

苏北高压—超高压变质带中成矿作用

余金杰¹, 王平安², 黄建平³, 王 辉³, 李晓峰¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

3. 江苏省地质调查研究院 江苏南京 210018

摘要: 以苏北地区为例, 在分析区域岩石学、构造地质学和成矿学资料的基础上, 结合江苏省地质调查院和江苏省地质矿产局第六地质大队有关区域地质调查和矿产资料, 初步建立了 2 个成矿系列, 即与超高压变质作用有关的金刚石—金红石—蛇纹石—蓝晶石—大理石成矿系列和与高压变质作用有关的磷—水晶—蓝晶石成矿系列。前者与印支期巨量物质超深俯冲有关, 后者与稍晚发生的高压—超高压变质带的折返事件有关。本区可能存在燕山期金、银多金属成矿系列, 在下一步地质找矿时值得注意。

关键词: 高压—超高压变质作用; 金属和非金属矿; 成矿系列; 巨量物质超深俯冲; 苏北。

中图分类号: P611.3

文章编号: 1000-2383(2006)04-0520-07

收稿日期: 2006-04-15

Mineralization of High Pressure and Ultrahigh Pressure Metamorphic Belt in Northern Jiangsu Province

YU Jin jie¹, WANG Ping an², HUANG Jian ping³, WANG Hui³, LI Xiao feng¹

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*

3. *Jiangsu Geological Survey, Nanjing 210018, China*

Abstract: Many deposits occur in the high pressure and ultrahigh pressure belt, northern Jiangsu Province, China. Diamond, rutile, kyanite, and marble metallogenic series and phosphorus, quartz, and kyanite metallogenic series are presented on the basis of regional petrology, structural geology, metallogeny and mineralization age in northern Jiangsu Province. The former was formed when a huge amount of material from the Yangtze plate was subducted northwards beneath the North China plate. The latter is associated with the exhumation of the high pressure and ultrahigh pressure belt. The paper also discusses the existence of the Yanshanian gold, silver, and polymetallic metallogenic series. Its formation is related to the Yanshanian post exhumation extension event.

Key words: high pressure and ultrahigh pressure metamorphism; metal and nonmetal deposits; metallogenic series; ultra deep subduction of a huge amount of material; northern Jiangsu Province.

超高压变质作用是指地温梯度小于 10 °C/km 条件下发生的高于“石英=柯石英”相变线压力 ($p > 28 \times 10^5$ kPa, $T = 800$ °C) 的变质作用(从柏林和王清晨, 1997)。最近 20 年来, 大别—苏鲁超高压变质带的超高压变质作用的标志一直是国内外学者研究的主题之一。研究表明, 在榴辉岩和超镁铁质岩中发现柯石英和金刚石。另外, 苏鲁超高压变质带各

种类型岩石内各种出溶结构和锆石中超高压矿物的研究表明在大别—苏鲁超高压变质带的形成过程中, 巨量物质发生了超深俯冲。在巨量物质发生超深俯冲及后期折返过程中, 发生了什么样的成矿作用? 形成了什么样的成矿系列? 这是本文关注的一个重要问题。建立和研究与高压—超高压变质作用有关的成矿系列, 对认识榴辉岩折返机理和大陆深部成

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2003CB716507)。

作者简介: 余金杰(1966—), 男, 博士, 研究员, 从事矿产资源调查与评价工作。E-mail: yjchina@sina.com

矿地球动力学过程有重要的意义. 本文以苏北地区为例, 在分析区域岩石学、构造地质学和成矿学资料的基础上, 结合江苏省地质调查院 1999 年和 2002 年有关区域地质调查报告以及江苏省地质矿产局第六地质大队 1991 年东海县毛北一新沂市蒋马金红石矿普查地质报告, 初步建立了 2 个成矿系列, 即印支期与超高压变质作用有关的金刚石 - 金红石 - 蛇纹石 - 蓝晶石 - 大理石成矿系列和稍晚进行的与高压变质作用有关的磷块岩 - 水晶 - 蓝晶石成矿系列. 本文最后探讨了本区可能存在燕山期金、银多金属成矿系列, 在下一步地质找矿时对此应引起重视.

