xls	2205	0.0334	0.0009	0.281332	0.000007	0.281296	-50.9	-2.9	2671	3263	-0.97
H\HF\10LJX05-44.xls	836	0.0396	0.0014	0.282401	0.000003	0.282379	-13.1	4.6	1217	1687	-0.96
H\HF\10LJX05-45.xls	839	0.0294	0.0009	0.282538	0.000003	0.282523	-8.3	9.7	1009	1224	-0.97
H\HF\10LJX05-46.xls	2194	0.0098	0.0003	0.281403	0.000000	0.281392	-48.4	0.2	2537	2983	-0.99
H\HF\10LJX05-47.xls	2484	0.0275	0.0006	0.281270	0.000001	0.281241	-53.1	1.5	2738	3064	-0.98
H\HF\10LJX05-48.xls	805	0.0212	0.0006	0.282508	0.000004	0.282500	-9.3	8.1	1041	1345	-0.98
H\HF\10LJX05-50.xls	811	0.0539	0.0013	0.282308	0.000003	0.282287	-16.4	0.7	1347	2010	-0.96
H\HF\10LJX05-51.xls	832	0.0156	0.0004	0.282088	0.000005	0.282081	-24.2	-6.1	1616	2631	-0.99
H\HF\10LJX05-52.xls	839	0.0369	0.0010	0.282271	0.000019	0.282255	-17.7	0.2	1386	2075	-0.97
H\HF\10LJX05-53.xls	834	0.0414	0.0012	0.282548	0.000001	0.282530	-7.9	9.9	1002	1211	-0.96
H\HF\10LJX05-54.xls	1844	0.0270	0.0007	0.281619	0.000000	0.281594	-40.8	-0.6	2271	2817	-0.98
H\HF\10LJX05-55.xls	1545	0.0453	0.0012	0.281915	0.000000	0.281880	-30.3	2.8	1891	2323	-0.96
H\HF\10LJX05-56.xls	1580	0.0430	0.0013	0.281858	0.000055	0.281819	-32.3	1.4	1975	2466	-0.96
H\HF\10LJX05-57.xls	740	0.1073	0.0027	0.282544	0.000005	0.282507	-8.0	6.9	1050	1408	-0.92
H\HF\10LJX05-58.xls	806	0.0376	0.0010	0.282314	0.000002	0.282299	-16.2	1.1	1324	1978	-0.97
H\HF\10LJX05-59.xls	1478	0.0122	0.0003	0.281613	0.000007	0.281605	-41.0	-8.5	2256	3268	-0.99
H\HF\10LJX05-60.xls	1469	0.0296	0.0008	0.281912	0.000008	0.281890	-30.4	1.4	1875	2391	-0.98
H\HF\10LJX05-61.xls	831	0.0624	0.0017	0.282386	0.000002	0.282359	-13.7	3.7	1249	1757	-0.95
H\HF\10LJX05-62.xls	1544	0.0710	0.0019	0.281970	0.000001	0.281915	-28.4	4.0	1847	2213	-0.94
H\HF\10LJX05-63.xls	671	0.0728	0.0020	0.282590	0.000001	0.282565	-6.4	7.5	963	1314	-0.94
H\HF\10LJX05-64.xls	1827	0.0148	0.0004	0.281538	0.000001	0.281524	-43.6	-3.4	2363	3057	-0.99
H\HF\10LJX05-65.xls	1122	0.0270	0.0008	0.281980	0.000013	0.281964	-28.0	-3.8	1779	2616	-0.98
H\HF\10LJX05-66.xls	819	0.0310	0.0009	0.282492	0.000000	0.282479	-9.9	7.7	1072	1393	-0.97
H\HF\10LJX05-67.xls	808	0.0647	0.0018	0.282544	0.000000	0.282516	-8.1	8.8	1025	1288	-0.94
H\HF\10LJX05-68.xls	818	0.0349	0.0010	0.282435	0.000003	0.282420	-11.9	5.6	1155	1580	-0.97
H\HF\10LJX05-69.xls	822	0.0479	0.0014	0.282631	0.000006	0.282609	-5.0	12.4	890	974	-0.96
H\HF\10LJX05-70.xls	1155	0.0244	0.0006	0.282161	0.000001	0.282147	-21.6	3.5	1524	1997	-0.98
H\HF\10LJX05-71.xls	815	0.0462	0.0011	0.282269	0.000007	0.282251	-17.8	-0.4	1394	2118	-0.97
H\HF\10LJX05-72.xls	2111	0.0672	0.0016	0.281439	0.000002	0.281374	-47.1	-2.3	2577	3147	-0.95

