

苏鲁高压—超高压变质地体的陆—陆 碰撞深俯冲剥蚀模式

许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 曾令森, 刘福来, 梁凤华, 唐哲民, 蔡志慧

中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

摘要: 中国苏鲁高压—超高压变质地体由2个不同时代的变质基底组成。南苏鲁(临沭—连云港地区)中不同类型高压—超高压变质岩石的原岩形成于由大陆玄武质岩石、辉长岩、表壳岩和花岗岩组成的被动大陆边缘拉伸构造环境。研究表明南苏鲁高压—超高压变质岩石的原岩所代表的花岗岩浆和基性岩浆作用为罗迪尼亚超大陆形成后的新元古代(780~700 Ma)裂解事件的响应。北苏鲁(青岛—威海)超高压变质地区的花岗质片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年表明, 变质基底的年龄是2400 Ma(或>2400 Ma), 并经历了1800~1700 Ma 和~200 Ma 的变质事件, 研究表明苏鲁高压—超高压变质地体由2个不同时代变质基底组成, 北苏鲁的变质基底属于北中国板块胶辽朝地的一部分, 形成时代比南苏鲁基底老得多, 其与南苏鲁地块之间的界限位于五莲以北到海阳以南一线。由于在北苏鲁含柯石英的透辉石石英岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得精确超高压峰期变质年龄为(234.1±4.2)Ma, 退变质年龄为(218.2±1.5)Ma, 表明南、北苏鲁2个不同时代基底地块同时经历了超高压变质作用。根据上述事实, 提出苏鲁高压—超高压变质地体的陆—陆碰撞俯冲剥蚀新模式, 即扬子板片在240~220 Ma 的深俯冲作用中拽动上部胶辽朝地的一部分老变质基底岩石向下俯冲至大于100 km 的深度, 并形成楔形俯冲剥蚀体, 之后又与南苏鲁俯冲板片一起快速折返上来, 使胶辽朝地地块的楔形俯冲剥蚀体经历了高压—超高压变质和折返退变质作用。

关键词: 苏鲁超高压变质地体; 变质基底; 陆—陆碰撞深俯冲剥蚀作用。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2006)04-0427-10

收稿日期: 2006-06-02

Deep Subduction Erosion Model for Continent-Continent Collision of the Sulu HP-UHP Metamorphic Terrain

XU Zhi-qin, QI Xue-xiang, YANG Jing-sui, ZENG Ling-sen, LIU Fu-lai,
LIANG Feng-hua, TANG Zhe-min, CAI Zhi-hui

Key Laboratory of Continental Dynamics of the Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: By the construction for the HP-UHP metamorphic rocks, containing eclogite, feldspar amphibolite, paragneiss and granitic gneiss, it is revealed that their protoliths were continental basaltic rocks, gabbros, supracrustal rocks and granites formed under extensional environment at the Yangtze passive continental margin. New zircon SHRIMP U-Pb dating for the protoliths of the south Sulu UHP metamorphic rocks reflects the Neoproterozoic (700–800 Ma) granitic-mafic magmatism events induced by the Rodinia supercontinental breakup. Detailed zircon SHRIMP U-Pb dating for granitic gneiss in the N. Sulu (Qingdao-Weihai) area shows its oldest metamorphic basement being age of >2400 Ma and was overprinted by metamorphisms of 1700–1800 Ma and to 200 Ma. Therefore, above-mentioned age dating together with previous chronologic data led us to conclude that the Sulu HP-UHP nappes have two basements; the Early-Middle Proterozoic (≥ 2400 Ma) basement in the N. Sulu and the Neoproterozoic (700–800 Ma) basement in the S. Sulu. The basement ages in the N. Sulu

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 40399141); 国家重点基础研究“973”项目(No. 2003CB716500); 中国地质调查局重点项目(No. 121201056606)。

作者简介: 许志琴(1941—), 女, 留法博士, 中国科学院院士, 中国大陆科学钻探首席科学家, 主要从事显微构造、大地构造和大陆动力学研究。E-mail: xzq@ccsd.org.cn

together with its western part of the no-UHP metamorphic area (Laiyang-Penglai) are similar and named by the Jiao-Liao-Korea block (JLKB) belong to the NCP. Besides, the boundary between both of the S. Sulu UHP area and JLKB is along north Wulian and south Haiyangsuo. New zircon SHRIMP U-Pb dating for coesite-bearing quartzite of the N. Sulu shows the UHP peak metamorphism being age of 238 Ma and retrograde metamorphism being age of 215 Ma, which indicates both basements of the Sulu UHP metamorphic terrain have undergone UHPM simultaneously. Based on occurrences of the two different basements of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain, a new dynamic model of deep subduction erosion for continent-continent collision is proposed in this study. That means during the deep subduction of YZP at 240–220 Ma, the part of JLKB had been dragged downward to be 100 km depth and a wedge subduction erosion body was formed on the upper part of the Yangtze subducted slab. Then both of them were exhumed rapidly.

Key words: Sulu HP-UHP metamorphic terrain; metamorphic basement; deep subduction erosion for continent-continent collision.

0 引言

苏鲁高压—超高压变质地体是北中国和扬子板块碰撞的产物,超高压变质带的岩石大部分来自于印支期扬子板片深俯冲(>100 km)的大陆地壳,而后又快速折返到地表(Li *et al.*, 1989, 1993, 2000a, 2000b; Ames *et al.*, 1993, 1996; Maruyama *et al.*, 1994; Cong *et al.*, 1995; Cong, 1996; Chavagnac and Jahn, 1996; Hacker *et al.*, 1998; Liou *et al.*, 1998). 利用 SHRIMP U-Pb 精确定年结果表明,南苏鲁(临沭—连云港地区)超高压片麻岩的形成年龄为 220~240 Ma,折返年龄为 200~220 Ma(刘福来等, 2003a, 2003b)以及正、副片麻岩的原岩的形成时代为新元古代(Liu and Xu, 2004). 但是发现北苏鲁(青岛—威海地区)的基性岩原岩形成时代偏老,出现 17~18 亿年的年龄(李曙光等, 1994; 杨经绥等, 2002).

