关于甚低级变质作用与近变质带 研究中的几个问题



Vol. 96 No. 5

May 2 0 2 2

王河锦

北京大学地球与空间科学学院,北京,100871

内容提要:本文集中讨论了甚低级变质作用研究中涉及到的几个问题,包括:① 近变质带的创立及其在解决划 分成岩作用与变质作用界线这一国际难题中所取得的进步;② 伊利石结晶度对碎屑岩甚低级变质作用研究起到的 作用与贡献;③ 仪器校正、粒度大小及其与 Kübler 指数的经验关系式;④ 泥质碎屑岩中的成岩指示矿物与变质指 示矿物;⑤ 松潘-甘孜、巴颜喀拉造山带的甚低级变质作用的模式与新的成因解释;⑥ 讨论了涉及到的科学研究的 相关规则。提出了运用指示矿物结合伊利石结晶度划分成岩作用/变质作用界线的方案和建立喜马拉雅伊利石结 晶度标样的重要性与必要性;提出碎屑岩甚低级变质作用的新成因模式。

关键词:甚低级变质作用;伊利石结晶度;成岩带;近变质带;浅变质带;指示矿物;成因解释;变质模式

甚低级变质作用指碎屑岩所经历的介于成岩作 用和绿片岩相变质作用之间的地质过程(Frey, 1987a; Merriman, 1991; Frey et al., 1999; Merriman et al., 1999a)。与甚低级变质作用相关 的成岩带(Diagenetic zone)/近变质带 (Anchizone)/浅变质带(Epizone)在变质相图中的 位置见图1。甚低级变质作用与有机矿产资源关系 密切,石油、天然气的保存(Ospinara, 1968; Mullis et al., 2002, 2017)、煤的形成(Ospinara, 1968; Teichmuller, 1974; Wolf, 1995)都与甚低级变质作 用相关。此外,许多岩石的变形与断裂、片理的形成 也与甚低级变质作用相关(Kisch, 1991a; Gonzalez et al. 2021)。因此,甚低级变质作用也可促进岩石 变形与应力作用的研究。

由于甚低级变质作用发生的温度较低(150~200℃至350~400℃)(Frey,1987a),只有对温度最 敏感的最细小的黏土矿物颗粒(<2 μm)、保留在矿 物中的流体包裹体和保留在岩石中的有机质(如植 物碎片、镜质体等)才能响应这样的环境条件的变 化。因此,黏土矿物学、流体包裹体学和有机质热演 化学是研究碎屑岩甚低级变质作用的重要方法,其 中黏土矿物学是基础。用肉眼和在光学偏光显微镜 下(其物镜光性分辨率无法分辨 2 µm 以下的颗粒) 无法观察到其低级变质作用所引发的黏土矿物颗粒 中的变化,只有使用 X-射线衍射分析和在透射电子 显微镜(纳米级的分辨率)下才可观察记录到黏土颗 粒的变化。已经证实由其低级变质作用引发的黏土 矿物的变化有结晶度变化和蒙脱石—伊蒙混层—伊 利石一白云母(2:1结构)系列的转变,以及包含 1:1结构系列黏土矿物和包含2:1:1结构系列 黏土矿物的变化以及它们的混合变化,如蒙脱石一 高蒙混层—高岭石—叶腊石(Frey, 1987a, 1987b; Wang Hejing et al., 1996),蒙脱石-绿蒙混层-绿泥石一硬绿泥石,蛭石一蛭绿混层一绿泥石的转 变(Arkai, 1991; Cruz et al., 2002; Bozkaya et al., 2012)。X-射线衍射仪除了可以分析测试黏土 矿物的物相及其组合外,还可确定矿物的结晶度以 及结构。由于碎屑岩含有大量的黏土矿物,因此,野 外采集的碎屑岩通常都可以得到黏土矿物的组合、 结晶度和结构信息,没有"哑地层"。这是甚低级变 质作用研究中有关黏土矿物研究的一个优点。相比 之下,流体包裹体和岩石中的有机质体的研究往往

收稿日期:2022-02-25;改回日期:2022-04-24;网络发表日期:2022-05-16;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:王河锦,男,1958年生。教授,从事甚低级变质作用和黏土矿物学研究。E-mail:hjwang@pku.edu.cn。

 引用本文:王河锦. 2022. 关于甚低级变质作用与近变质带研究中的几个问题. 地质学报,96(5):1711~1723, doi: 10.19762/j.cnki. dizhixuebao. 2022140.
 Wang Hejin. 2022. On several research aspects of very low-grade metamorphism and anchzione. Acta Geologica Sinica,96(5): 1711~1723.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41872048)资助的成果。



图 1 泥质碎屑岩成岩带、近变质带、浅变质带与变质相 P-T 关系图(据 Frey, 1987a; Bucher et al., 1994; Frey et al., 1999; 安佳丽等, 2018 修改)

Fig. 1 Positions of diagenetic zone, anchizone and epizone of pelitic rocks in P-T plot of metamorphic facies (after Frey, 1987a; Bucher et al., 1994; Frey et al., 1999; An Jiali et al., 2018)

Ky—蓝晶石;Sil—矽线石;And—红柱石

Ky-Kyanite; Sil-sillimanite; And-andalusite

会因为没有样品(如前寒武系往往没有有机质而无法 开展有机质热演化研究或十分困难)或没有采集到达 标的样品(原生包裹体样品)而产生"哑地层"现象。

成岩作用与变质作用的界线划分是地学界公认的一个未解决的难题(Frey,1987a;Kisch,1987), 也是甚低级变质作用研究直接面对的一个课题。我 国学者在甚低级变质作用方面已做了不少的工作 (赵宗溥,1984;任磊夫等,1984;吴汉泉等,1992;张 立飞,1992;Wu Hanquan et al.,1993;赵孟为, 1995;朱光,1995;索书田等,1995;柳益群,1996;毕 先梅等,2004;胡大千等,2009;沈其韩等,2018)。本 文就甚低级变质作用研究中的几个问题加以讨论。

1 近变质带的创立和推广

Kübler(1964,1967,1968)在成岩带和变质带之 间创立了一个"近变质带",以便将变质作用(带)和 成岩作用(带)区别开来。介于成岩作用和变质作用 之间的这个"近变质带"(也称成岩-变质转变带)可 以混合有成岩带的物质(矿物)也可以有变质带的物 质(矿物),而成岩带和变质带则分别只含有成岩矿 物和变质矿物。这一思想及其实践——"伊利石结 晶度和近变质带界线的建立"使得成岩/变质的界线 划分大大向前推进了一步。人们可以通过像"测量 线性变量"一样测试伊利石结晶度,从而"测量出"成 岩作用和变质作用之间的界线。1987年 Frey 出版 了《Low Temperature Metamorphism》, 1999 年 Frev 和 Robinson 出版了《Low Grade Metamorphism》。这两本书的出版使得 Kübler 这 种在成岩作用和变质作用之间划分出一个"过渡的 近变质带"的创造性的做法,在国际地学界获得了广 泛的推广。历经几十年的实践,已经在全世界不同 地区(如阿尔卑斯、喜马拉雅、安第斯、阿巴拉契亚、 西太平洋岛屿、非洲、南美洲、印度次大陆、澳大利 亚、新西兰等)取得了众多的成果(Pepiper et al., 1981; Katagas et al., 1991; Meere, 1995; Arka et al., 1997; Offler et al., 1998; Girard et al., 1999; Ellero et al., 2002; Ruiz et al., 2008; Sokalska et al., 2008; Wang Hejing et al., 2008, 2012, 2013, 2018; Hara et al., 2009; Bisevac et al., 2010; Fagereng et al., 2010; Abad et al.,

2012; Vazquez et al., 2013; Campos et al., 2015; Smithard et al., 2015; Makeen et al., 2016; Zaheer et al., 2017: Wonglak et al., 2020: Amireh, 2020: Anderson et al., 2021: Gonzalez et al., 2021; Das et al., 2021; Lowey, 2021)。在众多的 "绿片岩相"之下(之内)发现了其低级变质岩及其向 沉积岩过渡(界线)的现象。绿片岩相之下直接为沉 积岩不符合沉积-变质地质体的基本性质。图 2 表 示泥质碎屑岩成岩带/近变质带/浅变质带的伊利石 结晶度界线、伊利石 c* (结晶学倒易 c 轴)方向厚 度、K-云母多型和指示矿物在变质带中的分布。

