

苏鲁榴辉岩及 有关超基性岩

● 杨建军 著

292

地质出版社

苏鲁榴辉岩及有关超基性岩

杨建军 著

地 质 出 版 社

内 容 简 介

本书是作者在大量野外和室内工作及国际上同类研究的基础上,利用现代测试手段,对我国山东、苏北的榴辉岩和超基性岩及其主要造岩矿物和结构构造,主要元素含量及其变化,稀土及微量元素,Sm-Nd、Rb-Sr和氧同位素组成,榴辉岩的形成年龄,榴辉岩中绿辉石和石榴石的平衡热力学等,所进行的带有开创性研究工作的初步总结。基于这些研究成果,作者讨论了我国东部、中部的构造地质学问题,对东部寻找金伯利岩具有参考价值。本书读者对象为矿物岩石地球化学和构造地质学科研人员,也可供大专院校师生和地矿勘探人员参考。

苏鲁榴辉岩及有关超基性岩

杨建军 著

*

责任编辑:蔡卫东

地质出版社出版发行

(北京和平里)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

*

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 6.5 字数: 150,000

1991年1月北京第一版·1991年1月北京第一次印刷

印数: 1—560册 国内定价: 5.05元

ISBN 7-116-00792-X/P·675

目 录

引言	1
矿物代号	6
第一章 区域地质	7
第二章 榴辉岩及超基性岩的岩相学	9
一、苏北地区的榴辉岩与超基性岩	9
二、山东莒南榴辉岩及有关的超基性岩	15
三、山东日照的榴辉岩类及有关的超基性岩	19
四、山东诸城的榴辉岩	28
五、山东荣成的榴辉岩类	29
六、山东蒙阴金伯利岩中的榴辉岩类包体	31
第三章 榴辉岩类及有关超基性岩的主要元素化学和微量元素、同位素地球化学	34
一、主要元素化学	34
二、微量元素地球化学	42
(一) 超基性岩和有关的榴辉岩	42
(二) 围岩榴辉岩	45
三、榴辉岩类的Nd、Sr同位素组成及其形成时代	47
四、榴辉岩的氧同位素组成	51
第四章 榴辉岩类及橄榄岩的矿物学	52
一、与超基性岩有关的榴辉岩类	52
二、围岩榴辉岩	73
第五章 榴辉岩及橄榄岩形成的热力学条件	82
一、榴辉岩地质温度计	82
二、榴辉岩地质压力计	88
三、橄榄岩的平衡条件	89
第六章 榴辉岩类及超基性岩的成因及其地质意义	91
参考文献	96
英文摘要	98

引言

在研究地球岩石圈的构造和物质组成的过程中,以往认为是地球上的一种稀有岩石的榴辉岩,越来越多地被人们发现并受到重视。由于榴辉岩的产出位置特殊,因而对它们的详细了解将成为人们认识地球内部组成和热状态变迁规律的重要任务之一。根据已知资料,以岩体形式出露的榴辉岩几乎都分布在构造活动带,如太平洋沿岸大部分地区、阿尔卑斯褶皱带、乌拉尔褶皱带、斯堪的那维亚加里东造山带、中国的几个东西向褶皱带等,均有榴辉岩出露。这些榴辉岩体多产于古老片麻岩地带或相伴的蓝片岩相变质岩带内;也有的出现于深度变质的超基性岩体内;另一种产状是榴辉岩以包体形式产于金伯利岩或其它超基性岩中。许多地区在这种榴辉岩包体中发现了金刚石,如南部非洲的许多国家、苏联的Якутия、美国的Colorado高原等地。随着研究工作的深入,以榴辉岩这一术语命名的岩石越来越显示出其产状、结构、组成和成因上的特殊性和复杂性。

榴辉岩(eclogite)一词,是法国地质学家Haty(1822)在研究德国巴伐利亚Fichtelgebirge的一种由绿色辉石和石榴石组成的变质岩石时用来对之命名的。Eclogite是由希腊文(ἐκλογή)演化而来,原意为区别、选择。作为岩石名称,这里寓意其特征不同于其它所有岩石。1897年,人们在南非金刚石矿区首次发现了金伯利岩中的石榴石+单斜辉石组合的岩球,并称之为榴辉岩。但是,Beck(1899)认为,这些石榴石+单斜辉石二矿物岩是由金伯利岩岩浆中分凝的岩浆同结产物,在结构和组成上也不同于变质岩地区的榴辉岩。Beck建议将这种火成的石榴石+单斜辉石组合命名为griquaite(中译“透辉石榴岩”)。但是,由于金伯利岩中的石榴石+单斜辉石组合的岩球组成很复杂,多数情况下这些二矿物岩石与金伯利岩的关系很难肯定,更多人把它们称为金伯利岩榴辉岩(Kimberlite eclogite)(如Bosch, 1971)。而把产于变质地区的榴辉岩体称为“围岩榴辉岩(Country rock eclogite)”。另一方面,命名榴辉岩的矿物组成依据上也存在分歧。其一是当岩石含有原生的斜长石时,是否可以命名为榴辉岩的问题。大多数人认为斜长石稳定的压力和温度上限是榴辉岩相与麻粒岩相的最主要区别(如Green and Ringwood, 1967; Smith, 1982)。但是也有不少人将含有斜长石的类似岩石称为“麻粒岩相榴辉岩”(如Banno, 1970)。其二是单斜辉石的组成问题。一部分人认为,若单斜辉石中的硬玉分子含量低($<25\%$)即单斜辉石不是绿辉石时,石榴石+单斜辉石组合应称为石榴石辉石岩。另外有不少人(如Eskola, 1921; Lappin and Smith, 1978; Banno, 1970)则把硬玉-透辉石系列的单斜辉石和镁铝榴石-铁铝榴石-钙铝榴石系列的石榴石组成的岩石都称为榴辉岩。他们从岩石形成的压力和温度条件以及变质相的观点出发,认为产生于超基性岩体内的石榴石+低 Na_2O 的单斜辉石组合,与传统定义所指的变质岩区的含绿辉石的榴辉岩一样,反映了相当于上地幔压力和温度的形成环境,具有相似的地质意义。此外,许多与榴辉岩相伴的产于区域片麻岩内的总组成相当于中酸性岩的变质岩,包括沉积变质岩,含有石榴石+绿辉石组合,形成于较高的压力和温度条件下,因而也应该划入榴辉岩类。