在超高压变质作用演化的研究中,超高压变质岩石的原岩和前超高压变质事件研究一直是薄弱环节. 为了探讨高压—超高压变质地体的形成演化历史,有必要对前高压—超高压变质事件的历史(包括变质基底岩石的形成及其构造环境、主要构造事件的时限等问题)以及对超高压变质作用的影响与制约进行深入的研究. 最近几年来研究揭示南苏鲁中不同类型高压—超高压变质岩石的原岩形成于由大陆玄武质岩石、辉长岩、表壳岩和花岗岩组成的被动大陆边缘拉伸构造环境(刘福来等, 2003a, 2003b; 张泽明等, 2004; 许志琴等^①, 2006), 最新的研究表明:南苏鲁高压—超高压变质岩石的原岩所代表的花岗岩浆和基性岩浆作用是罗迪尼亚超大陆形成后的新元

古代裂解事件的响应;通过南苏鲁榴辉岩、斜长角闪岩、副片麻岩和花岗质片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年,确定南苏鲁的罗迪尼亚超大陆的裂解事件的时限大致为 780~700 Ma,而表壳火山—碎屑岩的原岩主要形成于新元古代—古生代(Xu *et al.*, 2006).

本文通过北苏鲁地体不同类型超高压变质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 精确定年,对比南、北苏鲁超高压变质地体的变质基底的原岩性质、形成时代及变质演化,为苏鲁超高压变质地体形成的深俯冲作用提供了新的动力学模型.

1 地质背景

研究已揭示了 NE-SW 走向苏鲁高压—超高压变质地体. 在苏鲁超高压变质地体中,榴辉岩和超基性岩占 5%. 它们的围岩花岗质片麻岩占 70%,变质表壳岩占 25%. 南苏鲁地区三维空间(15 000 km³)的表壳岩锆石中发现大量的柯石英及其他相伴生的超高压变质矿物包体,证明大量物质曾经历了超高压变质作用(>2.8 GPa, >650 °C). (Liu *et al.*, 1999, 2001, 2003, 2004a, 2004b, 2004c, 2004d). 苏鲁高压—超高压变质带的基本构造格架自 SE 向 NW 由高压(HP)变质叠置岩片和超高压(UHP)表壳/花岗变质叠置岩片单元组成,面理总体走向为 NE-SW,向 SE 缓倾,并在北西部构成背形构造. 构造单元与变质岩石序列分布具一致性. 构造岩片之间的边界为强烈变形的韧性剪切带(图 1)(许志琴等, 2003).

研究表明,北苏鲁地区(山东威海—海阳所一带)以出露大面积花岗片麻岩为特征,少量副片麻岩(包括蓝晶石—透辉石石英岩、大理岩、石榴石黑云母片麻岩、白云母片麻岩等),榴辉岩、石榴辉长岩、超基性岩及基性麻粒岩相岩石呈透镜体夹在正、副

^①许志琴等, 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录. 岩石学报(待刊).

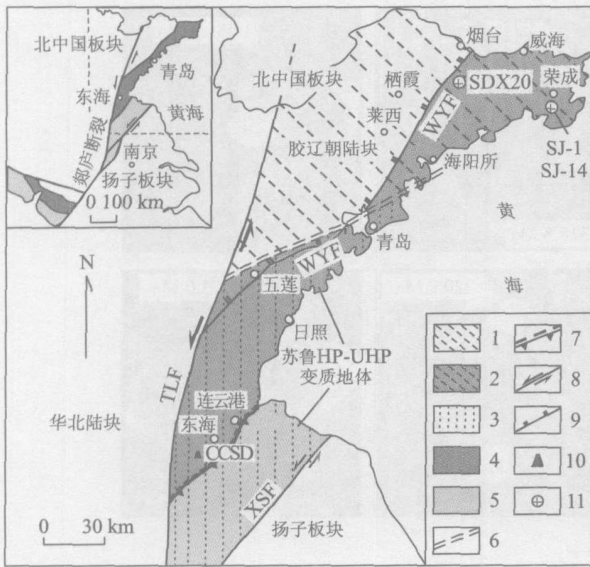


图 1 苏鲁高压—超高压变质地体及邻区基底地质图
 Fig. 1 Map showing different metamorphic basements for the Sulu HP-UHP metamorphic terrain and adjacent area
 1. 基底变质岩石年龄>22 亿年的胶辽朝陆块; 2. 经历超高压变质作用的陆—陆碰撞北苏鲁深俯冲剥蚀体; 3. 基底变质岩石年龄 7~8 亿年的南苏鲁地体; 4. 超高压变质带; 5. 高压变质带; 6. 胶辽朝陆块与南苏鲁地体的界限; 7. 韧性逆冲断层; 8. 走滑断层; 9. 正断层; 10. 中国大陆科学钻探 (CCSD) 孔位; 11. 本研究锆石 SHRIMP U-Pb 测年的采样位置及编号

片麻岩中。北苏鲁与南苏鲁变质基底的差别在于北苏鲁含有原生的麻粒岩相深变质岩石。由于在威海角闪岩相花岗片麻岩中发现柯石英和绿辉石包体 (Ye *et al.*, 2000), 后榴辉岩相的麻粒岩中发现残留的柯石英 (Wang *et al.*, 1993) 以及橄榄岩锆石中发现柯石英包体 (杨经绥等, 2002); 荣成榴辉岩中发现柯石英假象 (Enami and Zang, 1989) 以及估算大理岩和其中榴辉岩的形成压力达 2.5~3.5 GPa (Kato and Hirasawa, 1997) 等, 认为苏鲁超高压变质带的北界可抵达五莲—烟台断裂一线。

2 北苏鲁超高压变质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学记录

选择 3 件样品: 山东烟台南桃村花岗片麻岩 (SDX-20)、荣成单家含柯石英的透辉石石英岩 (SJ-1) 和荣成单家含柯石英的黑云斜长片麻岩 (SJ-14) 在河北廊坊地质调查研究院进行锆石分选, 然后在双目镜下精选形态完好的锆石, 用环氧树脂制成符

