

·学科进展·

大陆深俯冲作用:来自超高压变质岩的证据

从柏林 王清晨 叶 凯

(中国科学院地质研究所,北京 100029)

【摘要】 自 80 年代末在大别山-苏鲁地区发现含柯石英榴辉岩之后,该区即成为研究超高压变质作用和碰撞造山作用及其地球动力学的热点地区。本文总结了大陆深俯冲的证据及超高压变质作用的近期研究进展,并展望该领域的研究趋向。

【关键词】 深俯冲作用,大陆,超高压变质岩

自在西阿尔卑斯山发现低密度的沉积岩(2.6—2.7g/cm³)可被俯冲到 90 km 以下的高密度上地幔(平均 3.2—3.4g/cm³)深处,后又折返出露地表以来^[1],超高压变质作用便成为固体地球科学的研究热点之一。特别是自 80 年代末在大别山-苏鲁地区发现含柯石英榴辉岩之后^[2-7],许多中外科学家蜂拥该区,从各个角度研究超高压变质作用和碰撞造山作用及其地球动力学。他们的研究成果被反映在数百篇论文和若干专著中^[8-10]。根据我国科学家的建议,国家岩石圈计划也将该研究领域立为重点项目之一。国际上每年都有该研究领域的学术研讨会 2—3 次,每次会议的学术报告都以一些杂志的专刊形式发表。

1 近期研究进展

大别山-苏鲁地区以其独特的超高压变质作用和复杂的碰撞造山带结构而令世人瞩目(图 1)。国家自然科学基金委员会适时地在超高压变质作用研究方面给予了高强度的资助,不仅持续地批准一批面上项目,还设立了“八五”重点基金项目:大别山-苏北-胶东南超高压变质带及其大地构造意义。通过这些项目的实施,我国科学家和他们的国外合作者一起获得了以下重要成果:

(1)不仅在榴辉岩中,而且在超高压变质沉积岩中发现柯石英;不仅在石榴子石和绿辉石中,而且在绿帘石、蓝晶石和白云石等富水的矿物和挥发份中

发现柯石英包体^[9,11,12]。除柯石英外,还发现了指示形成压力在 3 GPa 以上的金刚石^[13]以及贫铝斜方辉石+钛斜硅镁石-斜硅镁石+菱镁矿组合和蓝晶石+多硅白云母+滑石组合^[14-15]。特别是 1995 年中日合作研究发现了中国青岛仰口榴辉岩中的粒间柯石英^[16],表明超高压变质岩形成于大陆超深俯冲环境,与晶内超压无关。

(2)采用多种同位素定年技术确定了大别山-苏鲁超高压变质作用发生在三叠纪^[17-24]。

(3)通过对超高压变质岩典型产地,如潜山双河,青岛仰口,岳西碧溪岭,进行大比例尺地质构造填图,以及精细的岩石学和矿物学工作,确认超高压变质岩与其围岩花岗片麻岩的关系是构造接触关系^[25,26]。最近在诸城桃行榴辉岩的围岩花岗片麻岩的锆石中发现了柯石英包体。但是,从几块花岗片麻岩分离出来的 200 多颗锆石中只有一颗锆石含柯石英包体。只有确定这颗含柯石英包体的锆石是原生的而不是外来的,才可推断花岗片麻岩也经受了超高压变质作用。

(4)大别山碰撞造山后的岩浆岩(镁铁质侵入岩和脉岩群)^[27-29]和合肥盆地的早第三纪玄武岩^[30]的地球化学属性指示北大别山下面可能有一个古老的地幔楔。最近的层析成象研究表明,大别山和苏鲁地区均是扬子板块俯冲于华北板块之下,并在约 130—170 km 的深度上发生了板块断离(Slab break off)。结合地质学证据推测,板块断离可能发生于

国家自然科学基金资助项目,批准号 49132040.

本文于 1999 年 1 月 8 日收到.

