

大陆板片多重性俯冲与折返的动力学模式

——苏鲁高压-超高压变质地体的折返年龄限定

许志琴, 曾令森, 梁风华, 戚学祥

(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: 苏鲁高压-超高压变质地体自南而北由高压(HP)、很高压(VHP)和超高压(UHP)变质叠覆岩片组成, 前者依次叠覆在后者之上, 岩片之间的界限为韧性剪切带。根据超高压变质岩片中角闪岩相岩石与高压变质岩片中绿片岩相岩石的黑云母和白云母 Ar-Ar 和 Rb-Sr 测年新结果, 结合前人在该区所做的锆石 SHRIMP U-Pb、全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 等测年数据综合分析表明, 超高压变质岩石的峰期变质年龄为 240~220 Ma, 折返年龄为 220~200 Ma; 而高压变质岩石的峰期变质年龄大于 258 Ma, 起始折返年龄为 258~240 Ma, 折返年龄比超高压变质岩石早 30~40 Ma。这说明扬子板片并不是整体俯冲和折返的。由于具组分和密度差异, 俯冲板块的不同部位沿岩性或构造界面先后分片俯冲和折返, 在北苏鲁超高压变质板片开始俯冲时, 南苏鲁高压变质板片已开始折返。

关键词: 多重性俯冲和折返; 苏鲁; 高压-超高压变质带

中图分类号: P597; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0357-12

A dynamic model for sequential subduction and exhumation of a continental slab: Age Constraints on the timing of exhumation of the Sulu HP-UHP metamorphic terrane

XU Zhi-qin, ZENG Ling-sen, LIANG Feng-hua and QI Xue-xiang

(Key Laboratory for Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract: From south to north, three parallel metamorphic imbricated slices compose the Sulu high to ultrahigh pressure metamorphic terrane. They are high pressure (HP) slice, very high pressure (VHP) slice, and ultrahigh pressure (UHP) slice, separated by ductile shear zones. Using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and whole rock Rb-Sr techniques, the authors analyzed micas from amphibolite facies rocks in the UHP slice and from greenschist facies rocks in the HP slice to constrain the timing of exhumation of the Sulu HP-UHP metamorphic belt. Together with previous results from zircon U/Pb, whole rock Sm-Nd and Rb-Sr measurements, the data obtained show that peak metamorphism and subsequent exhumation in the UHP zone occurred in 240~220 Ma and 220~200 Ma, respectively. In the HP zone, however, peak metamorphism and the onset of exhumation occurred earlier than 258 Ma and in 258~240 Ma, respectively. These data have led us to propose a new model for the formation and exhumation of the Sulu HP-UHP rocks. In this model, sequential subduction and exhumation of different parts of the Yangtze slab occurred in different periods, depending upon vertical variations in the physical properties of the subducted continental crust.

Key words: multiple subduction and exhumation; Sulu; HP-UHP metamorphic belt

大别-苏鲁超高压变质带为北中国(中朝)和扬子板块于三叠纪俯冲-碰撞的产物(Li *et al.*, 1989, 1996, 2000a, 2000b; Ames *et al.*, 1993; Liou *et al.*, 1998; Hacker *et al.*,

1998), 郟庐断裂将其错断, 分成大别(西部)和苏鲁(东部)(图1)两部分超高压变质带。广泛分布的超高压变质岩石作为俯冲折返过程及地幔信使的特性, 近15年一直是国内外地学界

收稿日期: 2005-08-05; 修订日期: 2005-08-22

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(40399141); 科技部 973 重大基础研究项目(2003CB716500); 中国地质调查局地调项目(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.cn。

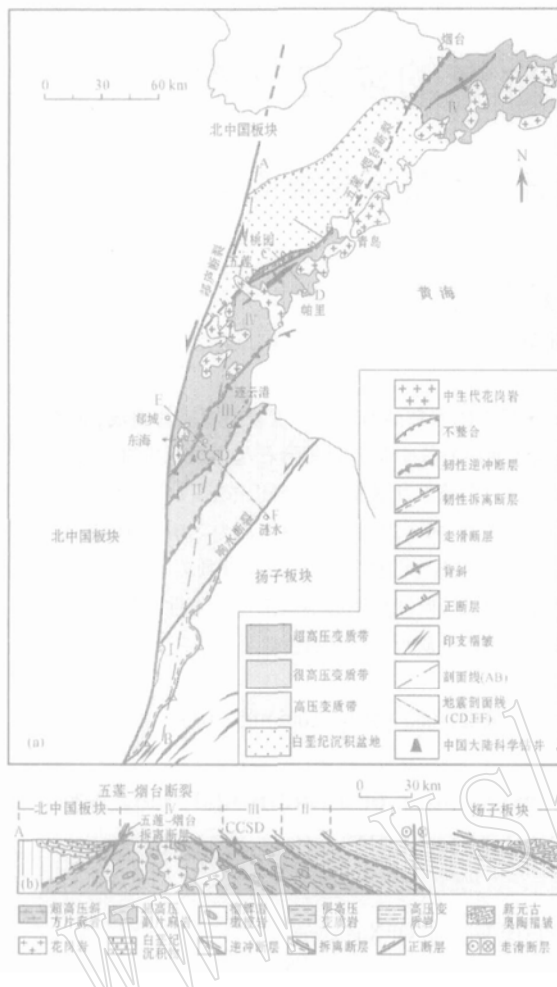


图1 苏鲁高压-超高压变质带构造图(A)及构造剖面图(B)
Fig. 1 Tectonic sketch map (A) and cross-section (B)
of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain

关注及研究的热点(如 Ernst *et al.*, 1997; Cong and Wang, 1999; Liou *et al.*, 2000; Ernst, 2001; Chopin, 2003)。关于俯冲和折返的年代,通过 Ar-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd 及锆石 SHRIMP U-Pb 等测年手段,已获得了大量的年龄数据(Li *et al.*, 1989, 1993, 1996, 2000a, 2000b; Ames *et al.*, 1993, 1996; Hacker *et al.*, 1998; Maruyama *et al.*, 1994; Rumble *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003; 刘福来等, 2003; Liu *et al.*, 2004a, 2004b; Zheng *et al.*, 2004)。苏鲁超高压变质带的峰期变质年龄基本被限定在 220~240 Ma, 而折返年龄则主要在 200~220 Ma。然而,最近对该超高压变质带的构造单元进行的细致划分以及进一步对不同单元中矿物和岩石进行 Ar-Ar 和 Rb-Sr 年龄测试的基础上,笔者发现苏鲁高压-超高压变质带并不是整体同时俯冲和折返的。这对于重塑俯冲折返过程、探索俯冲折返机制具有十分重要的意义。本文将着重讨论苏鲁高压-超高压变质带中折返年龄的不一致性,并结合地震反射剖面、构造格架等信息探讨新的苏鲁高压-超高压变质带的俯冲折返模式。

1 地质背景

苏鲁高压-超高压变质带为大别-苏鲁超高压变质带的东半部分,呈 NE-SW 走向,北界以五莲-烟台断裂与中朝板块为邻,南界沿嘉山-响水断裂东段转为 SSW 延至张八岭一带与扬子板块相连,西界以郯庐断裂与北中国板块相隔。中国大陆科学钻探工程孔位于苏鲁超高压变质带南部的江苏省东海县(图 1)。

在开展南苏鲁连云港幅 1:25 万区域地质填图和研究的基础上,以构造岩片为基本单元,以大型韧性剪切带为岩片单元界限,建立了苏鲁高压-超高压变质带的折返构造格架,将整个苏鲁高压-超高压变质带划分为 4 个大的叠置构造岩片单元,自上而下分别为:南苏鲁高压变质叠覆构造岩片(I)、南苏鲁很高压变质叠覆构造岩片(II)、北苏鲁超高压变质表壳岩叠覆构造岩片(III)和北苏鲁超高压花岗质变质岩叠覆构造岩片(IV)(图 1),前者总是叠覆在后者之上,岩片之间均以大型的韧性剪切带为界(许志琴等, 2003)。

南苏鲁高压(HP)变质叠覆构造岩片(I) 主要由二云钠长片麻岩、绿帘角闪钠长片麻岩、绿帘黑云角闪钠长片麻岩、白云母绿帘阳起片岩、白云母石英片岩、钠长阳起片岩及蓝透闪石石榴钠长阳起片岩等组成,以出现蓝透闪石、冻蓝闪石、多硅白云母、文石等高压矿物为特征,为高压(0.7~0.85 GPa)低温(300~360℃)叠覆构造岩片(邱海峻等, 2002)。本叠覆岩片的面理向 SE 缓倾(20°~35°),普遍发育 NW-SE 向拉伸线理,剪切指向自 SE 向 NW。

