

# 中生代苏-鲁活动大陆边缘榴辉岩、煌斑岩、金矿及富集地幔间的成因联系

胡受奚<sup>1</sup> 孙景贵<sup>1</sup> 凌洪飞<sup>1</sup> 叶瑛<sup>2</sup> 翟建平<sup>1</sup> 方长泉<sup>1</sup>

HU ShouXi<sup>1</sup>, SUN JingGui<sup>1</sup>, LING HongFei<sup>1</sup>, YE Ying<sup>2</sup>, ZHAI JianPing<sup>1</sup> and FANG ChangQuan<sup>1</sup>

1. 南京大学地球科学系成矿作用国家重点实验室, 南京 210093

2. 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

1. Department of Earth Sciences, State Key Laboratory of Ore Genesis, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2000-12-27 收稿, 2001-04-21 改回.

Hu SX, Sun JG, Ling HF, Ye Y, Zhai JP and Fang CQ. 2001. Genetic relationship between eclogite, lamprophyre, gold deposit and enriched mantle of Su-Lu active continental margin in the Mesozoic, China.

*Acta Petrologica Sinica*, 17(3):425-435

**Abstract** The Initial Eurasia plate and Paleopacific plate started to converge intensely at the end of Hercynian or beginning of the Triassic (250Ma). The subduction, its evolution and long distant effect are the fundamental factors controlling the formation and evolution of the most granitoids, volcanics, lamprophyres and gold deposits in Jiaodong terrane. The characteristics of lamprophyres in Jiaodong terrane are similar to lamprophyres related to gold deposits in other active continental margin or orogenic belts. Such as dyke occurrence, late-stage emplacement, intensive autometamorphism, enrichment in large ion lithophile element (LILE) and volatiles, higher content of gold, high ratios of LREE/HREE and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, low <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd ratios, complementarity in many main and trace elements with eclogites, and intimate association with granitoids and shoshonite volcanics, other mafic rocks, felsic dyke and hydrothermal gold deposits. All these features could be related to the enriched mantle wedge and explained by mantle-crust material exchange due to degassification, dealkalization, desilicification and remobilization of LILE during subduction of slab. The subduction and its evolution are the fundamental factors controlling the formation and evolution of most granitoids, volcanics, lamprophyres and gold deposits in Jiaodong terrane. All these features could be related to the enriched mantle wedge and explained by mantle-crust material exchange during subduction of slab in active continental margin.

**Key words** Lamprophyre, Eclogite, Enriched mantle, Su-Lu ultra-high-pressure-metamorphic belt (UHPMB), Gold deposits, A-type subduction

**摘要** 海西期末形成的初始欧亚板块, 从三叠纪(250Ma)开始, 便与古太平洋板块-太平洋板块发生强烈的挤压碰撞作用和俯冲作用, 及由此引起的远距离效应使中国广大的东部地区从中生代开始成为活动大陆边缘。俯冲作用及构造环境的演化是控制胶东地体等大多数中生代榴辉岩等变质岩类、花岗岩类、火山岩类、煌斑岩类以及金等矿床形成和使它们出露地表的重要因素。胶东地体中富钾的钙-碱性煌斑岩类的特征与其它活动大陆边缘和造山带中金矿有关的煌斑岩很相似, 例如呈脉状产出、晚期就位、强烈的自变质、富含大离子亲石元素(LILE)和挥发分、高的金含量、高的LREE/HREE和<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值、低的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd比值、与花岗岩类、橄辉安粗岩、酸性脉岩以及热液金矿床的密切共生及它们之间与富集地幔楔的成因联系等, 这些都表明它们与板块或板片俯冲过程中的去气、去碱、去LILE作用或壳-幔物质交换作用及由此形成的富集地幔楔有着紧密的联系。

**关键词** 煌斑岩; 榴辉岩; 富集地幔; 苏-鲁超高压变质岩带(UHPMB); 金矿床; A-型俯冲

**中图法分类号** P588.346; P597

· 国家自然科学基金会重点科研项目(编号49733120)基金及南京大学内生矿床成矿机制国家重点实验室部分基金资助。

第一作者简介: 胡受奚, 男, 1929年12月生, 教授, 矿床学专业。

## 1 引言

在大洋板块(B-型)俯冲过程中,中-酸性岩浆岩与榴辉岩之间的成因联系已被许多学者所公认,也为实验所证明(Ringwood, 1966, 1975; Khitarov *et al.*, 1972);但对A-型俯冲及在同一构造环境中榴辉岩、橄榄安粗岩系、安山-流纹岩系、煌斑岩及金矿之间的成因联系以及富集地幔的成因却还未被人们所重视。Rock(1991)虽详细划分煌斑岩类型,却没有讨论其中富钾的钙-碱性煌斑岩与富集地幔之间的成因联系。

本文以胶东地区广泛发育的中生代富钾的钙-碱性煌斑岩、金矿及榴辉岩为重点,并以少数其它造山带中与金矿有成因联系的煌斑岩作对比,从岩石学、岩石化学、地球化学和同位素特征来探讨它们之间的成因联系。

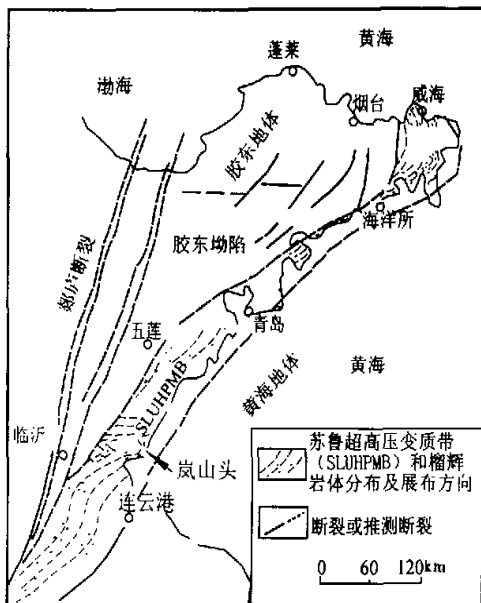


图1 山东半岛和苏北构造地质及榴辉岩体展布简图

Fig. 1 Simplified map of the tectono-geology and distribution of eclogites of Shandong peninsula and north Jiangsu province, China

## 2 中生代胶东活动大陆边缘的构造特征

分布于郯庐断裂以东,主要形成于中生代构造旋回早期(主要为印支期,240~200Ma,从柏林等,1991;韩宗珠等,1994),呈NNE-NE-NW(自南而北)走向,从江苏洪泽湖北岸潘赵庄至山东威海刘公岛延长约350km,其中分布有

大小不等(出露面积为 $1\text{ km}^2 \sim n\text{ cm}^2$ )近千个榴辉岩体的苏鲁沿海榴辉岩带。由于在其中一些榴辉岩中发现柯石英(Enami and Wang 1990; Hirajima *et al.*, 1990)、金刚石(Zhang YK, 1997; Zhang *et al.*, 2000)以及在大理岩中单斜辉石中钾长石的出溶体(胡受奚等,1994; Becker *et al.*, 1992)等,因此公认为是一条超高压变质岩带(UHPMB)(图1)。整个胶东是属于太平洋构造域中的一环,是海西期后初始欧亚板块与古太平洋板块强烈挤压过程中引发黄海地体向胶东地体A-型俯冲的产物(胡受奚等,1994,1987,1997,1998;陈衍景等,1992)。这里需要指出:郯庐断裂以西主要走向呈NNW、延长超过3000 km以上的大别-桐柏-秦岭-祁连榴辉岩带是属于EW-NW走向的古特提斯构造域。不同构造体系的岩带相互交叉是十分常见的现象,它们常构成网络构造。郯庐断裂东西两侧榴辉岩带在走向上和地质特征上突变性的变化,表明它们不属于同一构造带。