与榴辉岩的命名问题相伴的另一个更显重要的问题是榴辉岩的分类。Coleman等

(1965) 根据榴辉岩的产状与围岩的关系和榴辉岩中石榴石的组成将其分为三类: A. 金伯利岩及其它超基性岩体中的榴辉岩类包体(镁铝榴石 $>55\%$); B. 片麻岩地区的透镜状、似层状榴辉岩体(镁铝榴石 $30-55\%$); C. 蓝闪石片岩相或其他低温变质岩相中的榴辉岩体(镁铝榴石 $<30\%$)。Banno (1970) 考察了以上三类榴辉岩的石榴石和单斜辉石之间的 $\text{Fe}^{2+}-\text{Mg}$ 分配系数 K_D 认为它们分别对应于一定的数值范围。A类岩石 K_D 较低 (<5), B类岩石 K_D 较高 ($5-10$), C类岩石 K_D 最高 (>10); 表明三类岩石的形成温度依次降低。这样的分类至今对榴辉岩研究工作仍有很大的影响。

但是, 近些年来人们发现, 作为包体的榴辉岩有不少是金伯利岩岩浆在较浅部位捕获的地壳碎块。它们在组成上属于Coleman等(1965)的B、C类榴辉岩(如Shervais et al, 1986; Taylor et al, 1989; Helmstaedt and Doig, 1975)。人们还发现, 金伯利岩中的一些含金刚石的蓝晶石榴辉岩中的石榴石以钙铝榴石为主要组分, 镁铝榴石组分并不高(如Smyth and Hatton, 1977; Lappin, 1978)。类似地, 其它超基性岩内的榴辉岩类在结构和组成上也多种多样。其中不少为岩浆在上地幔结晶而成的普通辉石±石榴石组合。它们普遍发生了固相线以下的出溶、重结晶作用, 因而又多具有变质岩的结构。少数仍有残留原生的火成结构。显然, 它们与完全具变质特征的石榴石+绿辉石组合的岩石在成因上互不相关。因此, 单根据产状和石榴石的组成对榴辉岩分类, 会造成成因认识上的混乱。事实上绿辉石是多数变质成因的榴辉岩的重要造岩矿物, 它所构成的岩石有别于金伯利岩浆的分凝物(透辉石榴岩), 也不同于其它超基性岩体中的石榴石普通辉石岩或石榴石透辉石岩。可见, Haüy (1822) 最初对榴辉岩的定义是十分准确、方便的。

金伯利岩榴辉岩因含金金刚石而倍受重视。研究结果导致产生了一个假说, 认为在地球的内部存在着一个榴辉岩层。早期对这类深源包体的研究成果, 反映在Williams (1932) 的专著中。苏联雅库特金伯利岩及其深源包体的发现和研究, 开启了对包括榴辉岩在内的深源包体的第二个研究阶段。大量岩相学和矿物学资料, 加上人工合成金刚石的工作揭示出金刚石和含镁铝榴石岩石的高压条件, 使这项研究成为现代岩石学的重要课题之一。大多数人认为, 金伯利岩和玄武岩中的深源包体是取得上地幔组成信息的主要来源, 并构成不少地区金刚石的原生矿床。这个阶段的工作在Sobolev (1977) 的专著中作了总结。近十几年来, 国际上已形成了研究金伯利岩及其深源包体的专门队伍。到1986年, 已开过四届国际金伯利岩会议。对深源包体的研究是其中的主要内容之一。通过对这种深部上地幔榴辉岩的研究, 结合地球物理资料, 人们对地球内部的组成与金伯利岩浆活动, 上地幔交代作用的起因乃至板块运动机理有了新的看法(如Anderson, 1981; Ringwood, 1982)。

