

## 加强极低级变质作用研究

沈其韩, 耿元生, 宋会侠

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

**摘要:** 本文主要论述了4个与极低级变质作用研究相关的内容: ① 极低级变质作用研究的主要内容和标志; ② 加强极低级变质作用研究的重要意义和必要性; ③ 当前国内外研究现状和存在问题; ④ 加强极低级变质作用研究需要考虑的4个方面, 一是立项, 二是稳定的经费支持, 三是人才培养, 四是先进仪器设备的配备。

**关键词:** 极低级变质作用; 研究意义; 研究现状; 存在问题

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0342-07

### Strengthening the study of very low-grade metamorphism

SHEN Qi-han, GENG Yuan-sheng and SONG Hui-xia

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** This paper has predominantly discussed four aspects in the study of very low-grade metamorphism:

① The major features of very low-grade metamorphism and research contents; ② The significance and necessity to strengthen the study of very low-grade metamorphism; ③ Current research status and existing problems both in China and abroad; ④ Main problems in strengthening the study of very low-grade metamorphism: the first is setting up projects, the second is continuous projects funds, the third is talent training, the fourth is providing advanced instruments and equipment.

**Key words:** very low-grade metamorphism; research significance; research status; existent problems

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41203025); China Geological Survey Project (1212010811048); Basic Science and Fechnology Research Fundings of the Institute of Geology, GAGS(J1615)

极低级变质作用(very low-grade metamorphism)和极低级变质带(very low-grade metamorphic belt)是当代地球科学的前沿研究课题之一, 主要研究内容包括: 利用先进技术分析层状硅酸盐(以黏土矿物为主)的化学成分和结构的变化, 确定成岩-极低级-低级变质演化过程, 建立变质反应和化学平衡方程式, 进而建立低温条件下岩石成因格子; 根据精确测定的伊利石、白云母及绿泥石等矿物的成分微区变化特征、晶格指数和 $b_0$ 值, 建立新的黏土矿物温度计

和压力计, 与人工实验的矿物结晶所测得的数据进行对比; 确定极低级变质作用和变形的温度、压力、水岩反应及流体条件、热历史; 精确测定成岩压实、极低级变质和低级变质界线和转换过程; 利用极低级变质矿物成分和矿物晶层的堆垛状况、混层结构的变化等研究, 进一步分析和讨论低级变质作用与造山带、逆冲推覆、拆离带及各种盆地的形成演化过程和动力学背景; 对煤田和石油地质各种黏土矿物的研究可对其黏土矿物的形成-迁移和变化提

收稿日期: 2017-12-26; 接受日期: 2018-01-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41203025); 中国地质调查局工作项目(1212010811048); 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J1615)

**作者简介:** 沈其韩(1922-), 男, 研究员, 中国科学院资深院士, 主要从事变质岩和早前寒武纪地质研究, E-mail: huixiasong@cags.ac.cn。

供基础资料。

## 1 极低级变质作用的标志

国际上极低级变质作用的标志主要有:①标志矿物及组合;②伊利石和伊/蒙转换,如结晶度、多型、可膨胀层的百分比、有序度、晶畴大小、 $b_0$ 值等;③绿泥石的结晶度、多型、温度计;④自生石英与长石;⑤有机质参数,如镜质体反射率、笔石反射率、牙形刺颜色蚀变指数、孢子颜色、拉曼谱特征;⑥流体包裹体参数,如流体分带、均一温度等容线等。

Weaver(1960)将低级变质作用划分为成岩作用、初始变质作用、初始很弱变质作用和变质作用4部分。Kübler(1964)采用板岩和页岩中伊利石的半高峰宽区分出成岩(埋藏)带(沸石相 $<200^{\circ}\text{C}$ )、浅层或近变质带(anchigene metamorphic, 葡萄石-绿纤石相,  $200\sim370^{\circ}\text{C}$ )和浅变质带(epizone, 绿片岩相,  $>370^{\circ}\text{C}$ ), 浅层变质作用与成岩作用及变质作用的界限分别用伊利石结晶度指数  $K(0.400\Delta2\theta$  和  $215\Delta2\theta)$  标定。