伊利石结晶度 Kisch 对比方案(Alps 2 标样)与喜马拉雅(Himalaya)伊利石 结晶度标样建立的重要性

地壳岩石圈不是均质体,而是由众多不同性质、 成分、成因的各种岩石构成的。碎屑岩也是由不同 粒度不同成分不同性质的各类沉积岩石(包括火山 碎屑沉积岩)组成的。碎屑岩伊利石结晶度的测试 需要多个数据来描述。仅凭几个数据描述一个地区 的结晶度变化,不符合碎屑岩的多种岩石类型不同 性质不同成分的本质。

众所周知,用仪器测量物体的任何一个物理量,

都会产生误差,伊利石结晶度的测试同样会产生误 差。类似于物理学用"砝码"传递物质质量的方法, 伊利石结晶度的分析测试也需要"砝码"进行结晶度 数据的传递(王河锦等, 2015)。这个砝码就是伊利 石结晶度标样,即伊利石结晶度的分析测试需要使 用标样进行数据的校正。只有使用标样校正的测量 数据才能够达到伊利石结晶度数据的对比,所划分 的变质带才具有可对比的意义。否则,测量产生的 误差可能超过一个变质带的范围。同一块标本同一 块样品被人为地测量为不同的结晶度,最终确定为 不同的变质级别,并由此产生各种"争议",没有任何 意义。幸运的是,人们找到了克服这种错误的方法 即"标样砝码"。所以,伊利石结晶度的测试一定要 使用具有砝码特征的"标样"进行校正。

使得 Kübler 建立"近变质带"思想在 50 多年里 世界范围内广泛实践(应用)的一个重要原因是伊利 石结晶度国际对比方案的建立。Kisch(1991b)为此 做出了伟大的贡献:提供了一套不同结晶度的标样 供全世界研究学者使用,以校正不同实验室之间测 量伊利石结晶度时产生的偏差。该标样的使用使全 世界参加标样测试的实验室所测量的伊利石结晶度 值达到一致(小于实验偏差),从而由这些实验室测 试的伊利石结晶度值及所划分出的"近变质带"完全

泥质碎屑岩	伊利石结晶度 Kübler指数	伊利石NEWMOD 理论厚度(nm)	伊利石TEM 平均厚度(nm)	蒙脱石	伊蒙混层	绿蒙混层	高蒙混层	海绿石	K-云母多型	高岭石	叶腈石	黑硬绿泥石	钠云母	硬绿泥石	第三母
早期 成岩帯	1.0	0	9						(1M)						
晚期 成岩带		8							1Md						
低近 变质带	0.42		22			···· † ···			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						
高近 变质带	0.30	33	38						2M ₁ (3T)		 				
浅 变质带	0.25	40	52												

图 2 阿尔卑斯-喜马拉雅(Alps-Himalaya) 三叠系复理石变质带、伊利石结晶度、粒度大小、多型与指示矿物分布图 (据 Frey, 1987a, 1987b; Wang Hejing et al., 1996, 2008, 2012, 2013, 2018; Frey et al., 1999 绘制) Fig. 2 Illite crystallinity, domain size, polytype and index minerals distribution of Triassic flysches in the Alps-Himalaya orogens (modified after Frey, 1987a, 1987b; Wang Hejing et al., 1996, 2008, 2012, 2013, 2018; Frey et al., 1999)

可以对比。

Kisch(1990, 1991b)提供的伊利石结晶度标样 是由采自阿尔卑斯三叠系复理石中一系列具不同伊 利石结晶度的岩芯(片)构成的。使用了衍射仪直接 测量的 1 nm 衍射峰的半高宽表达伊利石结晶度, 并给定 Kübler 指数等于 0.21~0.38 为近变质带的 上下界线。由于仅有一套岩芯标样,Kisch 标样无 法提供给各实验室长期保留使用。此外,Kisch et al. (2004)修正了其标样的近变质带界线为"老界 线"Kübler 指数加 0.04 即 0.25~0.42,保持了与 Kübler 近变质带界线的一致。

Warret al. (1994)提供了一套采自英国西海岸 的岩屑样品,使用了拟合并"校正"的1 nm 衍射峰 的半高宽表达伊利石结晶度,并给定 Kübler 指数等 于 0.25~0.42 为近变质带的上下界线。由于其近 变质带界线与 Kübler 所提出的近变质带界线一致, 也得到了大量的使用。但是,很遗憾, Warr et al. (2015)在用 Warr et al. (1994)标样与阿尔卑斯样 品进行对比时,发现 Warr et al. (1994)提供的标样 完全偏离了阿尔卑斯样品的近变质带界线,因而把 Warr et al., (1994)标样的近变质带界线移动 (Shift)至 0.32~0.52。这说明 Warr et al. (1994) 标样在 21 年时间里(1994~2015 年)是与阿尔卑斯 复理石的成岩作用一变质作用的实际资料相差了半 个多变质带。由于 Warr et al. (1994)标样确定的 "近变质带"是一个偏离了半个多原 Kübler 近变质 带的假近变质带,因此,自我否定了他们之前的工 作。自然界是不以人们的意志为转移的,不会随人 为所定"界线值"的改变而改变。根据 Warr (1996) 及 Warr et al. (2016)对 Coombs et al. (1959)、 Coombs(1961)在新西兰南岛三叠系火山岩中划分 出的沸石相、葡萄石-绿纤石相、绿纤石-阳起石相和 绿片岩相进行比较,采用变化后的 0.32~0.52 为 Warr et al. (1994)标样的近变质带界线,所对应的 变质相与变质矿物组合发生了如下变动:① 由原来 的浅变质带含绿片岩相(GS)变为浅变质带含有绿 片岩相加绿纤石-阳起石相(GS+PA);② 近变质带 由绿纤石-阳起石相加葡萄石-绿纤石相(PA+PP) 变为葡萄石-绿纤石相加沸石相(PP+Z);③ 成岩带 减少了沸石相(Z)范围(见图 3)。同样,根据 Cruz et al. (2002)资料,西班牙 Maláguide 杂岩体中若 以 0.32~0.52 为近变质带界线,则地开石、珍珠陶 石、云母-绿泥石混层、蛭石-蛭石/绿泥石混层物相 进入浅变质带(绿片岩相),成为绿片岩相的矿物,这 有悖于绿片岩相的矿物共生组合。根据 Baludikay et al. (2018)资料,澳大利亚 Officer 盆地的近变质 带温度范围为 350~200℃,若以 0.32 和 0.52 为界 线,其近变质带温度范围将变化为 250~160℃,即 250℃就开始绿片岩相变质,与经典泥质岩等化学系 列绿片岩相 *T-P* 区域相悖(见图 1)。

根据 Frey(1987a) 近变质带上、下界线的温度 值(150~200℃和 350~400℃),按照平均温度界线 375℃和 175℃计算, Warr et al. (1994)标样的近变 质带(0.32~0.52)对应的温度范围将下移至 292~ 57℃,即浅变质带的温度下限低于 300℃,而成岩带 的温度上限低于 60℃。根据已经发表的地质温度 计的数据计算,这一近变质带界线的移动(由 0.25 ~0.42 移至 0.32~0.52),使得近变质带的温度界 线将下移 50~100℃。如此,成岩作用的最高温度 不到 60℃和绿片岩相的温度下限低于 300℃,这与 大量地质事实不符(大量沉积物在低于 60℃条件下 处于埋藏压实阶段,而代表绿片岩相开始的硬绿泥 石在≥300℃出现,黑云母在 420℃出现(Bucher et al., 1994))。说明近变质带界线由 0.25~0.42 到 0.32~0.52的移动,不符合沉积物(碎屑岩)埋藏--压实--成岩--变质的地质实际情况。如果将近变质 带界线由 0.25~0.42 移动到 0.32~0.52,可在已 发表的多达几十篇文章中出现这种与地质实际情况 相悖的现象(Potel et al., 2016; Zanoni et al., 2016; Bozkaya et al., 2016; Goncuoglu et al., 2016; Tetiker et al., 2016; Abd Elmola et al., 2017; Mullis et al., 2017; Do Campo et al., 2017; Wang Hejing et al., 2018; Siissenberger et al., 2018; Maza et al., 2018; Montomoli et al., 2018; Baludikay et al., 2018).