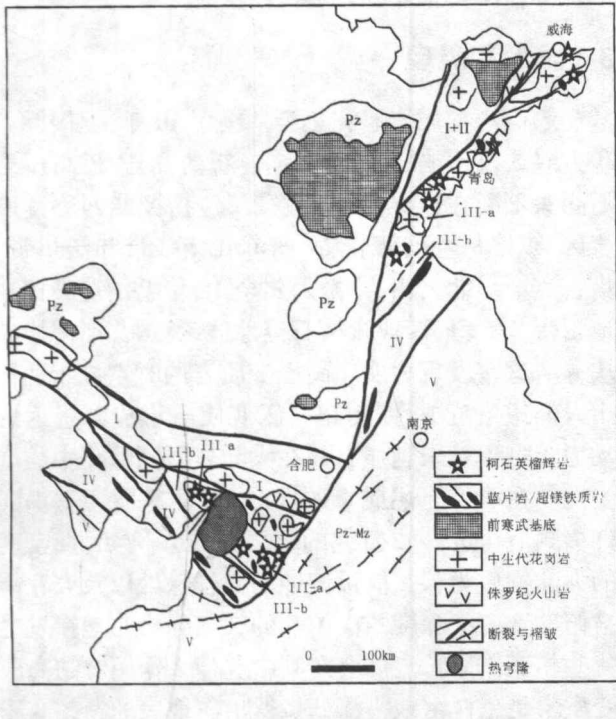


图1 大别山地质构造简图

构造单元: I——北淮阳复理石带; II——北大别弧杂岩带; III——南大别碰撞杂岩带(III-a:超高压亚带, III-b:高压亚带); IV——宿松变质杂岩带; V——前陆褶皱带。其它英文符号: SK——中朝陆块; YZ——扬子陆块; Pz——古生界; Mz——中生界。

200—190 Ma(徐佩芬等,1998,博士学位论文)。

(5)基于超高压变质岩及其围岩片麻岩的 PTt 轨迹,结合岩浆-构造热事件和变形分析,提出了超高压变质岩折返3阶段模式及折返机制^[31]。

(6)经过广泛的国际合作研究,中国大别山-苏鲁超高压变质岩带已经成为国际公认的世界规模最大、出露最好的超高压带,这里已发现了许多超高压变质岩研究的世界之最,如江苏东海青龙山榴辉岩最低的 ^{18}O 值(-10),威海榴辉岩最高的 ϵ_{Nd} (+260),碧溪岭最大的超高压榴辉岩体(约 2 km^2)。最近,国际大陆科学钻探委员会又选择在苏北东海进行深钻工程,世界第1口穿入超高压榴辉岩带的深钻孔(5 km)将于1999年开工。

2 大陆深俯冲的证据

近几年,在超高压变质作用研究领域又有些惊人的发现。Dobrzhinetskaya 等人^[35]在超高压变质的 Alpe Arami 地体的橄榄岩中,发现了橄榄石中有许多微米级的 $FeTiO_3$ 棒,而且这类钛酸盐有4种结构:钛铁矿和另外3种早先没有认知的介于钛铁矿

和钙钛矿结构之间。据推测,这些 $FeTiO_3$ 棒是富含 TiO_2 (约 0.7%) 的橄榄石在 10—15 GPa (相当于 300—400 km 深度) 的压力下作为钙钛矿出溶生成的,尔后大部分转变为钛铁矿。理论上,橄榄石在 10—15 GPa 压力下会转变成为密度更大的 wadsleyite 结构。因此,他们把 Alpe Arami 橄榄岩的橄榄石具有独特的晶格和完善的定向看成是在 wadsleyite 稳定时形成的。Ye K. 等人(1998,发表中)在早期橄榄石中发现2种特殊的出溶现象,一为细针状富 Cr 钛铁矿成分相,它们的出溶方位(橄榄石的[010]方位)及产状与 Dobrzhinetskaya 等人^[35]所报道的 $Fe-TiO_3$ 出溶物类似(图2)。另一种出溶物为具立方晶系或假立方晶系矿物形态的磁铁矿或铬铁矿片晶。虽然到目前为止,橄榄石中富铬钛铁矿成分相的晶体结构尚需进一步准确测定,但磁铁矿或铬铁矿从橄榄石中出溶暗示这些橄榄石或其中的部分成分可能曾被转变为尖晶石相结构。他们还发现束状单斜辉石常作为石榴子石的环边产出。到目前为止,这种结构仅见于超深的(大于 300 km)地幔岩包体中^[36—38],并被认为是单斜辉石曾转化为石榴子石结构后又发生反向转变的结果,而这种相转变只可能发生于上、下地幔之间的过渡带(380 km 深)或更深处。1999年 Bozhilov 等人报道了在 Alpe Arami 橄榄岩的透辉石中有斜顽辉石出溶条纹^[39]。Zhang R. Y. 等人也报道了在苏北东海的石榴辉石岩的顽火辉石中发现了斜顽辉石出溶条纹^[40]。这种出溶发生的最小深度约 250 km,而且如考虑到出溶的斜顽辉石还含百分之几的 $CaSiO_3$, 其出溶的深度还要大。