根据一般的变质作用分类,将变质作用条件低于 $350^{\circ}\text{C}$ 的变质范围划分为亚绿片岩相,并进一步划分为浊沸石相( $t=180\sim250^{\circ}\text{C}$ ,  $p<0.4\text{ GPa}$ )和葡萄石-绿纤石相( $t=250\sim350^{\circ}\text{C}$ ,  $p=0.2\sim0.5\text{ GPa}$ )。这两个相的变质作用条件与毕先梅等(1998)提出的极低级变质带A和极低级变质带B的条件大致相当。

## 2 加强极低级变质作用研究的重要意义和必要性

极低级变质作用研究的物质极大多数属微细矿物,常规的测试技术和分离手段难以奏效。近年来先进的测试技术飞速发展,特别是高分辨率的微束分析技术在地学领域中广泛应用,打开了极低级变质作用研究的方法之门。实践证明,许多金属和非金属矿产,如稀土、金、银、铂族元素、Hg、Sb、As等矿产不仅可以在中高温条件下形成,也可以在低温( $200^{\circ}\text{C}$ 以下)的条件下形成(某些有害元素,如Hg、Pb、Cd、As等主要在 $200^{\circ}\text{C}$ 以下的环境下活动)。极低级变质作用研究在油、气、煤盆地历史的恢复、成烃机理、油气聚集规律的研究中都发挥了重要作用。

通过极低级变质作用的研究可以在造山带、逆冲推覆、拆离带和活动断裂的研究中解决许多地质构造特别是新构造的关键问题。

我国极低级变质带分布非常广泛,如年轻造山带、特提斯带、古老造山带前陆逆冲-褶皱带和大型盆地内部都有大面积遭受过极低级变质改造的地质体。目前对这些地区,极低级变质作用的研究尚属空白或研究极少。要弄清上述地区的地质演化和构造背景,加强极低级变质作用的研究更显紧迫。我国极低级变质的研究,在理论和技术方法方面都紧随国外,无论在深度和广度方面,都存在较大的差距,必须奋力前进,达到并行,逐步争取超越。

## 3 国内外研究现状和存在问题

国际上对变质作用与成岩作用分界的研究较早,20世纪60年代初即已开始全面系统的研究,80年代初IGCP-235项目相变质带演化首次将低级变质作用列为研究内容,1984年在Bristol大学召开了“成岩作用和低温变质作用”国际会议;1985年由Bevins R. E. 和 Robinson D. 领导成立了以Kisch H. J. 为主席的伊利石结晶度测定工作组,以推动极低级变质作用的理论和方法研究;1990年和1991年先后在曼彻斯特召开“作为低级变质作用和成岩作用标志的层状硅酸盐矿物”并在Hoaesten召开“用黏土矿物作地质温度计和地质年代学”国际会议。1994年在我国西安召开了IGCP-294项目“极低级变质作用机理和地质应用”国际会议,此后的10余年间,多次召开国际会议进行学术交流,已有600多篇论文问世,大大推动了这方面的研究,使之接近高潮。

许多国外学者,如Sassi和Scolari(1974)、Dimberline(1986)、Blenkinsop(1988)、Starkey和Robert(1988)、Kisch(1990)、Betlison等(1991)、De Caritat等(1993)、Li等(1994)、Merriman等(1995)、Yui等(1995)、Frey和Robinson(1998)、Arkai等(2000)运用现代先进测试仪器和技术,如X射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、分子电子显微术(AEM)、电子探针(EMPA)及拉曼光谱(RS)等,进行了黏土及层状硅酸盐矿物成分和结构分析,获取变质变形过程物理条件的参数,结合地质资料,研究极低级变质作用的地球动力学过程,取得了很大成功。国外学者无论在研究的理论方面还是技术方法方面,都做出了很大贡献,而