南苏鲁很高压(VHP)变质叠覆构造岩片(II) 该岩片上部由蓝晶石-黄玉石英岩、含蓝晶石多硅白云母石英片岩和含蓝晶石钠长石英片岩组成,下部由大理岩、含磷大理岩及磷块岩组成。根据韩山含黄玉蓝晶石石英岩的温压条件估算,变质温度达到 500~600℃,压力为 1.5~2.0 GPa(Zhang *et al.*, 2002)。岩片 II 的基本变形特征与 I 相同。

北苏鲁超高压变质表壳岩叠覆岩片(III) 主要由超高压变质表壳岩夹大量榴辉岩及超基性岩透镜体组成,变质表壳岩包括含柯石英的副片麻岩、蓝晶石石英岩、硬玉石英岩及角闪岩等,在虎山蓝晶石石英岩中发现黄玉,估算变质温度 650℃,压力 2.8~3.0 GPa(Zhang *et al.*, 2002)。在变质表壳岩中部和下部如东海牛山、驼峰及羽山等地含有柯石英的花岗质片麻岩和含霓石的花岗质片麻岩分布。岩片面理 SE-SEE 向,拉伸线理为 NWW-SEE 至 NW-SE 向。中国大陆科学钻探主孔孔区就位于该单元中的榴辉岩体上。

北苏鲁超高压花岗质变质岩叠覆岩片(IV) 主要组分为花岗质片麻岩、少量变质表壳岩夹榴辉岩和超基性岩块体,研究表明,花岗质片麻岩、变质表壳岩及榴辉岩均含柯石英(Liu *et al.*, 2001a, 2001b, 2002; 刘福来等, 2003),威海石榴石橄榄岩锆石中也发现柯石英(Yang *et al.*, 2003)。本叠覆构造岩片(IV)位于苏鲁高压-超高压变质带最下部的构造层位,总体

的构造面理向 E 及 SEE 缓倾,但在靠近五莲-烟台断裂一侧的面理转为向西及北西缓倾,产状发生弯曲,形成 NE_SW 轴向的宽缓不对称“背形”构造(图 1)。

由高压(HP)-很高压(VHP)-超高压(UHP)变质岩石组成的苏鲁高压-超高压变质地体的基本构造格架是以剪切叠覆岩片为特征,岩片之间界线为韧性剪切带,位于南面的岩片逐一叠覆在北面的岩片之上。在超高压变质岩片中,大量榴辉岩和超基性岩呈大小不一的透镜状、团块状夹在大面积分布的围岩-变质表壳岩和花岗质片麻岩中,其中,花岗质片麻岩占 70%,变质表壳岩占 25%,榴辉岩和超基性岩占 5%。

刘福来等(Liu *et al.*, 2001a, 2001b, 2002; 刘福来等, 2003)在苏鲁超高压变质带大面积出露的榴辉岩及其围岩——正片麻岩、副片麻岩、斜长角闪岩、大理岩和蓝晶石石英岩等岩石的锆石中发现大量的柯石英及其他超高压变质矿物(绿辉石、多硅白云母、石榴石及蓝晶石等)的包体,而且在中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD_PP1、CCSD_PP2 和主孔 CCSD_MH 中的榴辉岩及榴辉岩围岩的锆石中也普遍发现

柯石英包体,这都证明了在苏鲁地区三维空间分布的大量物质曾经历了超高压变质作用(> 2.8 GPa, > 650 °C)。

苏鲁高压-超高压变质带的地震反射剖面(杨文采等, 2004)(图 2)说明高压-超高压变质区 10 km 深处存在一个宽约 15 km 的穹形板片(许志琴等, 2003)。超高压变质岩石占据这个板片的核部。岩片 III、II、I 南东倾向,连续位于超高压岩片 IV 的上面;在板片西北,高压岩片北西倾向,位于超高压岩片上面。超高压岩片 IV 上方,剪切带顶部的剪切指向为南东-北西,即在剪切带的底面,剪切指向为自穹隆顶部向南东方向,这说明板片经历了沿俯冲带向南东方向的挤出过程。

2 苏鲁高压-超高压变质带的折返年龄限定

为了准确地限定苏鲁高压-超高压变质带折返时限,运用⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素测年方法分别测定了苏鲁高压变质带和超高压变质带中不同类型岩石的黑云母和白云母的年龄(表 1、图 3、图 4)。发现在不同变质带中同类矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar 测

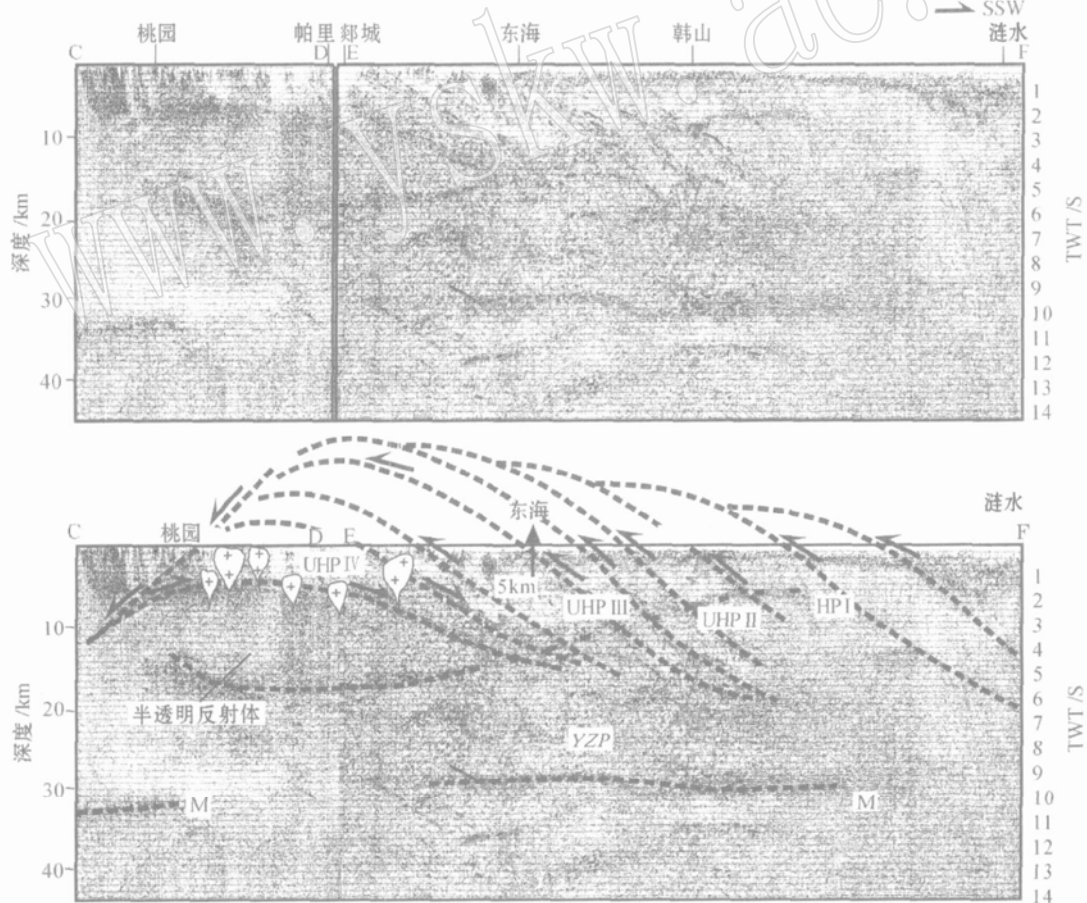


图 2 横穿苏鲁高压-超高压变质地体原始地震反射剖面(A)(据杨文采等, 2004)及解释剖面(B)

Fig. 2 Original seismic reflection profile (A) (after Yang *et al.*, 1999) with an updated interpretation (B) across the Sulu HP_UHP terrain

M—莫氏面; YZP—扬子板块
M—Moho; YZP—Yangtze craton

表1 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 阶段升温测年数据
Table 1 Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ stepwise heating dating for biotite