顺便指出:大别-桐柏-秦岭-祁连山带都具有晋宁旋迴、加里东旋迴和河西旋迴的大陆板块的增生带;在祁连山带还存在有印支旋迴增生带,而苏鲁榴辉岩带却未见这些增生带。正因为如此,Wiley(1990),Coney(1990)等皆将郯庐断裂带作为边界断裂。人们不能否认中生代古太平洋-太平洋板块或其中Fallaron, Izanagi 和 Kula 板块对初始欧亚-欧亚板块的强烈挤压俯冲作用(如:Wiley, 1990; Coney, 1990; Michell and Garson, 1981),以使中国东部成为环太平洋构造-岩浆带和成矿带的重要一环。

我们较详细研究苏鲁UHPMB的构造,发现它由3~4个弧形构造所组成,其中最明显的是胶南-青岛-荣成-威海构造弧:自南向北,在胶南-青岛段呈NE走向,向北渐转为NNE向,至荣成渐转为SN向,由荣成向北渐转为NNW向,至威海(特别是刘公岛)转为NW向。另一个是以日照岚山头为弧顶,其南翼由NE向转为EW向,其北翼为NW向。再一个在江苏赣榆-东海境内,其西北端的演马厂-堰水房榴辉岩段为NNW走向,至柘汪-石桥-东海转为NE向。这些向东突出的弧形构造,配合NE-NNE走向的断裂体系、胶莱火山岩盆地、以及崑崙山、玲珑和桃山花岗岩基及金矿带的分布等,这些不仅表示初始欧亚板块与古太平洋板块强烈挤压俯冲作用造成的种种地质现象,同时表示胶北地体为仰冲板块,而黄海地体为俯冲板块。这样的构造环境是我们讨论榴辉岩、火山岩、花岗岩、煌斑岩以及金矿之间成因关系的构造基础。

这里需要指出:广泛分布于胶东金矿区的煌斑岩类,不是一般在华南常见的云煌岩,而大多数是富钾的闪斜煌岩和拉辉煌岩,橄榄拉辉煌岩和富钾煌斑质辉绿岩等(孙景贵等,2000),它们不可能是地壳简单的重熔产物,它们是与富集地幔是有着紧密成因联系的。

## 3 黄海地体俯冲过程中富集地幔的形成

苏鲁榴辉岩带是由榴辉岩(原岩主要为玄武岩等铁镁

质岩)、超镁铁岩、蓝片岩、麻粒岩、片麻岩、大理岩、蓝晶石石英岩及片岩等所组成的超高压变质岩带(UHPMB)。该UHPMB中岩石组合的复杂性,是由多种原因造成的:(1)原岩组合的多样性(从超镁铁岩到中-酸岩,由碳酸盐岩,泥岩到碎屑岩);(2)俯冲环境的多样性:a)在高地热区俯冲过程中通过麻粒岩相进入榴辉岩相的进变岩类(多为残留体,以该带北段为主);b)在低地热区由蓝片岩相进入榴辉岩相(以南段为主);(3)折返过程中退变质岩类(十分普遍和发育),例如斜长角闪片岩、花岗片麻岩、石英岩和云母片岩等;(4)构造岩类,该UHPMB中存在多期次的许多与韧

性剪切带有关的构造岩类。当黄海地体向西俯冲过程中,由于温度、压力和变质相的逐渐增高,伴随着去气、去碱、去硅作用(Fyfe *et al.*, 1978)以及去大离子半径亲石元素(LILE)和金的活化转移(Anhaeusser, 1976)等作用。去气作用和分熔作用所产生的大量中-酸性岩浆和流体,除大多数侵入和喷出地表外,一部分便混入地幔楔,使其成为富集地幔(图2)。在俯冲过程中,我们可以近似地把榴辉岩看作是在去气、去硅、去碱、去LILE等作用及矿物相变过程中的产物。

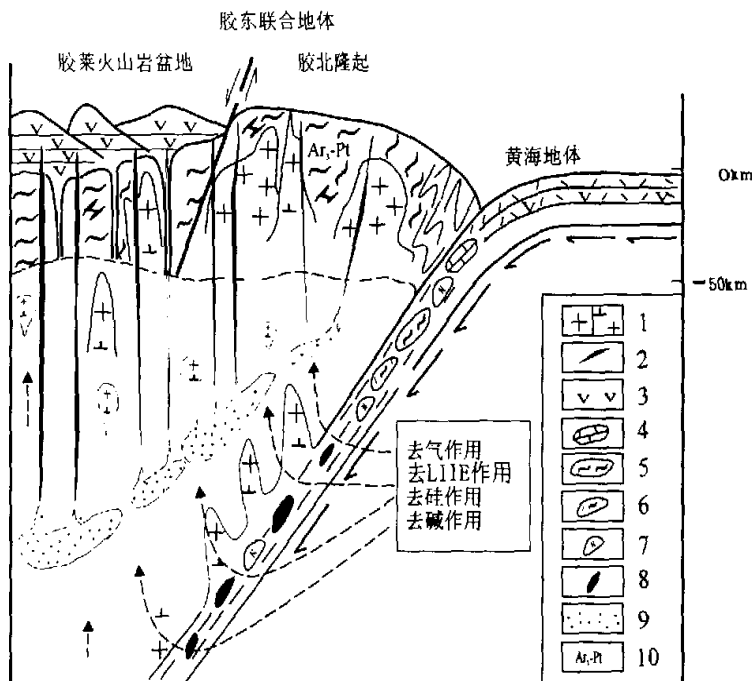


图2 在活动大陆边缘中-酸性岩浆和富集地幔形成模式

1. 花岗岩类, granitoids; 2. 火山岩, volcanics; 3. 煌斑岩类, lamprophyres; 4. 大理岩, marble; 5. 片麻岩, gneiss; 6. 石英岩, quartzites; 7. 超镁铁岩, ultrabasic-mafic rock; 8. 榴辉岩, eclogite; 9. 富集地幔楔, enriched mantle wedge; 10. Ar<sub>3</sub>-Pt

Fig. 2 The model for the formation of acid-intermediate magma and enriched mantle in the active continental margin

### 3.1 煌斑岩与榴辉岩在挥发组分上的互补性

由各类岩石组成的板片、地体或板块最初是含有较丰富的水等挥发组分。对水而言,包括雨水、海水、岩浆水、吸附水、裂隙水及结晶水等。当它们在碰撞挤压及俯冲过程中,随着温度、压力和变质相的升高,水及其它挥发分不断地从岩石中释放出来;至麻粒岩相(可以俯冲至上地幔形成)或榴辉岩相水的含量接近于零。但如果在较低地热梯度区,可以从高压低温含水较高的蓝片岩相进入上地幔,而后转变