1 区域地质背景

苏鲁高压 - 超高压变质带呈 N E S W 走向, 宽 180 km, 长 750 km, 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(许志琴等, 2003). 区域构造格架由北面的超高压变质带和南面的高压变质带组成, 二者之间的界线为韧性剪切带. 北面的超高压变质带由北西向南东, 依次划分为临沭构造岩片(I)、许沟 - 羽山 - 夹山构造岩片(II)、双店 - 磨山 - 城头构造岩片(III)、踢球山 - 阿湖 - 牛山 - 青龙山构造岩片(IV)和武强山 - 房山 - 安峰山构造岩片(V, 潘明宝等, 2002; 图 1). 超高压变质带岩主要由 4 种不同原岩的岩石类型组成, 即表壳岩、花岗质侵入岩、基性 - 超基性侵入岩和少量的地幔橄橄榄岩(张泽明等, 2002). 表壳岩主要由沉积 - 中酸性 - 基性火山岩系组成, 它们的变质产物由副片麻岩、片岩、石英岩和榴辉岩组成. 花岗质侵入岩是造山带核部大面积分布的长英质片麻岩的主要原岩. 基性 - 超基性侵入岩主要是榴辉岩和少量夹于其中的石榴石橄橄榄岩的原岩. 地幔橄橄榄岩由石榴石橄橄榄岩、纯橄橄榄岩和辉石橄橄榄岩组成, 它们来自俯冲带之上的地幔楔状体, 具典型地幔岩的岩石学和地球化学特征(张泽明等, 2002; Zhang *et al.*, 2005). 高压变质带位于超高压

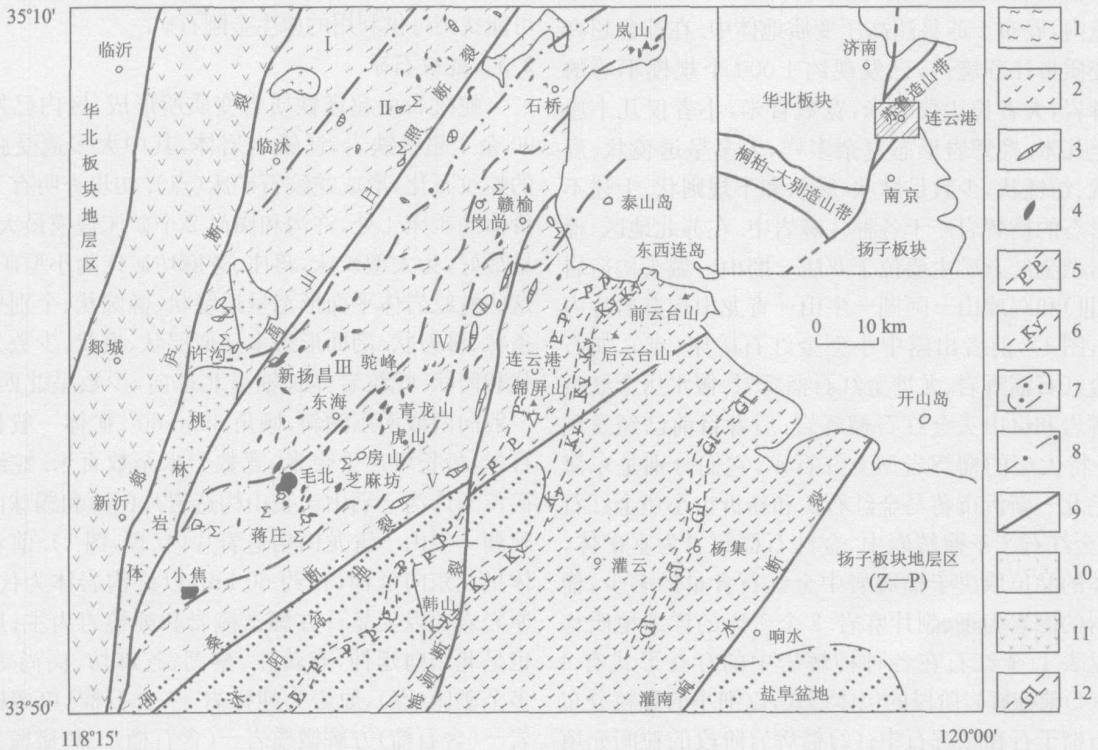


图 1 苏北地区地质构造略图(据潘明宝等, 2002, 略有修改)

Fig.1 Sketch map showing geology and structure of northern Jiangsu Province

- 1. 超高压变质带; 2. 高压变质带; 3. 大理岩; 4. 榴辉岩; 5. 石榴绿帘石变质带; 6. 蓝晶石黄玉变质带; 7. 中生代断陷盆地; 8. 构造岩片界线; 9. 断层
- 10. 中生代花岗岩; 11. 中生代基性火山岩; 12. 蓝闪黑硬绿泥石变质带; ∑. 蛇纹岩或超基性岩; ●. 大型金红石矿; ◇. 蓝晶石矿; ▽. 磷矿

变质带的南侧,主要出露于连云港、灌云和沐阳等地,也见于杨集和盱眙管镇的钻孔中。出露的岩石片理总体呈 NE-NNE 向,与区域构造线方向一致。高压变质带的原岩由中元古代锦屏岩群和云台岩群组成,岩石类型复杂,常见的岩石类型包括白云钠长片岩、绿泥绿帘钠长片岩、石榴绿帘白云钠长片岩、石榴二云钠长片岩、白云石英片岩和蓝晶石石英(片)岩等(于津海等,2001)。