温度/ °C	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$(^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$	$^{39}\text{Ar}(\times 10^{-12}\text{mol})$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}$	$\pm 1\sigma$	$^{39}\text{Ar}_K/\%$	年龄/ Ma	误差/ Ma
B527R388P1f, 黑云母, 称重 0.1364 g, J= 0.0137812, T _p = 214.40 ± 2.24 Ma, T _f = 214.00 ± 3.40 Ma, T _{iso} = 214.12 ± 4.28 Ma, 冷却天数: 79										
300	14.3427	0.020268	0.04979	0.0864	0.023	8.350	1.99	0.75	196.49	46.74
500	13.2030	0.015984	0.01158	0.0293	0.110	8.4722	0.42	3.54	199.21	9.94
620	14.4763	0.019087	0.00700	0.0248	0.243	8.8282	0.194	7.83	207.16	4.56
720	10.9338	0.006790	0.00667	0.0351	0.343	8.9193	0.171	11.05	209.14	4.00
850	11.1373	0.006691	0.00922	0.0260	0.548	9.1523	0.100	17.64	214.29	2.34
980	11.1034	0.006533	0.01333	0.0360	0.452	9.1655	0.134	14.54	214.58	3.15
1050	11.3064	0.006259	0.01151	0.0303	0.566	9.4459	0.120	18.24	220.84	2.80
1100	11.8261	0.008587	0.01383	0.0379	0.487	9.2815	0.122	15.68	217.14	2.84
1150	10.3309	0.004713	0.03453	0.0663	0.203	8.9332	0.31	6.54	209.45	7.27
1200	11.9346	0.010432	0.07219	0.2049	0.065	8.8509	0.79	2.10	207.62	18.42
1250	12.7542	0.012835	0.10521	0.1751	0.039	8.96366	0.40	1.24	246.78	11.00
1300	13.5806	0.016004	0.07871	0.2522	0.026	8.85096	0.58	0.85	243.87	16.06
B475R359P3v, 黑云母, 称重 0.094 g, J= 0.0137737, T _p = 210.90 ± 1.05 Ma, T _f = 210.60 ± 1.24 Ma, 冷却天数: 78										
300	16.8674	0.028443	0.00840	0.0282	0.128	8.4547	0.36	0.75	198.72	8.48
500	12.3520	0.013405	0.00350	0.0088	0.435	8.3824	0.11	2.54	197.11	2.51
620	13.1627	0.014624	0.00205	0.0059	1.287	8.8329	0.045	7.52	207.12	1.06
720	11.9891	0.010481	0.00176	0.0049	1.715	8.8835	0.043	10.02	208.24	1.02
850	10.6927	0.005731	0.00173	0.0049	3.086	8.9906	0.046	18.03	210.61	1.07
980	0.4467	0.004893	0.00224	0.0068	2.775	8.9924	0.046	16.21	210.65	1.08
1050	10.4621	0.004550	0.00243	0.0063	3.116	9.1092	0.044	18.20	213.23	1.04
1100	10.6252	0.004722	0.00320	0.0075	2.501	9.2216	0.050	14.61	215.71	1.17
1150	11.0979	0.006704	0.00607	0.0154	1.215	9.1087	0.09	7.10	213.22	2.12
1200	11.6124	0.008540	0.01009	0.0249	0.495	9.0812	0.11	2.89	212.61	2.57
1250	11.3591	0.010276	0.00436	0.0443	0.236	8.31419	0.07	1.38	229.99	1.93
1300	12.1769	0.013117	0.00430	0.0687	0.128	8.29266	0.20	0.75	229.43	5.64
B627R441P3n, 黑云母, 称重 0.0576 g, J= 0.0137737, T _p = 202.40 ± 1.04 Ma, T _f = 202.58 ± 1.20 Ma, 冷却天数: 81										
300	13.8736	0.019587	0.00822	0.0368	0.153	8.0778	0.30	0.84	190.31	7.13
500	12.6703	0.014865	0.00359	0.0113	0.430	8.2693	0.11	2.36	194.59	2.55
620	14.1419	0.018634	0.00139	0.0057	1.488	8.6566	0.040	8.17	203.21	0.94
720	11.6220	0.009849	0.00149	0.0070	1.944	8.7030	0.038	10.67	204.24	0.89
850	10.3752	0.006259	0.00165	0.0053	3.379	8.5171	0.041	18.55	200.11	0.97
980	10.2670	0.005691	0.00262	0.0075	2.670	8.5770	0.047	14.66	201.44	1.11
1050	10.2962	0.005355	0.00243	0.0067	3.372	8.7053	0.041	18.51	204.29	0.95
1100	11.3769	0.008226	0.00321	0.0082	2.694	8.9377	0.049	14.79	209.44	1.16
1150	10.5165	0.006886	0.00632	0.0160	1.317	8.4736	0.08	7.23	199.14	1.90
1200	11.3390	0.009026	0.01245	0.0504	0.423	8.6644	0.13	2.32	203.38	3.01
1250	11.7194	0.010646	0.00519	0.0797	0.208	8.56528	0.08	1.14	236.50	2.19
1300	12.6180	0.013545	0.00389	0.0761	0.138	8.60712	0.19	0.76	237.58	5.22
B608R432P1f, 黑云母, 称重 0.0634 g, J= 0.0137762, T _p = 200.86 ± 1.14 Ma, T _f = 200.65 ± 1.40 Ma, 冷却天数: 80										
300	13.3992	0.018001	0.00748	0.0222	0.159	8.0718	0.29	0.85	190.21	6.87
500	12.8020	0.015522	0.00250	0.0068	0.536	8.2069	0.09	2.87	193.23	2.04
620	13.6902	0.017432	0.00127	0.0056	1.498	8.5304	0.039	8.02	200.44	0.93
720	11.3935	0.009540	0.00115	0.0066	2.034	8.5659	0.036	10.89	201.23	0.85
850	10.3049	0.006405	0.00152	0.0047	3.426	8.4037	0.040	18.34	197.62	0.95
980	10.2190	0.006009	0.00227	0.0068	2.741	8.4347	0.046	14.67	198.31	1.08
1050	10.5333	0.006038	0.00195	0.0056	3.365	8.7407	0.041	18.01	205.11	0.97
1100	11.1127	0.007663	0.00239	0.0071	2.832	8.8399	0.046	15.16	207.31	1.08
1150	10.4788	0.006996	0.00538	0.0180	1.311	8.4033	0.08	7.02	197.61	1.90
1200	11.5179	0.009499	0.001160	0.0668	0.411	8.7033	0.13	2.20	204.28	3.10
1250	12.4796	0.012477	0.01786	0.0654	0.243	8.78590	0.07	1.30	242.20	1.88
1300	13.0927	0.014993	0.01705	0.0818	0.125	8.65520	0.12	0.67	238.82	3.41

年数据有一个时间差, 与前人所发表的年代学资料相结合, 对于重新认识苏鲁高压-超高压变质带的形成与折返机制具有重要意义。

2.1 苏鲁超高压变质带折返时限

中国大陆科学钻探 (CCSD) 主孔位于苏鲁高压-超高压变质带第 II 岩石构造单元的东海县县城西南 9 km 处。样品取自于 740~ 1 130 m 深处, 由副片麻岩为主组成的具有自 SE 向 NW 方向滑移的韧性剪切带中。共采集 4 个岩心样品: B475R359P3v(深度 891 m)、B527R388P1f(深度 960 m)、

B608R432P1f(深度 1 097 m) 及 B627R441P3n(深度 1 130 m), 岩性均为绿帘黑云角闪斜长片麻岩。由于上述样品的锆石中均发现柯石英包体, 表明它们曾经历了超高压变质作用 (Liu *et al.*, 2002; 刘福来等, 2003)。绿帘黑云角闪斜长片麻岩是超高压变质岩石在折返过程中角闪岩相退变质作用的产物, 因此黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄可以代表折返过程角闪岩相退变质事件的时限。此项测试在广州地球化学研究所进行, 所得结果见表 1。

黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年获得极好的坪年龄和等时线年

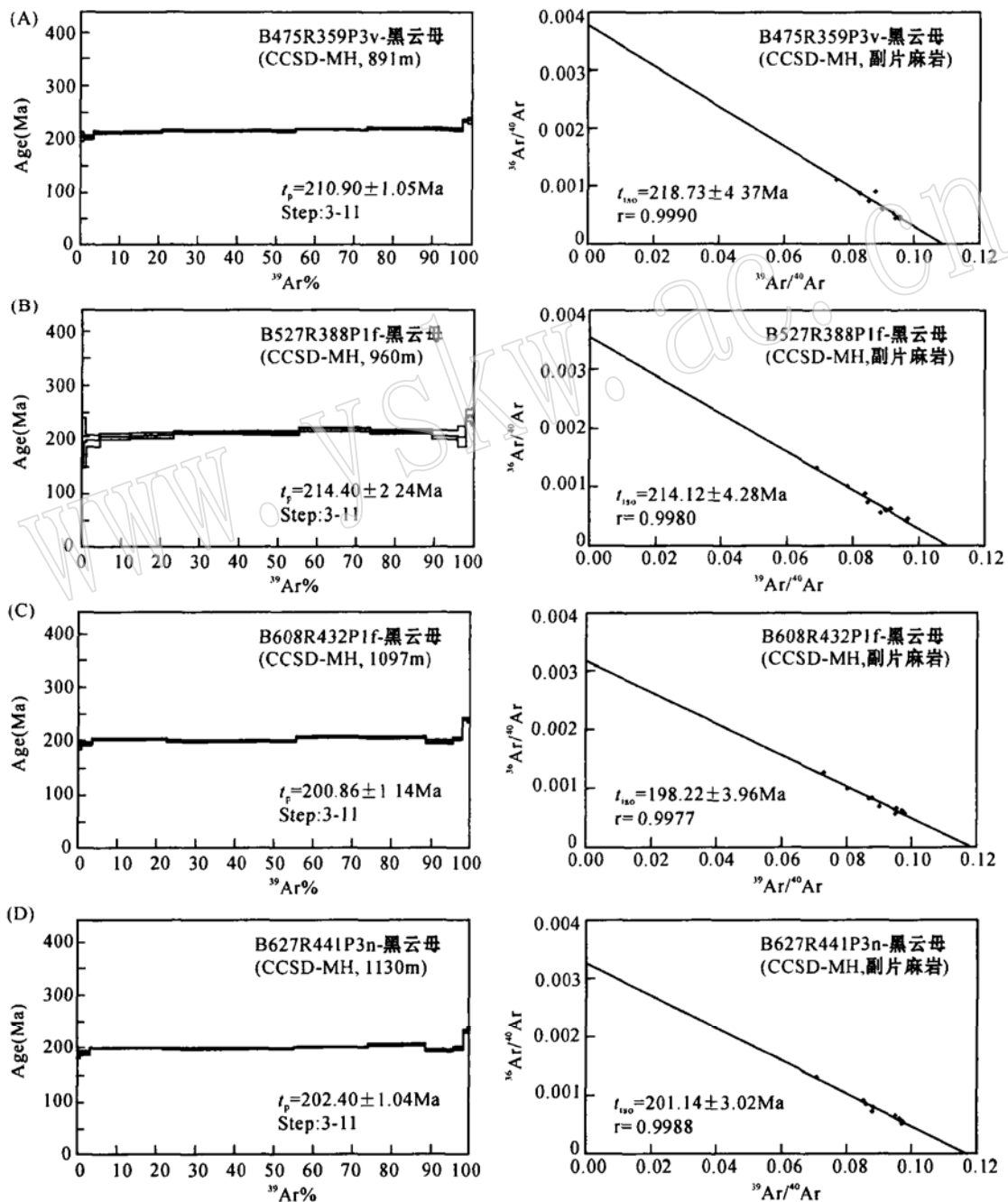


图 3 位于超高压变质地体的 CCSD 主孔岩石中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄
 Fig. 3 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isochron and plateau ages of biotite from the CCSD main hole in the UHP III zone

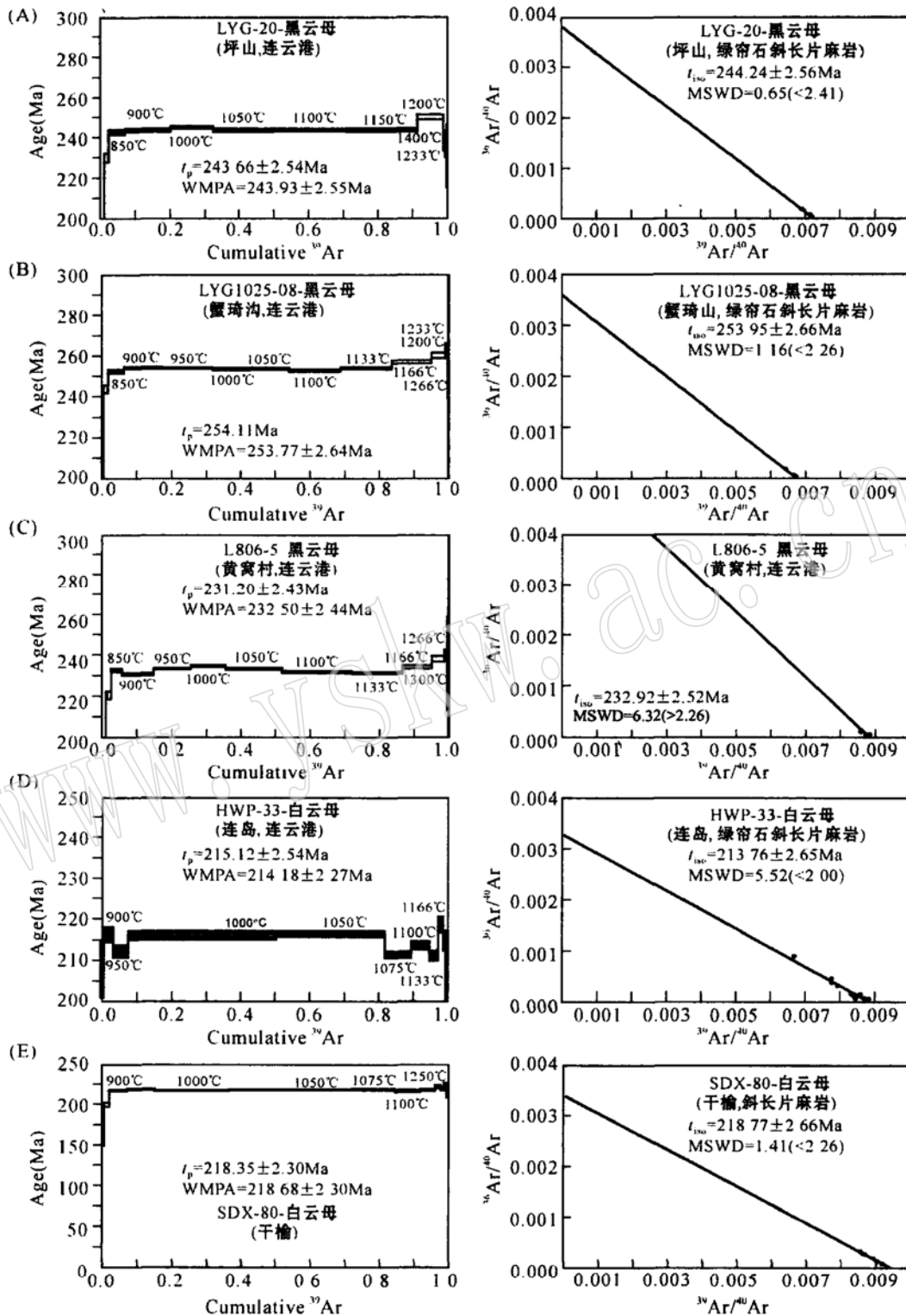


图4 高压变质带韧性剪切带岩石中黑云母和白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄和等时线年龄

Fig. 4 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isochron and plateau ages of biotite and muscovite from ductile shear zones in the HP zone

龄结果(表1和图3): B475R359P3v 绿帘黑云角闪斜长片麻岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 210.90 ± 1.05 Ma, 等时线年龄 218.73 ± 4.37 Ma; B527R388P1f 绿帘黑云角闪斜长片

麻岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 214.40 ± 2.24 Ma, 等时线年龄 214.12 ± 4.28 Ma; B608R432P1f 绿帘黑云角闪斜长片麻岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 200.86 ± 1.14 Ma, 等时

线年龄 198.22 ± 3.96 Ma; B627R441P3n 绿帘黑云角闪斜长片麻岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 202.40 ± 1.04 Ma, 等时线年龄 201.14 ± 3.02 Ma。总体来看, 坪年龄值在 200.9 ± 1.1 到 214.1 ± 4.3 Ma 的范围内, 对应等时线年龄从 198.2 ± 3.9 到 218.7 ± 4.4 Ma。这些数据与 Li 等(2003)、刘福来等(2003)、Liu 等(2004b) 得到的折返年龄 $220 \sim 200$ Ma 基本相符。