为榴辉岩(Fyfe *et al.*, 1978)。虽然大部分挥发分独自或伴随分熔岩浆从地幔进入或喷出地表,但部分水和其它挥发物可在地幔楔中集中。富含挥发分是富集地幔重要特征之一。

尽管榴辉岩在折返地表途径和退变过程中,普遍有挥发分的加入,但依旧可从图3A,B中清楚看出榴辉岩和煌斑岩在烧失量上存在着互补关系;前者平均仅为0.87%,而后者平均高达4.63%。此是表明煌斑岩与富含挥发分的地幔有成因联系的重要证据之一。

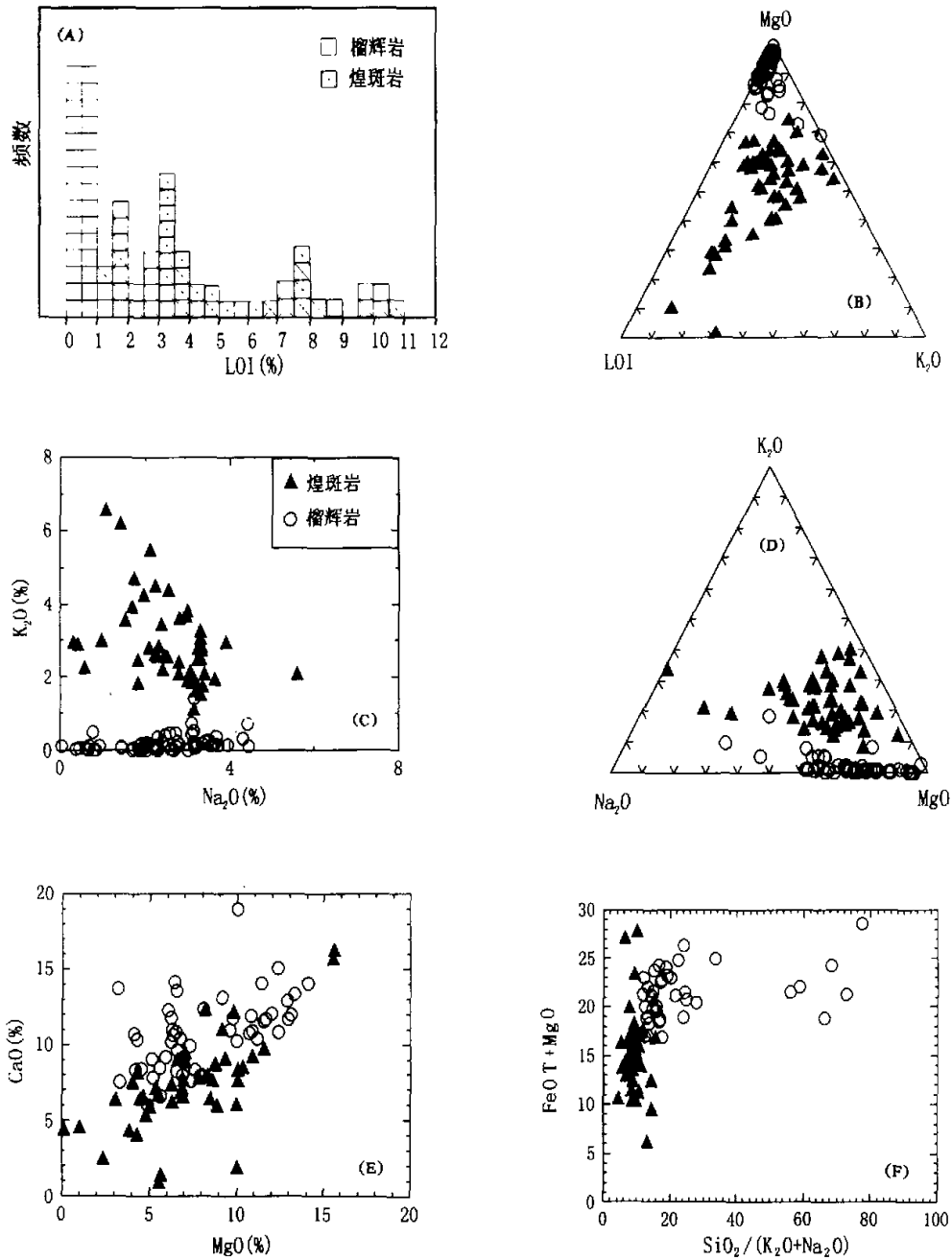


图3 榴辉岩和煌斑岩在造岩组分上的互补性图解

(资料来源于程振香, 1980; 翟淳, 1981; 杨建军, 1991; Rock, 1991; 徐树桐, 1992; 叶凯, 1992; 张希道, 1992; 韩宗珠, 1994; 樊金涛, 1994; 季海章, 1995; 孙丰月, 1995; 李兆龙, 1996; 孙治东, 1996; 黄智龙, 1996; 邱检生, 1997; 张永康, 1997; 张泽明, 1999; 孙景贵, 2000; 和作者)

Fig. 3 Complementarity of rock-forming components of eclogites and calc-alkaline lamprophyres

(A) Histogram of volatile contents of the lamprophyres and eclogites; (B) Volatile-K<sub>2</sub>O-MgO ternary diagram; (C) K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O (<math>)</math> diagram; (D) MgO-Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O ternary diagram; (E) CaO vs. MgO diagram; (F) (TFeO+MgO) vs. (SiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O) diagram.

### 3.2 煌斑岩与榴辉岩在造岩组分上的互补性

以下我们从煌斑岩与榴辉岩之间在造岩组分及微量元素上的互补性来探讨它们的成因联系以及富集地幔形成的机理。

#### 3.2.1 $K_2O$ 和 $Na_2O$ 的互补性

由于钾与钠是重要造岩元素,在地球化学上又是重要的元素对。但钾离子明显大于钠离子,因而它们之间的能量系数就有大的差异。在俯冲过程中,由于温度和压力升高所引起的去 LILE(大离子亲石元素)作用及去碱作用,必然导致钾与钠的分离。因此,  $K^+/Na^+$  比可以作为温压的指示剂。例如在硅酸盐矿物随着变质相的升高,  $K_2O$  和含钾矿物不断减少,而在榴辉岩中几乎全消失( $K_2O$  平均在 0.37%~0.03%);而  $Na^+$  却不相同,除了部分钠被释放外,部分钠却可以进入高压的硅酸盐矿物:如闪石类(如蓝闪石等)和辉石类(如硬玉,绿辉石等)矿物中,从而导致钾与钠的分离,使  $K^+/Na^+$  比值随着变质相升高而不断降低。富钾及地幔中钾交代是富集地幔的主要标志之一(Menzies, 1983),也是形成高钾-钾质脉岩(孙景贵等, 2000)的重要原因。这可以在图 3, B, C 和 D 中清楚看出。同时也是胶东联合地体(由胶北地体和胶南地体联合而成)金矿床中普遍发育钾化的根源(胡受美等, 1997, 1998, 2000)。