按照经典的变质岩石学概念,随着埋深加大,即压力和温度增加,变质相从有流体参与的绿片岩相经角闪岩相升级至基本无流体参与的麻粒岩相和榴

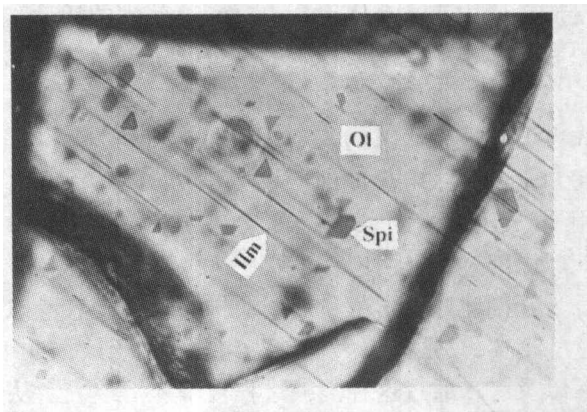


图2 东海芝麻坊石榴二辉橄榄岩的橄榄石(Ol)中针状钛铁矿(Ilmm)和片状尖晶石(Spi)出溶体

辉岩相。而随着超高压变质作用研究的深入,发现超高压变质岩常有相当量的,原生的含流体的(主要是 H_2O , 其次是 CO_2) 矿物相,如绿帘石、黝帘石,白云石,菱镁矿,滑石,多硅白云母,斜硅镁石,以及镁十字石等。另一方面,与超高压变质作用有关的高温高压相合成实验研究表明^[41],大多数合成相是含 H_2O 的矿物,如在白片岩中发现的镁硬绿泥石 $MgAl_2Si_2O_5(OH)_2$ 和镁十字石 $Mg_4Al_8Si_8O_{46}(OH)_2$, 它们稳定的 P-T 域分别是 1.8—5.8 GPa (400℃—800℃) 和 > 1.3 GPa (700℃—950℃), 以及在变泥质岩中发现的纤锰闪石 $MgAl_2[Si_2O_6](OH)_4$, 其在 > 650℃ 下稳定的压力为 0.7—5.0 GPa; 在超高压变质的镁铁质-超镁铁质岩中发现的斜硅镁石 ($Mg_5Si_4O_{18}H_2$) 和钛粒硅镁石 ($Mg_5Si_2O_{10}H_2$), 它们的稳定的 P-T 域是 > 2.9 GPa 和 > 730℃^[41]; 在榴辉岩中常见的蓝闪石,当温度 > 700℃ 时,其稳定压力为 1—3 GPa。还有一种含水超高压变质矿物即 Ti-Ellenbergerite, 至今在大别山-苏鲁超高压变质岩中还未发现,而在西阿尔卑斯白片岩中发育,其稳定的 P-T 域是 2.7—4.2 GPa 和 650℃—725℃。Schreyer 还报道了在过量的水流体参与下,在超高压的条件下合成出含相当量水的相,如 MgAl-绿纤石 (< 700℃ 下压力 > 3.7 GPa) 和 黄玉-OH [$Al_2SiO_4(OH)_2$] (400℃—900℃, > 5.5 GPa)^[42]。这些事实无疑表明,在超高压变质过程中的确有水的参与。但是,对中国大别山-苏鲁地区超高压变质岩的氧、碳、氢同位素研究表明,表壳岩在俯冲到地幔深度并经历超高压变质作用时,并无大规模流体活动,因此,在这些岩石中保留了超高压变质作用之前与大气水进行氧同位素交换的信号,而且在米级尺度上表现出氧同位素的不均一性^[32,34,43]。上述看似矛盾的事实或许是同一事物的 2 个不同侧面,一方面,在超高压变质环境中有水介入,另一方面,这些水的活动又被限制在很小的范围或特定的渠道。

