

# 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束

陈能松<sup>1,2</sup>, 刘 嵘<sup>1</sup>, 孙 敏<sup>3</sup>, 李惠民<sup>4</sup>, 何 蕾<sup>1</sup>, 王勤燕<sup>1</sup>, 张宏飞<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 香港大学地球科学系, 香港

4. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

**摘要:** 本研究应用激光剥蚀技术测定了北大别黄土岭高温—高压长英质麻粒岩锆石 3 个结构域的 U-Pb 年龄。变质锆石成因的碎屑锆石域的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄范围为(2 493±54)Ma~(2 500±180)Ma, 岩浆成因的碎屑锆石域的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄范围为 2 628~2 690 Ma, 其最大的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为(2 790±150)Ma, 变质增生或变质重结晶锆石域的不一致线上交点年龄为(2 044.7±29.3)Ma。长英质麻粒岩的矿物组合成分、主量元素地球化学, 尤其是锆石副矿物内部结构特征显示其原岩为沉积岩。这表明, 麻粒岩原岩物质来自具有复杂热历史的蚀源区, 该蚀源区曾发生过~2.8 Ga 的岩浆作用和~2.5 Ga 变质作用, 因此其原岩的沉积年龄不应早于 2.5 Ga。高温—高压麻粒岩相变质作用的精确年龄为(2.04±0.03)Ga, 表明黄土岭麻粒岩是一个晚古元古代超高温变质岩之残块。

**关键词:** 激光锆石 U-Pb 定年; 原岩和麻粒岩相变质年龄; 蚀源区; 长英质麻粒岩; 北大别。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2006)03-0294-07

收稿日期: 2005-08-29

## LA-ICPMS U-Pb Zircon Dating for Felsic Granulite, Huangtuling Area, North Dabieshan: Constraints on Timing of Its Protolith and Granulite-Facies Metamorphism, and Thermal Events in Its Provenance

CHEN Neng-song<sup>1,2</sup>, LIU Rong<sup>1</sup>, SUN Min<sup>3</sup>, LI Hui-min<sup>4</sup>, HE Lei<sup>1</sup>, WANG Qin-yan<sup>1</sup>, ZHANG Hong-fei<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China

4. Institute of Geology and Mineral Resources of Tianjin, Tianjin 300170, China

**Abstract:** LA-ICPMS U-Pb dating was conducted on three textural domains in zircon from a high-temperature high-pressure felsic granulite in the Huangtuling area, North Dabieshan, Central China. The metamorphic growth-derived detrital zircon domain yielded a <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age in the range of (2 493±54)–(2 500±180)Ma. The magmatic genesis-derived detrital zircon domain gave a <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age ranging from 2 628 Ma to 2 690 Ma, with an oldest <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U age of (2 790±150)Ma. The metamorphic overgrowth or metamorphic recrystallization zircon domain yielded a discordia with an upper intercept age of (2 044.7±29.3)Ma. Compositions of the mineral assemblage, major element geochemistry, and an especially complex interior texture of zircon suggest that the protolith of the felsic granulite is of sedimentary origin. The protolith material of the granulite came from a provenance with a complex thermal history, i. e. ~2.8 Ga magmatism and ~2.5 Ga metamorphism.

**基金项目:** 高校博士点基金项目(No. 98049114); 国家自然科学基金项目(Nos. 49972023; 40202008); 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室自由基金项目(MGMR2002-29); 香港大学杰出科研奖项目。

**作者简介:** 陈能松(1956—), 男, 教授, 从事造山带变质作用过程和年代学研究。E-mail: nengsongchen@cug.edu.cn

and deposited in a basin not earlier than 2.5 Ga. The high-temperature and high-pressure granulite-facies metamorphic age was precisely constrained at  $(2.04 \pm 0.03)\text{Ga}$ , which indicates the granulite in Huangtuling area should be a relict of the Palaeoproterozoic UHT metamorphosed slab.

**Key words:** LA-ICPMS U-Pb zircon dating; ages of protolith and granulite-facies metamorphism; provenance; felsic granulite; North Dabieshan.