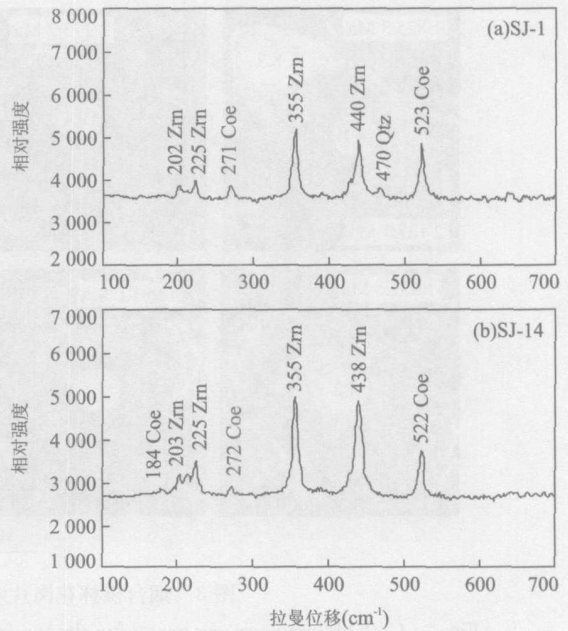


图 2 荣成单家透辉石石英岩 (a) 和黑云片麻岩 (b) 锆石中柯石英包体的拉曼光谱
 Fig. 2 Laser Raman spectrum showing the peaks of coesite, zircon (Zrn) and weak quartz (Qtz) from zircons in diopside quartzite (a) and biotite gneiss (b) of Shanjia, Rongcheng

合激光拉曼和 SHRIMP 测试的标准样品。锆石晶型及内部结构等在大陆动力学实验室激光拉曼仪和显微镜下观测, 测试表明荣成单家透辉石石英岩 (SJ-1) 和黑云斜长片麻岩 (SJ-14) 锆石中均含有柯石英包体 (图 2)。阴极发光图像在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室拍摄。锆石的 SHRIMP U-Pb 测年工作是在中国地质科学院地质所同位素实验室 SHRIMP II 型离子探针仪上根据 Stern and Rainbird (1998) 的测试方法和过程操作的。

2.1 山东烟台南桃村花岗片麻岩 (SDX-20) 的 SHRIMP U-Pb 测年

烟台南桃林花岗片麻岩位于 NE-SW 向五莲—烟台断裂东侧、样品 (SDX-20) 的岩性为绿帘石钾长花岗质片麻岩。岩石表面呈浅肉红色—灰白色, 他形粒状变晶结构, 块状构造, 局部为弱片麻状构造; 主要矿物组成为: 钾长石+石英+斜长石, 次要矿物为黑云母、绿帘石和多硅白云母等。通常长英质矿物含量大于 95%, 而黑云母+绿帘石+多硅白云母总量则小于 5%。在石英、斜长石和钾长石晶体中常可见锆石矿物包体。

本样品包含 2 类锆石: 一类为锆石核部或幔部

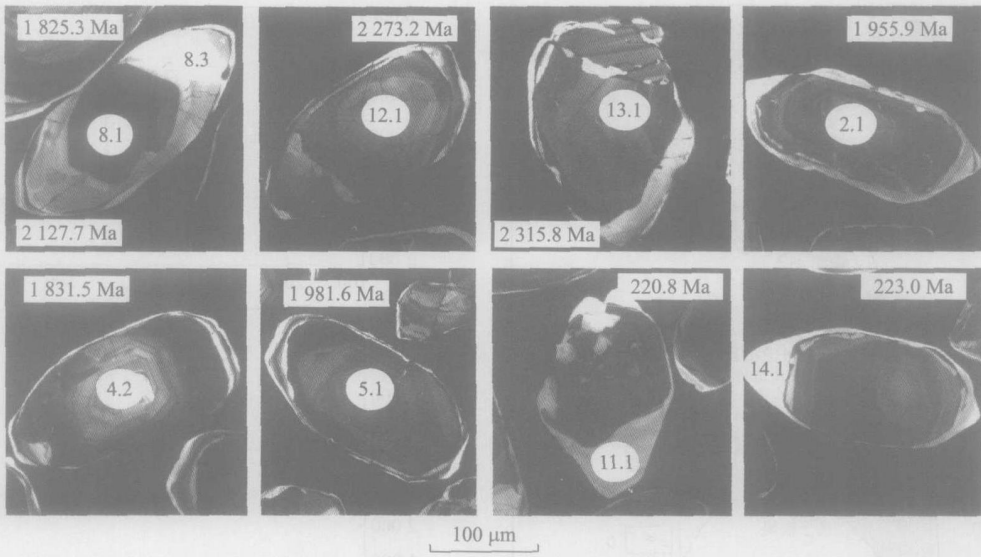


图 3 烟台桃林花岗片麻岩的部分锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence image for zircons from granitic gneiss sample (SDX 20) of Taolin, Yantai

表 1 北苏鲁烟台南桃林花岗片麻岩(SDX-20)锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据

Table 1 SHRIMP U-Pb data for zircons from the Taolin granitic gneiss sample (SDX-20) of Yantai, northern Sulu

样品测点	U (10^{-6})	Th (10^{-6})	Pb* (10^{-6})	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ $^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/$ ^{238}Pb	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	$\pm\%$	t ($^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$) $\pm\sigma(\text{Ma})$
SDX20-1.1	642	332	0.05	0.53	0.153 6	0.4	0.351 3	1.6	7.44	1.6	940.7 \pm 26.7
SDX20-2.1	527	247	0.12	0.48	0.158 0	0.5	0.354 5	1.6	7.72	1.7	1 955.9 \pm 27.0
SDX20-3.1	140	130	0.66	0.96	0.147 0	1.2	0.295 4	1.7	5.99	2.1	1 668.6 \pm 25.6
SDX20-4.1	115	38	0.40	0.34	0.129 6	1.4	0.273 9	1.8	4.89	2.2	1 560.6 \pm 24.7
SDX20-4.2	522	154	0.08	0.31	0.152 2	0.5	0.328 6	2.0	6.90	2.0	1 831.5 \pm 31.3
SDX20-5.1	372	242	0.12	0.67	0.155 6	0.5	0.359 9	1.6	7.72	1.7	1 981.6 \pm 27.5
SDX20-6.1	1 111	472	0.33	0.44	0.130 1	0.6	0.165 1	1.6	2.96	1.7	985.1 \pm 14.5
SDX20-6.2	13	1	9.65	0.06	0.143 9	20.0	0.043 2	4.4	0.86	20.5	272.9 \pm 11.7
SDX20-7.1	10	1	1.19	0.06	0.137 3	4.5	0.214 2	2.2	4.05	5.1	1 251.0 \pm 25.3
SDX20-7.2	33	1	1.11	0.04	0.108 9	3.0	0.175 5	2.3	2.64	3.8	1 042.2 \pm 22.3
SDX20-8.1	317	252	0.08	0.82	0.162 3	0.5	0.391 1	1.6	8.75	1.7	2 127.7 \pm 29.4
SDX20-8.2	88	10	1.05	0.12	0.099 4	3.8	0.113 5	2.0	1.55	4.3	692.9 \pm 13.2
SDX20-8.3	26	1	0.71	0.04	0.112 6	3.5	0.327 3	2.4	5.08	4.2	1 825.3 \pm 38.8
SDX20-9.1	110	92	0.28	0.86	0.157 1	1.2	0.406 3	1.8	8.80	2.1	2 197.8 \pm 33.0
SDX20-10.1	82	17	0.16	0.22	0.148 5	1.3	0.319 8	1.9	6.55	2.3	1 788.5 \pm 29.4
SDX20-11.1	12	1	9.74	0.09	0.031 4	73.2	0.034 8	3.7	0.15	73.3	220.8 \pm 8.1
SDX20-12.1	174	207	0.29	1.23	0.158 2	0.8	0.422 8	1.7	9.22	1.9	2 273.2 \pm 32.4
SDX20-13.1	200	224	0.15	1.16	0.160 3	0.7	0.432 2	1.7	9.55	1.8	2 315.8 \pm 32.3
SDX20-14.1	13	0	10.75	0.03	0.127 7	28.7	0.039 2	5.4	0.69	29.2	248.0 \pm 13.2
SDX20-14.1	13	0	6.32	0.02	0.073 0	22.6	0.035 2	3.0	0.35	22.8	223.0 \pm 6.5
SDX20-16.1	75	6	1.71	0.08	0.098 5	4.6	0.125 1	2.0	1.70	5.1	759.8 \pm 14.6