相比之下, 早期对“与金刚石无缘”的变质地带的榴辉岩岩体的研究十分冷落。虽然在本世纪初一度出现过“榴辉岩热”(Franchi, 1902; Briere, 1920; Eskola, 1921; Alderman, 1936; Tilley, 1936), 然而直到60年代以前, 人们对榴辉岩的认识上进展很小。板块构造学说的兴起, 使人们从榴辉岩的分布和组成特点推断它们与板块运动有成因联系, 从而对此作了大量的野外考查工作, 并将岩石学领域的新技术几乎全部应用于榴辉岩研究。人工榴辉岩矿物组合的高压实验研究揭示了其稳定的压力和温度范围; 电子探针等微束分析技术详细准确地提供了天然榴辉岩矿物的组成资料; 基于热力学理论的地质温度压力计可对各类榴辉岩形成的压力和温度条件作出估计。近年来以欧洲地质学家为主的三届国际榴辉岩会议(法国克莱蒙弗隆, 1982; 奥地利维也纳, 1985; 西德维尔茨堡,

1989) 基本反映出当代世界上这一领域的研究成果。当前人们利用各种技术找到了大量关于榴辉岩矿物组成和结构的成因证据。可是, 在这一研究领域里仍然存在着认识上的分歧。就围岩榴辉岩而言, 争论最为激烈的是其形成条件和来源与围岩的关系等问题。以Griffin和Bryhni为代表的“奥斯陆学派”认为, 围岩榴辉岩是与其围岩——片麻岩一起经历了高压变质作用形成的。这种观点被称为“原地变质模式 (In situ model)” (Bryhni, 1970; Griffin et al, 1985)。另一种与之相对立的观点则认为榴辉岩形成于上地幔 (Lappin和Smith, 1978, 1981) 或其它源区之后在构造变动过程中挤入到片麻岩内。此观点被称为“外来挤入模式 (Foreign model)”。随着工作的深入, 人们不断地修改着自己所提出的模式。目前, 还没有一个广为接受的模式来解释这类榴辉岩的成因。已有的成因模式都遇到强有力的挑战。例如, 原地变质模式认为挪威西部片麻岩区榴辉岩的形成压力不会超过 $23 \times 10^8 \text{Pa}$ (Krogh, 1980), 而Smith (1983) 却在其中部分榴辉岩中发现了柯石英。Yang and Smith (1989) 指出山东和苏北的许多榴辉岩中曾有柯石英存在并发现了透长石。这意味着, 岩石形成压力和温度应大于或等于 $28.5 \times 10^8 \text{Pa}$, 900°C 。另一方面, 被认为变质高峰在角闪岩相的含榴辉岩片麻岩中的石榴石内却发现了金刚石 (Sobolev, 1986), 这似乎又为“原地变质模式”提供了证据。这些事实使得被称为“神秘的”岩石的榴辉岩更富有诱惑力。榴辉岩独特而复杂的矿物成分, 多样而又具共性的形成历史使人们感到, 它们的确与众不同, 在地球内部的运动和演化中起着特殊的作用。

山东、苏北一带出露的榴辉岩是我国为数不多的几个榴辉岩出露区中分布面积较大者之一。岩体的分布严格地局限于郯庐断裂带以东的近海地带, 与该地区的变质超基性岩体相伴, 构成一个变质基性-超基性岩带 (图1)。1985年以来, 作者在导师池际尚教授的指导下对山东、苏北的榴辉岩类及有关的超基性岩作了三次野外地质调查, 查明了该岩带中10多个岩体群的岩体地质情况; 利用现有的测试手段, 对榴辉岩及其主要造岩矿物的结构构造、主要元素组成、稀土及微量元素组成、同位素组成作了系统研究。工作中, 作者给自己提出了如下一些问题:

1. 为什么本区榴辉岩岩体严格地局限于郯庐断裂带以东的地带? 其形成的构造背景是什么?

2. 为什么在同一地区会出现许多种不同产状, 不同组成和结构特点的榴辉岩类岩石和超基性岩?

3. 本区片麻岩中的榴辉岩是基性岩“原地变质的”还是构造引入的外来岩块?

4. 榴辉岩类与相伴的超基性岩在来源、组成和时间上的关系如何?

5. 本区金伯利岩和超基性岩中的榴辉岩类在成因上与围岩榴辉岩有什么区别与联系?

6. 本区所有这些榴辉岩和超基性岩类是什么样的条件下形成和演变的? 它们带有什么样的关于本区上地幔的组成、热状态及岩石圈演化的信息?

显然, 要想全部回答这些问题, 还必须对区域构造发展历史有详细深入的了解。本文将力图从所研究的对象中获取有关信息, 即从岩石学、矿物学、痕量元素地球化学的角度, 为回答上述问题提供依据。本区榴辉岩显示了复杂而有趣结构现象, 它们无疑具有重要岩石成因意义。榴辉岩矿物晶体化学复杂而独特, 它是追索岩石形成历史的基本途径。正确地估计岩石形成的物理化学条件是完成该项任务的重要前提, 因此对榴辉岩的两个主要造岩矿物即石榴石和单斜辉石固溶体热力学性质和存在于二者之间的化学反应平衡

的估算构成了本文工作的另一重点。然而正如同国际上其它榴辉岩研究一样，问题总是不断出现的。本文仅仅是把一系列有关问题展示出来，并试图加以解释，以期引起国内外同行的重视与讨论。