处于领先地位。

我国对极低级变质作用的研究,总体来说,还处于起步阶段,无论在理论方面还是研究广度方面与国外相比还存在较大差距,理论和技术方面则完全跟踪国外,自己还没有任何创新。虽然我国在1994年召开过一次IGCP-294国际会议,以此推动这方面研究,但由于诸多客观因素的限制,除我国台湾在这一方面进行过一些实地研究,大陆除少数地区外,实际研究工作并不多。

我国最早注意极低级变质作用的分界问题始于20世纪80年代初,赵宗溥(1983)首次对沸石相作为极低变质级提出了质疑,1984年他进一步讨论了成岩作用、埋藏变质作用和近变质作用,再次否定了浊沸石相为最低变质相(赵宗溥,1984)。任磊夫等(1987)对变质作用和成岩作用的界限进行了研究。董申保(1986)、董申保等(1986)在第一代变质地质图编制时将浊沸石相列入最低级变质作用范围。真正从事极低级变质作用野外观察和室内测试研究的是1992年张立飞等对陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质过程中黏土矿物转化的研究(张立飞,1992b)。他系统研究了陕北鄂尔多斯盆地中的三叠纪砂岩和泥岩,对砂岩划分了由成岩作用到变质演化的4个阶段,即高岭石结晶阶段、压溶石英和长石再生长阶段、碳酸盐胶结阶段和浊沸石生成阶段,其形成条件 $t < 250^{\circ}\text{C}$ , 摩尔分数 $X_{\text{CO}_2}$ 小于0.17( $p_{\text{CO}_2} < 34 \text{ Pa}$ ),认为该区浊沸石是埋藏变质过程中砂岩孔隙度堵塞隔绝后,在没有外来组分带入和带出( $\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CO}_2$ 除外)的条件下,由胶结物或胶结物与碎屑物经由高岭石+方解石+石英+ $2 \text{H}_2\text{O} = \text{浊沸石} + \text{CO}_2$ 和斜长石+石英+ $4 \text{H}_2\text{O} = \text{浊沸石}$ 反应所生成。在埋藏变质过程中,泥岩中的黏土矿物早期为蒙皂石、高岭石组合,随着埋深的增加转化为伊利石和镁铝蛇纹石混合,进一步埋深则出现伊利石/绿泥石混层,最后出现分散状伊利石和绿泥石。据伊利石-石英矿物对氧同位素测定,这一转化过程中的温度不超过 $150^{\circ}\text{C}$ 。在总结成岩作用和变质作用阶段的分界标志时,他指出“当砂岩中所有空隙被胶结物与碎屑颗粒之间反应形成的新的矿物共生组合充填,标志着成岩作用的结束,变质作用的开始”,从而认为鄂尔多斯盆地的浊沸石为埋藏变质作用产物。

张立飞(1992a)还对陕北鄂尔多斯盆地三叠系延长组浊沸石的形成条件进行了研究,认为:①该区浊沸石是埋藏变质过程中,砂岩孔隙度堵塞隔绝

以后没有外来组合的加入和带出的条件下,通过胶结物间或胶结物与碎屑颗粒间的高岭石+方解石+石英+ $2 \text{H}_2\text{O} = \text{浊沸石} + \text{CO}_2$ 和斜长石+石英+ $4 \text{H}_2\text{O} = \text{浊沸石}$ 反应所生成;②浊沸石形成条件为 $t < 250^{\circ}\text{C}$ ,  $X_{\text{CO}_2}$ 小于0.17;③埋藏变质作用的控制因素除温度和压力外, $\mu\text{CO}_2$ 和 $\mu\text{H}_2\text{O}$ 也是应有的控制因素。