## 0 引言

黄土岭麻粒岩是北大别穹窿的典型麻粒岩之一(图 1),其中因主要矿物石榴石为全球为数不多的保存完好生长环带的麻粒岩而闻名(Indares, 1995; Chen and Jahn, 1998; Cooke *et al.*, 2000,及文中有关文献).近年开展了包括常规锆石 U-Pb(Chen *et al.*, 1996; 陈能松等, 2002; 侯振辉, 2002)、阶段蒸发 Pb-Pb(Jian *et al.*, 1999)和原位锆石 SIMS U-Pb(吴元保等, 2002)年代学研究和石榴石阶段淋滤 Pb-Pb 年龄研究(Zhou *et al.*, 1999).然而,由于缺乏对该麻粒岩原岩性质的了解,对原岩的年龄颇存争议,可靠和精确的麻粒岩相峰期变质年龄更需进一步证实,麻粒岩相的构造意义和麻粒岩源区地壳的构造热演化也有待讨论.本文报道了基于阴极发光图像的锆石激光剥蚀 ICP-MS U-Pb 定年结果,该

结果提供了可靠的麻粒岩相变质峰期年龄;而且矿物组合及矿物化学特征、主量元素地球化学,特别是锆石副矿物内部结构特征的原岩恢复,提供了原岩年龄的重要约束和源区热事件年龄的重要线索.

## 1 长英质麻粒岩基本特征和原岩恢复

### 1.1 地质背景和岩相学特征

本长英质麻粒岩出露于湖北罗田县黄土岭小学篮球场旁.该麻粒岩的岩相学特征已有详细描述(王江海等, 1996; Chen *et al.*, 1998),但为便于理解,本文将对其岩相学特征进行简要描述.黄土岭长英质麻粒岩主要矿物为石榴石( $\sim 15\%$ )、紫苏辉石( $\sim 10\%$ )、堇青石( $< 5\%$ )、黑云母( $\sim 10\%$ )、斜长石( $\sim 30\%$ )、钾长石( $\sim 10\%$ )和石英( $\sim 20\%$ ),副矿物有金红石、独居石、黄铁矿、磷灰石和锆石等.结构关系显示 2 个世代矿物组合:世代 I 为石榴石+紫苏辉石+斜长石+钾长石+黑云母+石英,为麻粒岩相峰期变质产物;世代 II 为紫苏辉石+堇青石+斜长石+黑云母+石英,呈后成合晶或交生体取代石榴石.

### 1.2 原岩恢复

传统上变质岩原岩恢复的途径主要有岩石共生组合、岩相学(即矿物组合和岩石结构和构造特征)、岩石化学、地球化学和副矿物等 5 种(游振东和王方正, 1988).黄土岭长英质麻粒岩不与典型的变质沉积岩(如大理岩或石英岩)共生,露头上显示被一发育长英混合岩化的云母片麻岩所裹挟,故不易从岩石共生组合上判断正、副变质岩属性.其次,在岩相学上,由于变质程度相当高,原岩结构构造特征已荡然无存,但该长英质麻粒岩含有较高含量的石榴石、紫苏辉石( $\text{Al}_2\text{O}_3$  可达  $6\%$ )、黑云母和堇青石(以后成合晶的形式存在)等富 Al 质变质矿物(Chen and Jahn, 1998),最近还在石榴石的边部发现了蓝晶石包裹体(陈意,私人通讯),表明原岩的化学成分曾一度在矿物组合上显示  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相对过剩,因而可与富含粘土质矿物的沉积岩相比拟.第三,如后面锆石的 CL 图像显示,该岩石变质锆石包裹体既有变质成

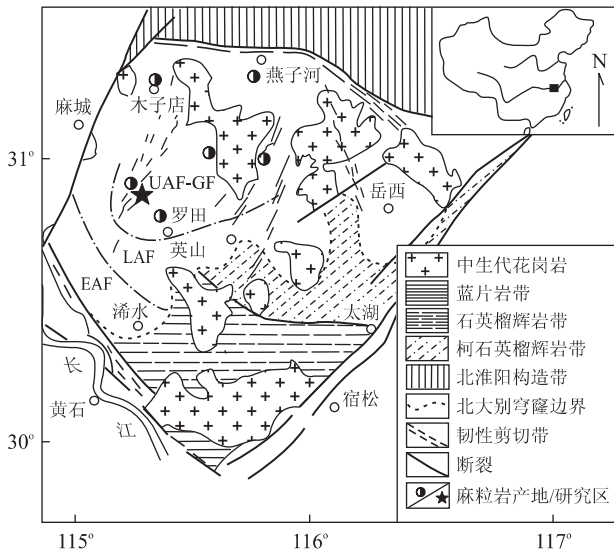


图 1 大别造山带东段地质和构造单元简图(据 Chen and Jahn, 1998; Wang *et al.*, 1998; Hacker *et al.*, 1998, 略作修改)