本文工作是在导师池际尚教授的亲切指导下进行的。邓晋福教授对论文给予了关怀和指导。收集资料过程中得到江苏地质局孙竞雄高级工程师，江苏地质六队和山东地质局杨惠南高级工程师的热情帮助。中国地质大学（北京）马聆音、邵道乾、鄂安源、李树岩，中科院高能物理所杨瑞英等老师对本文的全岩化学、电子探针和中子活化分析工作给予了指导和帮助。美国田纳西大学 L. A. Taylor 教授热情帮助分析了部分样品的氧同位素组

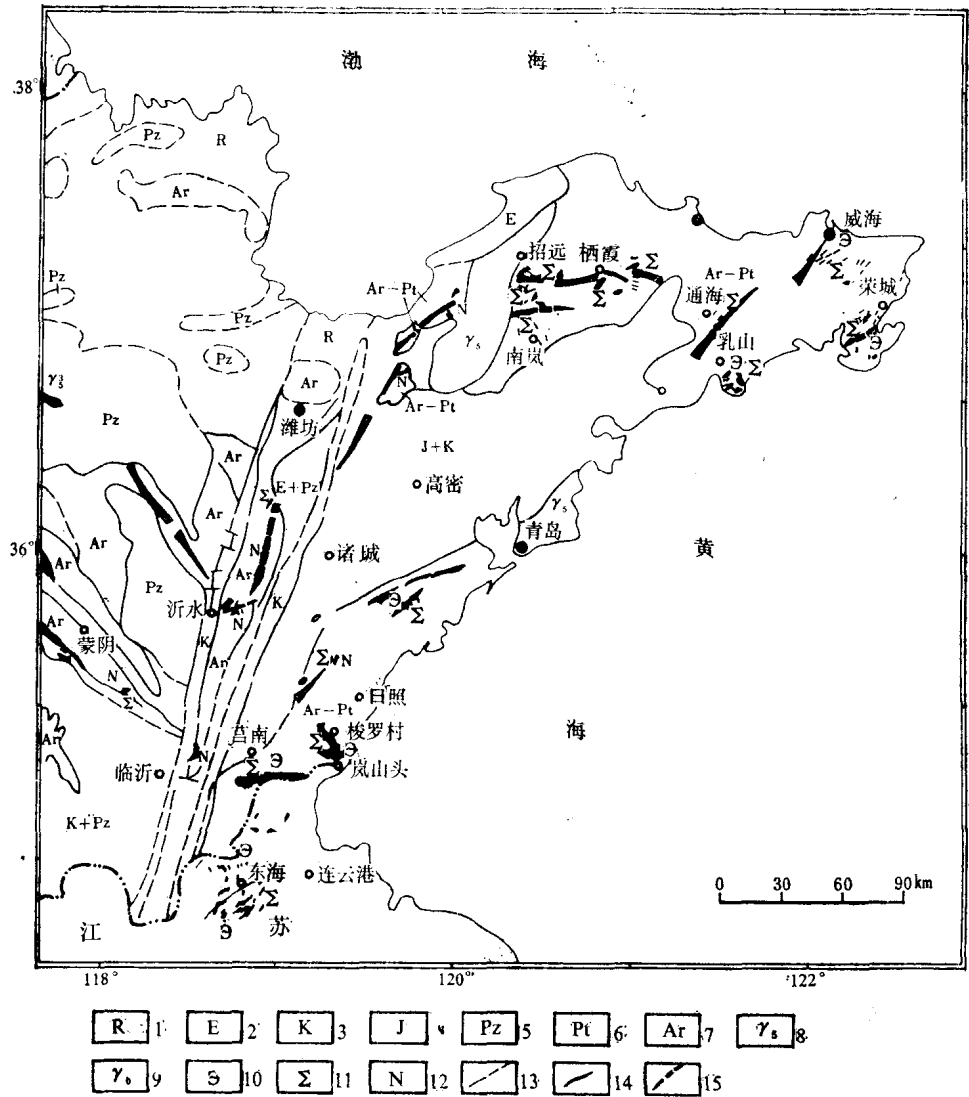


图 1 山东、苏北榴辉岩超基性岩分布略图

1. 第三系；2. 下第三系；3. 白垩系；4. 侏罗系；5. 古生界及震旦系；6. 元古界；7. 太古界；8. 古生代花岗岩；
9. 元古—太古代花岗岩；10. 榴辉岩；11. 超基性岩；12. 基性岩；13. 断层；14. 背斜轴；15. 向斜轴
(据山东地质研究所，略作修改)

成。在本文工作中，作者有幸访问了法国国家自然历史博物院矿物学实验室，得以与榴辉岩研究专家D. C. Smith教授、B. Lasnier教授共同从事研究。Barrendon先生协助作者做了大量的电子探针分析工作。沈其韩、邓晋福教授审阅了本文。