赵孟为(1995)通过对划分成岩作用与埋藏变质作用的标志及其分界标志的研究,认为鄂尔多斯盆地的中生代地层处于中期成岩作用阶段而不属于埋藏变质作用阶段,其理由如下:①三叠系、二叠系和寒武系泥岩中 $< 2 \mu\text{m}$ 组分的伊利石结晶度 $K_{\text{IKL}}$ 计算值为 $0.38^{\circ} \sim 0.82^{\circ}2\theta$ ,均大于 $0.28^{\circ}2\theta$ 成岩-变质阶段的界限,表明泥岩仍处于成岩作用阶段;②泥岩X射线和红外光谱分析结果表明,在1-900 m以浅,黏土矿物为 $R=3$ 型I/S层-伊利石-绿泥石-高岭石组合(偶见少量 $R=1$ 型I/S层),1-900 m以深为 $R=3$ 型I/S层-伊利石-绿泥石组合,指示了中期成岩作用阶段;③上三叠统延长组砂岩和中三叠统纸坊组砂岩中的浊沸石出现在1-920 m以下深度中,结合镜质体反射率值,推测其最高形成温度在 $135 \sim 160^{\circ}\text{C}$ 之间;④多年勘探证实,鄂尔多斯盆地上三叠统延长组、侏罗系富县组、延安组和直罗组中均产有工业油流,油源主要来自延长组,其次来自延安组,地层处于石油的形成阶段,即对应成岩作用的中期阶段,假如它们处于埋深变质作用阶段,要么应当产出干气,要么既不产油也不产气,但绝不会产油;⑤对延长组和纸坊组的粗砂岩中石英次生加大边和方解石胶结物的包裹体进行的显微测温结果显示,由包裹体均一化温度恢复的形成温度为 $90 \sim 170^{\circ}\text{C}$ ,主要集中在 $95 \sim 150^{\circ}\text{C}$ ;⑥张立飞(1992b)使用伊利石-石英矿物对氧同位素测温结果表明,成岩温度不超过 $180^{\circ}\text{C}$ 。

柳益群(1996)研究了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组的浊沸石和吐鲁番-哈密凹陷中三叠系岩石中的浊沸石。古温度估算、镜煤反射率、包裹体测温、黏土矿物转化、伊利石结晶度等测试结果表明,鄂尔多斯盆地东部上三叠统延长组砂岩应形成于中成岩成熟阶段,成岩古温度约为 $80 \sim 120^{\circ}\text{C}$ ,其中浊沸石所在层位 $_{4+5}$ ~ $_{长_7}$ 油层组的古温度为 $89 \sim 101^{\circ}\text{C}$ ,代表了浊沸石的最低形成温度。从区域资料来看,浊沸石分布深度比较广泛,中、下三叠统中均有,根据地温梯度和包裹体测温推测,下三叠统的浊沸石

的形成温度可能在 155℃ 左右。采用同样的方法,作者发现吐鲁番-哈密盆地三叠系凹陷中的浊沸石分布在石英胶结层段之下,呈孔隙式充填,交代斜长石而显示钠长石化。此阶段裂隙发育,片状伊利石和片状绿泥石开始出现,表明已进入较高成岩阶段。结合古温度测定,认为该层段正进入有机质超成熟阶段初期,相应的古温度约在 140℃,也就是说 140℃ 是浊沸石首先出现的温度,随着深度加大,成岩温度增加,浊沸石延续出现,到二叠纪温度会增至 200℃ 左右。

浊沸石的形成不仅受到温度压力的控制,流体成分和影响可能更为重要,因为它们是在开放体系中孔隙水与碎屑反应的产物,其形成温度可以从大约 80℃ 到 200℃ (±)。多数情况下与中成岩阶段和晚成岩阶段一致,即常与油气生成带一致,应属于成岩作用阶段。

综上所述,浊沸石作为目前所定义的最低变质相已无实际意义,对于处在成岩作用和变质作用之间的过渡带宜采用近变质带的名称。由此可见,研究结论尚有很大的分歧,进一步深入研究才能取得统一意见和观点。