Fig. 1 Schetch geological map showing tectonic units in eastern Dabie orogen

UAF-GF. 高角闪岩相-麻粒岩相带; LAF. 低角闪岩相带; EAF. 绿帘角闪岩相带

表 1 黄土岭长英质麻粒岩石化学成分

Table 1 Petrochemical composition of the felsic granulite from Huangtuling

样号	1	2	3	3	3
SiO <sub>2</sub>	63.10	63.62	60.39	63.23	62.03
TiO <sub>2</sub>	0.64	0.94	0.78	0.82	0.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.24	12.09	12.61	13.04	12.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.81	0.84	0.49	0.40	0.36
FeO	6.58	7.65	8.69	6.43	7.25
CaO	1.55	1.30	1.76	1.95	1.86
MgO	6.52	8.23	7.89	6.52	7.38
MnO	0.08	0.06	0.22	0.13	0.15
K <sub>2</sub> O	2.48	2.40	2.45	2.58	2.49
Na <sub>2</sub> O	2.64	2.50	2.43	2.62	2.58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.94	0.09	0.15	0.10
Total loss	1.90	0.11	1.78	1.97	1.90
Total	99.61	100.68	99.57	99.84	99.79
al	38.15	33.67	34.05	38.27	36.66
fm	42.63	49.07	48.02	40.74	43.77
c	4.47	3.62	4.75	5.72	5.25
alk	14.75	13.65	13.18	15.26	14.32
(al+fm)-(c+alk)	61.56	65.47	64.14	58.03	60.86
Si	181.76	177.17	163.08	185.59	175.18
DF 值	-5.75	-8.31	-7.38	-5.35	-6.38
数据来源	本文	a	b	b	b

注:Si, al, fm, c 和 alk 为尼格里数值(Niggle, 1954); a. 侯振辉, 2002; b. 王江海等, 1996.

因锆石, 也有岩浆成因锆石, 这种多成因性表明锆石核属碎屑成因, 来自于复杂蚀源区, 这有力地说明其原岩是沉积成因的. 第四, 岩石化学成分的研究对麻粒岩原岩的恢复结果也是沉积岩. 几年来, 不同研究者对该麻粒岩先后测定了 5 个样品的主量元素成分. 由表 1 可见, 各分析结果之间并无实质差别: SiO<sub>2</sub> = 60.39% ~ 63.62%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 12.09% ~ 13.24%, FeO = 6.43% ~ 8.69%, CaO = 1.30% ~ 1.95%, MgO = 6.52% ~ 8.23%, MnO = 0.08% ~ 0.22%, K<sub>2</sub>O = 2.40% ~ 2.59%, Na<sub>2</sub>O = 2.43% ~ 2.64%. 在近 2000 个前寒武纪变质岩样品统计分析研究的基础上, Shaw(1972)提出了一个正副变质岩的判别函数“ $DF=10.44-0.21SiO_2-0.32Fe_2O_3(T)-0.98MgO+0.55CaO+1.46Na_2O+0.54K_2O$ ”, 该函数成功地判别了全球前寒武纪高级变质岩原岩的正副属性. 黄土岭长英质麻粒岩的 DF 值范围为 -5.35 ~ -8.31 (表 1), 显示原岩为沉积岩. 此外, Simonen(1953)研究了变余构造清晰的泥质岩、砂岩、钙质岩、火山碎屑岩和玄武质溶岩, 在 (al+fm)-(c+alk) vs Si 图解上(图 2)勾绘出这些岩石的区域, 该图解可以成功地将变质的岩浆岩原岩与变质岩原岩区分开来.

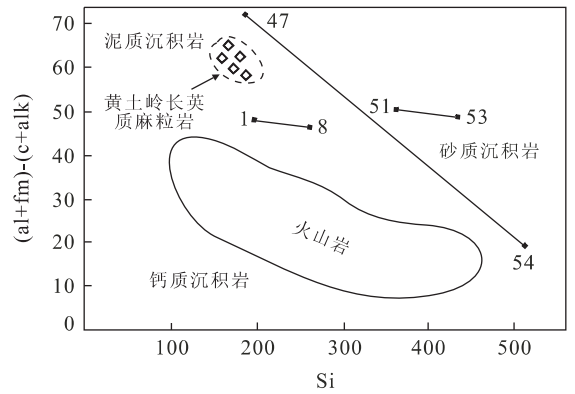


图 2 (al+fm)-(c+alk)-Si 图解(Simonen, 1953)