2.2 苏鲁高压变质带折返时限

通过对苏鲁南部高压变质带内韧性剪切带中糜棱岩化变质火山岩的黑云母和白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年, 获得高压变质岩石折返的时限。共采集地表样品 5 个: LYG_20 绿帘石黑云斜长片麻岩(位于连云港坪山)、LYG1025_08 绿帘石黑云斜长片麻岩(位于连云港蟹棋沟)、L806_5 绿帘石黑云斜长片麻岩(连云港黄窝村)、HWP_33 绿帘石二云斜长片麻岩(连云港连岛)和 SDX_80 白云母斜长片麻岩(赣榆高压变质推覆体)。上述岩石为蓝闪石-绿片岩相退变的产物(邱海峻等, 2002), 因此黑云母和白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄可以代表高压变质岩石折返过程时限。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年工作在美国斯坦福大学地质系 Ar/Ar 同位素实验室测定, 获得较好的坪年龄和等时线年龄结果(图 4): 其中 LYG_20 绿帘石黑云斜长片麻岩的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 243.93 ± 2.55 Ma, 等时线年龄 244.24 ± 2.56 Ma (MSWD= 0.65); LYG1025_08 绿帘石黑云斜长片麻岩的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 253.77 ± 2.6 Ma, 等时线年龄 253.95 ± 2.66 Ma (MSWD= 1.2); L806_5 绿帘石黑云斜长片麻岩的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 232.5 ± 2.4 Ma, 等时线年龄 232.9 ± 2.5 Ma (MSWD= 6.3); HWP_33 绿帘石二云斜长片麻岩的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 214.2 ± 2.3 Ma, 等时线年龄 213.76 ± 2.65 Ma (MSWD= 5.52); SDX_80 白云母斜长片麻岩的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 218.7 ± 2.3 Ma, 等时线年龄 218.77 ± 2.66 Ma (MSWD= 1.41)。

此外还采集了位于连云港连岛 LYG_48 黑云角闪片岩样品, 在中国地质科学院地质研究所同位素实验室进行了全岩、角闪石、黑云母的 Rb/Sr 同位素分析。全岩、角闪石和黑云母的等时线年龄为 258.1 ± 1.3 Ma (MSWD= 2.0, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.71712 \pm 0.00025$) (图 5)。

上述年龄值说明高压变质岩石的峰期变质年龄大于 258 Ma, 起始折返年龄为 258~240 Ma, 表明高压变质岩石的折返年龄比超高压变质岩石早 30~40 Ma。

3 讨论与结论

尽管苏鲁超高压变质岩石的原岩成分和变质程度在三维空间上变化很大 (Zhang *et al.*, 2000, 2005; 张泽明等, 2004; Liu *et al.*, 2004b), 但是研究表明, 由榴辉岩及其围岩组成的地壳物质曾俯冲到 100 km 以下深度, 遭受超高压变质作用 (Liu *et al.*, 2004b)。这些较轻的陆壳物质如何由地表深俯冲到地幔深度, 而又快速折返回到地表? 是研究板块

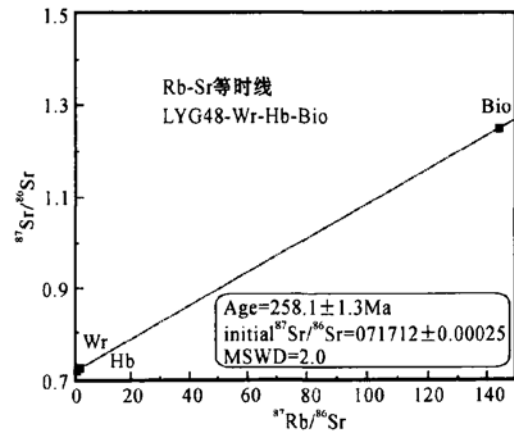


图 5 高压变质岩石的 W_r 、 H_b 、 B_i Rb/Sr 等时线
Fig. 5 W_r 、 H_b 、 B_i Rb/Sr isochron ages of the HP metamorphic rocks

碰撞边界深部动力学亟待解决的问题 (Ernst and Liou, 1999)。前人提出了各种假说试图解释超高压变质岩快速折返的原因, 其中包括剥蚀和漂浮机制 (Platt, 1993)、伸展机制 (Harrison, 1992)、垂向挤出机制 (Chemenda *et al.*, 1995, 1996; Maruyama *et al.*, 1994) 及上地壳的伸展和下地壳的缩短机制 (Anderson and Jamierit, 1990; Ballevere *et al.*, 1990) 等。

Chemenda (1995, 1996) 曾提出经历超高压作用的岩石变软, 由于板块的进一步会聚而从俯冲通道中挤出。在大别-苏鲁地区, 挤出和伸展模式 (Faure *et al.*, 2001; Maruyama *et al.*, 1994) 已被用来解释超高压变质岩片的折返问题。Hacker 等 (2004) 提出晚二叠世-早三叠世时期南中国板块的北缘被俯冲至 150 km 的深度, 形成了大别苏鲁的超高压变质岩, 由于伸展而造成折返是与 245~195 Ma 期间克拉通的顺时针旋转有关。但以上这些模式都建立在陆壳整体俯冲和折返的假设上。

最近笔者对榴辉岩进行了矿物成分、地球化学、流变学的分析, 以及对高压、超高压变质、退变质测年、折返的不同阶段的测年, 经过地表和深部地震反射剖面结构分析等多方面系统的研究, 得到了更详细的数据来阐明苏鲁高压-超高压变质带的演化特征:

(1) 副片麻岩、花岗质片麻岩和大理岩组成榴辉岩和超基性岩透镜体的围岩。在这些占苏鲁地体 80% 面积的围岩中, 柯石英等超高压特征矿物包体在锆石中普遍发现说明扬子板块巨量物质组成的陆壳在 240~220 Ma 深俯冲到华北板块 100 km 以下深度 (Liu *et al.*, 2002, 2004b)。

(2) 在苏鲁高压-超高压变质叠覆构造岩片中, 保存了与高压变质岩, 较高压变质岩向超高压变质岩转化相对应的、从地壳到地幔不同深度形成的构造。研究表明, 苏鲁超高压变质叠覆构造岩片可以划分为以表壳变质岩为主的 UHP(III) 单元和以花岗质变质岩为主的 UHP(IV) 单元, III 单元叠覆在

IV单元之上。这样一种“似地层”关系可以看作为上部为表壳岩、下部为花岗岩的原始垂直地壳剖面,这两种类型的岩石曾被榴辉岩的原岩玄武岩浆和辉长岩浆侵入(Jahn, 1998)。苏鲁UHP岩石的SHRIMP U_{Pb}锆石年龄说明榴辉岩母岩是玄武质的或辉长质的岩石,年龄约700~800 Ma (Jahn, 1998; Liu *et al.*, 2004b; Zheng *et al.*, 2004)。结合榴辉岩、副片麻岩和花岗质片麻岩的野外接触关系,这些年龄也说明榴辉岩的母岩曾经是作为岩墙或岩席侵入到围岩中的基性岩浆。

(3) 苏鲁高压-超高压变质带的地震反射剖面(图2)揭示了由高压-超高压变质岩石组成的厚度超过10 km宽约15 km的不对称穹窿形板片。超高压变质岩石IV单元占据穹窿形板片的核部,组成背形构造; I、II、III单元主要位于板片的南东侧并向SE缓倾。I、II、III单元中岩片之间的韧性剪切带显示自SE向NW的剪切指向的“逆冲”特征,而在板片下部的IV单元中出现复杂的剪切应变指向,以北西向南东的剪切滑移为主,重塑前穹窿阶段的高压-超高压折返变质板片为具有“挤出”性质的板片,上部“逆冲型”剪切带实为“正滑型”剪切带,下部“正滑型”剪切带实为“逆冲型”剪切带。