2 苏北地区的金属和非金属矿床

苏北地区超高压变质带各种类型的片麻岩中产出有大量榴辉岩、大理岩和超镁铁质岩,各自形成金红石矿或蓝晶矿床、大理石矿和蛇纹石矿,在榴辉岩折返阶段,形成东海水晶矿。在高压变质带中,锦屏岩群产有海州式磷矿、云台岩群中产有韩山蓝晶石矿。上述金属和非金属矿床在该区均具有开发前景,其中蛇纹石矿和大理石矿当地均有小规模开采。

2.1 榴辉岩型金红石矿和金红石砂矿

榴辉岩型金红石矿位于新沂市、东海县和赣榆县境内,展布于苏鲁超高压变质体中。在苏鲁超高压变质带江苏境内,已发现约 1 000 个规模不等的榴辉岩,大者长达数千米,宽数百米,小者仅几十厘米至几米。榴辉岩形态复杂多样,大多呈透镜状、扁豆状、纺锤状,少数呈脉状、肠状和不规则状。上述不同形态的榴辉岩产于各种片麻岩中。在苏北地区,榴辉岩型金红石矿主要位于双店-磨山-城头构造岩片(III)和踢球山-阿湖-牛山-青龙山构造岩片内(IV,图 1),前者出露中小型金红石矿床(点),如石桥金红石榴辉岩、尤塘金红石榴辉岩、偃水房金红石榴辉岩和岚山头金红石榴辉岩;后者目前已经发现 2 个特大型的榴辉岩型金红石矿,它们分别是东海县毛北-新沂市蒋马金红石矿和新沂市小焦金红石矿,金红石产于榴辉岩中,金红石榴辉岩为富矿体,矿体的品位取决于榴辉岩中金红石含量的多少,榴辉岩的围岩为正、副片麻岩。2 个矿床的详细地质特征见表 1。金红石在各种榴辉岩中的存在形式有 4 种:(1)前榴辉岩阶段的包体形式,以细小的颗粒分布于石榴子石和绿辉石中;(2)榴辉岩阶段的粒间充填形式,以大小不等的颗粒分布在石榴子石和绿辉石矿物粒间,这种形式的金红石数量最多,也最为重要;(3)退变质阶段形成的蚀变残余形式,在后成合晶中所形成的金红石往往呈蚀变残留状,金红石边缘常常

有钛铁矿和榍石退变边;(4)热液充填式金红石,呈脉状、串珠状或巨晶状充填在矿石原生节理、裂隙中,金红石自形程度较高,大多为后期热液作用所形成。

苏北地区已查明金红石砂矿 11 处,金红石砂矿是原生矿经风化剥蚀、运移后富集成矿,可分为残坡积型、坡冲积型和风化壳型 3 种类型,以坡冲积型工业价值最好,多形成于距矿源 5~10 km 左右的河谷下游地带。

2.2 金刚石矿

苏北原生金刚石矿包括榴辉岩型和橄榄岩型 2 类。苏北目前发现的含金金刚石榴辉岩赋存于花岗片麻岩中,其金刚石颗粒细小,粒径约 0.02~0.06 mm(樊金涛等,1998),无工业利用价值。尽管这样,苏北地区有可能找到可供利用的榴辉岩型原生金刚石矿。

橄榄岩型金刚石矿赋存于石榴二辉橄榄岩中,已在芝麻坊石榴二辉橄榄岩及其附近第四系中先后发现 4 颗金刚石,最大粒径达 2.25 mm×1.90 mm×1.35 mm。芝麻坊石榴二辉橄榄岩中石榴石为含铬镁铝榴石,Cr₂O₃ 的含量约 1.63%~3.05%,与金伯利岩中含铬镁铝榴石成分相当。本区超镁铁质岩同样有可能找到可供利用的原生金刚石矿。

2.3 蛇纹石矿

蛇纹石由超镁铁质岩变质所形成,区内已发现 90 余个超镁铁岩、镁铁岩岩体,其中大多遭受强烈的蛇纹石化,形成蛇纹石矿床(点)。初步查明有工业价值的矿床 4 处,许沟和岗尚 2 个矿床规模最大,质量最好,为大型矿床,蒋庄、芝麻坊矿床为小型矿床。这些蛇纹岩体平面形态呈透镜状、椭圆状、个别呈长条状、镰刀状。剖面形态多呈似层状、楔状,少数为舌状和筒状。蛇纹岩体长轴呈北东向,少数呈北西向,一般向南或南东倾斜,倾角 35°~80°。矿体一般长数百米,最长可达千余米,宽数十米至数百米。蛇纹石矿位于许沟-羽山-夹山构造岩片(II)和踢球山-阿湖-牛山-青龙山构造岩片内(IV,图 1)。前者总体呈北东向延伸,长约 60 km,以许沟岩体为代表,原岩岩性以尖晶石方辉橄榄岩和纯橄岩为主;后者也呈北东向延伸,有蒋庄、蔡湖、芝麻坊、岗尚等 20 多个矿床(点),原岩为纯橄岩-(含石榴)单辉橄榄岩-(含石榴)方辉橄榄岩-(含石榴)二辉橄榄岩等(李天福等,2003;陈世忠等,2005;杨经绥等,2005)。