上述发现无疑具有重要的科学意义,证实了原先在大陆地壳浅部的岩石可以被俯冲到地幔 300—400 km 深度,并通过地壳岩石含水矿物的去水作用,释放出大量的水(相当部分来源于大气水),参与地球深部过程,促使地壳和地幔的物质循环。而被誉为开创地球科学革命的板块构造学说没有考虑到这些事实,只是提出大洋地壳可被消减到约 720 km 深以及海水通过这种消减过程被带入上地幔。从这层意义上说,大陆地壳岩石的超高压变质作用的研究对固体地球科学的现有观念提出了挑战。一场新

的地球科学革命正在兴起。

3 思考和展望

超高压变质岩研究热已持续了 10 年,但国际上仍方兴未艾。自 1995 年以来,新的高压-超高压岩石露头不断在世界各地被发现,包括挪威西部片麻岩区,东格林兰榴辉岩省,朝鲜临津江带和沃川带,塔吉克斯坦北天山,中国阿尔金山,坦桑纳莫桑比克造山带,印度尼西亚含柯石英地体,德国艾斯博格地块等。这些发现表明超高压变质岩的时空分布远超出人们想象范围,控制超高压变质岩形成与折返的动力学过程越来越显出其在大陆岩石圈演化中的重要性。在取得上述成果的同时,科学家们还意识到许多颇值得进一步研究的重要问题。例如,低密度的大陆物质为什么能被俯冲到幔深处以及究竟能被俯冲到多大深度? 深俯冲的大陆壳会与地幔发生哪些相互作用? 流体会在其中起什么作用? 超高压变质岩是怎样由地幔深处折返出露地表的? 超高压变质岩的形成与折返在大陆壳增生过程中的地位与作用? 所有这些问题对深入认知我们居住的蓝色星球都至关重要。超高压变质地体已经成为探测地球深部动力学过程的新窗口。正因为如此,国际岩石圈计划执行局已经原则同意将中国科学家主持的 III-6 项目的研究继续进行下去,国家自然科学基金委员会在“九五”期间设立了重大项目“超高压变质作用与碰撞造山动力学”。

展望今后的几年,超高压变质作用研究将会在以下几方面延拓:

(1) 大陆深俯冲过程中的深部效应

通过岩石学、矿物学、地球化学等手段研究陆壳物质在深俯冲过程中所发生的物理、化学变化,陆壳物质进入地幔组分循环的可能性及对地幔成分的影响;研究在大陆深俯冲环境中的壳幔作用,包括正在俯冲的陆壳与上覆地幔间的作用和已俯冲的陆壳与上涌地幔间的作用,以及这些壳幔作用对岩浆活动的制约。

(2) 大陆深俯冲环境中的流体活动

通过对超高压变质地体中特殊岩脉的研究和对超高压变质矿物及其包体的稳定同位素研究,探讨大陆深俯冲环境中是否有流体活动,其表现与产物是什么,以及流体活动的形式与规模。

(3) 大陆深俯冲的造山过程

通过岩石学、矿物学、同位素地球化学、构造地质学的综合研究,探讨大陆深俯冲与陆-陆碰撞造山

的统一性,包括超高压变质岩的折返过程,该过程对周围盆地构造格架的影响,以及对大型盆地发育与充填历史的制约。

(4)大陆深俯冲造山带的三维结构

结合地表地质与深部地球物理(侧重地震反射与层析成像)调查,研究大陆深俯冲造山带的三维精细结构。

(5)建立大陆深俯冲过程的地球动力学模型

高度综合上述多学科研究成果,对大陆深俯冲过程的诸阶段进行地球物理学模拟,建立包括低密度大陆壳的深俯冲、超高压变质岩的折返、造山与造盆、岩浆岩演化等在内的地球动力学模型。