(4) 前人发表的同位素年代学数据表明,大别超高压变质事件发生在200~240 Ma(Li *et al.*, 1989, 1993, 1996,

2000a, 2000b; Ames *et al.*, 1993, 1996; Hacker *et al.*, 1998; Maruyama *et al.*, 1994)。Li等(1993)测得全岩Sm-Nd同位素年龄为221~228 Ma, Ames等(1996)测得苏鲁超高压变质带中榴辉岩的锆石U_{Pb}年龄值为217 Ma。在苏鲁超高压花岗岩和超基性岩的变质时间限定上,副片麻岩和花岗质片麻岩中含柯石英锆石微区的SHRIMP U_{Pb}测年表明经历了220~242 Ma的超高压变质作用(刘福来等, 2003)。东海大陆科学钻探岩心的锆石SHRIMP U_{Pb}测年数据表明:超高压岩石折返开始于219 Ma,副片麻岩的锆石U_{Pb}年龄是202~219 Ma,花岗质片麻岩年龄是209~219 Ma(刘福来等, 2003);山东威海的含柯石英石榴石橄榄岩及含柯石英榴辉岩的锆石SHRIMP U_{Pb}测年分别是221±12 Ma和228±29 Ma(Yang *et al.*, 2003),说明这些橄榄岩、榴辉岩及其片麻岩围岩在220~242 Ma时曾经发生了深俯冲和原地超高压变质事件(表2)(图6)。

(5) 新的测年数据表明,高压变质板片形成早于258 Ma,起始折返于250~240 Ma,和已发表的张八岭高压变质岩石的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年数据245 Ma十分吻合(Li *et al.*, 1993)。而超高压变质板片的俯冲和折返时间分别为240~220 Ma和220~200 Ma,说明高压变质板片形成与折返都要比超高压变质板片来得早,也就是说,在北苏鲁超高压

表2 苏鲁HP(I)和UHP(II和IV)变质带的放射性同位素数据的前工作总结表

Table 2 Summary of previous work on radioactive isotopic data from the Sulu HP-UHP metamorphic terrain

位置	围岩	方法	年龄/Ma	参考文献
苏鲁UHP变质带IV				
威海	石榴石橄榄岩	SHRIMP U/Pb 锆石	225±5 Ma	Yang <i>et al.</i> , 2003a
荣成	石榴石橄榄岩	SHRIMP U/Pb 锆石	229±39 Ma	Yang <i>et al.</i> , 2003a
马家沟	榴辉岩	Sm-Nd 全岩	209~211 Ma	Li <i>et al.</i> , 1993
洙边	榴辉岩	Sm-Nd 全岩	228±6 Ma	Li <i>et al.</i> , 1993
仰口,日照	榴辉岩	U _{Pb} 锆石	202±13 Ma	Li <i>et al.</i> , 1993
临沭	榴辉岩	U _{Pb} 锆石	217.1±8.7 Ma	Ames <i>et al.</i> , 1996
仰口,日照	榴辉岩	U _{Pb} 锆石	224±14 Ma	Zheng <i>et al.</i> , 2004
岚山头,日照	榴辉岩	U _{Pb} 锆石	224±27 Ma	Zheng <i>et al.</i> , 2004
苏鲁UHP变质带III				
青龙山,东海	榴辉岩	Sm-Nd 全岩	226±3 Ma	Li <i>et al.</i> , 1993
青龙山,东海	榴辉岩	U _{Pb} 锆石	218±16 Ma	Zheng <i>et al.</i> , 2004
青龙山,东海	正片麻岩	U _{Pb} 锆石	221 Ma	Rumble <i>et al.</i> , 2002
芝麻坊,房山	石榴石橄榄岩	U _{Pb} 锆石	216~233 Ma	Rumble <i>et al.</i> , 2002
CCSD_PP2,东海	正片麻岩	SHRIMP U/Pb 锆石核-幔部位	232±4.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004a
CCSD_PP2,东海	副片麻岩	SHRIMP U/Pb 锆石核-幔部位	228±5.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004a
CCSD_PP2,东海	正片麻岩	SHRIMP U/Pb 锆石边缘部位	213±5.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004a
CCSD_PP2,东海	副片麻岩	SHRIMP U/Pb 锆石边缘部位	208±4.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004a
CCSD_MH,东海	正片麻岩	U _{Pb} 锆石	227±2.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004b
CCSD_MH,东海	正片麻岩	SHRIMP U/Pb 锆石边缘部位	209±3.0 Ma	Liu <i>et al.</i> , 2004b
牛山,东海	榴辉岩	⁴⁰ Ar/ ³⁹ 角闪石	213.4±4.1 Ma	Li <i>et al.</i> , 2003
房山,东海	榴辉岩	⁴⁰ Ar/ ³⁹ 黑云母	200.6±3.1 Ma	Li <i>et al.</i> , 2003
房山,东海	榴辉岩	⁴⁰ Ar/ ³⁹ 黑云母	204±2.0 Ma	Li <i>et al.</i> , 2003
苏鲁HP变质带I				
张八岭	榴辉岩	⁴⁰ Ar/ ³⁹ 黑云母	204±2.0 Ma	Li <i>et al.</i> , 1993

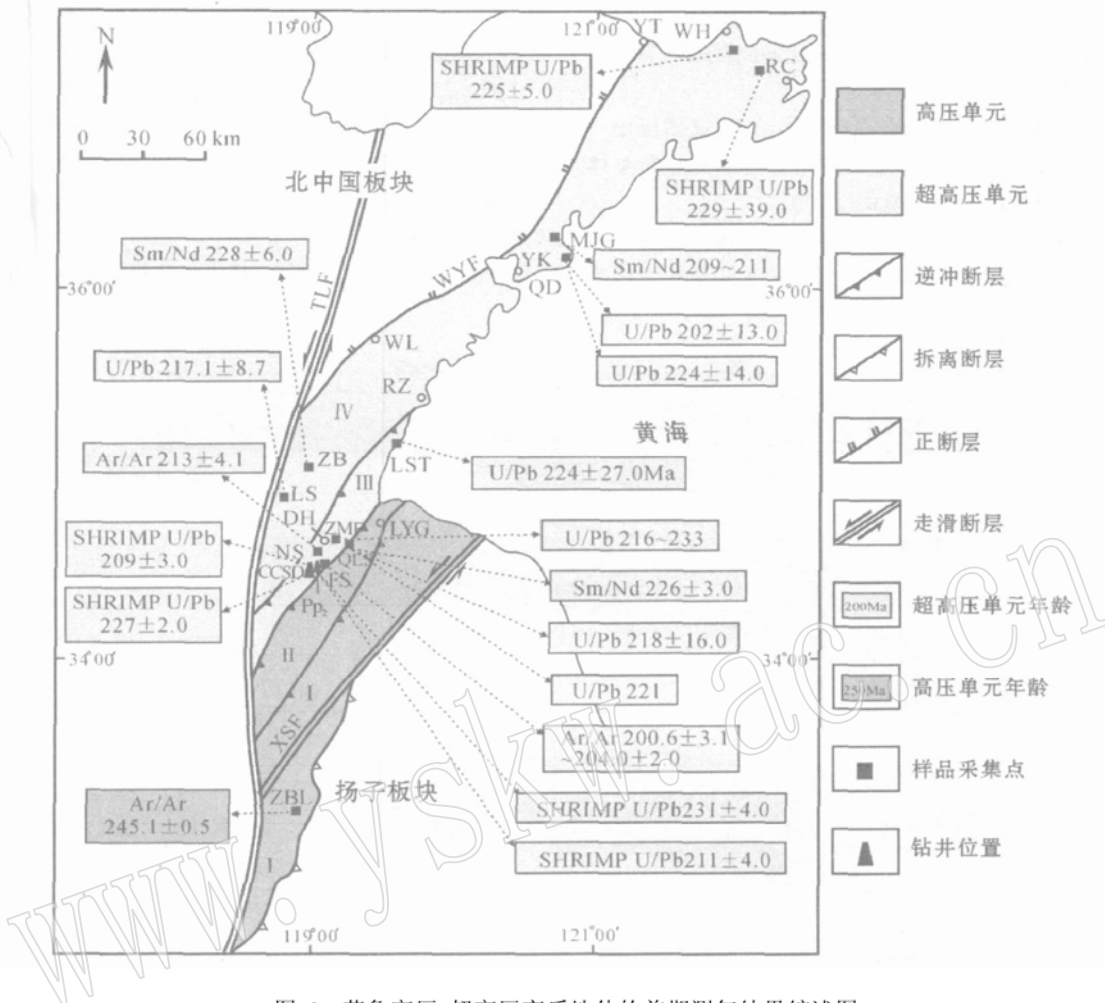


图 6 苏鲁高压-超高压变质地体的前期测年结果综述图

Fig. 6 Summary of previous dating results using different methods in the Sulu HP_UHP metamorphic terrain