朱光等(1994)应用 X 射线分析胶东蓬莱群板岩的变质作用,认为蓬莱群板岩中的伊利石结晶度值、黑云母的出现及仅存在 2M1 型伊利石表明这套地层经历了低绿片岩相(浅变质)变质,这期变质刚好达到了绿泥石带与黑云母带的边界,这些板岩中低绿片岩相矿物沿第 1 期变形劈理的定向表明变质作用与第 1 期变形同期。

20 世纪末,我国台湾学者运用云母的结晶度、炭质物拉曼光谱、镜质体反射率、叶腊石稳定区的温度等方法,对台湾中央山脉、雪山山脉、台北等地区进行了较深入的极低级变质作用研究(Shan and Yang, 1994; Yang *et al.*, 1994; Chen, 1994)。

索书田等(1995, 1996, 1998)运用伊利石结晶度(IC)、绿泥石-云母堆垛集合体、标志性黏土矿物及组合特征,参考牙形石色变指数和镜质体反射率,结合宏观野外地质学研究,对右江盆地中生代构造带首次进行了系统研究,提出右江构造带第三系槽盆相浊积岩系遭受了极低级变质作用,并划分出低级成岩带(<150℃)、高级成岩带(150~200℃)、高级近变质带(250~350℃)和浅变质带(>350℃)4 个亚带,为右江地区构造演化、金矿成因解释提供了科学依据。与此同时,毕先梅等(1998)运用野外调查

与现代测试技术(X 光衍射及电子微束技术为主)和地质温压计相结合的手段,通过对云南“三江”、新疆准噶尔盆地、北京西山潭柘寺典型剖面的解剖获取极低级变质-浅变质的各种矿物、有机质有关参数,突出了绿泥石的研究,对于极低-低级变质火山沉积岩区、矿床蚀变带和断裂构造的形成条件与时代研究具有一定意义,突出绿泥石研究更显重要。还强调了各种指示标志的综合与对照和各种标志之间的交合和验证,从而提高结论的可信度。

毕先梅等(1998)和燕守勋等(2002)还报道了极低级变质作用的国内外研究现状和研究方法。

董申保等(1986)在编制的第一代变质图上将东北地区大片的上古生界地层定为亚绿片岩相。近年来,胡大千等(2009, 2010, 2011, 2012)在内蒙古东部、吉林等地上古生界岩石中进行黏土矿物伊利石和镜质体反射率等研究,认为其变质作用仅为成岩极低级变质级,提供了新的思路。这一工作仍在深入进行中。

极低级变质作用研究在国外虽然已有长足的进展,但用以限定极低级变质作用的理论和技术方法尚在发展中,一些理论和技术尚不完善或很不完善,与中高级变质作用研究程度相比,仍相差甚远。例如已提出的 4 种绿泥石地质温度计中没有一种是令人满意的。利用伊利石(或白云母)结晶度指数区分成岩作用与浅层变质的标准也不令人满意,还在不断调整。不少层状硅酸盐矿物的成分和结构(多型)的认识也在不断更新中。主要原因是该领域的矿物成分和结构十分复杂,而且又受到复杂的物理化学环境(包括地质时间、 $t$ 、 $p$ 、 $f_{\text{CO}_2}$ 、 $f_{\text{SiO}_2}$  及  $f_{\text{K}_2\text{O}}$ )的影响,不确定因素很多,很多因素尚不清楚,研究工作还在不断完善中。

## 4 加强极低级变质作用研究亟需解决的实际问题

首先要提高地质工作者对极低级变质作用研究重要性和紧迫性的认识,其次要解决以下几个实际问题。

### 4.1 重视“极低级变质作用”项目的立项与经费保障

从全国范围看,在国家地质发展研究规划中应将极低级变质作用项目专项列入国家重大地质发展规划中,同时要注意与其他项目的配套研究,如沉积、成矿作用研究的拓展,而且要有较长的年限,使