Fig. 2 (al+fm)-(c+alk)-Si discrimination diagram

在该图解上, 黄土岭长英质麻粒岩的 5 个岩石化学数据投点在沉积岩区, 其原岩显示了与铁镁质泥质岩良好的亲缘性. 因此, 矿物组合和矿物化学和岩石化学特征都显示副变质岩特点, 副矿物锆石的内部构造特征揭示黄土岭麻粒岩的原岩为正常沉积的陆源碎屑岩, 而不是岩浆岩(吴元保等, 2002).

## 2 锆石特征

将挑选好的锆石置于环氧树脂中, 磨制至颗粒中心, 抛光后喷金, 在日本东京工业大学地球与空间科学系用 HITACHI S2250-N 扫描电子显微镜拍摄阴极(CL)发光图像. 黄土岭长英质麻粒岩的锆石以柱状和球粒状为主. 球粒状锆石为高级变质成因锆石的常见形状(Vavra *et al.*, 1996). CL图像(图 3)

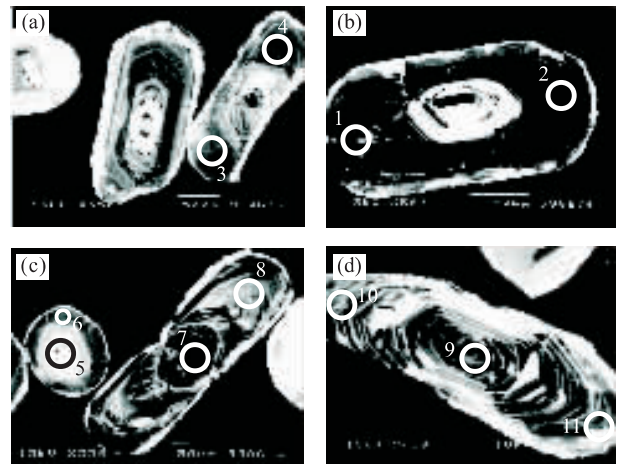


图 3 长英质麻粒岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons from the felsic granulite

表2 锆石 U-Pb 同位素分析和年龄计算结果  
Table 2 U-Pb zircon dating and isotope analysis

点号/域属性	放射性成因铅同位素比值				$t(\text{Ma})$		
	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1/Ⅲ	0.343 8±0.005 5	5.956 5±0.095 3	0.136 5±0.005 2	0.08	1 905±26	1 970±14	2 083±66
2/Ⅲ	0.276 9±0.002 8	5.064 6±0.050 6	0.131 4±0.004 1	0.04	1 576±14	1 830.2±8.5	2 117±55
3/Ⅲ	0.289 9±0.013 3	5.086 7±0.234 0	0.126 0±0.004 8	0.03	1 641±66	1 834±39	2 043±67
4/Ⅲ	0.338 6±0.012 0	5.993 6±0.227 8	0.127 1±0.005 0	0.09	1 880±58	1 975±33	2 058±69
5/Ⅰ	0.240 9±0.031 3	5.502 4±0.715 3	0.164 0±0.018 0	0.06	1 390±160	1 900±110	2 500±180
6/Ⅲ	0.254 7±0.002 8	4.493 9±0.049 4	0.126 6±0.005 6	0.03	1 463±14	1 729.8±9.1	2 051±78
7/Ⅰ	0.367 8±0.009 9	8.383 2±0.226 3	0.163 6±0.005 2	0.08	2 019±47	2 273±24	2 493±54
8/Ⅲ	0.340 0±0.000 7	5.946 4±0.011 9	0.125 6±0.006 2	0.01	1 886.7±3.4	1 968.0±1.7	2 037±87
9/Ⅱ	0.540 7±0.035 1	13.354 0±0.868 0	0.177 3±0.003 7	0.48	2 790±150	2 705±61	2 628±35
10/Ⅱ+Ⅲ	0.342 4±0.010 3	7.803 5±0.234 1	0.163 6±0.004 9	0.22	1 898±49	2 209±27	2 493±54
11/Ⅱ	0.422 1±0.009 3	10.795 6±0.237 5	0.183 6±0.011 4	0.32	2 270±42	2 506±20	2 690±100