续表 3

NO.	Age/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}/\text{Ma}$	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	$f_{\text{LW/Hf}}$
H\Hf\10LJX05-73.xls	1534	0.0224	0.0006	0.281896	0.000000	0.281878	-31.0	2.5	1888	2342	-0.98
H\Hf\10LJX05-74.xls	824	0.0337	0.0008	0.282268	0.000002	0.282255	-17.8	-0.1	1384	2094	-0.97
H\Hf\10LJX05-75.xls	800	0.0432	0.0011	0.282238	0.000001	0.282222	-18.9	-1.8	1435	2231	-0.97
H\Hf\10LJX05-76.xls	817	0.0218	0.0005	0.282345	0.000004	0.282337	-15.1	2.6	1266	1845	-0.98
H\Hf\10LJX05-77.xls	1752	0.0205	0.0005	0.281708	0.000001	0.281691	-37.6	0.8	2140	2639	-0.98
H\Hf\10LJX05-78.xls	810	0.0337	0.0010	0.282463	0.000001	0.282448	-10.9	6.4	1116	1501	-0.97
H\Hf\10LJX05-79.xls	2154	0.0145	0.0004	0.281187	0.000000	0.281172	-56.0	-8.5	2831	3711	-0.99
H\Hf\10LJX05-80.xls	2236	0.0316	0.0008	0.281286	0.000003	0.281252	-52.5	-3.8	2730	3359	-0.98