#### 3.2.2 $CaO$ 和 $MgO$ 的互补性

$Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  同是二价阳离子的碱土元素,在地球化学上是元素对。由于  $Ca^{2+}$  大于  $Mg^{2+}$ , 因此在高温高压条件下,钙与镁常发生分离,使  $CaO/MgO$  比值减小。早在 50 年代, Vinogradov(1959)以球陨石作分熔实验,就发现钙主要集中在易熔的玄武质熔体中,而镁集中在相当于镁质超基性岩的难熔部分中,钙与镁发生明显分离。以后 Green 和 Ringwood(1967, 1975)也从成分相当于球陨石或二辉橄辉岩的地幔岩(pyrolite)进行分熔实验,也证实它们的分离现象。

这里需要指出:上述情况是指地幔物质的第一次分熔过程中钙与镁的分离现象。但当洋壳俯冲至上地幔发生第二次分熔时,情况有所不同。这是因为榴辉岩主要是由石榴石和单斜辉石所组成,由于钙和镁都是这两种矿物的主要组成,由于没有橄辉石存在,因此榴辉岩中  $CaO$  与玄武质的原岩相比,往往不仅没有减少,反有所增加; $MgO$  的增加也不似第一次分熔那样明显。尽管如此,  $CaO/MgO$  却趋向降低。事实表明:随着温、压的升高,石榴石中镁铝榴石分子趋向增加,而钙铁和钙铝榴石分子趋向减少;使榴辉岩从 C 类→B 类→A 类(如岚山头榴辉岩)(Coleman *et al.*, 1965);虽然榴辉岩中难见斜方辉石,但在单斜辉石中斜顽辉石分子不断增加,而硅灰石和透辉石分子趋向减少。这些现象已被实验(Green and Ringwood 1967, 1975)所证明。总之,去 LILE 作用是导致榴辉岩中  $CaO/MgO$  比值降低,而在富钾钙-碱性煌斑岩中偏高的原因。煌斑岩与榴辉岩之间  $CaO$  和

$MgO$  的互补性表示在图 3. E 中。

#### 3.2.3 $SiO_2$ 的互补性

在板块俯冲过程中,由于  $T, P$  及变质相升高,矿物相也随之由富硅的硅酸盐矿物转变为贫硅的硅酸盐矿物:即由云母→角闪石→辉石→石榴石,矿物比重增大,使  $SiO_2$  不断释放。归纳起来,去硅作用有两种途径:即通过分熔作用形成富硅的中-酸性岩浆以及通过溶解在流体中的迁移作用在地壳中形成硅化岩石、石英脉及硅质沉淀等。由此从俯冲板片中释放出的  $SiO_2$ , 大多侵入地壳或喷出地表,但部分混入地幔。尽管榴辉岩岩中常较普遍存在石英或柯石英,但与玄武质原岩相比,榴辉岩  $SiO_2$  的含量降低至 40%~48%,平均为 46%。从图 3, F 中可以清楚看出:榴辉岩与煌斑岩之间在  $SiO_2$  上的互补性。顺便指出:少数榴辉岩中  $SiO_2$  含量达 52%~54%,这是与强烈的退变质作用有关。

以上表明在板块俯冲过程中,常引起壳-幔物质大规模交换。榴辉岩与富钾的钙-碱性煌斑岩造岩组分中钾与钠、钙与镁、 $SiO_2$  及烧失量的互补性都是它们之间成因联系的重要证据。

#### 3.2.4 REE 的互补性

众所周知,稀土元素具有镧系收缩的特性,从而导致  $La \rightarrow Lu$  半径有规律的缩小。这样在造山和板块俯冲过程中,由于温度和压力的增高所引发的去 LILE 的作用,必然使 LREE 和 HREE 不断分离,并导致榴辉岩中 LREE/HREE 的降低。这具体表现在石榴石和辉石中 LREE 的分配系数明显较 HREE 为小的原因(Hanson, 1980)。LREE 从俯冲板块中释出,必然有一部分混入地幔楔中。富集地幔中 LREE 的富集是其又一重要特征。在胶东地体富钾的钙-碱性煌斑岩与苏-鲁榴辉岩在  $\Sigma REE$  和 LREE/HREE 的形成强烈对照,表现出明显的互补性。榴辉岩中的  $\Sigma REE$  变化在 43.8~81.78, LREE/HREE 前者变化在 2.3~4.4;而煌斑岩的  $\Sigma REE$  高达 185.8~603.7, LREE/HREE 在 6.05~20.84 之间,清楚地表明两者有明显差别。这可以在(LREE/HREE -  $\Sigma REE$ , Nd-Yb 及 Nd-Sm 的座标图 4 的 A, B, C 以及在稀土分配曲线(图 D)上清楚看出。

#### 3.2.5 Au, Rb, Ba 的互补性

众所周知,煌斑岩与金矿有着密切的时空和成因关系(Rock and Grove, 1988; 季海章, 1992, 胡受美等, 1997)。我国最重要的胶东产区中有 10 个煌斑岩样品金的含量变化在  $4.1 \sim 20.5 \times 10^{-9}$  之间,平均达  $8.8 \times 10^{-9}$ 。(化学光谱分析),而 11 个榴辉岩样品的金含量变化在  $0.4 \sim 3.8 \times 10^{-9}$  之间,平均仅为  $1.83 \times 10^{-9}$ (图 5A)。这表明当黄海地体向胶东地体俯冲过程中,大部分金发生活化转移而被释放出来,其中一部分便在富集地幔楔中集中,并造成苏-鲁 UHPMB 中无金矿发育。此与南非和津巴布韦富产金的克拉通四周如林波波和莫桑比克等深变质(达麻粒岩相)的动力变质岩带中无金矿发育相似(Anhaeusser, 1976)。在俯冲的胶东地体中却分布着与其有密切时空和成因联系的由上千