显示本锆石具有复杂的核一边结构,可以分为3个结构域。

I域锆石通常见于核部,具有亮白的CL图像(图3a—3c),偶见暗灰或黑色(图3c),一些I域锆石具有不规则的港湾状碎屑锆石轮廓(图3a、3c)。总的看来,I域锆石原为变质锆石,但是以碎屑锆石进入麻粒岩原岩中的。II域锆石CL图像灰色,振荡环带清晰,为岩浆结晶锆石。该域锆石的多数包绕第I域锆石生长(图3a、3c),也有个别颗粒不存在锆石核(图3d)。锆石核的成分复杂,合理的解释是II域锆石也是碎屑锆石。III域锆石CL图像灰色—深灰色,具微弱环带或无环带构造,呈增生边包绕I和II域锆石(图3a—3c)。有的III域锆石边为II域锆石的变质重结晶边,变质重结晶锆石由边缘向颗粒内部发展(Hoskin and Black, 2000),其重结晶前锋切割了II域锆石的振荡环带构造(图3d)。II域和III域锆石通常具有港湾状边缘,表明峰期深熔作用的影响。

### 3 分析方法和结果

锆石的U和Pb同位素分析用香港大学地球科学系装载在Nd:YAG 213 nm激光器上的PQExcel四极杆ICP-MS进行。输出能量0.4 mJ/脉冲,分析点直径30  $\mu\text{m}$ ,每个点总的分析时间为120 s,其中空白测定30 s,样品测定时间90 s。内标样为NIST 612玻璃,外标校样为LHM锆石。更为详细的分析条件和分析流程见Xia *et al.* (2004)。LHM锆石的TIMS测定值为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.108 4 (0.000 06 (2\sigma))$ ,对应的年龄为 $(1 772 \pm 2) \text{Ma} (2\sigma)$  (Xu *et al.*, 1999)。本测定结果的单个分析点年龄值误差为 $1\sigma$ ,

平均年龄置信水平为95%。年龄计算用Ludwig (1998)编制的程序“ISOPLOT”计算。测定结果和计算的表面年龄列于表2。

测定结果表明,I域锆石没有明显的振荡环带,  $\text{Th}/\text{U} = 0.06 \sim 0.08$ ,低于0.1,进一步证实属变质成因(Rubatto and Gebauer, 2000; Rubatto, 2002)的碎屑锆石。II域锆石发育清晰的振荡环带,  $\text{Th}/\text{U} = 0.1 \sim 0.48$ ,高于0.1,确证为岩浆结晶成因(Rubatto and Gebauer, 2000; Rubatto, 2002)的碎屑锆石。III域锆石无明显的振荡环带,  $\text{Th}/\text{U} = 0.01 \sim 0.08$ ,皆低于0.1,故属变质增生或变质重结晶成因锆石。

## 4 讨论

### 4.1 麻粒岩原岩和蚀源区的热事件年龄

依据矿物组合、主量元素地球化学约束特别是副矿物锆石中存在大量变质成因和岩浆成因的碎屑锆石核,黄土岭长英质麻粒岩的原岩以具有沉积岩的亲缘性为特征。因为第I域和第II域锆石来自于源区,所以这2个域锆石的定年结果具有重要意义。第I域锆石原为变质成因的锆石,后以碎屑形式进入麻粒岩原岩,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(2 493 \pm 54) \text{Ma} \sim (2 500 \pm 180) \text{Ma}$ 。第II域锆石为从岩浆中结晶的锆石,后也以碎屑形式进入麻粒岩原岩,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(2 628 \pm 35) \text{Ma} \sim (2 690 \pm 100) \text{Ma}$ ,最大 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(2 790 \pm 150) \text{Ma}$ 。这些数据表明麻粒岩原岩的蚀源区发生过2次重要的热事件:~2.8 Ga的岩浆作用事件和~2.5 Ga的变质作用事件。而且,碎屑成因的变质锆石的~2.5 Ga变质年龄提供了麻粒岩原岩物质沉积的年龄上限,即长英质麻粒岩的原岩可能不是