蛇纹石矿矿石类型可分为块状蛇纹岩、聚斑状镁铝榴石蛇纹岩、聚斑状绿泥石蛇纹岩、似片麻状蛇纹岩 4 种,矿石含 MgO 36% 以上, CaO 小于 1%,

表 1 苏北地区大型榴辉岩型金红石矿的地质特征

Table 1 Geological characteristics of the large eclogite hosted rutile deposits in northern Jiangsu Province

	毛北 - 蒋马金红石矿	小焦金红石矿
矿体形态产状规模	在榴辉岩中共圈出 8 条矿体, 其编号为 Ru ₁ 、Ru ₂ 、Ru ₃ 、Ru ₄ 、Ru ₅ 、Ru ₆ 、Ru ₇ 、Ru ₈ 。矿体形态、规模和产状受榴辉岩体控制。榴辉岩体受构造变形改造强烈, 导致榴辉岩挤压拉长呈长条状、透镜状, 构成反“S”形。榴辉岩中矿体也形成相应形态。8 条矿体呈似层状或透镜状, 前 5 条矿体规模较大, 沿走向长度约 1 830~2 820 m, 矿体沿走向、倾向均较稳定, 但也有变化, 矿体平均厚度 6.99~25.47 m, 由于矿体受构造变形影响成反“S”形展布, 局部矿体产状变化较大, 总体走向北西 - 北北西, 倾角陡立, 约 60°~70°。后 3 条矿体规模相对较小, Ru ₆ 矿体呈似层状展布, 长 1 210 m, 走向 10°~30°, 倾向均为东倾, 倾角 65°~83°, 平均厚度 3.86 m。Ru ₇ 矿体呈透镜状, 长约 300 m, 走向 230°, 倾向东, 倾角 55°~82°, 厚 0.71~57.48 m。Ru ₈ 矿体呈透镜状, 长约 610 m, 走向 20°, 倾向东, 倾角 50°~83°, 平均厚 37.04 m	小焦金红石矿共圈定 4 个矿体, 矿体呈近于平卧的“S”形产于榴辉岩中, 总体呈 NW SE 展布, 倾向 NNE, 倾角 35°~62°。矿体延长数百米, 厚度 0.62~31.92 m, 金红石 TiO ₂ 平均品位 1.53%~4.34%, 目前控制到 88.83 m 仍稳定延深。金红石矿体产于榴辉岩中, 矿体与榴辉岩之间无明显界线。矿体形态以似层状、板块状为主, 另见少量透镜状、楔状, 矿体的规模大小不一, 平均品位变化较大。小焦金红石矿区的 XRU ₂ 矿体, 5 线控制矿体厚度 50.86 m, 平均品位 3.58%, 在 66.67 m 深度上仍稳定延伸, 见矿厚度 34.77 m, 平均品位 3.51%, 是目前发现的连续宽度最大、品位最高的工业矿体
矿石成分结构构造	矿石中含钛矿物主要为金红石, 其次为钛铁矿和钛磁铁矿。金红石在矿石中含量约 1%~6%, 呈半自形 - 自形柱粒状, 少量呈不规则状, 颜色为暗红、棕红、褐红、棕黄、黄褐和赤黑色, 自然粒径一般为 0.076~0.3 mm, 少部分为 0.7~2.0 mm。组成矿石的脉石矿物主要为石榴子石和绿辉石, 含量约 70%~80%, 其他脉石矿物包括多硅白云母、石英、黝帘石、蓝晶石、磷灰石、黄铁矿、绿帘石、榍石和锆石等。据矿物共生组合和矿物相互嵌布特征, 矿石结构主要有半自形 - 自形柱粒状变晶结构、半自形 - 自形鳞片粒状变晶结构 2 种, 前者见于榴辉岩型和石英榴辉岩型矿石中, 后者见于云母榴辉岩型矿石中。矿石构造可分为浸染状构造、脉状构造和串珠状构造, 以前者为主, 后二者较为少见	矿石中含钛矿物主要为金红石, 其次为钛铁矿和钛磁铁矿, 另有微量的锐钛矿和次生的白钛矿。金红石在矿石中含量约 1%~5.85%, 呈半自形 - 自形柱 - 他形粒状, 少量呈不规则脉状, 颜色为暗红、棕红、褐红、棕黄、黄褐和赤黑色, 自然粒径一般为 0.08~0.5 mm, 少部分为 0.7~2.0 mm。脉石矿物主要为石榴子石和绿辉石, 含量约 90%, 其他脉石矿物包括多硅白云母、黑云母、石英、黝帘石、蓝晶石、磷灰石、黄铁矿、绿帘石、榍石和锆石等。矿石结构主要有半自形柱粒状变晶结构和半自形鳞片粒状变晶结构。矿石构造以浸染状为主, 另有少量串珠状、脉状构造
自然类型	主要矿石类型为榴辉岩型金红石矿和云母榴辉岩型金红石矿, 以前者为主。另偶见石英榴辉岩型、钛铁矿榴辉岩型、黝帘石榴辉岩型、蓝晶石榴辉岩型、石榴子石型和绿辉石型 6 种, 多夹于前述其他 2 种类型矿石中, 各种矿石类型之间显示渐变过渡关系	可分为块状榴辉岩型金红石矿(占 78.90%)和片麻状榴辉岩型金红石矿(占 21.10%) 2 种主要矿石类型, 二者之间显示渐变过渡关系, 横向上前者分布在矿体的中间, 后者多数分布在矿体的边缘
蚀变	矿石蚀变主要为次闪石化、其次为白钛矿化、绿帘石化、斜黝帘石化、绿泥石化, 多分布于矿体边部、矿物颗粒间隙或节理裂隙附近	