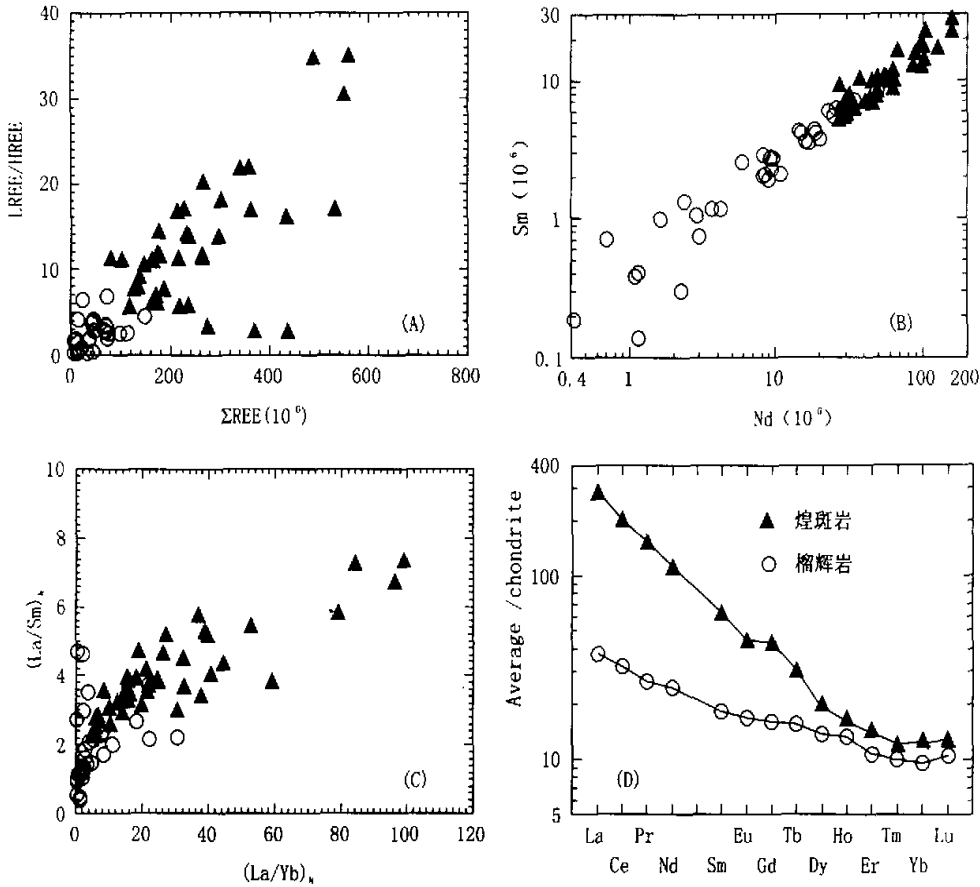


图 4 榴辉岩和富钾钙-碱性煌斑岩的 REE 互补性图解

Fig. 4 Diagram showing complementarity of REE of eclogites and Potash-rich calc-alkali lamprophyres

(A) LREE/HREE vs. ΣREE diagram; (B) Nd-Sm diagram; (C) La/Sm-La/Yb diagram; (D) REE patterns for eclogites and lamprophyres. Plotted data are listed in Appendix 2.

条大小和长度不等的煌斑岩组成的岩墙群(dike swarm)和金矿脉。

Rb 和 Ba 是典型的 LILE, 也是富集地幔的特征性元素。由于在高温高压下的去 LILE 作用, 使榴辉岩中这两种元素的含量明显偏低, 而煌斑岩中却明显偏高, 这种互补性, 可以从图 5B 中清楚看出。

在俯冲带或造山带中榴辉岩与煌斑岩之间在造岩组分和微量元素上的互补性, 充分表明在俯冲过程中壳-幔物质的大规模交换作用, 它们之间在成因上的联系性, 以及富集地幔形成的机理。当然, 组成俯冲板块的其它岩石也会发生同样作用, 这是导致仰冲的胶南地体或火山盆地中发育厚达 2500~10000m 青山组和王氏组橄榄安粗岩及安山-流纹岩系的发育。

#### 4 富钾钙碱性煌斑岩成因的同位素证据

上面已经指出: 由于在俯冲过程中俯冲板块的去 LILE

作用, 从而使地幔楔衍生物富含铷和锶, 并使 Nd/Sm 增高, 这是导致煌斑岩的同位素成份异常的重要原因。

胶东地体部分煌斑岩的<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 为 0.0742~0.0897, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 为 0.511650~0.511892, <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 为 0.1110~0.3052, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 为 0.709402~0.729545(表 1)。因为<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd 和<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 比值较低并且年龄相对较轻(120~110Ma)(李兆龙等, 1993), 因此在煌斑岩脉就位后, 放射性成因<sup>143</sup>Nd 和<sup>87</sup>Sr 积聚的量与它们在岩石中的初始量相比显得并不重要。现今的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值和初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值之间的差别小于 0.0008(在 0.00012~0.00076 之内), 同时现今的 ε<sub>Nd</sub>(0)值和初始 ε<sub>Nd</sub>(T)值之间的差别小于 2σ 单位(变化在 1.51 到 1.87 之间)。因此将现今<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 和 ε<sub>Nd</sub>(0)值投影到<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-ε<sub>Nd</sub>座标图上(图 6), 同时将与胶东地体相邻的鲁西地体中具有相近年龄的煌斑岩和橄榄安粗岩的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素成分(邱栓生等, 1996)也投影在图 6 上, 可以看出, 与大洋玄武岩(Hofmann and White, 1988)和

中国东部新生代大陆玄武岩(刘从强等, 1995; 王俊文等, 1988)相比, 胶东和鲁西煌斑岩和橄榄安粗岩具有低  $\epsilon_{Nd}$  和高  $^{87}Sr/^{86}Sr$  的特征。鲁西富钾火山岩和煌斑岩中含有铬透辉石和铬金云母, 表明这些岩石起源于富集地幔。胶东中部地幔衍生的碳酸盐也具有低  $^{143}Nd/^{144}Nd$  和高  $^{87}Sr/^{86}Sr$  的特征

(储同庆, 1992)。虽然所分析的胶东煌斑岩中有两个样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  异常高; 但大多数样品的变化范围很窄, 与前述岩石化学和地球化学一起, 表明这些富钾的火山岩和煌斑岩起源于因板片俯冲过程中混合有较多地壳物质而产生的富集地幔有成因上的联系。

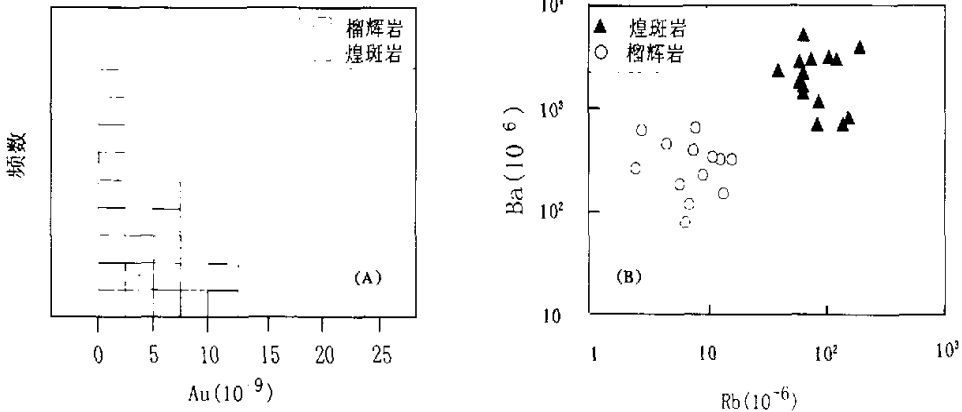


图 5 榴辉岩和煌斑岩之间 Au(A)和 Ba-Rb(B)的互补性

Fig. 5 Complementarity of Au between eclogites and lamprophyres (A) and Ba-Rb diagram (B)

表 1 山东胶北地体中煌斑岩的 Sr-Nd 同位素组成 \*

Table 1 Sr-Nd isotopic compositions of lamprophyres in Jiaodong terrane, Shandong

样品号	T(Ma)	$^{87}Rr/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$(^{87}Sr/^{86}Sr)$	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{147}Nd/^{144}Nd$	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(T)$
L4	120	0.2996	0.713182 ± 30	0.712671	0.0742	0.511781 ± 9	-16.72	-14.85
R1	120	0.1110	0.710805 ± 47	0.710616	0.0796	0.511676 ± 10	-18.77	-16.98
R9	120	0.3052	0.729545 ± 34	0.729024	0.0866	0.511650 ± 14	-19.27	-17.59
X3		0.1507	0.721221 ± 50	0.720964	0.0897	0.511892 ± 16	-14.55	-12.92
D2-X 1	120		0.709641 ± 15			0.511910 ± 8	-14.2	
Js435-5-1	120		0.713085 ± 39			0.512013 ± 14	-12.19	
Sh186-3	120		0.709402 ± 27			0.511705 ± 32	-18.2	
Sh186-4	120		0.711234 ± 55			0.511763 ± 27	-17.07	