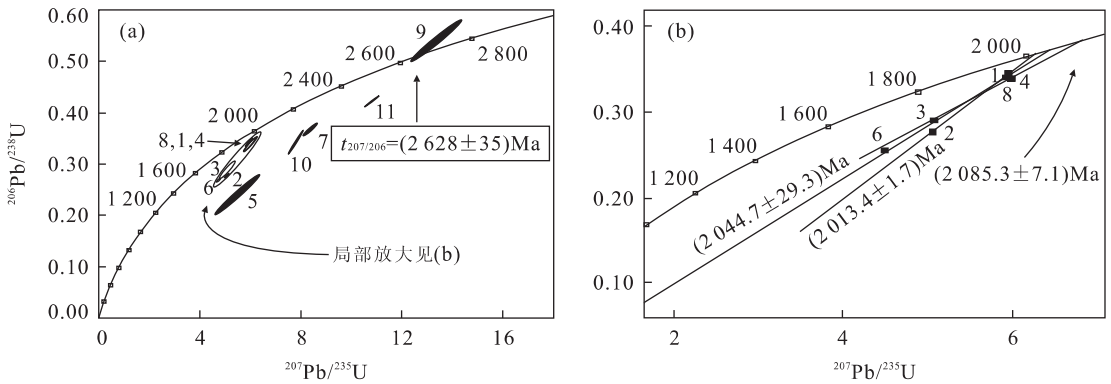


图 4 变质增生和变质重结晶锆石(Ⅲ域锆石)的 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagram for metamorphic overgrowth or recrystallized zircons (domain III zircons)

图 b 是图 a 中椭圆区的放大

晚太古界(Jian *et al.*, 1999; 吴元保等, 2002), 而应属于早古元古界。

#### 4.2 麻粒岩相变质作用年龄

Ⅲ域锆石的 CL 图像为无环带或弱的环带构造,  $Th/U < 0.1$ , 为变质增生或变质重结晶成因锆石。然而, 如表 2 所见, Ⅲ域锆石的晶内或晶粒之间都发生了不同程度的放射性铅丢失, 因此, 无一分析点获得谐和年龄值。由分析点 1、2 和分析点 3、4 两点等时年龄不一致线约束的 2 个上交点年龄分别为  $(2\ 013.4 \pm 1.7)\text{Ma}$  和  $(2\ 085.3 \pm 7.1)\text{Ma}$ , 分析点 1、2、3、4、6 和 8 构成的不一致线上交点年龄为  $(2\ 044.7 \pm 29.3)\text{Ma}$  (图 4), 此年龄值与前人用原位高精度 SIMS 技术定年结果  $(2\ 083 \pm 86)\text{Ma}$  (吴元保等, 2002) 和据常规 TIMS 技术定年结果处理的结果  $(2\ 068 \pm 81)\text{Ma}$  (陈能松等, 2002) 在误差范围内相当一致, 但精度有所提高。因此, 本测定结果可以合理地将麻粒岩相变质作用的年龄更为精确地确定在  $(2.04 \pm 0.03)\text{Ga}$ 。本锆石 U-Pb 定年结果和其他关于锆石的原位定年结果之所以都略高于石榴石 Pb-Pb 年龄  $(1\ 998 \pm 30)\text{Ma}$  (Zhou *et al.*, 1999), 可能是相比于石榴石, 锆石对 Pb 同位素具有更高封闭温度的缘故。

#### 4.3 构造意义

新近, 我们对黄土岭长英质麻粒岩的石榴石的化学成分分布进行了再研究, 应用校正了的 Al-紫苏辉石温压计重新计算了其峰期的变质温度压力条件为  $1\ 160\text{ }^\circ\text{C}$  和  $1.70\text{ GPa}$  (待发表), 大大高于作者早期对其温度压力条件的估算结果 ( $T = 850 \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 1.35 \pm 0.05\text{ GPa}$ , Chen *et al.*, 1998), 意味着该麻粒岩是超高温高压麻粒岩相变质作用的产

物。因此, 变质作用峰期曾一度在  $35\text{ km}$  以下的地壳深度进行, 与大陆碰撞或大陆深俯冲不无关系 (Thompson and England, 1984; O'Brien and Rötzler, 2003)。

依据 Nd-Pb 和 O 同位素地球化学资料的约束, 若干学者认为北大别包括麻粒岩在内的表壳岩系属于扬子陆块基底的一部分 (Chen and Jahn, 1998; Gao *et al.*, 1999; Ma *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2002)。扬子北缘的崆岭杂岩向来被认为是扬子陆块的太古代陆核, 其中仅可识别出  $2.9 \sim 3.2\text{ Ga}$  的岩浆作用事件 (Qin *et al.*, 2000) 和  $1.9 \sim 2.0\text{ Ga}$  的变质作用事件 (Ling *et al.*, 2001)。本文的研究结果表明, 如果黄土岭长英质麻粒岩属于扬子陆块基底的一部分, 那么, 扬子陆块基底在  $\sim 2.5\text{ Ga}$  以前还发生了一期极其重要的变质作用事件。