SiO₂< 40%, Al₂O₃< 1%, 符合制钙镁磷肥和耐火材料的工业要求, 蛇纹石矿已作为炼钢熔剂和钙镁磷肥原料开采使用。

2.4 大理石矿

大理石矿呈夹层展布于各种片麻岩之中, 如东海县三铺、代相、罗庄一带片麻岩中夹 3 层白云石大理岩, 延长 600 m, 总厚 80 m; 东海县黑豆涧白云石大理岩延长约 1 000 m, 厚约 100 m; 赣榆县三清阁大理石呈似层状、透镜状, 有二层矿体, 延长分别为 950 m 和 730 m。矿石自然类型主要为白云石大理岩, 含少量阳起石大理岩。白云石大理岩主要由方解石和白云石组成, 含少量透闪石、石英、滑石和透辉石。阳起石大理岩以方解石和白云石为主, 次为阳起石, 含少量透闪石和滑石。

大理石呈纯白、白、灰白、浅灰等色, 中粗粒变晶结构, 块状、条带状构造, 色泽美观, 品种优良, 岩石坚硬, 其抗压、抗拉、抗剪强度均较高, 有关指标满足大理石板材高级建筑装饰的工业要求。

2.5 蓝晶石矿

在超高压变质带, 蓝晶石矿多为矿点, 矿石类型

为蓝晶石榴辉岩和蓝晶石石英(片)岩, 前者以新扬昌和岚山头蓝晶石矿点为代表, 后者属表壳岩石, 矿点甚多, 如虎山矿点, 目前的资料未显示出较大规模成矿。

在高压变质带, 含矿地层为中元古代云台群蓝晶石石英岩和蓝晶石白云母片岩, 由韩山、弧山、石灯 4 处组成一矿带, 呈北东向展布, 长约 10 km。韩山蓝晶石矿为一中型矿床, 矿体呈透镜状、薄层状产于云台群中部, 矿体走向 40°~60°, 倾向南东, 倾角 25°~40°, 长 595~1 415 m, 平均厚 2.17~9.16 m, 最大厚度 23.08 m, 平均延深 257~435 m, 最大延深 650 m, 并有分叉复合现象。含矿岩系岩性为白云母片岩、白云石英片岩、蓝晶石石英岩和蓝晶石白云母片岩, 其中蓝晶石石英岩和蓝晶石白云母片岩构成矿体。矿石按照矿物成分可分为石英岩型蓝晶石矿、片岩型蓝晶石矿和叶腊石型蓝晶石矿, 以石英岩型蓝晶石矿为主, 片岩型蓝晶石矿次之。

2.6 磷矿

分布于连云港市境内, 为高压变质带中最重要的矿种之一, 已圈定 30 余个磷矿体, 出露于锦屏、陶

表 2 磷矿主要矿床简明特征

Table 2 Geological characteristics of the phosphorous deposits in the high pressure belt