之有一定的研究时间和稳定的经费保证。

中国地质调查局在全局的地质研究规划与国家研发计划衔接中应列有极低级变质作用研究专项,作为稳定实施的部门,应组织高等院校和负责的科研院所承担相应项目,亦可以和其他项目配套进行,分工协作,完成科研任务。如有条件,应组织地质科研人员积极申请国家自然科学基金项目,开展多方面研究,如在研究极低变质作用的同时,增加油气性质方面的同步变化研究,并探讨一些盆地地层的新老序列或变形极性,探讨构造作用的性质以及地热异常的机制等。

#### 4.2 加强人才培养

从以往进行该类研究的人员组成看,一是从事黏土矿物研究的人员,一是油田地质人员,缺少把黏土矿物、极低级变质作用与形成构造背景进行综合研究的人才。目前能从事此项研究工作的专业人员基本集中在高等院校和科研院所,而且人数不多。省市科研院所和野外地质队基本缺乏这方面的人才,即使有少数人员,目前也没有从事此类项目研究。因此应继续培养或引进这方面人才,充实研究力量。

#### 4.3 加强专有设备的引进和开发

从事极低级变质作用的研究单靠野外工作不能解决问题,必须野外工作与室内的先进技术测试相结合,配备先进的仪器设备,如X射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、分析电子显微束(AEM)、电子探针(EM)及拉曼光谱(RS)等。当前许多高校和科研院所或多或少有其中的一些设备,但完整的不多。且其中一些设备属于比较通用的设备,多用于其它类型研究,对于复杂的、粒度细微的层状硅酸盐矿物研究或缺少标样或缺少相应的软件因此应用较少。鉴于这种情况,必须重点配备一些专用设备和相应软件,适当地投入。同时科研人员必须能亲自掌握这类仪器设备的操作方法,能对数据给以合理解释,因此配备以上设备后要适当进行培训,提高科研人员的相关技能。

如能达到上述目标,极低级变质作用的研究必将有大的发展,才能尽快达到国际前列。

## References

- Arkai P, Mata M P, Giorgetti G, *et al.* 2000. Comparison of diagenetic and low-grade metamorphic evolution of chlorite in associated metapelites and metabasites: an integrated TEM and XRD study[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18: 531 ~ 550.
- Bettison-Varga L, Mackinnon I D R and Schiffman P. 1991. Integrated TEM, XRD and electron microprobe investigation of mixed-layer chlorite-smectite from the point Sal ophiolite, California[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(6): 697 ~ 710.
- Bi Xianmei, Suo Shutian, Mo Xuanxue, *et al.* 1998. A review of very low-grade metamorphism[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 302 ~ 306(in Chinese with English abstract).
- Blenkinsop T G. 1988. Definition of low-grade metamorphic zones using illite crystallinity[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 6(5): 623 ~ 636.
- Chen C H. 1994. Application of K-mica crystallinity to the study of very low grade metamorphism in the central range of Taiwan[A]. IGCP Project 294-International Symposium[C], 176 ~ 183.
- De Caritat P, Hutcheon I and Walshe J L. 1993. Chlorite geothermometry: A review[J]. *Clays and Clay Minerals*, 41(2): 219 ~ 239.
- Dimberline A J. 1986. Electron microscope and microprobe analysis of chlorite-mica stacks in the Wenlock turbidites, mid Wales, U. K [J]. *Geological Magazine*, 123(3): 299 ~ 306.
- Dong Shenbao. 1986. Metamorphism and Crustal Evolution in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 233(in Chinese).
- Dong Shenbao, Shen Qihan, Sun Dazhong, *et al.* 1986. Metamorphic Map of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 37(in Chinese).
- Frey M and Robinson D. 1998. Low-Grade Metamorphism[M]. Oxford: Blackwell Science, 1 ~ 328.
- Hu Daqian, Han Chunyuan, Ma Rui, *et al.* 2012. The very low grade metamorphism in the Upper Paleozoic in Xinlingol area of Inner Mongolia, NE China: Evidence from studies of illite and vitrinite reflectance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 3 042 ~ 3 050(in Chinese with English abstract).
- Hu Daqian, Hong Yan and Yu Jiejiang. 2010. Genetic characteristics of illite in the Permo-Carboniferous, in East Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(5): 1 035 ~ 1 040(in Chinese with English abstract).
- Hu Daqian, Liu Yue, Hong Yan, *et al.* 2011. Research of coexisting clay minerals in the Upper Paleozoic argillaceous rocks in Northeast China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1 458 ~ 1 465(in Chinese with English abstract).
- Hu Daqian and Yu Jiejiang. 2009. Study of illite in the Upper Paleozoic, in northeastern Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25