三叠纪南北大陆碰撞期间, 扬子陆块北缘的基底被认为深俯于华北陆块之下。然而, 黄土岭长英质麻粒岩的锆石 U-Pb 同位素系统几乎没有受到  $220 \sim 240\text{ Ma}$  超高压变质作用的影响。这可能意味着, 黄土岭长英质麻粒岩在其古元古代变质折返之后一直滞留在地壳的较浅部位, 没有参与三叠纪的大陆深俯冲过程, 或者虽然参与了俯冲, 但没有俯冲到地壳的较深部位。另一种可能性是该麻粒岩确实参与了俯冲且有深俯冲的年代学记录, 这一记录正等待人们去发现。

## 5 结论

(1) 在区分原岩的沉积成因或岩浆成因时, 对具



有振荡环带锆石原位年龄的解释要相当小心。原岩恢复是变质岩石学研究的一项传统方法,它常常可为同位素年龄的合理解释提供重要帮助。如本研究所示,黄土岭长英质麻粒岩的部分锆石虽然具有清晰的振荡环带,但原岩是沉积岩而不是岩浆岩。(2)黄土岭长英质麻粒岩的原岩物质来自一个太古界蚀源区,于古元古代早期或晚太古代末期沉积下来,蚀源区曾发生过 $\sim 2.8$  Ga 的岩浆作用事件和 $\sim 2.5$  Ga 的区域变质作用事件。(3)超高温高压麻粒岩相变质作用可以更精确地约束在 $(2.04 \pm 0.03)$  Ga,现有的锆石 U-Pb 年代学研究结果不能确认黄土岭长英质麻粒岩是否卷入了三叠纪华北陆块与扬子陆块俯冲碰撞事件。

致谢:锆石年龄的意义解释和黄土岭麻粒岩的变质过程曾与中国科学院地质与地球物理所的叶凯教授进行过有益的交流。匿名评审人对本文手稿提出了建设性意见。

## References

- Chen, J. F., Jahn, B. M., 1998. Crustal evolution of south-eastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284:101–133.
- Chen, N. S., You, Z. D., Suo, S. T., et al., 1996. Zircon U-Pb ages of felsic granulite and deformed granite from Dabie Mountains, Central China. *Chinese Science Bulletin*, 41:1886–1890.
- Chen, N. S., Sun, M., You, Z. D., et al., 1998. Well-preserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, Central China. *Journal of Metamorphic Geology*, 16:213–222.
- Chen, N. S., Li, H. M., He, L., et al., 2002. Polygonal rule for assessing the discordant U-Pb data of single-grain zircon by TIMS: Taking high-grade metamorphic rocks from Dabie and East Kunlun Mountains as examples. *Geological Science and Technology Information*, 21(3):24–29 (in Chinese with English abstract).
- Cooke, R. A., O'Brien, P. J., Carswell, D. A., 2000. Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure-temperature granulites from the Moldanubian, Austria. *Journal of Metamorphic Geology*, 18:551–569.
- Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63:2071–2088.
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultra-high-pressure Qingling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 161:215–230.
- Hoskin, P. W. D., Black, L. P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18:423–439.
- Hou, Z. H., 2000. Study on geochemistry and chronology of granulites and TTG gneisses from northern part of Dabie orogen (Dissertation). University of Sciences and Technology of China, Anhui (in Chinese).
- Indares, A., 1995. Metamorphic interpretation of high-pressure-temperature metapelites with preserved growth zoning in garnet, eastern Grenville Province, Canadian Shield. *Journal of Metamorphic Geology*, 13:475–485.
- Jian, P., Yang, W. R., Zhang, Z. C., 1999.  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  zircon dating of the Huangtuling hypersthene-garnet-biotite gneiss from the Dabie Mountains, Luotian county, Hubei Province, China: New evidence for Early Precambrian evolution. *Acta Geologica Sinica*, 73:78–83.
- Ling, W. L., Gao, S., Zhang, B. R., et al., 2001. The recognizing of ca. 1.95 Ga tectono-thermal event in Kongling nucleus and its significance for the evolution of Yangtze block, South China. *Chinese Science Bulletin*, 46:326–329.
- Ludwig, R. K., 1998. ISOPLOT—A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, Version 2.96. Revision of the U. S. Geological Survey Open File Report, 91-445, 1–49.
- Ma, C. Q., Ehlers, C., Xu, C. H., et al., 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precambrian Research*, 102:279–301.
- Niggli, P., 1954. Rocks and mineral deposits. Freeman, San Francisco.
- O'Brien, P. J., Rötzler, J., 2003. High-pressure granulites: Formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. *Journal of Metamorphic Geology*, 21:3–20.
- Qin, Y., Gao, S., Managhton, N. J., et al., 2000.  $>3.0$  Ga continental crust in the Yangtze craton, South China: SHRIMP U-Pb zircon and Nd isotopic evidence. *Geology*, 28:11.
- Rubatto, D., 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and