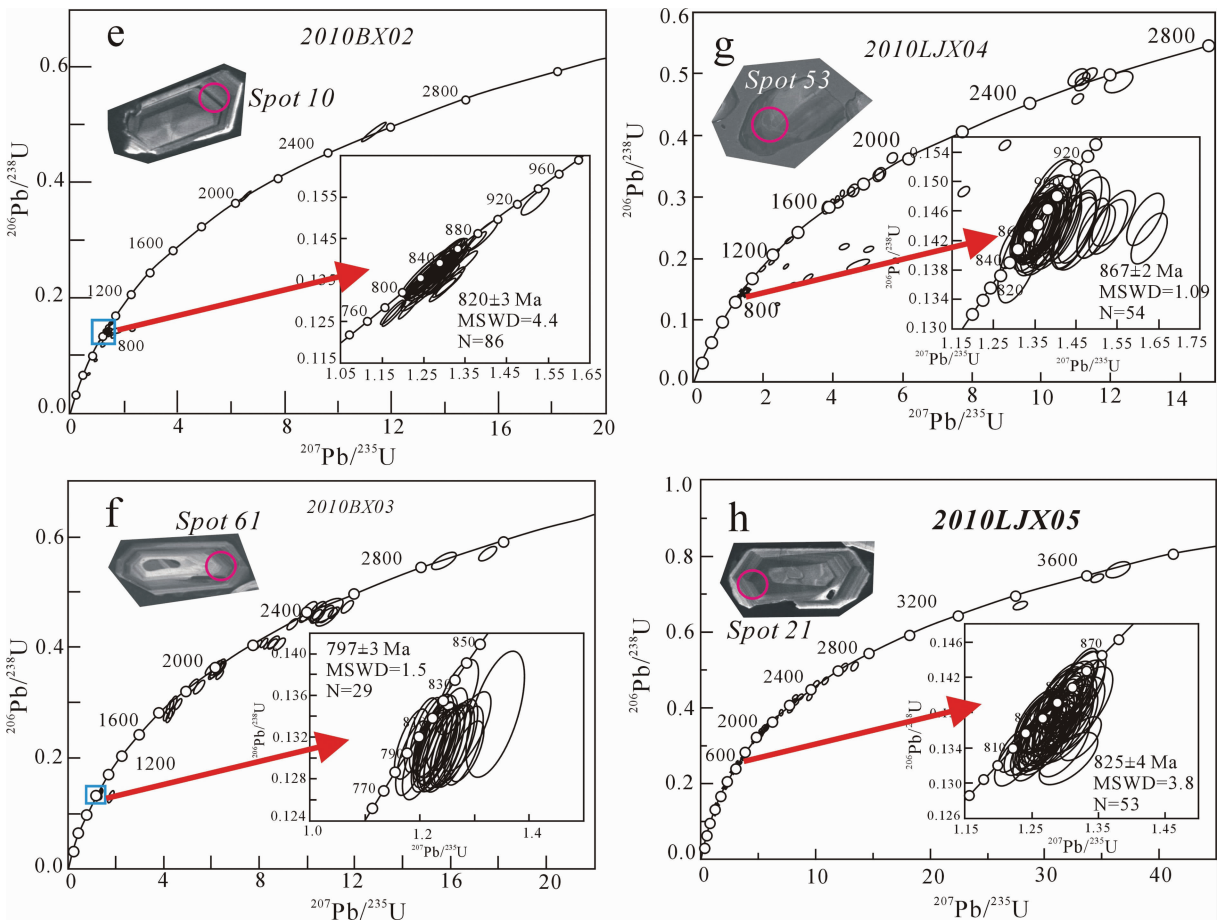


图 3 冷家溪群和板溪群的定年结果(详细说明见文中)

Fig.3 Zircon U-Pb ages of Lengjiaxi and Banxi Groups (for detailed discussions see the text)

近报道的资料并不支持四堡群和冷家溪群属于中元古代地层。结合不整合在这套强变形(紧闭褶皱)弱变质(低绿片岩相)地层之上的丹洲群和板溪群最大沉积年龄(820~800 Ma),可以确定“四堡造山”发生的准确时间应该在 840~820 Ma 之间。很显然,华南地区新元古代造山事件与典型的格林威尔造山有显

著的时间差异。

从锆石的 Hf 同位素分析,笔者注意到,从积累的大量锆石测年以及锆石的 O-Hf 同位素研究结果分析,在 1.0~0.7 Ga 之间,在华南地区发生过大规模的陆壳生长<sup>[33-34]</sup>。尤其重要的是,在大量的新元古代碎屑岩中,获得大量的 850~740 Ma 之间的岩浆