由于:① Kisch标样不易获得,且其物相组成为 混合物,其相对统计误差较大,其早期的近变质带界 线较 Kübler 界线偏小 0.04,后期才更正与 Kübler 界线一致;② Warr et al. (1994)"标样"早期(1994 ~2015年)与 Kübler 近变质带界线假一致,而后期 (2015年以后)大大偏离 Kübler 界线,故此,新的与 Kübler 界线标样一致并与阿尔卑斯有相同的大地 构造背景和地质演化历史的伊利石结晶度标样的建 立就十分有必要。我国青藏高原广泛发育了三叠系 复理石(出露约 90 万 km²,面积是阿尔卑斯三叠系复 理石区古特提斯东缘的对应出露区,有着十分丰富 的各种甚低级变质作用区、带,其伊利石结晶度



图 3 近变质带界线由 0.25~0.42 (Küber 指数)移动到 0.32~0.52 (Küber 指数)而产生的变质相变化 (据 Wang Hejing et al., 2018)

Fig. 3 Variations of metamorphic facies resulted from the shift of anchizone boundaries from 0.25~0.42 (Küber Index) to 0.32~0.52 (Küber Index) (after Wang Hejing et al., 2018)

E、A、D—以近变质带界线 0.25~0.42 划分的浅变质带、近变质带和成岩带; E、A、D—以近变质带界线 0.32~0.52 划分的浅变质带、近 变质带和成岩带; GS—绿片岩相; PA—绿纤石-阳起石相; PP—葡萄石-绿纤石相; Z—沸石相

E, A, D—Epizone, anchizone and diagenetic zone divided by the boundaries of 0. $25 \sim 0.42$; *E*, *A*, *D*—epizone, anchizone and diagenetic zone divided by the boundaries of 0. $32 \sim 0.52$; GS—greenschist facies; PA—pumpellyite-actionlite facies; PP—prehnite-pumpellyite facies; Z—zeolite facies

Kübler 指数(KI)分布范围从>1 到<0.15,是建立 伊利石结晶度标样的极好选区。该区产出的样品在 区域大地构造和区域地球化学背景和时间因素上都 与阿尔卑斯标样完全一致,可建成更好的 (Himalaya)伊利石结晶度标样组,也可为我国碎屑 岩甚低级变质作用研究奠定国际对比的基础。

3 仪器校正、粒度计算与X射线伊利 石结晶度诸指数的定量关系式

3.1 X射线衍射仪的校正

需要指出的是,伊利石结晶度测量涉及1 nm 单个衍射峰。X射线单个衍射峰是由5个基本要素 构成的,即衍射峰位置(d 值)、最大强度、半高宽、形 态、不对称性(图4),每个要素都具有特定的物理学 意义(Wang Hejing,1994; Wang Hejing et al., 2000a; Zhou Jian et al.,2003)。众所周知,任何衍 射仪都需在 d 值校正后才可运行。然而,由于伊利 石结晶度 Kübler 指数是由衍射峰半高宽描述的,d 值的校正并不等于半高宽的校正。因此,在进行伊 利石结晶度测试时,除了 d 值校正外,衍射仪还需 进行半高宽的校正。

3.2 粒度大小与 Kübler 指数的关系

由于 Kübler 指数是建立在结晶学 Scherrer (1918)公式基础上的,其结晶度数值与粒度大小直 接相关。因而,Kübler 指数近变质带的界线,也反 映了伊利石在甚低级变质作用影响下生长出的粒度 大小,即结晶学倒易 c 轴(c^* ,下同)方向的厚度。近 变质带界线的伊利石 c^* 方向厚度可由透射电镜实 验测试,再经统计求得平均值,也可由 Scherrer 公 式计算。由于 Scherrer 公式假定颗粒为球形或等 轴粒形,与伊利石片状相差很大,且不考虑颗粒的生 长分布情况(模式),因此,与伊利石实际生长情况不 符,计算误差大,按照 Kübler 近变质带界线 0.42~ 0.25° $\Delta 2\theta$,常数 K 取 0.94,由 Scherrer 公式计算出





PP-衍射峰位置; I_{max}一最大衍射强度; MN一半高宽; Sc一形态参数; As-不对称性参数(据 Wang Hejing et al., 2000a)

PP—Peak position; I_{max} —maximum intensity; MN—full width at half maximum;Sc—shape coefficient;As—asymmetry (after Wang Hejing et al., 2000a)

c*方向厚度为20~33 nm。本文运用充分考虑颗粒 生长遵循 Ostwald 模式(Eberl et al., 1990)与对数 正态分布模式的 NEWMOD 软件(Reynolds, 1985, 2017),消除应力作用的效应,进行理论计算,给出近 变质带的理论粒度值为 23~40 nm(图 2)。值得 指出的是,在 TEM(透射电镜)实验测试伊利石 c^* 方向厚度时,100%精准的c*定向尚有难度。通过 定向岩石芯片所切制的"定向芯片"往往是偏离 c* 方向的,而一旦偏离,就是斜向切片,结果往往是 增加 c* 方向的视厚度。多颗粒统计的平均值,实 际上是制片技术偏离准确 c* 方向程度的衡量。随 着岩石遭受的变质作用强度的增强,伊利石结晶 度变好,颗粒增大,片状性质更明显,更难切制垂 直 c* 晶片,更易斜切、增大斜距,统计的平均粒度 便偏大。另一方面,由于黏土矿物颗粒细小,在透 射电镜高能量电子束的轰击下,极不稳定(数秒内 即可非晶化),拍到的往往是已经从三维尺度部分 非晶化的照片(颗粒变小)。因此,透射电镜的数 据也是有偏差的。这就是 Merriman et al. (1999b) 提出的伊利石近变质带 c* 方向厚度界线(22~38 \sim 52 nm)与 NEWMOD 理论计算值相差 -1 nm、 +5 nm、+12 nm 的原因(图 2)。样品 RW-75 的 实测 Kübler (KI) 指数为 1.979,由 NEWMOD 理 论计算的 c* 方向厚度介于 3 nm(KI=2.073)和 4 nm(KI=1.64)之间(3.5 nm),即成核厚度,非常 符合黏土矿物 2:1 基本结构单元层(1 个 2:1 基 本结构层厚度 = 1 nm)稳定存在的最低层数 (\geq 3 层)。NEWMOD 计算的近变质带 c^* 方向厚度界 线值与 TEM 平均界线值的关系见图 5。根据图 5,可建立伊利石结晶度 Kübler 指数 *KI* 与 c^* 方向 厚度 *D* 的关系式:

$$D = 7.9524 K I^{-1.184}$$
(1)
$$R^{2} = 0.9995$$

式中,D单位为 nm,KI单位为° $\Delta 2\theta$,CuK α 。

若以 TEM 平均近变质带 c* 方向厚度界线值 (Merriman et al., 1999b)建立与 KI 的关系式,则 KI 指数 1.979 对应 1.7 nm 厚度(不到 2 个基本层)。显 然这样小于 2 个基本层的颗粒是不存在的。由此说 明了 TEM 实验数据存在较大的偏差,即大的偏大, 小的偏小,存在不合理性;而且,现有的 TEM 技术也 很难得到晚期成岩带伊利石 c* 的照片(数据)。





Fig. 5 The relationship between Kübler index KI and domain size D along c^*

黑圆圈为 NEWMOD 计算厚度数据;黑菱形为 TEM 平均厚度数据;虚线为 D 与 KI 的指数负相关函数曲线

Full circles are calculated with NEWMOD; full diamonds are TEM statistics cited from Merriman and Peacor 1999b; dashed line is a negative exponent relationship between KI and D