序号	位置	矿体概况	规模	备注
1	大浦镇	含磷岩系位于厚 20~40 m 的第四系之下, 磷矿赋存于锦屏岩群西山组和东山组内, 矿体呈透镜状、似层状, 长 400~1600 m, 平均厚 1.54~3.0 m, 最厚达 30 m; 矿石呈条带状、条痕状和块状; 矿石矿物为磷灰石, 平均含 P_2O_5 21.53%, 最高达 38%	小型	开采中
2	新浦北	含磷岩系位于厚 17~28 m 的第四系之下, 磷矿赋存于锦屏岩群西山组和东山组内, 矿体呈似层状、透镜状, 规模大小不一, 长数十米至 1200 m, 平均厚 1.22~5.37 m, 最厚达 11.8 m; 矿石呈条带状、条纹状和细粒块状; 矿石矿物为磷灰石, 平均含 P_2O_5 5.52%~16.90%, 最高达 32.2%	中型	开采难度大
3	陶湾	含磷岩系位于厚 18~25 m 的第四系之下, 磷矿赋存于锦屏岩群东山组内, 矿体呈似层状, 长 1346 m, 平均厚 6.25 m, 最厚达 11.46 m; 矿石呈条带状、和块状; 矿石矿物为磷灰石, 平均含 P_2O_5 17.95%	中型	待勘探
4	锦屏山南麓	矿区出露锦屏岩群和云台岩群, 磷矿赋存于锦屏岩群西山组内, 有上下两层矿, 其中下矿层长 2071 m, 平均厚 23 m, 最厚 35 m; 上矿层长 960 m, 平均厚 30 m, 最厚 46 m; 矿体呈似层状、透镜状, 矿石呈块状、条带状和条纹状; 矿石矿物为磷灰石, 平均含 P_2O_5 14.12%, 最高达 27.92%	中型	开采中
5	顾庄南	含磷岩系隐伏于第四系之下, 磷矿赋存于锦屏岩群东山组内, 矿体呈不规则似层状, 长 600 m, 平均厚 3.3 m, 平均厚 3.3 m; 矿石呈条带状、和块状; 矿石矿物为磷灰石, 平均含 P_2O_5 15.92%	小型	尚未开采

湾、新浦、顾庄等地。含磷地层为元古代锦屏岩群, 地表仅见于锦屏西山和东山。5 个主要矿床简明情况见表 2, 矿床成因类型均为沉积变质型。

2.7 水晶矿

水晶矿位于东海县和新沂市境内, 其中东海的水晶矿早已闻名于世。已发现 4 个小矿床、10 个矿化点。水晶矿主要产于石英脉中, 位于榴辉岩与片麻岩接触部位, 或位于榴辉岩、片麻岩和角闪岩的裂隙中, 大多为单式脉, 个别为分支脉和交叉脉, 埋藏不深, 出露于地表或距地表 1~2 m。水晶石英脉呈脉状、透镜状、串珠状, 走向 $10^\circ \sim 35^\circ$, 倾向北西或南东, 倾角 $50^\circ \sim 74^\circ$, 含水晶石英脉大小悬殊, 长 1~80 m, 宽一般 1~2 m, 最宽 20 m, 延深约 10 m, 最深达 18 m, 含水晶脉石英呈乳白色、灰白色和无色, 以致密块状为主, 局部可见晶簇, 含水晶石英脉以不规则状和分岔明显者含晶性较好, 一般为单晶晶洞。水晶晶体以无色为主, 晶体一般较大, 在柘塘发现最大的水晶晶体长达 1.8 m, 直径 1.2 m, 重 3.5 t。但质量较好的晶体往往很小, 一般 100~150 g。原生水晶矿床成因类型为中温热液型。

3 苏北超高压和高压变质带成矿系列

中国大陆科学钻探工程的实施掀起了新一轮超高压变质作用的研究热潮, 其关键科学问题“大陆板片如何俯冲下去? 又如何折返上来?”的动力学机制一直没有解决(许志琴等, 2003)。基于全岩化学成分

和矿物含量, 榴辉岩可划分为 5 种类型, 即富硅的石英榴辉岩、富钛的金石榴榴辉岩、富铝的多硅白云母和蓝晶石榴榴辉岩、富镁的双矿物榴辉岩和具有正常玄武岩成分的普通榴辉岩(张泽明等, 2004, 2005)。其中的金石榴榴辉岩和蓝晶石榴榴辉岩分别构成了金石榴矿床和蓝晶石矿床的容矿岩石, 如毛北-蒋庄和小焦金石榴矿、新扬昌蓝晶石矿点。上述各种类型榴辉岩的石榴石和绿辉岩中含柯石英或柯石英假象包体, 普遍认为榴辉岩峰期变质温度、压力条件是 $700 \sim 860^\circ\text{C}$ 和 $3.0 \sim 4.0 \text{ GPa}$ 。

长英质片麻岩构成了大面积分布的角闪岩相变质岩, 在长英质变质岩的锆石中发现了柯石英、绿辉石、石榴石和多硅白云母等超高压变质矿物包体, 因而榴辉岩的围岩长英质片麻岩也经历了超高压变质作用(Liu *et al.*, 2001, 2002, 2004)。