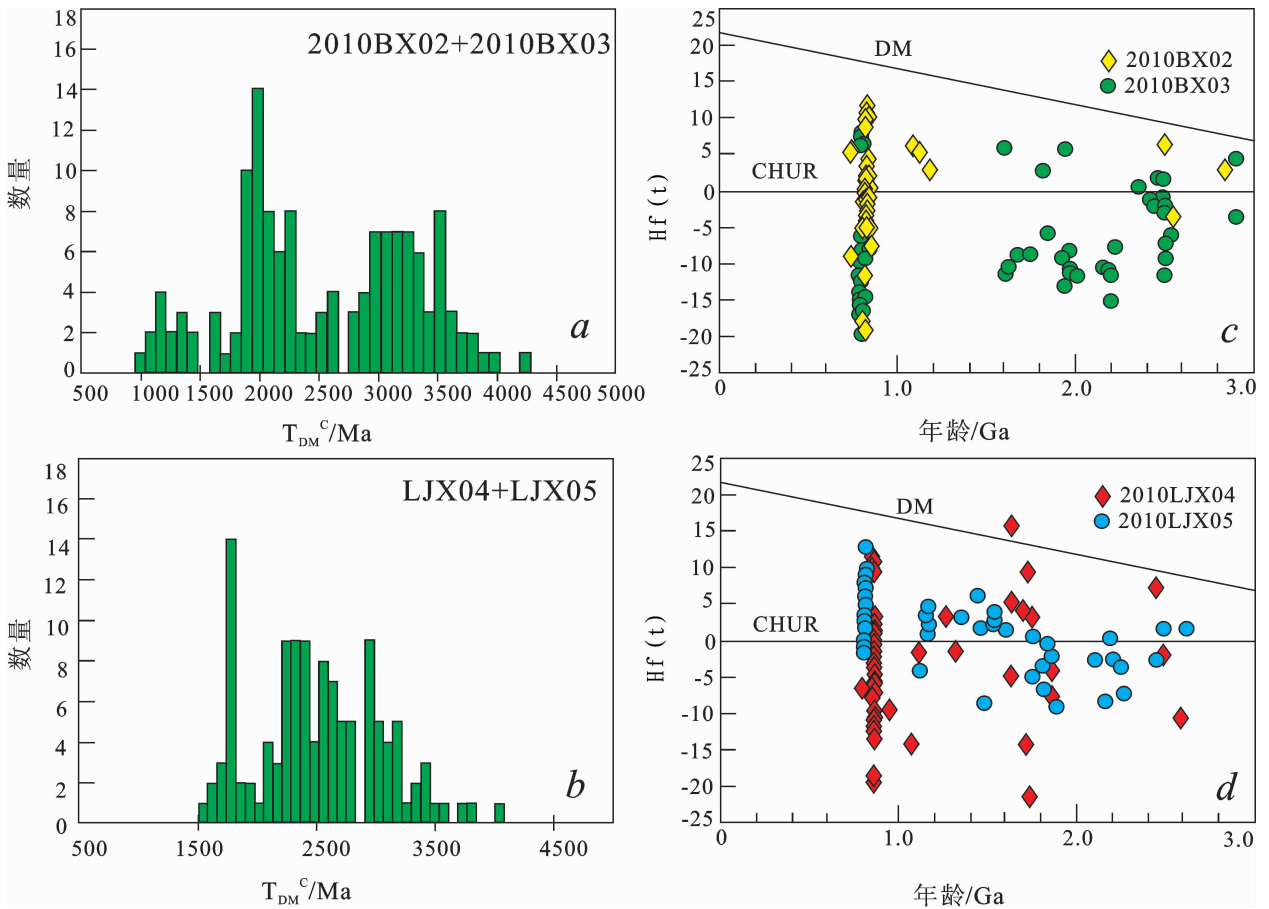


图 4 冷家溪和板溪群锆石 Hf 同位素组成(详细讨论见文中)

Fig.4 Zircon Hf isotope compositions of Lengjiaxi and Banxi Groups (for detailed discussions see the text)

岩来源的碎屑锆石,这表明在华南地区,新元古代的岩浆作用是非常活跃的。从获得的岩浆岩年龄分析看,主要集中在 825~800 Ma 和 780~760 Ma 两个阶段,这二个阶段的岩浆作用与其他的 Rodinia 超大陆块体上的岩浆活动具有很好的可比性,这为新元古代地幔柱模式提供了重要证据。然而,由于在华南地区缺少大规模的大陆溢流玄武岩,而且大量的新元古代花岗岩表现出钙碱性特征,使很多学者对地幔柱模式提出质疑<sup>[5]</sup>。有些地质学家认为,新元古代溢流玄武岩可能已经在后期的地质演化中剥蚀殆尽(如在扬子北缘碧口地区还保留了 820 Ma 的大陆溢流玄武岩<sup>[5,34,36]</sup>,其主要证据是来自新元古代碎屑锆石表现出明显的 Hf-O 同位素漂移,表明有显著的地幔物质加入到地壳。尽管如此,我们的工作表明,新元古代锆石几乎均显示它们由酸性岩浆结晶形成,这表明新元古代岩浆活动以酸性岩浆为主(如大量的花岗岩侵入和流纹岩及凝灰岩发育,而相对

比较少的玄武岩和基性侵入岩),这与地幔柱模式中大规模的玄武岩浆活动是不一致的。

Zheng 等<sup>[14-15]</sup>提出在新元古代属于板块裂解模式(plate-rift model)。Zheng 等认为,扬子和华夏在 830~820 Ma 之间发生拼合,在 820~800 Ma 之间开始发育裂谷盆地,裂谷盆地发育的诱因是俯冲板片的拆离。这一模式比较合理地解释了华南地区尤其是江南造山带新元古代岩浆活动的分布特征以及相关的地球化学属性,也与我们本项研究中发现大量新元古代(850~800 Ma)由酸性岩浆结晶的锆石证据吻合。

## 6 结论

综合上述,我们得出以下主要结论:(1)新获得的锆石 U-Pb 年龄表明,位于江南造山带中段的冷家溪群沉积时代大致在 860~820 Ma 之间,不整合在其上的板溪群沉积下限在 820 Ma 左右,这表明

江南造山带在晋宁造山运动之后,很快进入伸展裂解阶段;(2)锆石的 Hf 同位素表明,在 850~800 Ma 之间,锆石 Hf 初始值表现出快速上升趋势,表明这一时期有显著的地幔物质加入。造成这一现象的原因,一方面是早期的岛弧岩浆岩(850~820 Ma,尤其是 I 型花岗岩)是碎屑物的主要来源,另一方面造山后快速裂解形成的壳幔混合岩浆物质(如凝灰岩)形成板溪群部分物质来源;(3)无论是现今观察到的地质事实还是通过锆石特征分析(如大量新元古代锆石显示它们是由酸性岩浆结晶形成),都表明在华南地区缺少大规模的新元古代玄武质岩浆活动。因此,新元古代板块俯冲、拼合以及拼合后由于板片的拆沉引起的快速裂解(plate-rift model)是江南造山带形成的比较合理的地球动力学模型。