- metamorphism. *Chemical Geology*, 184:123–138.
- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps. In: Pagel, M., Barbin, P., Ohnenstetter, D., eds., *Cathodoluminescence in geosciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 373–400.
- Shaw, D. M., 1972. The origin of Apsley gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Science*, (9):18–35.
- Simonen, A., 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, Early Archaean supracrustal rocks in southwestern Finland. *Bull. Comm. Geol. Finland*, 160:1–64.
- Thompson, A. B., England, P. C., 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II: Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Journal of Petrology*, 25:929–955.
- Vavra, G., Gebauer, D., Schmid, R., et al., 1996. Multiple growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122:337–358.
- Wang, X., Neubauer, F., Genser, J., et al., 1998. The Dabie UHP unit, Central China: A Cretaceous extensional allochthon superposed on a Triassic orogen. *Terra Nova*, (10):260–267.
- Wang, J. H., Chang, X. Y., Zhuo, H. W., 1996. Characteristics of corona textures in the Huangtuling granulite in the Dabie complex, China, and their implications for tectonic settings. *Acta Mineralogica Sinica*, 16:118–125 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. B., Chen, D. G., Xia, Q. K., et al., 2002. SIMS dating of zircons in granulite of Huangtuling from northern Dabieshan. *Acta Petrologica Sinica*, 18:378–382 (in Chinese with English abstract).
- Xia, X. P., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. Spot zircon U-Pb isotope analysis by ICP-MS coupled with a frequency quintupled (213 nm) Nd-YAG laser system. *Geochemical Journal*, (38):191–200.
- Xu, P., Guan, H., Sun, M., et al., 1999. Further discussion on analytical methodology and calibration strategies for U-Pb isotope analysis of zircon by LA-ICPMS. *Geochimica*, 28:136–144 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Wang, F. Z., 1988. Lectures on metamorphic petrology. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, H. F., Gao, S., Zhong, Z. Q., et al., 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, (186):281–299.
- Zheng, Y. F., Fu, B., Li, Y. L., 2001. Oxygen isotopic composition of granulites from Dabie in eastern China and its implication for geodynamics of Yangtze plate subduction. *Physics and Chemistry of the Earth*, (26):673–689.
- Zhou, H. W., Li, X. H., Liu, Y., et al., 1999. Age of granulite from Huangtuling, Dabie Mountain; Pb-Pb dating of garnet by a stepwise dissolution technique. *Chinese Science Bulletin*, 44:941–944.

#### 附中文参考文献

- 陈能松, 李惠民, 何蕾, 等, 2002. 热离子质谱测定的颗粒级锆石 U-Pb 不一致年龄数据处理的多边形准则——以大别山和东昆仑山深变质岩为例. *地质科技情报*, 21(3):24–29.
- 侯振辉, 2002. 大别造山带北部麻粒岩和 TTG 片麻岩的地球化学和年代学研究(硕士论文). 安徽: 中国科学技术大学.
- 王江海, 常向阳, 周汉文, 1996. 湖北大别山黄土岭麻粒岩中冠状体结构特征及其地质意义. *矿物学报*, 16:118–125.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等, 2002. 北大别黄土岭麻粒岩锆石 U-Pb 离子探针定年. *岩石学报*, 18:378–382.
- 徐平, 关鸿, 孙敏, 等, 1999. 激光探针等离子体质谱用于锆石 Pb-Pb 定年的分析和校正方法的进一步讨论. *地球化学*, 28:136–144.
- 游振东, 王方正, 1988. 变质岩岩石学教程. 武汉: 中国地质大学出版社.