3.3 伊利石结晶度诸指数的关系式

除 Kübler 指数外,用 X 射线方法描述伊利石 结晶度的还有 Weaver 指数(Weaver, 1960)和 Weber 指数(Weber, 1972),由于 Kübler 指数、 Weaver 指数和 Weber 指数之间存在定量关系式 (表 1)(Wang Hejing et al., 2000b; 王河锦等, 2007),因此,只需测量 Kübler 指数来描述伊利石结 晶度(王河锦, 1998; 王河锦等, 1998),其他指数可由 这些定量关系式转换而来。现在 Weaver 指数和 Weber 指数已很少使用。

方程编号	定量关系式	系数	备注
1	$KI = C_1 / (\ln W_U)^{0.5}$	$C_1 = 0.703$	Gauss 分布
2	$Wv = C_2 / KI^2$	$C_2 = 1.638$	Gauss 分布
3	$KI = C_3 / (Wv - 1)^{0.5}$	$C_3 = 0.844$	Lorentz 分布
4	$W_v = C_4 K I^{-2} + 1$	$C_4 = 0.712$	Lorentz 分布
5	$KI = C_5 / (Wv^{1/\mu} - 1)^{0.5}$	C_5 * , $\mu \!=\! 1 \!\sim\! \infty$	Pearson VII 分布
6	$W_{v} = (1 + C_{6} K I^{-2})^{\mu}$	C_6 * , $\mu \!=\! 1 \!\sim\! \infty$	Pearson VII 分布
7	$Wb = C_7 / (\ln Wv)^{0.5}$	$C_7 = 501.912$	Gauss 分布
8	$Wv = C_8 / Wb^2$	$C_8 = 1.9625$	Gauss 分布
9	$Wb = C_9 / (Wv - 1)^{0.5}$	$C_9 = 602.857$	Lorentz 分布
10	$W_{v} = C_{10} / Wb^{2} + 1$	$C_{10} = 363436.735$	Lorentz 分布
11	$Wb = C_{11}/(Wv^{1/\mu}-1)^{0.5}$	C_{11} ** , $\mu\!=\!1\!\sim\!\infty$	Pearson VII 分布
12	$Wv = (1 + C_{12}/Wb^2)^{\mu}$	C_{12} ** , $\mu\!=\!1\!\sim\!\infty$	Pearson VII 分布
13	$KI = C_{13}Wb$	$C_{13} = 0.0014$	任一分布
14	$Wb = C_{14}KI$	$C_{14} = 714$	任一分布

表 1 Kübler(KI), Weaver(Wv)和 Weber(Wb)指数的定量关系式(据 Wang Hejing et al., 2000b;王河锦等, 2007) Table 1 Relationships among Kübler (KI), Weaver (Wv) and Weber (Wb) indices (after Wang Hejing et al., 2000b; Wang Hejin et al., 2007)

注:*参考王河锦等(2007)中图 1;**参考王河锦等(2007)中图 2。

4 成岩作用与变质作用的界线划分

按照原有岩石在温度压力升高条件下形成新的 矿物的变质作用定义,只有变质矿物开始形成时,变 质作用(过程)才开始。因此,原有岩石中的沉积-成 岩自生矿物和火山玻璃、火成矿物随着温度压力的 升高产生新的变质矿物时,标志着变质作用的开始。 对于碎屑岩而言,泥质岩类第一个变质反应与伊利 石结晶度关系的确定,富铁镁质岩类第一个变质反 应与伊利石结晶度关系的确定,成岩带膨胀层黏土 矿物的分布与伊利石结晶度关系的确定是碎屑岩甚 低级变质作用研究的重要内容,在以上三大关系确 定的基础上得出以矿物分布为基础的成岩作用与变 质作用的分界线,确定成岩带/近变质带/浅变质带 各带的矿物组合类型,近变质带中混合矿物的类型, 可为成岩/变质界线的划分提供以矿物学岩石学为 依据的方案。

碎屑岩按照化学成分的特点,主要为富 Si-Al 系列岩石,其在成岩→变质转变过程中,矿物发生的 主要变化是成岩自生矿物向变质矿物的转变,如:蒙 脱石±伊蒙混层±绿蒙混层±高岭石(成岩带)→伊 利石±绿泥石±叶蜡石(近变质带)→白云母±绿泥 石(浅变质带),达到绿片岩相时可出现白云母、钠云 母、黑云母、黑硬绿泥石、硬绿泥石等矿物,即随着变 质程度的加深混层矿物中膨胀层消失,层间电荷逐 渐增加直至饱和。泥质岩中发生的第一个变质反应 是高岭石+石英生成叶腊石的反应(Frey,1987b), 而富铁镁系列的岩石,其第一个变质反应是海绿石 +石英±绿泥石—黑硬绿泥石+碱性长石+H₂O+ O2 的反应(Frey et al., 1973)。控制黏土矿物形成、 转变的因素有很多,除了温度和岩石化学系列外,压 力、pH值、水介质等条件不同,引起的变质作用强 度不同,对应的矿物组合不同,结晶度不同,结构参 数不同。由于碎屑岩在低温条件下,岩石往往达不 到完全封闭的系统状态,甚低级变质岩岩石成因格 子的分析达不到经典的绿片岩相及其以上变质相的 研究程度,所以以某种矿物出现或消失划分变质带 的方法一直使用至今。

Wang Hejing et al. (2018) 指出碎屑岩经成岩作 用形成的成岩指示矿物为:蒙脱石、伊蒙混层、绿蒙 混层、1M 伊利石、高岭石。此外还有海绿石、高蒙 混层。碎屑岩受甚低级变质作用影响形成的变质指 示矿物为:钠云母、叶腊石、黑硬绿泥石、硬绿泥石、 黑云母和石墨;基性火山碎屑岩受甚低级变质作用 的影响产生的变质指示矿物为:浊沸石、葡萄石、绿 纤石、阳起石。值得注意的是高岭石和钠云母常常 会出现在近变质带中,这也是近变质带的一个特点。

根据这些指示矿物及其分布,结合伊利石结晶 度的变化就可划分出一个地区碎屑岩中的近变质 带/成岩带的界线,即成岩作用/变质作用的界线。 这是定性物相分析与定量结晶度分析相结合的划分 方案。

关于绿泥石,就其成因而言,可在风化到沉积到 成岩到低温变质的过程中形成(Frey, 1987; Chamley,1989)。因此,绿泥石像石英一样可称为 "贯通"矿物。铁镁质矿物在地表风化过程中通过水 化很容易风化成绿泥石,长英质矿物也可在风化、沉 积、成岩过程中通过增加铁镁质和水化形成自生绿 泥石,沉积物(包括自生矿物)在埋藏过程中随埋藏 深度的增加,引起温度压力增加最终可形成新的变 质的绿泥石。因此,并不是所有绿泥石都是变质绿 泥石,也不能把绿泥石当成变质指示矿物。正是绿 泥石可在沉积—成岩—变质的过程中大量出现在碎 屑岩中,其与环境的平衡生长(通过成分与结构的调 整)记录了环境的各种温压和介质条件,从而使得绿 泥石成为了能够反映成岩到甚低级、到绿片岩相变 质过程的有效地质温度计。

另一个值得再提的是绢云母(Sericite)。在地 质学领域,绢云母除了用于描述热液蚀变绢云母化 外,还用于低温变质研究中,用绢云母-绿泥石组合 描述绿片岩相的变质级别。然而,1998年国际矿物 学会矿物命名委员会云母分会 15位委员联名在4 个国际矿物学刊物——《American Mineralogist》 《Canadian Mineralogist》《Mineralogical Magazine》 《Clays and Clay Minerals》)上发表了云母类矿物的 新分类方案,该方案取消了绢云母(Sericite)(Rieder et al.,1998)。以前发表的描述为绢云母(Sericite) 的"矿物",实际上是伊利石,或>95%的"绢云母"都 落入到了伊利石的分布区内。因此,绢云母-绿泥石 组合应该为伊利石-绿泥石组合,而"伊利石向绢云 母的转变"自然是不存在的。