**致谢:**两名匿名审稿人对本文进行了详细的审阅,他们的意见为本文的修改提供了重要帮助;《中国地质》编辑部的王学明副主编对文章也做了大量的润色,在此一并致以诚挚的感谢。

### 参考文献(References):

- [1] Li X H, Li Z X, Ge W C, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca 825 Ma? [J]. *Precambrian Res.* 2003, 122, 45-83.
- [2] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guandaoshan pluton in SW Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance [J]. *Sci. China (Ser. D)*, 2003, 46 (Supp.):73-83.
- [3] Li X H, Li Z X, Sinclair, et al. Revisiting the Yanbian Terrane: implications for Neoproterozoic tectonic evolution of the western Yangtze Block, South China [J]. *Precambrian Res.*, 2006, 151: 14-30.
- [4] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up [J]. *Precambrian Res.*, 2003, 122:141-158.
- [5] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Nonglacial origin for low  $\delta^{18}\text{O}$  Neoproterozoic magmas in the South China Block: evidence from new in-situ oxygen isotope analyses using SIMS [J]. *Geology*, 2011, 39: 735-738.
- [6] Zhou M F, Yan D P, Kennedy, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth Planet. Sci., Lett.* 2002, 196:51-67.
- [7] Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the Northern Margin of South China: implications for the Accretion of Rodinia [J]. *J. Geol.*, 2002, 110: 611-618.
- [8] Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al. The Yanbian terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block [J]. *Precambrian Res.*, 2006;144, 19-38.
- [9] Zhou M F, Yan D P, Wang C L, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 248:286-300.
- [10] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. Geochemistry of the Meso- to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: implications for the evolution of the western Jiangnan orogen [J]. *Precambrian Res.*, 2004, 135:79-103.
- [11] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Res.*, 2006, 145:111-130.
- [12] Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, et al. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Precambrian Research*, 2007, 159:117-131.
- [13] Zhao Pengda, Yu Sheng, Eiji Ohtani. East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40:689-709.
- [14] Zheng Y F, Zhang S B. Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2007, 52:1-12.
- [15] Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B, et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China [J]. *Precambrian Res.*, 2008, 163:351-383.
- [16] Yang M G, Wang J G, Li Y, et al. Regional geology of South China [C]//Cheng Y Q (ed.). *Outline of Regional Geology of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1994:313-384.
- [17] Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China and implications for Rodinia assembly [J]. *Precambrian Res.*, 1999, 97:43-57.
- [18] Li X H, Li W X, Li Z X, et al. 850-790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia [J]. *Lithos*, 2008, 102:341-357.
- [19] Gao L Z, Yang M G, Ding X Z, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen Groups in South China: constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt [J]. *Geol. Bull. Chin.*, 2008, 27: 1744-1758.
- [20] Gao L Z, Dai C G, Liu Y X, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Sibao Group in southeastern Guizhou-northern Guangxi area, China and its stratigraphic implication [J]. *Geol. Bull.*