- (8): 2 017 ~ 2 022 (in Chinese with English abstract).
- Kisch H J. 1990. Calibration of the anchizone: a critical comparison of illite crystallinity scales used for definition[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 8(1): 31 ~ 46.
- Kübler B. 1964. Les argiles, indicateurs de métamorphisme[J]. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 19: 1 093 ~ 1 112.
- Li G, Peacor D and Merriman R J. 1994. TEM and AEM constraints on the origin and significance of chlorite-mica stacks in slates: an example from Central Wales, U. K[J]. *Journal of Structural Geology*, 16(8): 1 139 ~ 1 157.
- Liu Yiqun. 1996. The boundary between diagenesis and metamorphism: A discussion with reference to zeolite facies[J]. *Geological Review*, 42(3): 214 ~ 222 (in Chinese with English abstract).
- Merriman R J, Roberts B and Peacor D R. 1995. Strain-related differences in the crystal growth of white mica and chlorite: a TEM and XRD study of the development of metapelitic microfabrics in the Southern Uplands thrust terrane, Scotland[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 13(5): 559 ~ 576.
- Ren Leifu and Chen Yunjing. 1984. On the division of diagenesis stages according to the transformation of clay minerals[J]. *Oil and Gas Geology*, 5(4): 325 ~ 334 (in Chinese with English abstract).
- Sassi F P and Scolari A. 1974. The b<sub>0</sub> value of the polarsitic white micas as a barometric indicator in low-grade metamorphism of pelitic schists[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 45(1): 143 ~ 152.
- Shan Y H and Yang H Y. 1994. Very low grade metamorphism of ultramafic fragments in basaltic tuffs from Hsuehshan Range, northern Taiwan [A]. *IGCP Project 294 International Symposium[C]*, 76 ~ 91.
- Starkey and Robert J. 1988. Low-grade Metamorphism of the Karmutsen Volcanics[M]. Vancouver, Laramie: University of Wyoming, 1 ~ 167.
- Suo Shutian, Bi Xianmei, Zhao Wenxia, *et al.* 1998. Very low-grade metamorphism and its geodynamical significance of Triassic strata within the Youjiang River basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(4): 395 ~ 405 (in Chinese with English abstract).
- Suo Shutian, Qi Xianglei and Bi Xianmei. 1996. Metamorphic and deformational evolution of the Youjiang River Mesozoic very-low grade metamorphic belt[J]. *Geological Science and Technology Information*, 15(4): 65 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Suo Shutian, You Zhendong and Zhou Hanwen. 1995. Very-low-grade metamorphism and metamorphic belt: A review[J]. *Geological Science and Technology Information*, 14(1): 1 ~ 8 (in Chinese with English abstract).
- Weaver C E. 1960. Possible uses of clay minerals in search for oil[J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 44(9): 1 505 ~ 1 518.
- Yan Shouxun, Tian Qingjiu and Wu Yunzhao. 2002. Very Low-grade Metamorphism and Its Research Methods[J]. *Geoscience*, 16(1): 37 ~ 44 (in Chinese with English abstract).
- Yang H Y, Lo Y M and Huang T M. 1994. The pyrophyllite isograds in the metamorphic terrane of Taiwan[A]. *IGCP Project 294 International Symposium[C]*, 168 ~ 175.
- Yui T F, Huang E and Xu J. 1995. Raman spectrum of carbonaceous material: A possible metamorphic grade indicator for low-grade metamorphic rocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(2): 115 ~ 124.
- Zhang Lifei. 1999a. Origin of laumontite and condition for its formation in Triassic Yanchang Series, North Shaanxi[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 8(2): 145 ~ 153 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lifei. 1992b. Burial metamorphism of the Ordos basin in northern Shaanxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 66(4): 339 ~ 349 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengwei. 1995. The indicators and boundary for separating diagenesis from burial metamorphism[J]. *Geological Review*, 41(3): 238 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongpu. 1983. Zeolite facies untenable[J]. *Study on Petrology*, (4): 123 ~ 133 (in Chinese).
- Zhao Zongpu. 1984. Diagenesis, burial metamorphism and anchimetamorphism[J]. *Geology Review*, 30(5): 501 ~ 509 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Xu Jiawei and Fletcher C W N. 1994. Analysing slate metamorphism of Penglai Group in northern Shandong by X-ray diffraction [J]. *Geology and Prospecting*, 30(2): 42 ~ 49 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 毕先梅, 索书田, 莫宣学, 等. 1998. 极低级变质作用的研究现状[J]. *地质前缘*, 5(4): 302 ~ 306.
- 董申保. 1986. 中国变质作用及其与地壳演化的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 233.
- 董申保, 沈其韩, 孙大中, 等. 1986. 中国变质地质图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 37.
- 胡大千, 韩春元, 马 瑞, 等. 2012. 内蒙古锡林郭勒地区上古生界极低级变质作用: 伊利石和镜质体反射率的证据[J]. *岩石学报*, 28(9): 3 042 ~ 3 050.
- 胡大千, 洪 艳, 于介江. 2010. 吉林省东部石炭-二叠系伊利石的成因标志[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(5): 1 035 ~