在超高压变质带的大理岩中已经找到石榴石、绿辉石和多硅白云母等超高压变质矿物组合, 在锆石中发现柯石英包体, 同时大理岩中含柯石英榴辉岩透镜体, 表明大理岩经历了超高压变质作用(张泽明等, 2005)。这一认识得到白云石的分解反应的佐证(朱永峰, 2005)。

在东海的蒋庄、芝麻坊、许沟、毛北和岗尚等地的地表和钻孔中都有超基性岩出现, 岩石类型复杂多样, 常见的岩石类型包括石榴橄榄岩、石榴二辉橄榄岩、纯橄岩和石榴辉石岩, 常遭受强烈的蛇纹石化, 形成蛇纹石矿床。超基性岩可分为 A、B 两种类型(Zhang *et al.*, 2000; 张泽明等, 2002; Zhang

et al., 2005): A型为地幔楔状体中的石榴石橄榄岩构造侵位到俯冲带之中, 后与深俯冲的陆壳物质一起经历了超高压变质作用, 它们基本保留了地幔岩的化学成分特征; B型是侵入到地壳的基性-超基性层状侵入体, 它们与表壳岩一起经历了深俯冲和超高压变质作用。

苏鲁造山带超高压变质作用形成的时代一直是研究的主题之一。尽管超高压变质的峰期年龄还未最终确定, 但许多资料显示峰期年龄约 220 ~ 250 Ma, 大范围角闪岩相退变质年龄约 210 Ma (张泽明等, 2005)。这样, 苏北地区超高压变质带中出露的各种岩石, 包括各种榴辉岩、超镁铁质岩、表壳岩于印支期发生了巨量物质超深俯冲, 形成了规模宏观的超高压变质带, 与此同时, 形成了与超高压变质作用有关的金刚石-金红石-蛇纹石-蓝晶石-大理石成矿系列。

在苏北高压变质带, 许志琴等 (2003) 将其细分为高压 (0.7 ~ 0.85 GPa) 低温 (300 ~ 360 °C) 构造岩片和高压 (1.5 ~ 2.0 GPa) 中温 (500 ~ 600 °C) 构造岩片, 海州式磷矿床和韩山蓝晶石矿位于高压中温构造岩片内。于津海等 (2001) 将苏北高压变质带划分为蓝闪石-黑硬绿泥石带、石榴石-绿帘石带和蓝晶石-黄玉带 3 个变质亚带, 并认为高压变质作用形成于超高压变质作用之后, 与超高压变质体折返到一定阶段的退变质作用同时发生。产于东海和新沂一带的水晶矿主要位于榴辉岩与片麻岩接触部位, 或位于榴辉岩、片麻岩和角闪岩的裂隙中, 这一特征决定了水晶矿与板片折返有关的重结晶和退变质有关, 也被同位素年代学所证实 (王登红等, 2003)。这样在苏北高压-超高压变质带存在有与高压变质作用有关的磷-蓝晶石-水晶矿成矿系列。

4 可能存在的燕山期金银多金属成矿系列

苏鲁超高压、高压变质带是秦岭-大别造山带在郯庐断裂以东的东延部分, 苏北高压变质带与大别南部红安-宿松-张八岭高压变质带可对比, 超高压变质带与南大别超高压变质带也能进行对比。在大别造山带, 燕山期存在一巨大的岩浆-流体-成矿系统, 形成一系列金、银多金属矿床, 矿床成因类型包括构造蚀变岩型、岩浆热液型等, 矿床的形成

与燕山期强烈的拆沉、伸展、折返和隆升有关 (杜建国等, 2001a, 2001b)。

苏鲁造山带经历了后折返的伸展事件, 表现为燕山期花岗岩 (约 150 ~ 100 Ma) 的大量侵位和韧性伸展转换型剪切带的形成 (许志琴等, 2003)。理论上存在与大别山同样的构造-岩浆-热液成矿系统。在苏北超高压-高压变质带, 近年来发现一系列金、银多金属矿化点, 尽管未构成一定规模的工业矿体, 但仍显示出寻找金、银多金属矿床的良好前景。

References

- Chen, S. Z., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2005. Petrology and mineralogy of PP3 ultramafic rocks in Sulu UHP belt and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2): 369-380 (in Chinese with English abstract).
- Cong, B. L., Wang, Q. C., 1997. Ultrahigh pressure metamorphism and formation of mineral resources. *Geology and Prospecting*, 33(1): 49-52 (in Chinese with English abstract).
- Du, J. G., Chan, D. Y., Dai, S. Q., et al., 2001a. A preliminary study on the metallogenic system and regularity in the Dabie orogenic belt. *Anhui Geology*, 11(2): 140-149 (in Chinese with English abstract).
- Du, J. G., Gu, L. X., Sun, X. R., et al., 2001b. Fluid system and mineralization of the Dabie orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 507-517 (in Chinese with English abstract).
- Fan, J. T., Cheng, Z. Y., Jia, G., 1998. Metallogenic series of high pressure and ultra high pressure metamorphic rocks in northern Jiangsu Province, China. *Mineral Deposits*, 17 (Suppl.): 535-538 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. F., Yang, J. S., Zhang, R. Y., 2003. Peridotite from the pre pilot hole (PP1) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project and its bearing on depleted and metasomatic upper mantle. *Acta Geologica Sinica*, 77 (4): 492-509 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Katayama, I., et al., 2001. Mineral inclusions in zircon of 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., et al., 2002. Ultrahigh pressure mineral inclusions in zircons from gneiss core samples of the Chinese Continental Scientific Site in eastern China. *Eur. J. Mineral.*, 14: 499-512.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Liou, J. G., et al., 2004. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh pressure and retrograde metamor-