TLF—郯庐断裂; XSF—响水断裂; WYF—五莲-烟台断裂; YT—烟台; WH—威海; RC—荣成; WL—五莲; MJG—马家沟; YK—仰口; QD—青岛; RZ—日照; LST—岚山头; ZB—株边; LS—临沭; DH—东海; LYG—连云港; ZMF—芝麻房; NS—牛山; QLS—青龙山; FS—房山; ZBL—张八岭

TLF—Tanlu fault; XSF—Xiangshui fault; WYF—Wulian_Yantai fault; YT—Yantai; WH—Weihai; RC—Rongcheng; WL—Wulian; MJG—Majiaogou; YK—Yangkou; QD—Qingdao; RZ—Rizhao; LST—Lanshantou; ZB—Zhubian; LS—Linshu; DH—Donghai; LYG—Lianyungang; ZMF—Zhimafang; NS—Niushan; QLS—Qinglongshan; FS—Fangshan; and ZBL—Zhangbaling

变质板片开始俯冲时, 南苏鲁高压变质板片已开始折返。

上述测年结果表明, 苏鲁地体中 4 个构造叠置岩片被韧性剪切带分割, 虽然整体构造关系受到后期的改造(中生代的伸展及花岗岩的侵入), 但是, 它们原始关系很可能相似于今日所见之格局。高压带岩石经历 300~ 360 °C 和 0.7~ 0.85 GPa 的变质作用, 相对应于俯冲到 30 km 深度的温压条件; 很高压带岩石经历 500~ 600 °C、压力为 1.5~ 2.0 GPa 的变质作用, 对应于俯冲到 30 km 深度的温压条件; 超高压带岩石经历大于 650 °C、压力为 2.8~ 3.0 GPa 的变质作用, 对应于俯冲到 100 km 以上深度的温压条件。新的同位素年龄值说明高压变质岩石的峰期变质年龄大于 258 Ma, 起始折返年龄为 253~ 240 Ma, 表明高压变质岩石的折返年龄比超高压变

质岩石早 30~ 40 Ma。

前人的模式都建立在俯冲大陆板片是整体的, 不具差异性的基本假设之上。但大陆岩石圈的一个重要特征是层圈化, 各层之间存在极大的物理和化学性质差异, 导致被动陆壳的各层之间密度和力学特征不同, 具有分层性特点, 层与层之间由于物性差异形成拆离层。这种俯冲大陆板片的分层性特征有可能导致不同层的可俯冲性不同。对于苏鲁高压-超高压变质地体, 高压岩石代表了扬子板块最上部的岩石, 由于它们的低密度, 在 258 Ma 前沿拆离层只能俯冲到 30 km 的深度, 遭受 HP 的峰期变质作用, 并且在 250~ 240 Ma 期间开始沿俯冲的通道折返。反之, VHP 和 UHP 岩石代表扬子板块深层次岩石, 密度较大, 较容易沿拆离层向 60 km 以至 100

km 的深度俯冲, 先后形成很高压 (VHP) 和超高压 (UHP) 变质岩石, 并导致高压、很高压的变质岩石比超高压岩石具有更早的变质峰期和折返时间。

基于这些考虑和新的地质研究及测年结果, 试图提出一个与前人不同的在板块会聚碰撞期间被动陆缘板片非整体 (分片式) 俯冲与折返的动力学模式 (图 7):

(a) 早于 258 Ma 时, 扬子板块被动边缘上部火山质岩石呈岩片首先俯冲到北中国板块下面, 俯冲到 30 km 的位置

时, 形成含有蓝闪石和其他高压指示矿物的高压变质岩片, 形成的温压条件为 300~ 360 °C 和 0.7~ 0.85 GPa;

(b) 258~ 240 Ma 期间, 扬子板块被动边缘中上部火山质和含磷层位岩层俯冲到北中国板块下面 60 km 的深度, 形成以黄玉等很高压 (VHP) 矿物为特征的变质岩片, 形成的温度为 500~ 600 °C, 压力为 1.5~ 2.0 GPa; 与此同时, 高压变质岩片开始折返;

(c) 240~ 220 Ma 期间, 扬子板块被动边缘以原岩为沉积

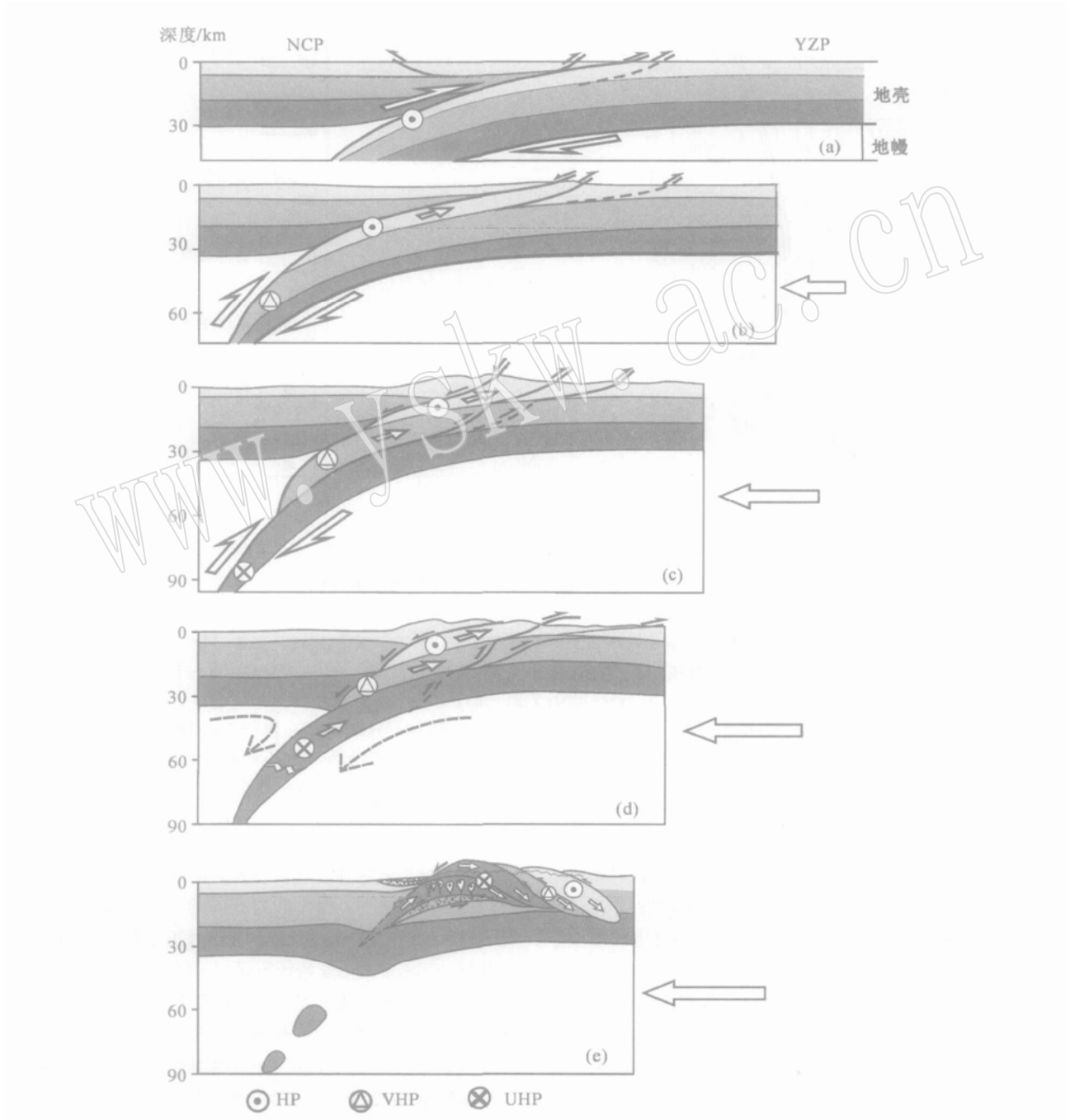


图 7 本研究提出的大陆岩石圈板片多重性的俯冲与折返模式

Fig. 7 Multiple model for the differential subduction and exhumation of a continental lithosphere proposed in this study

岩的表壳岩和下部的花岗岩岩基俯冲到北中国板块下面 100 km 以下深度, 形成以柯石英、金刚石超高压变质矿物为代表的超高压(UHP)变质岩片, 形成的温度为 500~ 600 °C, 压力为 1.5~ 2.0 GPa, 与此同时, 很高压和高压变质岩片开始和继续折返;

(d) 220~ 200 Ma 期间, 超高压变质岩片开始折返, 很高压和高压变质岩片继续折返;

(e) 200~ 100 Ma 期间, 高压-很高压-超高压变质叠置板片在后折返伸展过程中弯曲, 形成白垩纪陆相盆地及伸展构造。

本文提出的模式尚需更多的资料予以检验和论证, 在此提供专家们讨论和指正。

致谢 本文的⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年在美国斯坦福大学地质与环境系、中国科学院广州地球化学研究所进行, Rb/Sr 测年在中国地质科学院地质研究所同位素实验室测试, 成文过程中刘福来研究员、杨经绥研究员、张泽明研究员和李海兵研究员参与了讨论, 图件由张晓卫和蔡志慧帮忙绘制, 在此一并感谢!