Pb* 放射成因铅; 年龄误差为 1σ 。

的残余无晶形锆石或具环带的结晶岩浆锆石($\text{Th}/\text{U}>0.1$); 另一类是位于边部的浑圆状变质增生锆石($\text{Th}/\text{U}<0.1$)(图 3)。共测 20 个数据, 交点与年龄一致曲线相交, 上交点 2 425 Ma, 中交点 1 800 Ma, 下交点集中的 3 个年龄的加权平均值

(230.6 \pm 14.3)Ma。上交点 2 425 Ma 代表花岗片麻岩原岩形成年龄, 中交点 1 800 Ma 代表原岩形成后经受的变质作用时期, 下交点(230.6 \pm 14.3)Ma 代表超高压变质年龄(表 1, 图 4)。在阴极发光图像(图 3)中可以看到位于锆石核部的残余无晶形锆石, 幔

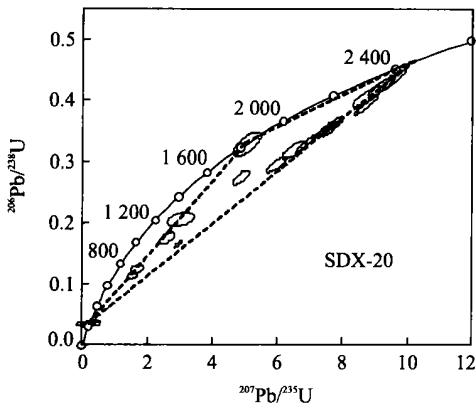


图4 烟台桃林花岗片麻岩(SDX-20)的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和谐曲线

Fig. 4 Concordant diagram of the SHRIMP U-Pb age for the zircons from granitic gneiss of Taolin, Yantai

部结晶岩浆锆石分别代表原岩形成年龄及1 800 Ma 变质事件年龄。

2.2 荣成单家含柯石英的透辉石石英岩(SJ-1)的 SHRIMP U-Pb 测年

荣成单家透辉石石英岩样品(SJ-1)呈浅灰绿色,主要由石英、透辉石组成,含少量白云母及碳酸盐矿物。透辉石石英岩锆石中超高压矿物包体的组合有石榴石、柯石英、绿辉石和磷灰石。本样品包含2类锆石:一类为变质增生锆石($Th/U < 0.1$);另一类为变质过程中形成的部分重结晶锆石($Th/U < 0.1$),说明是变质锆石在变质过程中部分重结晶引起的。共测13个点(表2),其中5个测点(包含柯石英包体部位)的加权平均值为(234.1 ± 4.2)Ma ($MSWD = 1.2$);8个测点的加权平均值为(218.2 ± 1.5)Ma ($MSWD = 1.2$)(图5a)。前者代表超高压峰期变质年龄,后者代表退变质年龄。

2.3 荣成单家含柯石英的黑云斜长片麻岩(SJ-14)的 SHRIMP U-Pb 测年

荣成单家含柯石英的黑云斜长片麻岩(SJ-14)岩心表面呈灰白色,他形鳞片粒状变晶结构,片麻状构造。矿物组成为:黑云母+斜长石+石英,含少量石榴石。其中黑云母呈鳞片状,定向排列。副矿物锆石呈半自形晶—他形晶,以包体的形式存在于斜长石和石英中。在锆石中发现标志性超高压矿物相,超高压矿物包体的组合有石榴石、柯石英、绿辉石、菱铁矿、金红石、磷钇矿和磷灰石。

本样品包含2类锆石:一类为核部残余无晶形锆石或具环带的结晶岩浆锆石($Th/U > 0.1$);另一类为

边部变质增生锆石($Th/U < 0.1$),前者获得2组靠近谐和一致曲线的年龄(表2);3个测点的加权平均值为(946 ± 120)Ma ($MSWD = 6.9$),5个测点的加权平均值为(644 ± 74)Ma ($MSWD = 30$);后者4个测点的加权平均值为(231 ± 5)Ma ($MSWD = 1.8$)(图5b)。上述结果表明,包含残余锆石(大致(946 ± 120)Ma 和(644 ± 74)Ma 年龄)的副片麻岩的原岩年龄应该小于600 Ma,剥蚀源区的基底岩石可能大于850 Ma。本岩石也经历了231 Ma 超高压变质事件。

3 苏鲁高压—超高压变质地体深俯冲新模式的提出与讨论

3.1 北苏鲁超高压变质地体的变质基底时代

已初步揭示在北苏鲁超高压变质带中出现老的变质年龄:威海大屯榴辉岩锆石的 SHRIMP 年龄(1821 ± 19)Ma(杨经绥等,2002),海阳所斜长角闪岩捕掳晶锆石 U-Pb 年龄2 149 Ma 和岩浆锆石(1784 ± 11)Ma(李曙光等,1994)。本研究针对大面积出露的威海 SW 部的 SDX-20 的花岗片麻岩锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年,获得古老基底的形成年龄为 >2400 Ma,并经历了1 700~1 800 Ma 的变质热事件。上述分析表明,北苏鲁地区的变质基底比南苏鲁变质基底(700~800 Ma)要老得多。