5 青藏高原松潘-甘孜、巴颜喀拉造山 带三叠系复理石区的甚低级变质作 用与变质带

根据1400多个可进行国际对比的青藏高原三 叠系复理石黏土矿物物相组成、伊利石结晶度、绿泥 石结晶度、矿物温度计、K-云母 b。值数据,较完整揭 示了青藏高原三叠系复理石中保留的十几个成岩 带、近变质带和浅变质带(Wang Hejing et al., 2008, 2012, 2013, 2018)。这是阿尔卑斯-喜马拉 雅三叠系复理石甚低级变质作用研究中的第一个完 整的变质带分布图。它揭示了青藏高原从古特提斯 洋到喜马拉雅造山过程中甚低级变质所起的作用, 也为建立成岩作用与变质作用界线划分方案奠定了 实例基础。这一研究成果表明了在青藏高原北缘至 青藏高原东北出露的三叠系并非全是区域低绿片岩 相变质(董申保等,1986;沈其韩等,2016),而是一个 汇聚了沉积岩(成岩带)到浅变质岩(绿片岩相)的区 域。由北西向东南龙门山断裂带,总体从成岩作用 区转变到绿片岩相变质作用区,成岩作用与变质作 用的界线穿越地层界线,同时穿越褶皱轴线(图 6)。 说明其低级变质不是埋藏变质作用引起的,而是构 造增厚-埋藏产生温压升高引起的,称为"构造-埋藏 变质作用"或"构造-埋藏变质模式"。这是除了唯一



图 6 松潘-甘孜造山带和巴颜喀拉造山带变质带分布图(据 Wang Hejing et al., 2008, 2012, 2013, 2018 修改) Fig. 6 Distribution of metamorphic zones in Songpan-Garzê and Bayan Har orogens

(modified from Wang Hejing et al., 2008, 2012, 2013, 2018)

(a) 一成岩带-变质带分布图;(b) 一变质带与褶皱(背斜)轴关系图;1一壤塘浅变质带;2一丹巴-金川浅变质带;3一小金近变质带;4一两河口近变质带;5一松潘近变质带;6一久治近变质带;7一兴海-同德-泽库近变质带;8—扎陵湖-鄂陵湖近变质带;9一巴颜喀拉成岩带
(a) 一Distribution of diagenetic zone and metamorphic zones; (b) — relation between metamorphic zones and folding axes (anticline); 1—Rangtang epizone; 2—Danba-Jinchuan epizone; 3—Xiaojin anchizone; 4—Lianghekou anchizone; 5—Songpan anchizone; 6—Jiuzhi anchizone; 7—Xinghai-Tongde-Zeku anchizone; 8—Zhalinghu-elinghu anchizone; 9—Bayan Har diagenetic zone

的"埋藏变质"解释模式外,甚低级变质作用新的成 因解释模式。

图 6 表明,松潘-甘孜造山带和巴颜喀拉造山带 的三叠系复理石仅局部(约 40%)遭受了低级到甚 低级变质作用的影响,而大部分地区依然处于成岩 作用阶段,尚未变质。这与 2016 版中国变质地质图 所划分的松潘-甘孜造山带和巴颜喀拉造山带都属 于区域中低压低绿片岩相变质不同,也与 1986 年版 中国变质地质图所划分的区域绿片岩相型低温动力 变质不同。

6 相关科学术语与引用

1993年7月5~17日,在西安召开了地科联 294项目的"Very low-grade metamorphism: Mechanisms and geological applications"国际研讨 会⁰,会议将Very Low-Grade Metamorphism 翻译 为甚低级变质作用。会议组委会成员有沈其韩(中 国科学院院士,变质岩专家)、马福臣(时任国家自然 科学基金委地学部副主任)、Day H W(美国加利福 尼亚大学教授,变质岩专家)、Liou J G(美国斯坦福 大学教授,《Low Temperature Metamorphism》作者 之一)、Robinson D(英国布里斯托大学教授,《Low Grade Metamorphism》编者之一,作者之一,长期担任 过《Journal of Metamorphic Geology》副主编)、Bevins R E(英国威尔士国家博物馆,博士)。地科联 294项 目(Very Low-Grade Metamorphism)伊利石结晶度小 组负责人以色列 Kisch H J 教授参加了会议。

根据科学术语翻译的优先性、国际会议的广泛 影响性和专家权威性原则,本文沿用1993年地科联 294项目会议翻译的术语"甚低级变质作用"(图7) (注:1995年,出现将"Very low-grade metamorphism" 翻译为"极低级变质作用",并出现"成岩变质作用" 一词,2004年还出现"伊利石向绢云母转变"的提 法)。

7 结论

(1)碎屑岩甚低级变质作用的研究属于定量分析的科学范畴,其科学术语的使用包括翻译须遵循科学界优先性的基本规则。

(2)用肉眼和光学偏光显微镜无法观察到甚低 级变质作用所引发的碎屑岩中黏土矿物颗粒的物相 及其组成、结晶度和结构的变化;X-射线衍射仪是 碎屑岩甚低级变质作用研究最常规有效的仪器。

(3)以指示矿物结合伊利石结晶度可进行碎屑



图 7 地科联 294 项目西安研讨会论文摘要封面与 对应的中文页面

Fig. 7 Cover page of abstracts of Xi'an international symposium of IGCP 294 and corresponding Chinese page

岩成岩作用与变质作用界线的划分,泥质碎屑岩成 岩指示矿物有:蒙脱石、伊蒙混层、绿蒙混层、高岭 石/蒙脱石混层、高岭石、海绿石、1M 伊利石等,变 质指示矿物有:叶腊石、钠云母、黑硬绿泥石、黑云 母、硬绿泥石、石墨等。

(4)近变质带以阿尔卑斯三叠系复理石伊利石 结晶度标样划分,其 Kübler 指数为 0.42~0.25° Δ2θ,CuKα;近变质带的温度范围约为 150~200℃ 至 350~400℃。

(5)建立新的与 Kübler 创立的阿尔卑斯近变质 带界线一致的喜马拉雅(Himalaya)伊利石结晶度 标样十分重要、十分有必要。

(6) 甚低级变质作用的成因模式有待进一步 发展。

致谢:感谢二位审者对本文提出的宝贵意见和 建议。

注 释

地科联 294 项目. 1993. 甚低级变质作用:机制及地质应用. 会议论文摘要(英中文). 西安.

References

- Abad I, Nieto F, Gutierrez-Alonso G, Murphy J B, Braid J A, Rodriguez-Navarro A B. 2012. Fluid-driven low-grade metamorphism in polydeformed rocks of Avalonia (Arisaig Group, Nova Scotia, Canada). Swiss Journal of Geosciences, 105(2): 283~297.
- Abd Elmola A, Charpentier D, Buatier M, Lanari P, Monie P. 2017. Textural-chemical changes and deformation conditions registered by phyllosilicates in a fault zone (Pic de Port Vieux thrust, Pyrenees). Applied Clay Science, 144: 88~103.
- Amireh B S. 2020. Weathering, recycling, hydraulic sorting and metamorphism/metasomatism implications of the NE Gondwana Lower Cambrian—Lower Cretaceous siliciclastic succession of

Jordan. Journal of Asian Earth Sciences, 191: 104228.