在此，作者谨向对本文工作给予帮助和关怀的所有人士致以深深的谢意！

矿物代号

代 号	矿 物 名 称	代 号	矿 物 名 称
Ab	钠长石	Jd	硬 玉
Ald	铁铝榴石	Kp	钾长石
Amp	角闪石	Ky	蓝晶石
Amt	锥辉石	Mi	微斜长石
An	钙长石	Mt	磁铁矿
Anr	钙铁榴石	Mu	白云母
Ap	磷灰石	Nph	霞 石
Aug	普通辉石	Ol	橄榄石
Bit	黑云母	Om	绿辉石
Cal	方解石	Opx	斜方辉石
CaTs	钙契尔马克分子	Or	正长石
Cb	碳酸盐	Pg	钠云母
Chl	绿泥石	Pl	斜长石
Chm	铬铁矿	Phen	多硅白云母
Cpx	单斜辉石	Phl	金云母
Crd	刚 玉	Pyx	辉 石
Cs	柯石英	Pyp	镁铝榴石
Cz	斜黝帘石	Qz	石 英
Di	透辉石	Rt	金红石
Do	白云石	San	透长石
En	顽火辉石	Sep	蛇纹石
Ep	绿帘石	Sp	尖晶石
Es	艾斯科拉分子	Spe	锰铝榴石
Fa	铁橄榄石	Sph	榍 石
Fo	镁橄榄石	Tlc	滑 石
Fs	斜铁辉石	Uv	钙铬榴石
Gr	石榴石	Wl	硅灰石
Gro	钙铝榴石	Zo	黝帘石
Hb	普通角闪石		
Hd	钙铁辉石		
Hm	赤铁矿		
Il	钛铁矿		

第一章 区域地质

本区的榴辉岩和超基性岩带座落在秦岭造山带的东延部分,即夹持在盱眙-响水断裂与五莲-荣成深断裂之间的苏北-胶南地块(任纪舜,1989)。北起胶东半岛的荣成县,南经胶南、诸城、莒南、日照,至江苏北缘的赣榆、东海、新沂诸县,西南端被郯庐断裂带切割。岩带可分为两段:北段对应于胶东隆起区,三面临海,北面以即墨-牟平NE向断裂带为界;南段范围较大,对应于胶南隆起,北接相家山-郝戈庄第一系列NEE向断裂,南缘海洲-宿千一带,东濒黄海。大部分榴辉岩体产于片麻岩类中,另有一部分岩体则与变质超基性岩体紧密相随,或出现于超基性岩体之内,或见于其附近的围岩(片麻岩类)中。与世界上其它榴辉岩出露区一样,在相伴的变质超基性岩体中也有许多石榴石辉石岩(也有人称“榴辉岩”)岩体。属华北地台东南缘的鲁西蒙阴地区的金伯利岩中还发现有榴辉岩类包体(郭文祥,1984)。岩体的围岩均为前震旦纪的变质岩(1300—2400Ma)。山东境内称胶南群即大山沟组、甄家沟组、邱官庄组及于家岭组(山东区调队,1981);江苏境内称东海群即演马场组、阿湖组、墩尚组及胸山组(江苏区调队,1986)。以前统称为胶东群即洙边组、坪上组(北京地质学院,1961)。主要岩性为各种片麻岩、混合岩、片岩、大理岩及斜长角闪岩类等。区域的沉积盖层大都为第四系,局部有白垩系和第三系红层出露,未发现古生界。中生代的闪长岩、花岗岩等侵入作用强烈,并有花岗斑岩、闪长玢岩、正长斑岩、煌斑岩、细晶岩、伟晶岩等脉岩发育。

区域构造十分复杂,变质岩中有多期褶皱变形,韧性剪切带发育。印支-燕山以来的构造-岩浆活动对早期构造有强烈的叠加改造。岩带总的展布方向受郯庐断裂带以东的NE和NNE向深断裂控制。榴辉岩体和超基性岩体与这些压剪性断裂带相伴出现。整个岩带内榴辉岩及超基性岩体露头有数千个,但是与世界上多数地区一样,出露总是很差。岩体成群分布于次级褶皱的轴部及近轴部位置。多数岩体在地表呈与片麻理一致的长条形、透镜状、脉状、似层状。长几米到几十米甚至几百米。一般长:宽为3:1—10:1,少数大于20:1或小于3:1。岩体内条带方向多与围岩片麻理一致,局部斜交。有的岩体外部围岩发生小规模褶皱。一些岩体的接触带上可见到榴辉岩呈条带状插入围岩。较大的榴辉岩体边部的片理化明显比中部强烈。局部出现压剪性柱状节理,反映出构造挤压、滑移的就位特征。在有的脉状榴辉岩体的中轴面上,穿入石英脉,表明榴辉岩形成之后有混合岩化作用发生。各种在宏观特征和矿物组合上大不相同的榴辉岩常常相邻出露,甚至出现于同一个露头。

岩体边部或内部裂隙发育处常出现角闪岩或榴闪岩。产于超基性岩体附近的榴辉岩体与片麻岩接触边上出现宽20—30cm的角闪石+绿帘石+白云母组合的绿色岩壳。超基性岩体内的榴辉岩与超基性岩接触界线十分明显,接触带产状与岩体内外片理产状一致。接触带外侧的超基性岩呈黄灰色。榴辉岩体内则出现透镜状片麻岩夹片。这些现象表明:(1)榴辉岩是呈固体状态运移上来的,并显示出塑性特征;(2)多数情况下榴辉岩与超基性岩不是同时就位的,它们产于超基性岩中并非必然。它们的共生关系指出它们是同种构造条