3.2 苏鲁超高压变质地体的2个变质基底及其界限

北苏鲁(青岛—威海)超高压变质地区的花岗质片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年表明,变质基底的年龄是2 400 Ma(或 >2400 Ma),并经历了1 800~1 700 Ma 和 ~ 200 Ma 的变质事件,北苏鲁的变质基底应属于北中国板块胶辽朝地块的一部分。研究表明五莲—烟台断裂以西的胶北地块由2个世代(2 500~2 800 Ma,1 700~1 800 Ma)的变质基底组成,已报道的莱西石榴辉石麻粒岩矿物—全岩 Sm-Nd 等时线年龄为(1752 ± 30)Ma(李永刚等,1997),位于栖霞以北的混合片麻岩锆石 U-Pb 年龄(2514 ± 23)Ma 和(2715 ± 39)Ma,麻粒岩化变辉长岩的角闪石 $^{39}Ar/^{40}Ar$ 年龄(1803.2 ± 12.3)Ma ($MSWD = 6.7$)(Faure *et al.*, 2003)。上述表明胶北与北苏鲁为2个时代(1 700~1 800 Ma 和 >2400 Ma)的变质基底组成的同一古老地块,乔秀夫和张安棣(2002)曾把它称为“胶辽朝”地块。根据变质基底的组合和形成时代以及盖层(震旦纪—早

表 2 北苏鲁荣成单家透辉石石英岩(SJ-1)和黑云母片麻岩(SJ-14)锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据

Table 2 SHRIMP U-Pb data for zircons from diopside quartzite (SJ-1) and biotite gneiss (SJ-14) samples of Shanjia, Rongcheng, N. Sulu

样品测点	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	Pb* (10 ⁻⁶)	Th/U	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* ± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U ± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U ± %	t (²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U) ±σ(Ma)
SJ-1-1.1	333	21	9.90	0.06	0.062 5	6.1	0.034 64	219.5±4.2
SJ-1-2.1	499	23	14.2	0.05	0.057 8	2.5	0.033 19	210.5±3.8
SJ-1-2.2	424	11	13.4	0.03	0.060 1	2.6	0.036 74	232.6±4.2
SJ-1-3.1	408	19	11.9	0.05	0.053 3	2.9	0.033 98	215.4±4.3
SJ-1-3.2	323	10	11.0	0.03	0.050 2	3.5	0.039 6	250.3±7.9
SJ-1-4.1	595	16	18.9	0.03	0.052 8	2.2	0.036 90	233.6±4.0
SJ-1-5.1	454	4	13.6	0.01	0.053 8	2.6	0.034 96	221.5±3.9
SJ-1-6.1	375	10	11.5	0.03	0.054 3	2.9	0.035 73	226.3±4.1
SJ-1-7.1	247	4	7.36	0.02	0.048 3	5.2	0.034 62	219.4±4.2
SJ-1-8.1	280	19	8.78	0.07	0.056 6	3.3	0.036 48	231.0±4.3
SJ-1-9.1	225	17	6.48	0.08	0.058 7	3.6	0.033 58	212.9±5.0
SJ-1-10.1	176	6	5.59	0.03	0.058 5	4.2	0.037 06	234.6±4.8
SJ-1-11.1	325	7	9.73	0.02	0.057 5	3.0	0.034 9	220.8±6.6
SJ-14-2.1	142	57	18.7	0.41	0.093 6	1.9	0.152 8	917±18.0
SJ-14-2.2	945	31	97.3	0.03	0.078 1	1.7	0.119 9	730±12
SJ-14-2.3	386	4	12.5	0.01	0.055 9	2.9	0.037 62	238.0±4.4
SJ-14-3.1	550	22	15.5	0.04	0.053 2	2.7	0.032 68	207.3±6.0
SJ-14-4.1	410	37	38.7	0.09	0.072 4	1.4	0.109 9	672±12
SJ-14-4.2	322	3	9.94	0.01	0.057 6	3.4	0.035 96	227.7±4.4
SJ-14-5.1	71	31	10.7	0.45	0.075 0	2.8	0.175 0	1 040±28.0
SJ-14-6.1	691	1 344	54.8	2.01	0.062 31	1.3	0.092 4	569.8±9.6
SJ-14-7.1	276	99	13.4	0.37	0.062 9	2.5	0.056 5	354.4±8.2
SJ-14-8.1	249	100	22.5	0.41	0.085 8	1.8	0.105 4	646±11.0
SJ-14-9.1	346	137	46.6	0.41	0.092 6	1.3	0.156 9	940±16.0
SJ-14-10.1	368	3	11.3	0.01	0.053 7	3.3	0.035 85	227.0±4.3
SJ-14-11.1	479	73	43.1	0.16	0.087 9	1.2	0.104 6	641±11
SJ-14-12.1	364	5	12.3	0.01	0.054 5	3.0	0.039 4	249±14

Pb* 放射成因铅; 年龄误差为 1σ.

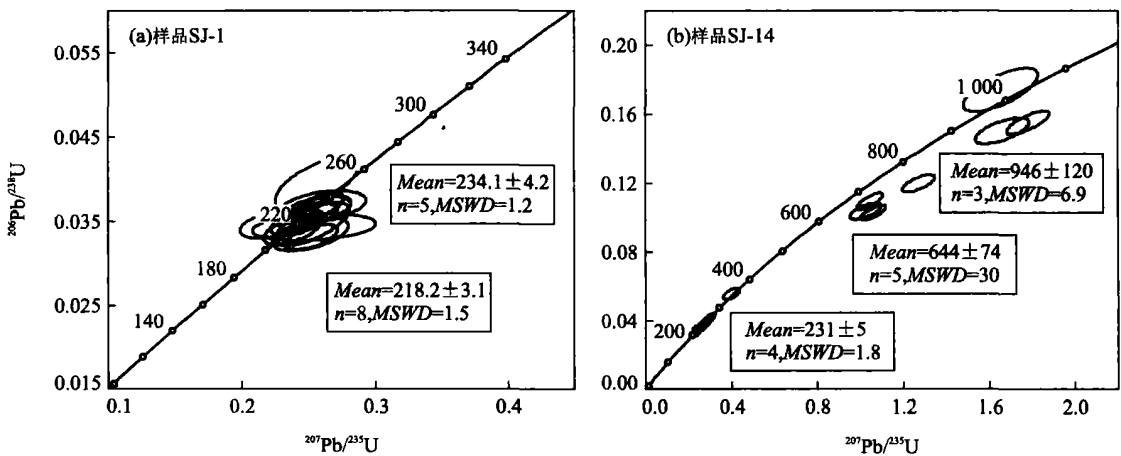


图 5 荣成单家超高压变质石英岩(SJ-1)(a)和榴辉岩(SJ-14)(b)锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和谐曲线