- An Jiali, Wang Hejin, Yuan Lei. 2018. Very low-grade metamorphism of the Precambrian along profile Kaili-Rongjiang-Congjiang, southeast of Guizhou Province, China. Acta Petrologica Sinica, 34(3): 669~684 (in Chinese with English abstract).
- Anderson R B, Long S P, Horton B K, Calle A Z, Soignard E. 2021. Late Paleozoic Gondwanide deformation in the Central Andes: insights from RSCM thermometry and thermal modeling, southern Bolivia. Gondwana Research, 94: 222 ~242.
- Arkai P. 1991. Chlorite crystallinity—an empirical-approach and correlation with illite crystallinity, coal rank and mineral facies as exemplified by Paleozoic and Mesozoic rocks of northeast Hungary. Journal of Metamorphic Geology, 9(6): 723~734.
- Arkai P, Ghabrial D S. 1997. Chlorite crystallinity as an indicator of metamorphic grade of low-temperature meta-igneous rocks: a case study from the Bukk Mountains, northeast Hungary. Clay Minerals, 32(2): 205~222.
- Baludikay B K, Francois C, Sforna M C, Beghin J, Cornet Y, Storme J Y, Fagel N, Fontaine F, Littke R, Baudet D, Delvaux D, Javaux E J. 2018. Raman microspectroscopy, bitumen reflectance and illite crystallinity scale: comparison of different geothermometry methods on fossiliferous Proterozoic sedimentary basins (DR Congo, Mauritania and Australia). International Journal of Coal Geology, 191: 80~94.
- Bi Xianmei, Mo Xuanxue. 2004. Transition from diagenesis to lowgrade metamorphism and related minerals and energy resources. Earth Science Frontiers, 11(1): 287 ~ 294 (in Chinese with English abstract).
- Bisevac V, Balogh K, Balen D, Tibljas D. 2010. Eoalpine (Cretaceous) very low- to low-grade metamorphism recorded on the illite-muscovite-rich fraction of metasediments from South Tisia (eastern Mt Papuk, Croatia). Geologica Carpathica, 61 (6): 469~481.
- Bozkaya O, Yalcin H, Goncuoglu M C. 2012. Diagenetic and very low-grade metamorphic characteristics of the Paleozoic series of the Istanbul Terrane (NW Turkey). Swiss Journal of Geosciences, 105(2): 183~205.
- Bozkaya O, Gunal-Turkmenoglu A, Goncuoglu M C, Unluce O, Yilmaz I O, Schroeder P A. 2016. Illitization of Late Devonian-Early Carboniferous K-bentonites fromwestern Pontides, NW Turkey: implications for their origin and age. Applied Clay Science, 134(3): 257~274.
- Bucher K, Frey M. 1994. Petrogenesis of Metamorphic Rocks. London: Springer-Verlag, 99~146.
- Brant Campos L F B, Guimaraes E M, Barroso R H G, Gomes A W. 2015. Influence of pressure and temperature in the illite crystallinity in Proterozoic sequences: North of Distrito Federal and Goias, Brazil. Brazilian Journal of Geology, 45(3): 383 ~398.
- Chamley H. 1989. Clay Sedimentology. Hongkong: Springer-Verlag, 20~562.
- Coombs D S. 1961. Some recent work on the lower grade of metamorphism. The Australian Journal of Science, 24(5): 203 \sim 215.
- Coombs D S, Ellis A J, Fyfe W S, Taylor A M. 1959. The zeolite facies with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. Geochimica et Cosmochimica Acta, 17: $53 \sim 107$.
- Cruz M D R, Jimenez P R. 2002. Correlation between crystallochemical parameters of phyllosilicates and mineral facies in very low-grade metasediments of the Betic Cordilleras, Spain: a synthesis. Clay Minerals, 37(1): 169~185.
- Das A K, Khaoash S, Mishra P, Mohapatra B K, Mohanty J. 2021. Chromite-bearing quartzite in the southern fringe of Singhbhum Craton around Ghutrigaon, eastern India: petrogenetic implication. Geological Journal, 56(7): 3472~3496.
- Do Campo M, Nieto F, Albanesi G L, Ortega G, Monaldi C R. 2017. Outlining the thermal posdepositional evolution of the

Ordovician successions of northwestern Argentina by clay mineral analysis, chlorite geothermometry and Kubler index. Andean Geology, 44(2): 179~212.

- Dong Shenbao, Shen Qihan, Sun Dazhong. 1986. Metamorphic Map of China (1: 40000000). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Eberl D D, Środoń J, Kralik M, Taylor B, Peterman Z E. 1990. Ostwald ripening of clays and metamorphic minerals. Science, 248: 474~477.
- Ellero A, Leoni L, Marroni M, Nicolae I, Pandolfi L, Sartori F. 2002. Deformation and metamorphism in the Fenes Nappe (southern Apuseni Mountains, Romania). Comptes Rendus Geoscience, 334(5): 347~354.
- Fagereng A, Cooper A F. 2010. The metamorphic history of rocks buried, accreted and exhumed in an accretionary prism: an example from the Otago Schist, New Zealand. Journal of Metamorphic Geology, 28(9): 935~954.
- Frey M. 1987a. Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In: Frey M, ed. Low Temperature Metamorphism. New York: Chapman and Hall, 9~58.
- Frey M. 1987b. The reaction-isograd kaolinite + quartz = pyrophyllite+H₂O, Helvetic Alps Switzerland. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 67: $1\sim$ 11.
- Frey M, Roggwill P, Schindle C. 1973. Progressive low-grade metamorphism of glauconite-bearing formations, Helvetic Alps, Switzerland. Contributions to Mineralogy and Petrology, 39: 185~218.
- Frey M, Robinson D. 1999. Low-Grade Metamorphism. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Girard M, Steck A, Thelin P. 1999. The Dutung-Thaktote extensional fault zone and nappe structures documented by illite crystallinity and clay-mineral paragnesis in the Tethys Himalaya between SpitiRiver and Tso Morari, NW India. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 79(3): 419 ~430.
- Goncuoglu M C, Gunal-Turkmenoglu A, Bozkaya O, Unluce-Yucel O, Okuyucu C, Yilmaz I O. 2016. Geological features and geochemical characteristics of Late Devonian—Early Carboniferous K-bentonites from northwestern Turkey. Clay Minerals, 51(4): 539~562.
- Gonzalez V M, Carbonell P J T, Turienzo M M. 2021. Structural overprinting and style of deformation at sierra Beauvoir and sierra de Apen: a geometric and kinematic model for the evolution of the internal thrust-fold belt, Fuegian Andes, Argentina. Journal of Southern American Earth Sciences, 112 (part 1): 103575.
- Hara H, Wakita K, Ueno K, Kamata Y, Hisada K, Charusiri P, Charoentitirat T, Chaodumrong P. 2009. Nature of accretion related to Paleo-Tethys subduction recorded in northern Thailand: constraints from melange kinematics and illite crystallinity. Gondwana Research, 16(2): 310~320.
- Hu Daqian, Yu Jiejiang. 2009. Study of illite in the Upper Paleozoic, in northestern Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 2017~2022 (in Chinese with English abstract).
- Katagas C, Tsoliskatagas P, Baltatzis E. 1991. Chemicalmineralogy and illite crystallinity in low-grade metasediments, Zarouchla Group, northern Peloponnesus, Grece. Mineralogy and Petrology, 44(1-2): 57~71.
- Kisch H J. 1987. Correlation between indicators of very low-grade metamorphism. In: Frey M, eds. Low Temperature Metamorphism. New York: Chapman and Hall, 227~300.
- Kisch H J. 1990. Calibration of the anchizone—a critical comparasion of illite crystallinity scales used for definition. Journal of Metamorphic Geology, 8(1): 31~46.
- Kisch H J. 1991a. Development of slaty cleavage and degree of verylow-grade metamorphism—a review. Journal of Metamorphic Geology, 9(6): 735~750.
- Kisch H J. 1991b. Illite crystallinity: recommendations on samples preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory

samples. Journal of Metamorphic Geology, 9(6): 665~670.