\* 由南京大学现代分析中心测定

Zindler and Hart(1986)指出富集地幔的形成可能有以下几种途径: (a)通过俯冲作用使大陆衍生沉积物或地壳物质(Cohen and O' Nions, 1982)或变化了的洋壳(Hofmann and White, 1982)进入地幔造成的; (b)与陆下岩石圈的拆沉作用(delamination)有关(McKenzie and O' Nions, 1983); (c)与地幔交代作用有关(Menzies, 1983)。我们认为所有这些机制都可在聚敛板块构造环境与俯冲过程中发生的(见图 2)。从图 6 可以看出: 在山东富钾的钙-碱性煌斑岩和橄榄安粗岩的  $\epsilon_{Nd}-^{87}Sr/^{86}Sr$  图上的投影与西澳大利亚钾镁煌斑岩类(Fraser *et al.*, 1986/86)的投影点相近, 并分布在

EMI 和 EMII 之间。EMII 具有与大陆地壳或大陆衍生沉积物极强的相似性(Zindler and Hart, 1986)。Menzies(1983)指出: 南非金伯利岩的超镁铁岩高的  $^{87}Sr/^{86}Sr$ (EMII 型)是水交代流体混入的结果, 而 EMI 型可能与起源于深部地幔的富  $CO_2$  的流体作用有关。EMII 型可能与俯冲环境从地壳来源的水参加的交代作用有联系(Cong *et al.*, 1992)。

总之, Rb、Sr、Sm 和 Nd 的同位素组成的资料表明, 与金矿有密切成因联系的煌斑岩、火山岩是与混合有大量地壳物质所形成的富集地幔有成因联系。

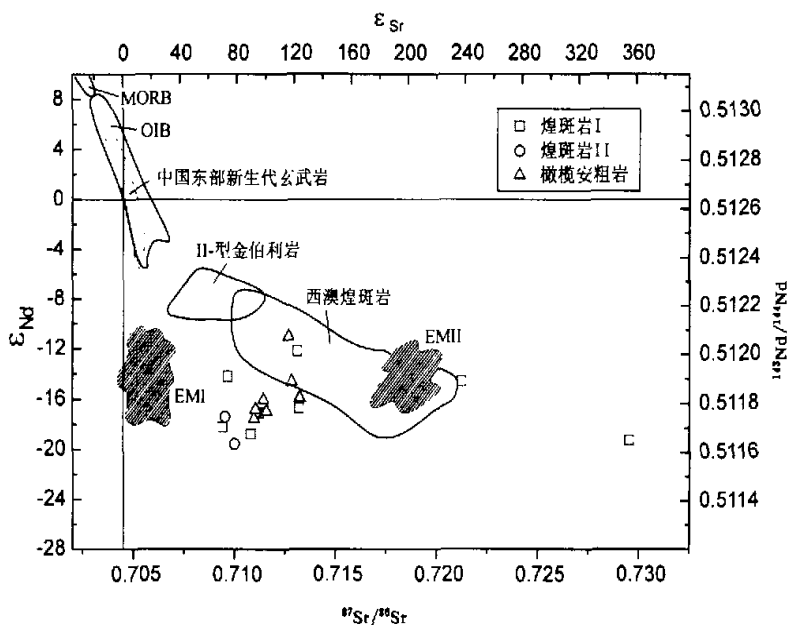


图 6 山东东部煌斑岩(煌斑岩 I)和西部煌斑岩(煌斑岩 II)以及橄辉安粗岩的  $\epsilon_{Nd} - ^{87}Sr/^{86}Sr$  图

Fig. 6  $\epsilon_{Nd}$  vs.  $^{87}Sr/^{86}Sr$  diagram for lamprophyres in east Shandong (lamprophyre I) and western Shandong (lamprophyre II), and shoshonites in western Shandong

The areas are after Feasre *et al.* (1985/1986), Vollmer *et al.* (1984), Lin *et al.* (1995), Smith (1983), Wang *et al.* (1988) and Zindler and Hart (1986).

## 5 结论

从现有资料来看,胶东地体中榴辉岩和花岗岩的形成都具有多旋回特征,但中生代早期(240~200Ma)是最主要形成时代。在海西期后巨大的古太平洋板块与初始欧亚板块强烈挤压俯冲作用下所引发的黄海地体向胶东联合地体的A-型俯冲作用过程中所引起的地壳内部及壳-幔物质交换作用,不仅导致仰冲的胶东地体中广泛发育中生代改造型、同熔型花岗岩类及中-酸性火山岩类,同时形成富含挥发分和LILE的富集地幔楔,在其演化晚期产生与其有成因联系的富含挥发分和LILE的煌斑岩类以及与强烈钾交代作用有联系的焦家式和玲珑式金矿床(卢冰等,1992;胡受奚等,1996,1998;Wang *et al.*, 2000)(在成矿过程中不排斥有壳源物质的参加,包括雨水)。

需要指出:以上这些不同岩石和金矿在形成时代上存在着时差,即从榴辉岩(240~200Ma,以T为主)→改造型花岗岩(T-J为主)→同熔型花岗岩,火山岩及次火山岩(150~130Ma,以K<sub>1</sub>为主)→煌斑岩和金矿(以K<sub>1</sub>晚期为主,125~100Ma)。这种时差正是与构造环境及地幔楔的演化有关;同时表明富钾煌斑岩及金矿主要是与富集地幔的残余相更有密切的成因和时,空上的联系(图2)。

同时需要指出:第三纪由于构造环境变化和俯冲带的

东移(移至日本-琉球-台湾-菲律宾一线),使中国东部大陆处于弧后扩张环境,从而导致与俯冲机制有关的榴辉岩、中-酸性岩类及其有关的金矿趋向消亡(Hu *et al.*, 1994),而广泛发育大陆裂谷型碱性玄武岩。

顺便指出:在苏-鲁榴辉岩带中榴辉岩所占体积仅约为4%(从柏林口头所述),同时许多榴辉岩体多呈较小的透镜体夹在各类变质岩中,这很可能是由于大多数榴辉岩因比重大而滞留在地幔中,并未折返回地表。

**鸣谢** 感谢从柏林教授和程振香工程师等的协助和提供资料。

## References

- Anhaeusser CR. 1976. Archean metallogeny in Southern Africa. *Econ. Geol.* 71(1):1643
- Becker H Altherr. 1992. Evidence from ultra-high-pressure marbles for recycling of sediments into the mantle. *Nature*, 358(27): 745-748
- Chu TQ. 1992. The characteristics of apatite from carbonatite in Shandong and its significance. *Mineralogy and Petrology*, 12 (3):5-12 (in Chinese with English abstract)
- Cohen R S and O' Nions R K. 1982. Identification of recycled continental material in the mantle from Sr, Nd and Pb isotope