- Chin., 2010, 29:1259-1267.
- [21] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 黔东南地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄锆石及其地层意义 [J]. 中国地质, 2010, 37(4):1071-1080.  
Gao Linzhi, Dai Chungu, Liu Yanxue, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuffaceous bed of Xiajiang Group in Guizhou Province and its stratigraphic implication [J]. Geology in China, 2010, 37, 1071-1080.
- [22] 高林志, 陈峻, 丁孝忠, 等. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 2011, 31(7):1001-1008.  
Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuff bed of Lengjiayi and Banxi Groups, northeastern Hunan: constraints on the Wuling Movement [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 31(7):1001-1008(in Chinese with English abstract).
- [23] Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and Sedimentation[J]. Precambrian Research, 2009, 170:27-42.
- [24] Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Nonglacial origin for low  $\delta^{18}\text{O}$  Neoproterozoic magmas in the South China Block: evidence from new in-situ oxygen isotope analyses using SIMS[J]. Geology, 2011, 39, 735-738.
- [25] Wang X L, Shu L S, Xing G F, et al. Post orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca 800-760 Ma volcanic rocks [J]. Precambrian Res., doi:10.1016/j.precamres.2011.07.003.
- [26] 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 等. 中国中-新元古代地层年表的修正——锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约 [J]. 地层学杂志, 2011, 35(1):1-6.  
Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Pang Weihua, et al. New geologic time scale of Meso-and Neoproterozoic of China and Geochronologic Constraint by SHRIMP Zircon U-Pb dating [J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(1):1-6(in Chinese with English abstract).
- [27] 高林志, 黄志忠, 丁孝忠, 等. 赣西北新元古代修水组和马洞桥组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2012, 31(7):1086-1093.  
Gao Linzhi, Huang Zhizhong, Ding Xiaozhong, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Xiushui and Majianqiao Formations in northwestern Jiangxi Province [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7):1086-1093(in Chinese with English abstract).
- [28] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: implications for petrogenesis and tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2006, 145:111-130.
- [29] 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 等. 华北—江南地区中-新元古代地层格架的再认识[J]. 地球学报, 2009, 30(4):433-446.  
Gao Linzhi, Zhang Chuanheng, Liu Pengju, et al. Recognition of Meso-and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(4):433-446(in Chinese with English abstract).
- [30] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICPMS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4):481-492.  
Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4):481-492(in Chinese with English abstract).
- [31] 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 2011, 30(10):1508-1513.  
Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, et al. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(10):1508-1513 (in Chinese with English abstract).
- [32] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带形成过程中若干新元古代地质事件[J]. 高校地质学报 2009, 154:453-459.  
Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. Some Neoproterozoic geological events involved in the development of the Jiangnan orogen [J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(4):453-459(in Chinese with English abstract).
- [33] Wang X C, Li X H, Li W X, et al. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for >1500 °C mantle melts by a Rodinian mantle plume[J]. Geology, 2007, 35:1103-1106.
- [34] Wang X C, Li X H, Li W X, et al. The Bikou basalts in northwestern Yangtze Block, South China: remains of 820-810 Ma continental flood basalts [J]? Geological Society of American Bulletin, 2008, 120:1478-1492.
- [35] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. Comment on 'Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma?' by Xian-Hua Li et al. (PR 122, 45-83, 2003)[J]. Precam. Res., 2004, 122:401-403.
- [36] Ling W, Gao S, Zhang B, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of Yangtze Craton, South China: implications for amalgamation and break-up of Rodinia Supercontinent [J]. Precambrian Res., 2003, 122:111-140.

## Zircon U–Pb age and Hf isotope compositions of Lengjiaxi and Baxi Groups in middle Hunan Province: implications for the Neoproterozoic tectonic evolution in South China

MENG Qing-xiu<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian<sup>3</sup>, GENG Jian-zhen<sup>3</sup>,  
ZHANG Chuan-lin<sup>2</sup>, HUANG Wen-cheng<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 3. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Zircon LA-ICPMS U–Pb ages and Hf isotope compositions of the tuff and clastic rocks from Lengjiaxi Group and Banxi Group in the middle section of the Jiangnan orogenic belt were determined. The results reveal that the sedimentary time of the Lengjiaxi Group is 860–820 Ma. On the other hand, the lower limit of sedimentation of the Banxi Group which overlies the Lengjiaxi Group in angular unconformity is ca. 820 Ma, suggesting the quick transformation from the assemblage between Cathysia and Yangtze to the extension of the Jiangnan orogenic belt. Zircon Hf isotope compositions exhibit a rapid increase of the initial Hf values during 850–820 Ma, indicating significant addition of the depleted mantle materials during this period. The quick increase of  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  could be ascribed to the following factors: (1) most clastic materials were derived from arc igneous rocks (e.g., I-type granites) and (2) some materials were derived from the mixed substances (such as tuff) between crust-derived magma and mantle-derived magma during the quick collapse after the orogeny). In combination with previous studies, the authors hold that the plate-rift model is a most plausible geodynamic model for the Neoproterozoic tectonic evolution of South China.

**Key words:** Jiangnan orogenic belt; Lengjiaxi Group; Banxi Group; zircon U–Pb dating; Hf isotope; geodynamic settings

---

**About the first author:** MENG Qing-xiu, female, born in 1979, master, engages in the study of structure geology; E-mail: mqxxqm@126.com.

**About the corresponding author:** ZHANG Chuan-lin, male, senior researcher; E-mail: zchuanlin@yahoo.com.cn.