Fig. 5 Concordant diagrams of the SHRIMP U-Pb age for the zircons from UHP metamorphic quartzite (a) and eclogite (b) of Shanjia, Rongcheng

古生代)的沉积特征和发展历史而区别于更古老的 地块(克拉通)(乔秀夫和张安棣,2002).

最老变质基底时代 38 亿年(刘敦一等,1994)的华北

南苏鲁超高压变质带不同类型超高压变质岩

石:榴辉岩、角闪岩、副片麻岩和正片麻岩的原岩特征研究表明,它们曾形成于由大陆玄武质岩石、辉长岩、表壳岩和花岗岩组成的被动陆缘的拉伸构造环境,以及原岩所代表的花岗岩浆和基性岩浆作用为罗迪尼亚超大陆形成后的新元古代(780~700 Ma)裂解事件的产物。

因此,北苏鲁基底形成时代比南苏鲁基底老得多,其与南苏鲁地块之间的界限位于五莲以北到海阳所以南一线。

3.3 北苏鲁超高压变质作用时限

根据荣成单家含柯石英的透辉石石英岩的SHRIMP U-Pb精确测年指示,锆石含柯石英超高压变质包体部位的测年为(234.1±4.2)Ma,代表超高压峰期变质年龄,退变质年龄为(218.2±1.5)Ma。上述数据与南苏鲁含柯石英包体的正、副片麻岩的SHRIMP U-Pb精确定年结果:超高压副片麻岩的形成年龄为220~234 Ma,折返年龄为202~219 Ma;超高压花岗质片麻岩形成年龄为224~242 Ma,折返年龄为209~219 Ma(刘福来等,2003a,2003b)几乎相似。说明南、北苏鲁变质基底岩石同时经历了超高压变质时间,并继而同时折返。

3.4 陆—陆碰撞深俯冲剥蚀模式

长期以来,超高压变质带俯冲和折返模式的建立是以陆—陆碰撞时期被动陆缘板片的单向深俯冲为基础的,苏鲁一大别超高压变质带也不例外。南苏鲁的许沟和芝麻房超基性岩体被认为原来是北中国板块的上地幔楔物质,后经历了超高压变质作用(Zhang *et al.*, 1995)。

但是本研究提供了一个重要的事实:苏鲁超高压变质地体由2个变质基底组成:一个是扬子板块的新元古代变质基底(700~800 Ma),形成于由大陆玄武质岩石、基性岩墙(脉)、表壳岩和花岗岩组成的被动大陆边缘的拉伸构造环境;另一个是北中国板块“胶辽朝地块”的早元古代(或更老>2 400 Ma)和中元古代(1 700~1 800 Ma)变质基底。说明“胶辽朝地块”的北苏鲁地区和扬子板块的南苏鲁地区的基底岩石均遭受220~240 Ma以来的超高压变质事件,即两者同时深俯冲到地幔的深处(>100 km深度)。

Peter and Paola(2004)在研究大洋岩石圈俯冲时提出2类活动陆缘:(1)加积板块边缘(accretionary plate margins);(2)剥蚀板块边缘(erosive plate margins)。认为大洋岩石圈板片俯冲作用可以将上部板片中大量陆壳物质拖拽下去,在海沟地带形成剥蚀板块边缘。已经

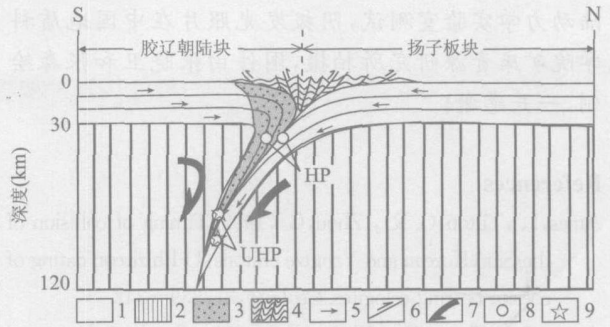


图6 苏鲁高压—超高压变质带形成的陆—陆碰撞俯冲剥蚀模式

Fig. 6 Deep subduction erosion model for continent-continent collision of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain

1. 地壳;2. 岩石圈地幔;3. 俯冲剥蚀板片;4. 褶皱盖层;5. 壳内滑动方向;
6. 逆冲断裂;7. 板块俯冲方向;8. 高压变质带;9. 超高压变质带

证明在全球具有板块剥蚀边缘特征的地带有太平洋东岸中南段(墨西哥—北智利)、太平洋西岸的日本岛弧东侧(Kurile-IsuMariana)及澳大利亚东岸(Tonga-Kermadec)(Peter and Paola, 2004)。另外, Russell(2001, 2002)通过陆—陆碰撞的壳幔体系数值模拟提出俯冲的地幔岩石圈沿壳—幔界面向下俯冲的新的板块双向俯冲演化模式。

在这里,我们根据苏鲁超高压变质带的2个变质基底存在的事实,提出一个新的陆—陆碰撞的俯冲剥蚀模式(图6),即在240~220 Ma扬子板片深俯冲过程中,拽动相邻的北中国板块“胶辽朝地块”的一部分物质向下俯冲,在扬子板片的上盘形成楔形俯冲剥蚀体,后又快速折返地表,这就是现在的北苏鲁变质楔状体,其中可能包含没有俯冲到100 km深度的非超高压变质岩石,因为在SDX-20样品的锆石中我们没有发现柯石英包体。陆—陆碰撞俯冲剥蚀模式与以往超高压变质带形成模式不同之处在于,其不是简单的单向俯冲模式,而是由于被动陆缘板块的俯冲引起上覆板片物质遭受俯冲剥蚀,导致不对称的双向俯冲;本模式也不同于大洋岩石圈俯冲的俯冲剥蚀模式(Peter and Paola, 2004)和陆—陆碰撞的双向俯冲模式(Russell, 2001, 2002)。

本研究得到国家自然科学基金重大项目(No. 40399141)、国家基础研究“973”项目(No. 2003CB716500)和中国地质调查局重点项目(No. 121201056606)的资助。SHRIMP U-Pb测年在中国地质科学院地质研究所离子探针中心进行,得到宋彪、阎全人研究员的帮助,激光拉曼在国土资源部大

陆动力学实验室测试, 阴极发光照片在中国地质科学院矿床资源研究所拍摄, 图件由张晓卫和张森绘制, 一并感谢!