- investigation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 61:73-84
- Coleman R G, Lee DE, Beatty LB and Brannock WW. 1965. Eclogites and eclogites: Their differences and similarities. *Amer. Bull.*, 76:483-508
- Coney PJ. 1990. Terranes, Tectonic and Pacific Rim. Terrane analysis and the Pacific Rim. Published by the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Houston, Texas, U. S. A.
- Cong B, Zhang R, Li S and Zhai M. 1992. Preliminary study of isotope chronology of eclogites in northern Jiangsu and eastern Shandong Provinces, China. In: *Exploration of volcanoes and rocks in Japan, China and Antarctica; Commemorative paper for Professor Yukio Matsumoto*. 411-417
- Enami M and Wang Q. 1990. Quartz pseudomorph after coesite in eclogite from Shandong province, east China. *Am. Mineral.*, 75:381-386
- Fraser KJ, Hawkesworth CJ, Erlank AJ, Mitchell RH, Scott-Smith. 1985/86. Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86: 57-70
- Frey FA. 1980. Applications of neutron activation analysis in mineralogy and petrology. *Mineralogical Association of Canada*, 5:167-210
- Fyfe WS, Price NJ and Thompson AB. 1978. *Fluids in the Earth's Crust*. Elsevier Scientific Publishing Company
- Green DH and Ringwood AE. 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological application. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31:767-833
- Han Zongzhu. 1994. Geochemistry of eclogites from the Lu-Su district. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 24(1):102-112
- Han Z, Zhao G, Hu S, Zhao Y and Xu B. 1994. The spatial distribution, rock type, geology evolution, pressure-temperature-time path and tectonic setting of eclogites in east China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 30(1):86-97
- Hanson GN. 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous system. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 8:371-406
- Hofmann AW and White W M. 1982. Mantle plumes from ancient oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 57:421-436
- Hu Shouxi, Wang H, Wang D and Zhang J. 1998. *Geology and Geochemistry of Gold Deposits in Eastern China*. Beijing: Science Press, 343p
- Hu Shouxi, Zhao Y, Guo JC, Xu B. 1994. Evolution and development of tectonic and magmatism at the active continental margin of the east China During Mesozoic and Cenozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 10:370-381
- Hu Shouxi, Zhao Y, Xu B, Lu B, Ji H, Ye Y. 1997. Evidence for the Jiangsu-Shandong ultra- high-pressure metamorphic belt returns from the upper mantle to the Earth surface in Mesozoic-Cenozoic. *Acta Geologica Sinica*, 71(3):245-253
- Hu Shouxi, Zhao Y, Xu J and Ye Y. 1997. *Geology of Gold Deposits in North China Platform*. Beijing: Science Press, 220p
- Huang Zhilong, Wang Liankui, Zhu Chengming. 1996. A study on rare earth elements and the genesis of lamprophyres in Laowangzhai gold deposit area, Yunnan. *Geological Journal of Universities*, 2(1):100-111
- Hurajima T, Ishiwata A, Cong BL, Zhang RY, Banno S, Nozaka T. 1990. Coesite from Mengzhong eclogite at Dounghai county, north Jiangsu province, China. *Mineral. Mag.*, 54:579-583
- Ji H, Zhao Y, Lu B. 1992. Study on the relationships of lamprophyres and gold deposits in Jiaodong area. *Geology and Exploration*, 11(2):15-18
- Ji HZ. 1995. *Geology, geochemistry and genesis of three typical gold deposits in the Shandong peninsula, China*. Doctor's thesis, Tokyo University
- Khitrov L, Pugin VA, Slutsky AB. 1972. Melting and crystallization of quartz tholeiite at high pressure and evolution of magmas under abyssal condition. *Geochemistry (USSR)*, (4):428-436
- Li S-G, Jagoutz E, Xiao Y-L, Ge N-J and Chen Y Z. 1996. Chronology of ultrahigh pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Sulu terrane: I. Sm-Nd. *Science in China (Series D)*, 39(6):597-609
- Liu C-Q, Xie G-H. 1995. Geochemistry of Cenozoic basalts in East China - (II) Sr, Nd and Ce isotope compositions. *Geochimica*, 24(3):203-213 (in Chinese)
- Lu Bing, Hu Shouxi, Zhao Ye and Xu Bing. 1992. Wall rock alteration and metallogenic model of alkali metasomatism for gold mineralizations in the Jiaobei terrane. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 4(3):12-22
- McKenzie D and O' Nions RK. 1983. Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, 285:621-624
- Menzies M. 1983. Mantle ultramafic xenoliths in alkaline magmas: evidence for mantle heterogeneity modified by magmatic activity. In: Hawkesworth CJ, Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, 92-110. Cheshire, Engl: Shiva, 272
- Mitchell AHG and Garson MS. 1981. *Mineral deposits and global tectonic setting*. Academic Press INC. London, 405p
- Qiu J, Wang D, Zeng J and Brent IAM. 1997. Study on trace elements and Nd-Sr isotopic geochemistry of Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong province. *Geological Journal of China Universities*, 3(1):384-395
- Ringwood AE. 1975. *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. McGraw- Hill Inc.
- Ringwood AE and Green. 1966. An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical consequences Tectonophysics, 383-427
- Rock NMS and Grove DL. 1988. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits? *Geology*,

- 16:538-541
- Rock NMS. 1991. *Lamprophyres*. Thomson Litho Ltd., East Kilbride, Glasgow, 1-132
- Rosenbusch H. 1987. *Mikroskopische physiographic*. 3rd. Edn. Schweizerbart, Stuttgart
- Ru Y and Juhn G Liou. 1998. Dual origin of garnet peridotites of Dabai-Su-Lu UHP terrane, eastern-central China. *Episodes*, 21(4):229-233
- Smith CB. 1983. Pb, Sr and Nd isotopic evidence for sources of southern African Cretaceous kimberlites. *Nature*, 304:51-5426
- Sun J, Hu S, Ling H. 2000. Study on geochemistry of high potassium and potassium dike rocks and its related to the subduction and crust-mantle reaction in Jiaodong gold area. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3):401-412
- Sun F, Shi Z and Feng B. 1995. *Gold Ore Geology, Lithogenesis and Metallogenesis Related to the Differentiation of Mantle-derived C-H-O Fluids in Jiaodong Peninsula, Eastern China*. Changchun: Jilin People Press
- Vinogradov AP. 1959. On the origin of the Earth's crust matter. *Geochemistry (USSR)* 11-29
- Vollmer PO, Schilling J-G, Kingsley RH and Waggoner DG. 1984. Nd and Sr isotopes in ultrapotassic volcanic rocks from the Leucite Hills, Wyoming. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 87:359-368
- Wang Yurong and Hu Shouxi. 2000. Experimental study of gold activation-transportation in the process of potash metasomatism-alteration-North China platform gold deposit taken as an example. *Science in China (Series D)*, 44(1):64-76
- Wang J W, Xie G-H, Tatsumoto M and Basu AR. 1988. Sr, Nd and Pb isotope geochemistry and magmatic evolution of potassic volcanic rocks in Wudalianchi, North China. *Geochimica*, (4): 821-825 (in Chinese)
- Wiley TJ. 1990. *Field trip in Shandong province, Eastern China. Terrane analysis and the Pacific Rim*. Published by the Circum-Pacific Council for energy and mineral resources. Houston, Texas, U.S.A.
- Xiaomin Wang, JG Liou, Shigenori Maruyama. 1992. Coesite-bearing eclogites from the Dabai Mountains, Central China; petrogenesis, P-T paths, and implications for regional tectonics. *Journal of Geology*. 100:231-250
- Xu Huiji *et al.* 1978 Eclogites of Junan-Rizhao in Jiaodong. Report Xu S-T, Okay AI, Ji S-Y, Sengon AMG, Su W, Liu Y-C, Jiang L-L. 1992. Diamond from the Dabai Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256, 80-82
- Yang Jianjun. 1991. Eclogites, garnet pyroxenites and related ultrabasics in Shandong and north Jiangsu of East China. Beijing: Geological Press
- Ye Kai and Xu Ping. 1992. Petrogenesis of eclogites and related peridotitic rocks in Datuan area of Rongcheng county, Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1):27-39
- Zai Cun. 1981. *Study on genetic model of the lamprophyre*. *Geological Review*, 27(6):528
- Zhang X-D *et al.* 1992. The characteristics of eclogites in Ju-Nan county, eastern Shandong. *Acta Petrologica Sinica*. 8(1):40-49
- Zhang Zeming, Xu Zhiqin and Xu Hufen. 2000. Metamorphism of the eclogites from the ZK703 drill hole in Donghai South Sulu ultrahigh-pressure belt, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 74(4):321-333
- Zhang Y-K. 1997. Donghai, north Jiangsu: one of the best site options for the first continental scientific drilling in China. *Jiangsu Geology (China)* 21(3): 129-137 (in Chinese)
- Zheng Y-F, Fu Bing and Li S-G. 1996. Extreme  $^{18}\text{O}$  depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in the East China. *Eur. J. Mineral.*, 8:317-323
- Zindler A and Hart S. 1986. *Chemical Geodynamics*. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14:493-571