References

- Ames L, Tilton G R and Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U/Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites[J]. *Geology*, 21: 339~ 342.
- Ames L, Zhou G and Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China[J]. *Tectonics*, 15: 472~ 489.
- Arderson T B and Jamert B. 1990. Uplift of deep crust during orogenic extensional collapse: A model based on field studies in the Sogn-Sunnfjord region of Western Norway[J]. *Tectonics*, 9: 1 097~ 1 111.
- Ballevre M, Lagabrilie Y and Merle O. 1990. Tertiary ductile normal faulting as a consequence of lithospheric stacking in the Western Alps[J]. *Mémoires de la Société géologique de France*, 156: 227~ 236.
- Chemenda A I, Mattauer M and Bokun A N. 1996. Continental subduction and a mechanism for exhumation of high-pressure metamorphic rocks: new modeling and field data from Oman[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 143: 173~ 182.
- Chemenda A I, Mattauer M, Malavielle J and Bokun A N. 1995. A mechanism for syn-collisional rock exhumation and associated normal faulting: Results from physical modeling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 132: 225~ 232.
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 1~ 14.
- Cong B L and Wang Q C. 1999. The Dabie-Sulu UHP rocks slice: Review and prospect[J]. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1 074~ 1 085.
- Ernst W G. 2001. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism, and regurgitation of buoyant crustal slices—implications for arcs and continental growth[J]. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 127: 253~ 275.
- Ernst W G and Liou J G. 1999. Overview of UHP metamorphism and tectonics in well-studied collisional orogens[J]. *International Geology Review*, 41: 477~ 493.
- Ernst W G, Maruyama S and Wallis S. 1997. Buoyancy-driven, rapid exhumation of ultrahigh-pressure metamorphosed continental crust[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94: 9 532~ 9 537.
- Faure M, Lin W and Le Breton N. 2001. Where is the North China-South China block boundary in eastern China[J]? *Geology*, 29: 119~ 122.
- Hacker B R, Ratschbacher L and Liou J G. 2004. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen [A]. Malpas J, Fletcher C J N, Ali J R, *et al.* Aspects of the Tectonic Evolution of China[C]. Geological Society of London Special publications, 226: 157~ 175.
- 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~ 230.
- Harrison C G A. 1992. Rates of Continental Erosion and Mountain Building[M]. *Proceedings of the 29th IGC, Kyoto, Japan*, 2.
- Jahn B M. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen[A]. Hacker B R and Liou J G. *When Continents Collide: Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*[C]. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, 203~ 239.
- Li J Y, Yang T N, Chen W, *et al.* 2003. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of deformation events and reconstruction of exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Donghai, East China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77: 155~ 168.
- 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 [J]. *Science in China*, 32: 1 393~ 1 400.
- 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[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 1 077~ 1 093.
- Li S G, Jagoutz E, Lo C H, *et al.* 2000b. Sm/Nd, Rb/Sr, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic systematics of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu slice, central China: A Retrospective View[A]. Ernst W G and Liou J G. *Ultra-High Pressure Metamorphism And Geodynamics in Collision-Type Orogenic Slices*[C]. The Sheridan Press, Pennsylvania, 234~ 244.
- Li S G, Jagoutz E, Xiao Y L, *et al.* 1996. Chronology of ultrahigh-

- pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane [J]. *Science in China, Series D*, 39: 597~ 609.
- 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[J]. *Chemical Geology*, 109: 89~ 111.
- Liou J G, Hacker B R and Zhang R Y. 2000. Into the forbidden zone [J]. *Science*, 287: 1215~ 1216.
- Liou J G, Zhang R Y, Ernst W G, *et al.* 1998. High-pressure minerals from deeply subducted metamorphic rocks[J]. *Review in Mineralogy and Geochemistry*, 37: 33~ 96.
- Liu F L, Xu Z Q and Xue H M. 2004b. 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[J]. *Lithos*, 78: 411~ 429.
- Liu F L, Xu Z Q, Katayama Ikuo, *et al.* 2001b. Mineral inclusions in zircons of para- and orthogneiss from pre-pilot drillhole CCSD_PP1, Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Lithos*, 59: 199 ~ 215.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, *et al.* 2004a. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh pressure and retrograde metamorphism of gneisses, southwestern Sulu terrain, eastern China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 22: 315~ 326.
- Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, *et al.* 2002. Ultrahigh pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese continental scientific drilling site in eastern China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 14: 499~ 512.
- Liu F L, Xu Z Q, Yang J S, *et al.* 2001a. Mineral inclusions of zircon and UHP metamorphic evidence from paragneiss and orthogneiss of pre-pilot drillhole CCSD_PP2 in north Jiangsu province, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1037~ 1042.
- Liu Fulai, Zhang Zeming and Xu Zhiqin. 2003. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77: 69~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Maruyama S, Liou J G and Zhang R. 1994. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure (UHP) and high-pressure (HP) metamorphic slices from central China[J]. *The Island Arc*, 3: 112~ 121.
- Platt J P. 1993. Exhumation of high-pressure rocks: A review of concepts and processes[J]. *Terra Nova*, 5: 119~ 133.
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, *et al.* 2002. New mineral evidence of high-pressure metamorphism of the Subei high-pressure slice—Aragonite inclusions in garnet from greenschist[J]. *Geological Bulletin of China*, 21: 617~ 624 (in Chinese with English abstract).
- Rumble D, Giorgis D, Ireland T, *et al.* 2002. Low $\delta^{18}\text{O}$ zircons, U-Pb dating, and the age of the Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu Province, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 2299~ 2306.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, *et al.* 2003. Exhumation Structure and Mechanism of the Sulu Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433~ 450 (in Chinese with English abstract).
- Yang J S, Wooden J L, Wu C L, *et al.* 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 551~ 560.
- Yang Wencai, Yang Wuyang and Cheng Zhenyan. 2004. Interpretation of 3D seismic reflection data in the Chinese Continental Scientific Drilling site[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 127~ 137 (in Chinese with English abstract).
- Zhang R Y, Liou J G and Shu J F. 2002. Hydroxy-rich topaz in high-pressure and ultrahigh-pressure kyanite quartzite, with retrograde woodhouseite, from the Sulu terrane, eastern China[J]. *American Mineralogist*, 87: 445~ 453.
- Zhang Z M, Xiao Y L, Liu F L, *et al.* 2005. Petrogenesis of UHP metamorphic rocks from Qinglongshan, southern Sulu, east-central China[J]. *Lithos*, 81: 189~ 207.
- Zhang Z M, Xu Z Q and Xu H. 2000. Petrology of ultrahigh pressure eclogites from the ZK703 drill hole in the Donghai, eastern China [J]. *Lithos*, 52: 35~ 50.
- Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai, *et al.* 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~ 2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 27~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F, Wu Y, Chen F, *et al.* 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4145~ 4165.

附中文参考文献

- 刘福来, 张泽明, 许志琴. 2003. 苏鲁地体超高压矿物的三维空间分布[J]. *地质学报*, 77(1): 69~ 84.
- 邱海峻, 许志琴, 张泽明. 2002. 苏北高压变质带绿片岩中石榴石内文石包裹体的发现[J]. *地质通报*, 21(10): 617~ 624.
- 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[J]. *地质学报*, 77(4): 433~ 450.
- 杨文采, 杨午阳, 程振炎. 2004. 中国大陆科学钻探孔区三维地震资料的初步解释[J]. *岩石学报*, 20(1): 127~ 138.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100~ 2050 m) 榴辉岩岩石化学研究[J]. *岩石学报*, 20(1): 27 ~ 42.