- Kisch H J, Arkai P, Brime C. 2004. On the calibration of the illite Kubler index (illite " crystallinity "). Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 84: 323 ~331.
- Kübler B. 1964. Les argiles, indicateurs de métamorphisme. Revue Instituté de la Français de Pétrole, 19: 1093~1112.
- Kübler B. 1967. Anchimetamorphisme et schistosite. Bulletin Centre Recherche Pau-SNPA, 1: 259~278.
- Kübler B. 1968. Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Bulletin Centre Recherche Pau-SNPA, 2: 385~397.
- Liu Yiqun. 1996. The boundary between diagenesis and metamorphism-a discussion with reference to zeolite facies. Geological Review, 42(3); $215 \sim 222$ (in Chinese with English abstract).
- Lowey G W. 2021. Very low-grade metamorphism of the Dezadeash Formation (Jura-Cretaceous): constraints on the tectonometamorphic history of the Dezadeash flysch basin and implications regarding the tectonic evolution of the northern Cordillera of Alaska and Yukon. AIMS Geosciences, 7(3): 355 ~389.
- Makeen Y M, Abdullah W H, Ayinla H A, Hakimi M H, Sia S G. 2016. Sedimentology, diagenesis and reservoir quality of the upper Abu Gabra Formation sandstones in the Fula sub-basin, Muglad basin, Sudan. Marine and Petroleum Geology, 77: 1227~1242.
- Maza S N, Collo G, Morata D, Lizana C, Camus E, Taussi M, Renzulli A, Mattioli M, Godoy B, Alvear B, Pizarro M, Ramirez C, Rivera G. 2018. Clay mineral associations in the clay cap from the Cerro Pabellon blind geothermal system, Andean Cordillera, Northern Chile. Clay Minerals, 53(2): 117 ~141.
- Meere P A. 1995. Sub-greenschist facies metamorphism from the Variscides of SW Ireland—an Early syn-extensional peak thermal event. Journal of the Geological Society, 152: 511~521.
- Merriman R J. 1991. Phyllosilicates as indicators of very low-grade metamorphism and diagenesis-introduction. Journal of Metamorphic Geology, 9(6): 663~664.
- Merriman R J, Frey M. 1999a. Patterns of very low-grade metamorphism in metapelitic rocks. In: Frey M, Robinson D, eds. Low Grade Metamorphism. Oxford: Blackwell Science, 61 \sim 107.
- Merriman R J, Peacor D R. 1999b. Very low-grade metapelites: mineralogy, microfabrics and measuring reaction progress. In: Frey M, Robinson D, eds. Low Grade Metamorphism. Oxford: Blackwell Science, 10~60.
- Montomoli C, Iaccarino S, Simonetti M, Lezzerini M, Carosi R. 2018. Structural setting, kinematics and metamorphism in a km-scale shear zone in the Inner Nappes of Sardinia (Italy). Italian Journal of Geosciences, 137(2): 294~310.
- Mullis J, Rahn M K, Schwer P, de Capitani C, Stern W B, Frey M. 2002. Correlation of fluid inclusion temperatures with illite " crystallinity" data and clay mineral chemistry in sedimentary rocks from the external part of the Central Alps. Symposium on Diagenesis and Low-Grade Metamorphism. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 82(2): 325 ~340.
- Mullis J, Mahlmann R F, Wolf M. 2017. Fluid inclusion microthermometry to calibrate vitrinite reflectance (between 50 and 270 degrees C), illite Kithler-Index data and the diagenesis/ anchizone boundary in the external part of the Central Alps. Applied Clay Science, 143: 307~319.
- Offler R, McKnight S, Morand V. 1998. Tectonothermal history of the western Lachlanfold belt, Australia: insights from white mica studies. Journal of Metamorphic Geology, 16(4): 531 \sim 540.
- Ospinara E. 1968. Thermodynamicaspects of origin of oil gas and coal. Magyar Kemikusok Lapja, 23 (2): 69.

- Pepiper G,Kotopouli C N. 1981. Very low-grade metamorphism of Triassic volcanics, West Hellenic Nappes, southern Peloponnese, Greece-summary. Geological Society of America Bulletin, 92 (12): 914~916.
- Potel S, Maison T, Maillet M, Sarr A C, Doublier M P, Trullenque G, Mahlmann R F. 2016. Reliability of very low-grade metamorphic methods to decipher basin evolution: case study from the Markstein basin (southern Vosges, NE France). Applied Clay Science, 134(3): 175~185.
- Ren Leifu, Chen Yunqing. 1984. On the division of diagenesis stages according to the transformation of clay minerals. Oil & Gas Geology, 5(4): $325 \sim 334$ (in Chinese with English abstract).
- Reynolds R C Jr. 1985. NEWMOD@ A computer program for the calculation of one-dimensional diffraction patterns of mixed layered clays. R. C. Reynolds, Jr., 8 Brook Dr., Hanover, USA, release 2017.
- Rieder M, Cavazzini G, D'Yakonov Y, Frank-Kamenetskii V A, Gottardi G, Guggenheim S, Koval P V, Müller G, Neiva A M R, Radoslovich E W, Robert J-L, Sassi F P, Takeda H, Weiss Z, Wones D R. 1998. Nomenclature of the micas. Canadian Mineralogist.46(5): 586~595.
- Ruiz G M H, Helg U, Negro F, Adatte T, Burkhard M. 2008. Illite crystallinity patterns in the Anti-Atlas of Morocco. Swiss Journal of Geosciences, 101(2): 387~395.
- Scherrer P. 1918. Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. Göttinger Nachr. Math. Phys. 2: 98~100.
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Liu Fulai. 2016. Metamorphic Map of China (1:50000000), Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Shen Qihan, Geng Yuansheng, Song Huixia. 2018. Strengthening the study of very low-grade metamorphism. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(2): 342~348.
- Siissenberger A, Wemmer K, Schmidt S T. 2018. The zone of incipient ⁴⁰Ar^{*} loss-monitoring ⁴⁰Ar^{*} degassing behavior in a contact metamorphic setting. Applied Clay Science, 165: 52 ~63.
- Smithard T, Bordy E M, Reid D. 2015. The effect of dolerite intrusions on the hydrocarbon potential of the Lower Permain Whitehill Formation (Karoo supergroup) in South Africa and southern Namibia: a preliminary study. South African Journal of Geology, 118(4): 489~510.
- Sokalska E T, Dubinska E, Kapron G, Kozubowski J A, Walski M. 2008. Clay minerals from Permo-Carboniferous very low-grade metamorphic rocks from the central part of the Fore Sudetic monocline (western Poland). Clay Minerals, 43(4): 561~574.
- Suo Shutian, You Zhendong, Zhou Hanwen. 1995. Very-low-grade metamorphism and metamorphic belt: a review. Geological Science and Technology Information, 14(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Teichmuller M. 1974. The origin and transformation of bituminous substances in coals in relation to the origin and transformation of petroleum. Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen,24: 65~112.
- Tetiker S, Yalcin H, Bozkaya O. 2016. Diagenesis/metamorphism history of Lower Triassic Cigli Group rocks in Uludere-Uzungecit (Sirnak) area (eastern Part of the Southeast Anatolian Autochthone). Turkiye Jeoloji Bulteni-Geological Bulletin of Turkey, 59(3): 323~340.
- Vazquez M, Asebriy L, Azdimousa A, Jabaloy A, Booth-Rea G, Barbero L, Mellini M, Gonzalez-Lodeiro F. 2013. Evidence of extensional metamorphism associated to Cretaceous rifting of the North-Maghrebian passive margin:the Tanger-Ketama Unit (External Rif, northern Morocco). Geologica Acta, 11(3): 277~293.
- Wang Hejin. 1998. On the error calculation of the Kubler index of illite crystallinity. Geological Review, 44(3): 328 ~ 335 (in Chinese with English abstract).