件下深部物质活动的结果。

本区的地质构造和建造与鲁西迥然不同。构造地质学研究（如徐嘉伟，1980）表明，这种差异是缘于郯庐断裂带的左行运动，本区构造上位于扬子地台的北缘。大规模平移发生在晚白垩世晚期，在早第三纪末，平移运动结束，转以引张为主。由于区域引力场的改变，断裂带表现为挤压性质并小幅度右移。

航磁资料（中科院山东地震考察小组，1974）表明，胶辽地块为变化负磁场区，范围包括胶东、辽东及其间海域。但是本区的变质基性—超基性岩带却与自荣成经日照至苏北的一条正异常带相一致。该正异常带轴向以NE和NEE为主，在即墨附近分为两段。而本区的变质基性—超基性岩带也大致在该处分为南北两段。

第二章 榴辉岩及超基性岩的岩相学

本章按岩体自南向北的出露位置顺序分述其岩体地质与薄片观察结果以及其它有关的资料。各类岩石的矿物百分含量肉眼估计列于表1。

一、苏北地区的榴辉岩与超基性岩

江苏东海、新沂、赣榆等地出露的榴辉岩体有几百个。它们多为产于片麻岩内的榴辉岩，少数与超基性岩体相伴出现。限于篇幅，这里仅以青龙山、碱厂、后昌桥的岩体及芝麻坊的超基性岩体为例作介绍。

1. 青龙山岩体 (DQ)

该岩体位于东海县城以东 15km 左右。围岩为洙边组黑云母长石片麻岩及片麻状混合岩。岩体为几个透镜状块体构成，长达数十米，沿 NNE 方向产出，与区内断裂剪压带平行，与围岩片麻理方向接近。岩体与片麻岩界线清楚，接触带上可见到榴辉岩呈条带状插入围岩。榴辉岩不同程度地发育片理构造。一些片理构造强烈的部位导致出现剪切柱状节理 (图2)，节理柱面上清楚地显示出波形剪切、挤压面。石榴石相对集中形成红色条带，而单斜辉石在很大程度上为帘石、角闪石、云母类矿物所取代，它们定向排列形成片理构造。接触带片麻岩的片理十分紧密，岩体内部片理构造不发育甚至消失，粒度较粗 (≥ 5 mm)。岩体内偶尔可见到石榴石+石英细脉 (宽0.4—2cm)。

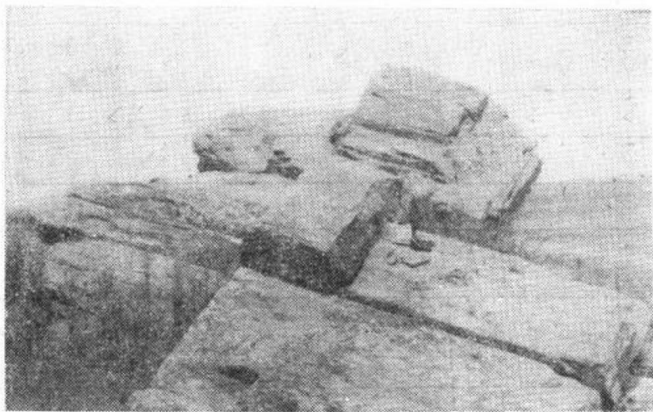


图 2 榴辉岩的压剪性节理 (苏北青龙山)

榴辉岩初始矿物*组合为石榴石、单斜辉石、蓝晶石、石英、磷灰石、金红石。次生矿物为黝帘石、绿帘石、白云母、石英、角闪石、绿泥石、碳酸盐、榍石等。岩石为粒状变晶、板状变晶及斑状变晶结构。有的样品石榴石呈自形晶，其内部出现单斜辉石、角闪

* 本文把属于进变质作用形成的榴辉岩相矿物称作初始相 (initial phases)，而把属于退变质作用形成的矿物统称为次生相 (Secondary phases)。

表 1 榴辉岩类及橄辉岩的矿物组合及相对含量范围 (%)