1 040.

- 胡大千, 刘 越, 洪 艳, 等. 2011. 东北地区上古生界泥质岩石共存粘土矿物[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(5): 1 458 ~ 1 465.
- 胡大千, 于介江. 2009. 内蒙古东北地区上古生界伊利石研究[J]. 岩石学报, 25(8): 2 017 ~ 2 022.
- 柳益群. 1996. 关于成岩作用与变质作用界限的讨论——从沸石相说起[J]. 地质论评, 42(3): 214 ~ 222.
- 任磊夫, 陈芸菁. 1984. 从粘土矿物的转变讨论沉积成岩到变质过程中的阶段划分[J]. 石油与天然气地质, 5(4): 325 ~ 334.
- 索书田, 毕先梅, 赵文霞, 等. 1998. 右江盆地三叠纪岩层极低级变质作用及地球动力学意义[J]. 地质科学, 33(4): 395 ~ 405.
- 索书田, 祁向雷, 毕先梅. 1996. 右江中生代极低级变质带的变质变形过程[J]. 地质科技情报, 15(4): 65 ~ 72.
- 索书田, 游振东, 周汉文. 1995. 极低级变质作用和极低级变质带综述[J]. 地质科技情报, 14(1): 1 ~ 8.
- 燕守勋, 田庆久, 吴昀昭. 2002. 极低级变质作用及其研究方法[J]. 现代地质, 16(1): 37 ~ 44.
- 张立飞. 1992a. 陕北三叠系延长统浊沸石的成因及形成条件的理论计算[J]. 岩石学报, 8(2): 145 ~ 153.
- 张立飞. 1992b. 陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质作用研究[J]. 地质学报, 66(4): 339 ~ 349.
- 赵孟为. 1995. 划分成岩作用与埋藏变质作用的指标及其界限[J]. 地质论评, 41(3): 238 ~ 244.
- 赵宗溥. 1983. 沸石相质疑[J]. 岩石研究, 4: 123 ~ 133.
- 赵宗溥. 1984. 成岩作用埋藏变质作用与近变质作用[J]. 地质论评, 30(5): 501 ~ 509.
- 朱 光, 徐嘉炜, Fletcher C W N. 1994. 应用 X 射线衍射分析胶北蓬莱群板岩中变质作用[J]. 地质与勘探, 30(2): 42 ~ 49.