#### 附中文参考文献

- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律. 北京: 地震出版社.
- 储同庆. 1992. 山东碳酸岩磷灰石的特征及其研究意义. *矿物岩石*, 12(3):5-12 从柏林, 张儒媛, 李曙光, 王松山, 陈秋媛. 1991. 中国苏北-胶东南高压变质带的同位素的年代学证据. 中国科学院地质研究所岩石圈构造演化开放实验室年报. 北京: 中国科学技术出版社, 68-72
- 樊金涛. 1994. 苏北东海榴辉岩, 斜长角闪岩原岩及其成因初步研究. *江苏地质*, 18(3/4):144-153
- 韩宗珠, 胡受奚, 赵广涛, 赵懿英. 1994. 中国东部榴辉岩的岩石学特征及其 PT<sub>t</sub> 轨迹研究. *南京大学学报*, 30(1):86-97
- 韩宗珠. 1994. 苏-鲁地区榴辉岩的地球化学. *海洋地质大学学报*, 24(1):102-112
- 胡受奚, 赵懿英, 胡志宏, 郭继春, 徐兵. 1994. 中国东部中、新生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展. *岩石学报*, 10(4):378-381
- 胡受奚, 赵懿英, 徐金方, 叶瑛. 1997. 华北地台金成矿规律以山东和东北缘为例. 北京: 科学出版社
- 胡受奚, 赵懿英, 叶瑛等. 1997. 苏-鲁超高压变质带从地幔返回地表问题的证据. *地质学报*, 71(3):245-253
- 胡受奚, 赵懿英, 周顺之, 叶瑛等. 2000. 华北地台金成矿规律. *南京大学学报(自然科学)*, 36(2):133-139
- 黄智龙, 王联魁, 朱成明. 1996. 云南老王寨金矿区煌斑岩的成因, 稀土元素研究. *高校地质学报*, 2(1):100-111
- 季海章, 赵乙英. 1992. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探. *地质与勘探*, (1):14-21
- 李兆龙, 杨敏之. 1993. *胶东金矿床地质地球化学*. 天津: 天津科学技术出版社
- 刘丛强, 谢广震, 增田彰正. 1995. 中国东部新生代玄武岩的地球化学. *地球化学*, 24(3):203-213
- 卢冰, 胡受奚, 赵懿英等. 1992. 胶北金矿和围岩蚀变及碱交代成矿模式. *南京大学学报(地科版)*, (3):11-22

- 孙丰月、石准立、冯本智. 1995. 胶东金矿地质及幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿. 长春: 吉林人民出版社
- 孙景贵, 胡受美, 凌洪飞, 叶葵. 2000. 胶西北两类金矿的高钾-钾质脉元素地球化学与成岩作用研究. 地球化学, 29(2): 143-152
- 王俊文, 解广豪, Tatsumoto T, Basu AR. 1988. 五大连池钾质火山岩的同位素地球化学及岩浆的化学演化. 地球化学, 73(4): 310-317
- 杨建军. 1991. 苏-鲁榴辉岩及有关超基性岩. 北京: 地质出版社
- 叶凯, 徐平. 1992. 山东荣成大麻榴辉岩成因岩石学研究. 岩石学报, 8(1): 27-39
- 张希道, 陈允福, 王桂枝. 1992. 鲁东南莒南一带榴辉岩的特征. 岩石学报, 8(1): 40-48
- 张永康. 1997. 江苏东海-中国第一口大陆科学钻探的最佳选区之一. 江苏地质, 21(3): 128-137
- 张泽明, 许志琴, 徐慧芬. 1999. 南苏-鲁超高压变质岩带 703 孔榴辉岩的变质作用. 地质学报, 73: 321-341

## · 动态与简讯 ·

### 埃达克质岩(adakite-like)及其地球动力学意义学术研讨会 (第一号通知)

研讨会由国家自然科学基金委员会地学部、中国科学院资环局、“973”计划“大规模成矿作用与大型集矿区预测”项目组、国家攀登计划“与寻找超大型矿床有关的基础研究”项目组、中国科学院广州地球化学研究所、中国地质大学(北京)、中国地质大学(武汉)、北京大学、吉林大学、中国科学院地质与地球物理研究所等共同发起和主办,由中国科学院地质与地球物理研究所和中国地质大学(北京)承办。

**研讨会组织委员成员**(以姓氏拼音为序):

白志民、柴育成、邓军、范蔚茗、郭进义、韩宝福、胡瑞忠、刘伟、马昌前、毛景文、吴福元、许保良、许继峰、杨坤光、姚玉鹏、翟明国、张金东、张旗、赵振华

**秘书长:** 刘伟

**副秘书长:** 白志民

**会议主题:** 交流 adakite-like 的研究成果和不同认识; 研讨 adakite-like 的地球动力学意义, 近期目标, 今后研究方向及合作事宜。

**会议地点:** 北京 中国地质大学

**时间:** 2001 年 12 月(具体时间见第 2 号通知)

**论文集集:** 会议将出版会议论文摘要集, 论文摘要集为内部刊物, 提交摘要时间截止于 11 月底。

**要求:** A4 纸 1-4 页, 论文按《地质科学》的格式, 文后附英文题目、作者和单位。

**摘要可用电子邮件或信件寄交:** E-mail: jinhui\_yang@hotmail.com

**地址:** 北京德外中科院地质与地球物理研究所 杨进辉 收(邮编: 100029)

**经费:** 与会者自行解决, 会议费 200 元

**回执请寄:** 中国科学院地质与地球物理研究所 100101 刘伟 收

**联系人:** 刘伟 中国科学院地质与地球物理研究所 100101

**电话:** 010-64889078; E-mail: liuw@mail.c-geos.ac.cn

中国科学院地质与地球物理研究所(代章)

2001 年 6 月 21 日