References

- Ames, L., Tilton, G. R., Zhou, G., 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339–342.
- Ames, L., Zhou, G., Xiong, B., 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472–489.
- Chavagnac, V., Jahn, B. M., 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem. Geol.*, 133: 29–51.
- Cong, B. L., 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Science Press, Beijing, 224.
- Cong, B. L., Zhai, M., Carswell, D. A., et al., 1995. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China. *Eur. J. Mineral.*, 7: 119–138.
- Enami, M., Zang, Q. J., 1989. Quartz pseudomorph after coesite in eclogites from Shandong Province, east China. *American Mineralogist*, 75: 381–386.
- Faure, M., Lin, W., Monie, P., et al., 2003. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in east China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula. *Tectonics*, 22: 1018.
- Hacker, B. R., Ratschbacher, L., Webb, L., et al., 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215–230.
- Kato, N., Hirasawa, T., 1997. A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 102(1–2): 51–68.
- Li, S. G., Chen, Y. Z., Ge, N. J., et al., 1994. U-Pb Zircon ages of eclogite and gneiss from Jiaonan Group in Qingdao area: Evidence for Jinning magmatic event in history of the Jiaonan Group. *Acta Geoscientia Sinica*, 1–2: 35–36 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Hart, S. R., Zhang, S. G., et al., 1989. Timing of collision between north and south China blocks—The Sm-Nd isotopic age evidence. *Science in China*, 32: 1393–1400.
- Li, S. G., Jagoutz, E., Chen, Y. Z., et al., 2000a. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 1077–1093.
- Li, S. G., Jagoutz, E., Lo, C. H., et al., 2000b. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu slice, central China: A retrospective view. In: Ernst, W. G., Liou, J. G., eds., *Ultra-high pressure metamorphism and geodynamics in collision-type orogenic slices*. The Sheridan Press, Pennsylvania, 234–244.
- Li, S. G., Xiao, Y. L., Liu, D. L., et al., 1993. Collision of North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 89–111.
- Li, Y. G., Zhai, M. G., Liu, H., et al., 1997. Sm-Nd geochronology of the high-pressure basic granulite, in Laixi, eastern Shandong. *Scientia Geologica Sinica*, 32(3): 283–290 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., Ernst, W. G., et al., 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 37: 33–96.
- Liu, D. Y., Wu, J. S., Sheng, Q. H., et al., 1994. The remnants of $\geq 3\ 800$ Ma crust in Sino-Korean craton—The evidence from ion microprobe U-Pb dating of zircons. *Acta Geoscientia Sinica*, 1–2: 3–13 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., 2004. Fluid inclusions hidden in coesite-bearing zircons in ultrahigh-pressure metamorphic rock from south western Sulu terrane in eastern China, China. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 181–189.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Katayama, I., et al., 2001. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD-PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Lithos*, 59: 199–215.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, J. G., 2004a. Tracing the boundary between UHP and HP metamorphic slices in the south-western Sulu terrane, eastern China: Evidence from mineral inclusions in zircons from metamorphic rocks. *International Geology Review*, 46: 409–425.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, J. G., et al., 2004b. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, south-western Sulu terrain, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315–326.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Song, B., 2003a. Precise restriction of none-

- UHP granitic gneiss from the UHP metamorphic belt in the Sulu terrane, Eastern China: Evidence from mineral inclusion, cathodoluminescence images and SHRIMP U-Pb dating in zircon domains. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 534—540 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Song, B., 2003b. Determination of UHP and Retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb dating on Zircons of gneissic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 229—239 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Xu, H. F., et al., 1999. High and ultrahigh-pressure metamorphism and retrogressive textures of gneiss in the Donghai area: Evidence from gneisses in drillhole ZK2304. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 300—315.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Xue, H. M., 2004c. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons. *Lithos*, 78: 411—429.
- Liu, F. L., Yang, J. S., Xu, Z. Q., 2004d. SHRIMP ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, Sulu terrain, eastern China. *Science in China (Series D)*, 34(3): 219—227.
- Maruyama, S., Liou, J. G., Zhang, R., 1994. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure (UHP) and high-pressure (HP) metamorphic slices from central China. *The Island Arc*, 3: 112—121.
- Peter, C., Paola, V., 2004. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust. *Review of Geophysics*, 42: 1—31.
- Qiao, X. F., Zhang, A. D., 2002. North China block, Jiao-Liao-Korea block and Tanlu fault. *Geology in China*, 29(4): 337—345 (in Chinese with English abstract).
- Russell, N. P., 2001. Evolution of subducting mantle lithosphere at a continental plate boundary. *Geophysical Research Letters*, 22(23): 4399—4402.
- Russell, N. P., 2002. Lithospheric deformation during the early stages of continental collision: Numerical experiments and comparison with south island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 107(B7, 2133): 10.
- Stem, R. A., Rainbird, R. H., 1998. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection. *Earth and Planetary Science Letters*, 164(3—4): 409—420.
- Wang, Q. C., Ishiwatari, A., Zhao, Z. U., et al., 1993. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *J. Mineral.*, 5: 141—152.
- Xu, Z. Q., Zeng, L. S., Zhang, Z. M., et al., 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic terrane. In: Hacker, B. R., McClelland, W. C., Liou, J. G., eds., *Ultrahigh-pressure metamorphism: Deep continental subduction. Geological Society of America Special Paper*, 403: 9, doi: 10.1130/2006.2403(05).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433—450 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2002. SHRIMP U-Pb dating on coesite-bearing zircon: Evidence for Indosinian ultrahigh-pressure metamorphism Su-Lu, East China. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 354—371 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Yao, Y. P., Katayama, I., et al., 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China: New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157—164.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Ernst, W. C., 1995. Ultrahigh-pressure metamorphism and decompressional P-T paths of eclogites and country rocks from Weihai, eastern China. *The Island Arc*, 4: 293—309.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100—2 050 m) of Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27—42 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李曙光, 陈移之, 葛宁洁, 等, 1994. 青岛榴辉岩及胶南群片麻岩的锆石 U-Pb 年龄——胶南群中晋宁期岩浆事件的证据. *地球学报*, 1—2: 35—36.
- 李永刚, 翟明国, 刘辉, 等, 1997. 胶东莱西地区高压麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学. *地质科学*, 32(3): 283—290.
- 刘敦一, 伍家善, 沈其韩, 等, 1994. 中朝克拉通老于 38 亿年的残余陆壳——离子探针质谱锆石微区 U-Pb 年代学证据. *地球学报*, 1—2: 3—13.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪, 2003a. 苏鲁超高压变质带中非超高压花岗质片麻岩的准确识别: 来自锆石微区矿物包体及 SHRIMP U-Pb 定年的证据. *地质学报*, 77(4): 534—540.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪, 2003b. 苏鲁地体超高压和退变质时代