样品	产地	无水硅酸盐										含水硅酸盐							碳酸盐				不透明矿物			
		Gr	Cpx	Opx	Ol	Ky	Cs	Qz	San	Mi	Pl	Ap	Amt	Amp	Zo	Ep	Sph	Mn	Bit	Chl	Cz	Rt	Il	Mt	Sp	Chm
DQ	苏北青龙山	20~50	10~60			<0	✓	20~50				2±		2~20	5~50			✓				<2	✓	✓		
DJ	苏北碱厂	<40	<50			<1	✓	<10			✓	<5	✓		10±			<2				<2				
DH	苏北后昌桥	<50	~5					✓			✓	✓		5~80				✓	✓			✓				
DM	苏北孟中	<40	<50					<10		<5		✓														
DA	苏北安峰	55	25				5	✓																		
DZ	苏北芝麻坊	15±	30±	20±	30±									<5		✓				✓		✓				5
DG	苏北蒋庄	15±	40±	30±										✓						✓		✓				3±
JC	山东陈莲坡	10~90	10~80											<30			✓	✓				✓				
JC	山东林莲坡	25±	40±											✓			✓	✓		✓		✓				
JZA	山东张莲坡	40	50											✓						✓		✓				
JH	山东环河崖	20~80	20~40					✓				<15		<5		✓				✓		✓				
H10	山东胡家林	✓	<90										✓	✓						✓		✓				✓
H03~07	山东胡家林	10~40	<90										✓	✓						✓		✓				✓
H16	山东胡家林	<40	✓										✓	✓						✓		✓				✓
RH702	山东梭罗树	<30	<70										✓	✓						✓		✓				✓
RS	山东水车沟	40~60	<40					5~20					✓	✓						✓		✓				✓
RL204	山东岚山头	50±	40			✓							✓	✓						✓		✓				✓
RL207	山东岚山头	40±	40±				✓	<10	✓		✓		✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓				✓
RM	山东马家村	50~80	15~85										✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	<3		<8		✓
YX	胶东仙姑顶	<3~90	<3~90					✓				31		✓								✓				✓
YK	胶东康家村	50±	30±									✓		✓								✓				✓
YT	胶东滕家集	30±	30±	30±								✓		✓								✓				✓
YD	胶东大疃	40±									20±	✓		✓	✓	✓				✓		✓				✓
KEM	山东蒙阴	40±	50±									✓		20±						✓		✓				✓

注: ✓表示该矿物作为初始或退变质矿物少量出现。

石、白云母、金红石和石英等矿物(图3)。石榴石在粒度上远小于单斜辉石。单斜辉石为它形,常包含有自形的磷灰石。黝帘石和绿帘石为典型的次生交代矿物,主要取代单斜辉石生长。角闪石沿单斜辉石的裂隙和边缘交代。蓝晶石为自形一半自形,包围单斜辉石(图4),受到绿帘石等次生矿物的包围。所谓斑状变晶结构是自形黝帘石的粗大晶体(达1cm以上)分布于其它矿物构成的基质中,包含交代初始矿物(图5)。单斜辉石被交代为棒状或弯沟状。金红石与钛铁矿连为一体。绿泥石为极细粒状集合体,局部可达30%±。石英可独立出现,常呈波状消光。岩体边部退化变质的榴辉岩中石英含量可达50%以上,具稳定的重结晶结构(三联点)。这类石英为次生石英。石榴石呈孤岛状分布于次生石英之间(图6)局部黝帘石、绿帘石可达30%以上,单斜辉石则为1%±,白云母可达10%。这可能是岩体与围岩作用的结果。



图3 新生的石榴石包含其它矿物
(正交偏光, 4×10)

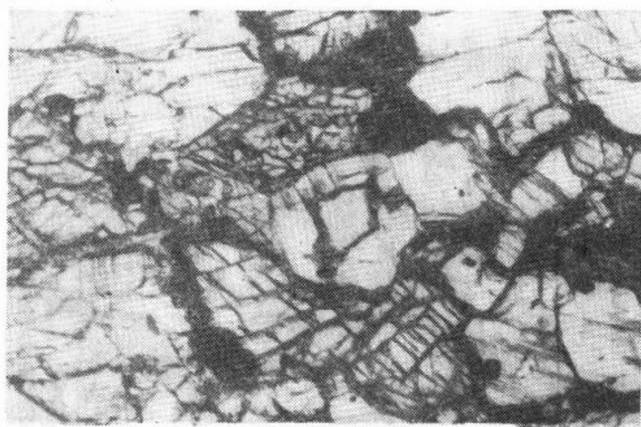


图4 蓝晶石包围单斜辉石的现象
(单偏光, 4×10)

岩石中常可见到的石英作为包体出现于单斜辉石及石榴石内的现象,指示了初始石英的存在。在这些石英周围,寄主矿物常常发生以石英为中心的放射状裂开。由于青龙山榴辉岩发生了较大程度的退变质作用,上述石英包体重结晶程度较高,呈“多晶石英(multicrystalline quartz)”特点。即被包裹的石英晶粒间界线清晰、平直。另一方面,石英包体周围寄主矿物的破裂并不总是呈放射状,有时甚至很少有破裂。原因是后期的热事件



图 5 石榴石等受到黧帘石的包围、交代
(正交偏光, 4×10)

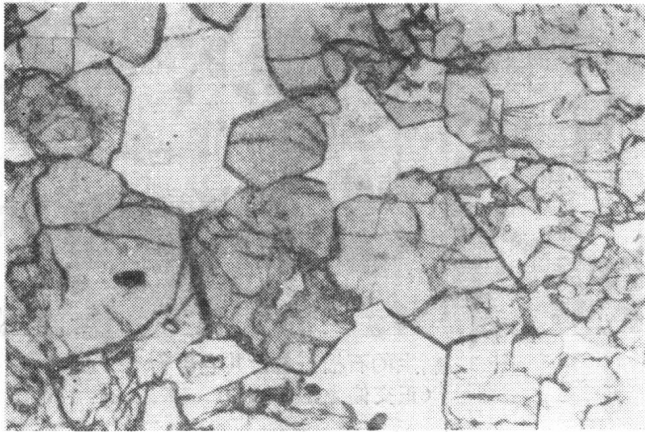


图 6 石榴石与次生石英共生
(单偏光, 4×10)