结语:我们应抓住历史契机,把由超高压变质作用研究引发的固体地球科学观念的重大变革推向新高潮,保持中国科学家的领先地位,为国际地球科学研究作出更大贡献。

参 考 文 献

- [1] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high grade pelitic blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences: *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, **86**: 107—118.
- [2] Xu Z. Etude tectonique et microtectonique de la chine paleozoique et triasique des Qintings (Chine). Thesis de doctorate Univ. Sci. Tech. Languedoc, Montpellier. 1987.
- [3] Yang J, Smith D C. Evidence for former sanidine-coesite at Lanshantou, east China, and the recognition of the Chinese Su-Lu coesite eclogite province (abstract). Third International Eclogite Conference. Blackwell Science, Oxford, 1989, 26.
- [4] Okay A I, Xu S, Sengbr A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *Eur. Jour. Mineral.*, 1989, **1**: 595—598.
- [5] Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, 1989, **17**: 1085—1088.
- [6] Enami M, Zang Q. Magnesian staurolite in garnet-currundum rocks and eclogite from tile Donghai District, Jiangsu Province, East China. *Amer. Mineral.*, 1988, **73**: 48—56.
- [7] Enami M, Zang Q. Quartz pseudomorph after coesite in eclogite from Shandong Province, east China. *Amer. Mineral.*, 1990, **75**: 381—386.
- [8] Coleman R G, Wang X. *Ultrahigh-Pressure Metamorphism*, Cambridge University Press, 1995, 528.
- [9] Cong Bolin. *Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China*. Science Pres, Beijing, China, Kluwer Academic Publishers, 1996, 224.
- [10] Hacker B, Liou J G. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks*. Chapman & Hill. 1998.
- [11] Zhang R Y, Liou J G. Significance of coesite inclusions in dolomite from eclogite in the southern Dabie mountains, China. *Amer. Mineral.* 1996, **80**: 181—186.
- [12] Su W, Xu S T, Jiang L L et al. Coesite from quartz-jadeite in the Dabie Mountains, eastern China. *Mineral. Mag.*, 1996, **60**: 659—662.
- [13] Xu S, Okay A I, Ji S et al. Diamond from metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 1992, **256**: 80—82.
- [14] Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. Talc-, magnesite- and Ti-clinohumite-bearing ultrahigh-pressure meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China. *J. Petrol.*, 1995, **36**: 1011—1037.
- [15] Zhang R Y, Liou J G. Significance of magnesite paragenesis in ultrahigh-P metamorphic rocks. *Amer. Mineral.*, 1994, **79**: 397—400.
- [16] Ye K, Hirajima T, Ishiwatari A et al. The discovery of intergranular coesite in eclogite of Yangkou, Qingdao and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**: 1407—1408.
- [17] Li S, Liou D, Chen Y et al. The Sm-Nd isotopic age of coesite-bearing eclogite from the southern Dabie Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 1992, **37**(19): 1638—1641.
- [18] Li S, Chen Y, Cong B et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. *Chemical Geology*, 1993, **109**: 70—89.
- [19] Li S, Jagoutz E, Xiao Y et al. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: I. Sm-Nd isotope system, *Science in China (Series D)*, 1996, **39**(6): 597—608.
- [20] Ames L, Tilton G R, Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 1993, **21**: 239—342.
- [21] Cong B, Zhang R, Li S et al. Preliminary study of isotope chronology of eclogites in northern Jiangsu and eastern Shandong Provinces, China. In: *Exploration of canoes and rocks in Japan, China and Antarctica: Commemorative papers for Professor Yukio Matsumoto*. 1992, 411—417.
- [22] Eide E A, McWilliams M O, Liou J G. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and exhumation of high-pressure to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in east-central China. *Geology*, 1994, **22**: 601—604.
- [23] Jahn B -M, Cornichet J, Cong B. Crustal evolution of the Qinling-Dabie orogen: isotopic and geochemical constraints from coesite-bearing eclogites of the Su-Lu and Dabie Terranes, China. *Chinese Science Bulletin*, 40 Supplement, 1995, 116—119.
- [24] Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 1996, **133**: 29—51.
- [25] Cong B L, Zhai M, Carswell D et al. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China. *Eur. J. Mineral.*, 1995, **7**: 119—138.
- [26] Wallis S R, Ishiwatari A, Hirajima T et al. Occurrence and field relationships of ultrahigh-pressure metagranitoid and coesite eclogite in the Su-Lu terrane, eastern China. *J. Geol. Soc. London*, 1997, **154**: 45—54.
- [27] Li S, Nie Y, Zheng S et al. Interaction between subducted continental crust and upper mantle: I. Major and trace elements of the syn-collision mafic-ultramafic rocks. *Science in China (Series D)*, 1997, **27**: 466—493. (in Chinese).
- [28] Li S, Nie Y, Hart S R. Interaction between subducted continental crust