的厘定:来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. 地质学报, 77(2): 229—239.

乔秀夫, 张安棣, 2002. 华北块体, 胶辽朝块体与郯庐断裂. 中国地质, 29(4): 337—345.

许志琴, 张泽明, 刘福来, 等, 2003. 苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制. 地质学报, 77(4): 433—450.

杨经绥, 许志琴, 刘福来, 等, 2002. 含柯石英锆石的 SHRIMP U-Pb 定年: 胶东印支超高压变质作用的证据. 地质学报, 76(3): 354—371.

张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2 050 m)榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报, 20(1): 27—42.

《地球科学——中国地质大学学报》征稿简则

1 办刊宗旨

《地球科学——中国地质大学学报》是由中国地质大学主办的综合性地球科学学术理论刊物(双月刊, 国内外公开发行), 以反映我国地球科学领域最新的、高水平的基础地质、应用地质、资源与环境地质及地学工程技术科研成果为主要任务, 以促进国内外地学学术交流, 繁荣我国地质教育、地质科技与地质找矿事业, 为我国社会主义现代化建设服务为目的. 本刊坚持党的基本路线, 提倡“双百”方针. 刊登内容主要包括: 地层、古生物、岩石、矿物、构造、地球化学、地球物理、矿床地质、能源地质、找矿勘探、水文地质与工程地质、环境地质、灾害地质、探矿工程、数学地质与遥感地质、计算机应用及地学领域的边缘学科.

2 来稿要求和注意事项

2.1 来稿应是自然科学基础理论或应用研究的创新性成果, 要求论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字精炼、可读性强. 每篇论文必须包括题目、作者姓名、作者单位及邮政编码、中英文摘要和关键词、中国图书资料分类号、正文、参考文献及第一作者简介. 请在文稿首页地脚处注明论文属何基金项目资助、项目号, 并提供联系电话和 E-mail 地址.

2.2 摘要应尽量写成报道性文摘, 直截了当地阐明研究的目的、方法、结果和结论, 具有独立性、自明性.

2.3 引言应提供充足的研究背景, 尤其是近 2~3 年的研究成果, 需引用参考文献, 使读者不需要参考以往的刊物就能明白或推断文章的结论.

2.4 量和单位的使用请参照中华人民共和国法定计量单位最新标准. 文稿中外文字符必须分清大、小写, 正、斜体, 黑、白体; 上、下角标字符的位置高低应区别明显, 容易混淆的外文字母、符号请在第一次出现时注明.

2.5 图、表应有自明性, 图表名应附相应的英文名. 附图力求简明清晰, 墨色要黑, 线条要匀. 图中文字、符号、纵横坐标必须写清, 并与正文一致. 凡涉及国界线的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上. 图版不超过 2 幅, 长×宽不超过 23.0 cm×16.5 cm. 照片要求图像清晰, 层次分明. 附表中测试数据要注明测试者、测试手段、测试条件、测试精度及误差范围.

2.6 讨论与结论部分应该由观测和实验结果引申得出, 切忌简单地再罗列一遍实验结果. 讨论得出的结论与观点应明确, 实事求是.

2.7 参考文献应注意引用近两年国内外及本刊的最新文献, 所引文献必须是作者直接阅读过的、最主要的、发表在正式出版物上的文献; 未公开发表的资料或协作成果, 应征得有关方面同意, 以脚注方式标明. 本刊采用著者—出版年制标注参考文献, 所有中文参考文献必须有对应的英文翻译.

3 投稿约定

3.1 编辑部收到稿件之后, 立即给作者收稿回执. 来稿经编辑部送有关专家审阅和主编、编委会讨论, 将在 3 个月内决定刊用与否. 3 个月后(以收稿邮戳为凭)作者未收到编辑部的答复, 可自行处理, 此期间内收到复函和录用通知者, 不得另投他刊.

3.2 本刊现为纸张印刷版—光盘版—网络版三位一体的出刊模式, 凡本刊刊用的稿件, 将同时编入《中国学术期刊光盘版》、ChinaInfo《电子期刊》、《中文科技期刊数据库》和《华艺中文电子期刊服务数据库》.

3.3 作者投稿不符合本刊征稿要求者, 本刊编辑部将先退请作者修改后再行评审, 并以稿件符合要求的时间为投稿日期. 来稿请附带软盘(方正、Word 或纯文本文件均可), 图件请用软件 CorelDRAW 绘制. 本刊录用稿件将存档保存, 未录用稿件一律不退还作者, 请自留底稿.

3.4 稿件文责自负. 编辑部对来稿有权作技术性和文字性修改, 实质性内容修改须征得作者同意.

3.5 来稿一经发表, 按篇酌致稿酬(包括光盘版和网络电子版稿酬), 并赠送刊物 2 册和单行本 25 份, 高水平的论文稿酬从优.

来稿请用挂号投寄:《地球科学——中国地质大学学报》编辑部; 地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号; 邮编: 430074.

联系电话: +86-27-67885075, 67885076

传真: +86-27-67885075

本刊网址: www.earth-science.net

电子信箱: cjournl@cug.edu.cn; xbb@cug.edu.cn