- phism of gneisses, southwestern Sulu terrane, eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 22: 315 – 326.
- Pan, M. B., Zhang, Q. L., Chen, H. G., et al., 2002. Lithostratigraphic framework on the southern margin of the Sulu orogen. *Geological Bulletin of China*, 21 (12): 848 – 854 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. H., Xu, J., Chen, Y. C., et al., 2003. Dating on the eclogite hosted quartz crystal and its significance for tracing the exhumation history of the UHP belt in north Jiangsu Province. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 544 – 548 (in Chinese with English abstract).
- 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., Chen, S. Z., Zhang, Z. M., et al., 2005. A preliminary study of the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) PP3 hole on the Gangshan garnet peridotite body in the Sulu UHPM belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 293 – 304 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. H., Wang, C. Y., Lin, L. M., 2001. Nature of the high pressure metamorphic zone and its relationship with the ultra high pressure metamorphic zone in northern Jiangsu Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 82 – 90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. Y., Liu, J. G., Yang, J. S., et al., 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie Sulu UHP terrane, eastern central China. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 149 – 166.
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2002. Composition and metamorphism and the root of the southern Sulu orogen. *Geological Bulletin of China*, 21: 609 – 616 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100 – 2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27 – 42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liou, J., et al., 2005. Oxygen isotope geochemistry of rocks from the Pre Pilot Hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD PPH1). *American Mineralogist*, 90: 857 – 863.
- Zhang, Z. M., Zhang, J. F., You, Z. D., et al., 2005. Ultrahigh pressure metamorphic P-T path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2): 257 – 270 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. F., 2005. Dolomite decomposition texture in ultrahigh pressure metamorphic marble: New evidence for the deep recycling of continental materials. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 347 – 354 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈世忠, 杨经绥, 许志琴, 等, 2005. 大陆科学钻探 CCSD PP3 钻孔超镁铁岩岩石学和矿物学特征及其意义. *岩石学报*, 21(2): 369 – 380.
- 从柏林, 王清晨, 1997. 超高压变质作用与成矿. *地质与勘探*, 33(1): 49 – 52.
- 杜建国, 常丹燕, 戴圣潜, 等, 2001a. 大别山区域成矿体系与成矿规律的初步研究. *安徽地质*, 11(2): 140 – 149.
- 杜建国, 顾连兴, 孙先如, 等, 2001b. 大别造山带的流体系统与成矿作用. *地质学报*, 75(4): 507 – 517.
- 樊金涛, 程振香, 贾根, 1998. 苏北高压超高压变质成矿系列. *矿床地质*, 17(增刊): 535 – 538.
- 李天福, 杨经绥, 张儒媛, 2003. 江苏东海预先导孔 (CCSD PP1) 橄辉岩及其反映的上地幔亏损和交代事件. *地质学报*, 77(4): 492 – 509.
- 潘明宝, 张庆龙, 陈火根, 等, 2002. 苏鲁造山带南缘岩石-地层格架. *地质通报*, 21(12): 848 – 854.
- 王登红, 徐珏, 陈毓川, 等, 2003. 苏北榴辉岩中水晶的形成时代及其对变质岩折返的示踪意义. *地质学报*, 77(4): 544 – 548.
- 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, 陈世忠, 张仲明, 等, 2005. 苏鲁超高压变质带岗上石榴石橄辉岩岩体: 中国大陆科学钻探卫星孔 (CCSD PP3) 初步研究. *岩石学报*, 21(2): 293 – 304.
- 于津海, 王赐银, 林黎明, 2001. 苏北高压变质带及与北侧超高压变质带的关系. *地质学报*, 75(1): 82 – 90.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2002. 苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用. *地质通报*, 21: 609 – 616.
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程 (100~2 050 m) 主孔榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1): 27 – 42.
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等, 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P-T 轨迹. *岩石学报*, 21(2): 257 – 270.
- 朱永峰, 2005. 超高压变质大理岩中的白云石分解结构: 大陆地壳物质深循环的新证据. *岩石学报*, 21(2): 347 – 354.