- Wang Hejin, Zhou Jian. 1998. On theindices of illite crystallinity. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 395~405 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hejin, Tao Xifeng, Rahn M. 2007. Determination of constants C1-C14 in 14 equations of the relationships between the Kübler, weaver and weber indices and their applications. Geological Journal of China Universities, 13(3): 561~565 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hejin, Zhou Zhao, Wang Ling, Yuan Lei, An Jiali, Huang Baoling. 2015. Calibration of illite crystallinity Kübler index and determination of anchizone. Acta Geologica Sinica, 89(2): 406~411 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hejing, Frey M, Stern W B. 1996. Diagenesis and metamorphism of clay minerals in the Helvetic Alps of eastern Switzerland. Clays and Clay Minerals, 44: 96~112.
- Wang Hejing, Zhou Jian. 2000a. Data smoothing and distortion of X-ray diffraction peaks. I. Theory. Journal of Applied Crystallography, 33: 1128~1135.
- Wang Hejing, Zhou Jian. 2000b. The relationships between the Kübler index, Weaver index and Weber index of illite crystallinity and their applications. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 80: 187 ~198.
- Wang Hejing, Rahn M, Tao Xiaofeng, Zheng Nan, Xu Tingjing. 2008. Diagenesis and metamorphism of Triassic flysch along profile Zoige-Lushan, northwest Sichuan, China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 82(4): 917~926.
- Wang Hejing, Ma Yongsheng, Zhou Jian, Xu Tingjing. 2012. Diagenesis and very low-grade metamorphism in a 7012 m-deep well Hongcan 1, eastern Tibetan plateau. Swiss Journal of Geosciences, 105(2): 249~261.
- Wang Hejing, Rahn M, Zhou Jian, Tao Xiaofeng. 2013. Tectonothermal evolution of the Triassic flysch in the Songpan-Garzê orogen, eastern Tibetan plateau. Tectonophysics, 608: 505~516.
- Wang Hejing, Rahn M, Zhou Jian. 2018. Tectonothermal evolution of the Triassic flysch in the Bayan Har Orogen, Tibetan plateau. Tectonophysics, 723: 277~287.
- Warr L N. 1996. Standardized clay mineral crystallinity data from the very low-grade metamorphic facies rocks of souther New Zealand. European Journal of Mineralogy, 8: 115~127.
- Warr L N, Rice A H N. 1994. Interlaboratory standardization and calibration of clay mineral crystallinity and crystallite size data. Journal of Metamorphic Geology, 12: 141~152.
- Warr L N, Ferreiro Mählmann R. 2015. Recommendations for Kubler Index standardization. Clay Minerals, 50: 283~286.
- Warr L N, Cox S C. 2016. Correlating illite (Kübler) and chlorite (Árkai) "crystallinity" indices with metamorphic mineral zones of the South Island, New Zealand. Applied Clay Science, 134: 164~174.
- Weaver C E. 1960. Possible use of clay minerals in search for oil. Bulletin American Association of Petroleum Geologists, 44: 1505~1518.
- Weber K. 1972. Note on the determination of illite crystallinity. Neues Jahrbuch fur Mineralogie Monatshefte, 6: 267~276.
- Wolf M. 1995. Reflectance and composition of dispersed organic matter at DSDP Leg 67 Hole. Palaeontologische Zeitschrift, 69 (1-2): 1∼6.
- Wonglak S, Sutthirat C, Assawincharoenkij T. 2020. Petrochemistry of Lan Sang metamorphic suites. Scienceasia, 46(4): 481~489.
- Wu Hanquan, Feng Yuemei, Song Suguang. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, north Qilian Mountains, China. Journal of Metamorphic Geology, 11(4): 523~536.
- Wu Hanquan, Tian Bai, Song Suguang, Su Li. 1992. Very low grade metamorphism-on achievements and problems. Northwest Geosciences, 13 (2): $161 \sim 178$ (in Chinese with English abstract).

- Zaheer M, Khan M S, Mughal M S, Abbasi N. 2017. Petrography, provenance, diagenesis and depositional environment of Murree Formation in Jhelum Valley, Sub Himalayas, Azad Jammu and Kashmir, Pakistan. Arabian Journal of Geosciences, 10 (23): 514.
- Zanoni G, Segvic B, Moscariello A. 2016. Clay mineral diagenesis in Cretaceous clastic reservoirs from West African passive margins (the South Gabon Basin) and its impact on regional geology and basin evolution history. Applied Clay Science, 134 (3): 186~209.
- Zhang Lifei. 1992. Burialmetamorphism of the Ordos basin in northern Shaanxi. Acta Geologica Sinica, 66(4): 339~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Mengwei. 1995. Theindicators and boundary for separating diagenesis from burial metamorphism. Geological Review, 41 (3): 238~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zongpu. 1984. Diagenesis, burial metamorphism and anchimetamorphism. Geological Review, 30(5): 501~509 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jian, Wang Hejin. 2003. Thephysical meanings of 5 basic parameters for an X-Ray diffraction peak and their application. Chinese Journal of Geochemistry, 22(1): 38~44.
- Zhu Guang. 1995. Grading the extremely-low metamorphic clastic sedimentary rocks by the crystallinity of the illite. Petroleum Exploration and Development, 22(1): 33~34 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 安佳丽,王河锦,苑蕾. 2018. 黔东南凯里-榕江-从江前寒武系甚低 级变质作用研究. 岩石学报,34(3):669~684.
- 毕先梅,莫宣学.2004.成岩一极低级变质一低级变质作用及有关 矿产.地学前缘,11(1):287~294.
- 董申保,沈其韩,孙大中. 1986. 中国变质地质图(1:400万).北京: 地质出版社.
- 胡大千,于介江.2009. 内蒙古东北地区上古生界伊利石研究. 岩石 学报,25(8): 2017~2022.
- 柳益群.1996.关于成岩作用与变质作用界线的讨论:从沸石相谈 起.地质论评,42(3):215~222.
- 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. 石油与天然气地质,5(4): 325~334.
- 沈其韩, 耿元生, 刘福来. 2016. 中国变质地质图(1:500万). 北京: 地质出版社.
- 沈其韩, 耿元生, 宋会侠. 2018. 加强极低级变质作用研究. 岩石矿 物学杂志, 37(2): 342~348.
- 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.地质科技情报,14:1~8.
- 王河锦. 1998. 关于伊利石结晶度指数的误差计算. 地质论评,44 (3): 328~335.
- 王河锦,周健. 1998.关于伊利石结晶度诸指数的评价. 岩石学报,14 (3): 395~405.
- 王河锦,陶晓风, Rahn M. 2007. 伊利石结晶度 Kübler, Weaver 和 Weber 指数关系式常数的确定与应用. 高校地质学报, 13(3): 561~565.
- 王河锦,周钊,王玲,苑蕾,安佳丽,黄宝玲. 2015. 伊利石结晶度 Kübler 指数的校正与近变质带的确定.地质学报,89(2):406~411.
- 吴汉泉,田白,宋述光,苏犁. 1992. 多种地球动力学背景条件下甚 低级变质作用的一些问题. 西北地质科学,13(2):161~178.
- 张立飞. 1992. 陕北鄂尔多斯盆地埋藏变质作用研究. 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线. 地 质论评,41(3): 238~244.
- 赵宗溥.1984. 成岩作用、埋藏变质作用与近变质作用. 地质论评,30 (5):501~509.
- 朱光.1995. 用伊利石结晶度确定碎屑沉积岩甚低级变质等级. 石油 勘探与开发, 22(1): 33~34.

On several research aspects of very low-grade metamorphism and anchzione

WANG Hejin*

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing100871, China * Corresponding address: hjwang@pku.edu.cn

Abstract

Several aspects of very low-grade metamorphism were discussed in this article, including ① Kübler's creation of "anchizone" and its role in the solution of the boundary between diagenesis and metamorphism, which is an internationally-agreed puzzle in geology; ② contribution and role of "illite crystallinity" in the research of very low-grade metamorphism of clastic rocks; ③ calibration of instrumental, and a proposed calibration formula between Kübler Index and domain size; ④ diagenetic and metamorphic index minerals; ⑤ new pattern and genetic interpretation for very low-grade metamorphism of Songpan-Garzê and Bayan Har orogens; ⑥ in addition, some scientific regulations were discussed. It is proposed that the boundary between diagenesis and metamorphism can be ascertained by a combination of index minerals with "illite crystallinity". It is realized that to establish a set of standards of "illite crystallinity" from Himalaya is very important and essential. New interpretation of metamorphic pattern of Triassic flysches in the Tibet plateau could be used for genetic analysis of very low-grade metamorphism of clastic rocks beyond the only model burial metamorphism.

Key words: very low-grade metamorphism; illite crystallinity; diagenetic zone; anchzione; epizone; index minerals; genetic interpretation; metamorphic pattern