图 7 榴辉岩的板状变晶结构
(正交偏光, 4×10)

使得这些破裂因退火作用部分或全部愈合, 消失 (Chopin, 1984; Smith, 1984)。上述的这种石英被包含以及周围发生破裂的现象表明这些石英多晶是由早期形成于榴辉岩变质高

峰的柯石英在压力降低时转化而来。同时岩石中大量含水矿物的出现,对柯石英向石英的转变起着重要的促进作用(Boyd and England, 1960)。由此可见,青龙山榴辉岩已经经历了变质高峰后较大程度的退变质过程。

2. 碱厂岩体 (DJ1, DJ2)

位于东海县北20km左右,露头面积很小。但这里岩石较新鲜,退变质作用较弱。岩体DJ1岩石呈黑绿色,块状或片状构造,局部为条带状构造。条带产状为 $48^{\circ}\angle 50^{\circ}$,与区域片麻理方向基本一致。石榴石和石英相对集中形成脉体。岩体周围为第四系覆盖。

初始矿物为石榴石、单斜辉石、蓝晶石、磷灰石、金红石+钛铁矿,次生矿物为角闪石、黝帘石、绿帘石、绿泥石、锥辉石、斜长石、钠云母。样品DJ102呈板状变晶结构,条带状构造(图7)。条带由单斜辉石及石榴石、石英、绿帘石构成(单斜辉石条带)或由石榴石及单斜辉石构成(石榴石条带)。条带之间常有长大的黝帘石晶体(14.3 mm)。样品DJ103为粒状变晶结构。石榴石呈拉长状或粒状,垂直于拉长方向发生裂开。常常包含圆粒状多晶石英,边缘受到绿泥石的交代。蚀变强的部位成团包围于帘石内。单斜辉石为它形板状晶体。边缘分解、重结晶为细粒的角闪石+斜长石后成合晶。角闪石、斜长石小晶体垂直于单斜辉石的边缘生长。单斜辉石粒度大者达4.6 mm。单斜辉石分解并为角闪石+斜长石取代的现象在单斜辉石带内明显强于石榴石带。蓝晶石为它形晶体,很不规则,总是为钠云母所包围交代。磷灰石为自形一半自形粒状,常为石榴石或单斜辉石所包含。金红石量少,可达0.72mm,与钛铁矿伴生。黝帘石为半自形,长柱状,包围所有初始矿物,主要交代石榴石生长。石英呈自形一半自形粒状,具三联点结构。

岩体DJ2岩石呈青灰色,条带状,粒度粗大($>5\text{mm}$)。石榴石与单斜辉石的颜色较之其它露头同类矿物都浅。肉眼可见较多的白云母。同时见到角闪石岩、伟晶岩。这个榴辉岩露头以上述特征明显区别于其它露头。

岩石具板状变晶结构,片状、条带状构造,矿物组合与DJ1相同。石榴石淡粉或近无色,它形,有的呈拉长状,个别包含单斜辉石。常受到黝帘石、斜黝帘石的包围。 $\leq 0.77\text{mm}$ 。石榴石条带为粒状变晶结构。石榴石为细粒($\leq 0.5\text{mm}$)圆粒状,含量在95—100%。在单斜辉石带内,石榴石粒度较大($\leq 1\text{mm}$),约占40%,受到角闪石等的交代,单斜辉石为它形板状变晶, $\leq 1.5\text{mm}$,条带状岩石中,单斜辉石板状变晶可达4mm,有的包含石榴石。角闪石顺解理交代单斜辉石。常包含有石英晶粒。黝帘石亦受到角闪石、白云母的交代。蓝晶石呈半自形,达3.2mm,包含有石英颗粒。石英亦可独立出现。随着角闪石的含量增高,单斜辉石和石榴石含量迅速降低。此时岩石转变为榴闪岩。随着单斜辉石的逐渐消失,矿物组合中出现了钠长石,它与角闪石构成了这一榴辉岩体退变质的最终产物:角闪石+钠长石+白云母。其晶体自形程度好,生长为伟晶状组成均匀的岩石。有的角闪石内还可见到石榴石、单斜辉石残晶。

3. 后昌桥岩体 (DH)

在碱厂西南,后昌桥村北部水沟中,见到露头面积较大的榴辉岩体。但岩石因水的作用而风化强烈。岩体西侧接触带产状较陡($193^{\circ}\angle 70^{\circ}$)。岩体与围岩黑云母片麻岩界线清楚。接触带附近的围岩片理发育,产状为 $23^{\circ}\angle 83^{\circ}$ 。矿物组合为石英+角闪石+单斜辉石+黑云母+白云母+榍石。岩体东侧为第四系覆盖。岩体形态不清楚,走向大致为 150° 。可见这一岩体产状与区域构造线是不一致的。榴辉岩边缘结晶较细($<1\text{mm}$)。榴辉岩发育