- and upper mantle: II. Sr and Nd isotopic geochemistry of the syn-collision mafic-ultramafic rocks. *Science in China (Series D)*, 1998, **28**: 18—22. (in Chinese).
- [29] Chen C H, Lo C H, Teng L S et al. Preliminary geochemical result of the basic pluton and basic-intermediate dike from Northern Dabieshan area, China. *Extended Abstracts of the Conference on Geology across the Taiwan Strait*, 1995, 4—7.
- [30] Cong B L, Wang Q C, Zhang H Z et al. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei basin, China. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, **12**: 370—381.
- [31] Wang Q, Cong B. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains. *Science in China (Series D)*, 1996, **39**: 311—318.
- [32] Yui T F, Rumble D, Lo C H. Unusually low ^{18}O ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**: 2859—2864.
- [33] Zheng Y F, Fu B, Cong B L et al. Extreme ^{18}O depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in east China. *Eur. J. Mineral.*, 1996, 317—323.
- [34] Jahn B M, Cornichet J, Cong B et al. Ultrahigh- ϵ_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. *Chemical Geology*, 1996, **127**: 61—79.
- [35] Dobrzhinskaya L, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths more than 300 km. *Science*, 1996, **272**: 1841—1845.
- [36] Sauter V, Haggerty S E, Field S. Ultra-deep (> 300 km) ultramafic xenolith: new petrologic evidence from the transition zone. *Science*, 1991, **252**: 827—830.
- [37] Haggerty S E, Sauter V. Ultra-deep (> 300 km) ultramafic upper mantle xenoliths. *Science*, 1990, **248**: 993—996.
- [38] Haggerty S E. Deep upper mantle and transition zone xenoliths in the Jagersfontein kimberlite, Kaapvaal Craton. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 1994, **77**: 761.
- [39] Bozhilov K N, Green II N W, Dobrzhinskaya L. Clinoenstatite in Alpe Arami peridotite: additional evidence of very high pressure. *Science*, 1999, **284**: 128—132.
- [40] Zhang R Y, Shau Y H, Liou J G et al. Discovery of clinoenstatite in the Sulu garnet pyroxenite and implication for continental subduction. *EOS, Transaction AGU 1998*, **79**(45): 971.
- [41] Schreyer W. Experimental studies on metamorphism of crustal rocks under mantle pressure. *Mineral. Mag.*, 1988, **52**: 1—26.
- [42] Schreyer W. Ultradeep metamorphic rocks: The retrospective viewpoint. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 8353—8366.
- [43] Wang Q, Rumble D. Oxygen and carbon isotope composition from the UHP Shuanghe marbles, Dabie Mountains, China. *Science in China (Series D)*, 1999, **42**: 88—96.

UTRADEEP CONTINENTAL SUBDUCTION: EVIDENCES FROM ULTRAHIGH-PRESSURE (UHP) METAMORPHIC ROCKS

Cong Bolin Wang Qingchen Ye Kai
(*Institute of Geology, CAS, Beijing 100029*)

Abstract The discoveries of coesite-eclogite in Dabieshan and Sulu regions in late 1980s attracted most of the predominant geologists in this field, thorough investigations were performed on ultrahigh-pressure metamorphism, collisions of continents and related geotectonics. This articles summarized progresses in ultrahigh-pressure metamorphism and geosciences in collision-type orogenic belts, and proposed some research trends the this field.

Key words ultradeep, continental subduction, ultrahigh-pressure metamorphic rocks