

很低级变质作用研究及其在沉积盆地中的应用

汤 艳¹, 张云鹏², 齐先茂³, 杨云龙⁴

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610082; 4. 中石化股份有限公司勘探南方分公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 很低级变质岩石在沉积盆地中分布广泛。在成岩-低级变质作用演化过程中, 随着变质程度的增加, 油气、煤的演化阶段也会发生相应的变化。因此, 很低级变质作用与石油、天然气、煤等能源矿产关系密切。本文系统总结了很低级变质作用研究的几个方面及其新进展, 包括很低级变质带的划分、粘土矿物地质温压计、变质作用 p - T - t 轨迹及其在沉积盆地中的应用等等, 并结合实例初步探讨了川西北若尔盖坳陷三叠系的很低级变质作用。研究表明, 对沉积盆地中很低级变质作用的研究, 对于划分成岩-变质界限, 明确盆地的热成熟阶段, 恢复盆地古地温、古构造史以及指导油气勘探等, 都具有十分重大的理论和实际意义。

关键词: 很低级变质作用; 很低级变质带; 粘土矿物温压计; 变质作用 p - T - t 轨迹; 若尔盖盆地

中图分类号: P588.3; P588.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0353-12

A study of the very low-grade metamorphism and its application to the sedimentary basin

TANG Yan¹, ZHANG Yun-peng², QI Xian-mao³ and YANG Yun-long⁴

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. Chengdu Center of Geological Survey, China Geological Survey, Chengdu 610082, China; 4. Sinopec Exploration Southern Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Very low-grade metamorphic rocks are widely spread in the sedimentary basin. During the diagenetic to low-grade metamorphic process, the evolution stage of petroleum and coal would undergo corresponding changes with the increasing metamorphic grade. Thus, the very low-grade metamorphism has close relationship with oil, gas, coal and other energy mineral resources. This paper first summarizes some aspects of this problem and the new progress in the study of very low-grade metamorphism, such as the dividing of very low-grade metapelitic zones, geothermobarometry on clay minerals, metamorphic p - T - t path and their application to the sedimentary basin, and then preliminarily discusses the Triassic very low-grade metamorphism in the Zoigê depression, northwest Sichuan. Studies show that the research on diagenetic to very low-grade metamorphism in the sedimentary basin has great theoretical and practical significance in dividing the boundary between diagenesis and metamorphism, determining the stage of basin maturity, recovering the paleotemperature and paleotectonic history and, on such a basis, guiding oil and gas exploration.

Key words: very low-grade metamorphism; very low-grade metapelitic zone; clay mineral geothermobarometry; metamorphic p - T - t path; Zoigê depression

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2015-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41302047)

作者简介: 汤 艳(1983-), 女, 博士, 讲师, 主要从事很低级变质作用研究, E-mail: tangyan2011@chd.edu.cn

很(或甚、极)低级变质作用(very low-grade metamorphism)是变质地质学研究的前沿领域之一,指很低温的一类变质作用,即从成岩作用向低级变质作用的转变过程。从20世纪50年代至今,很低级变质作用的研究已经历半个世纪,相比超高压、超高温变质作用而言,它的研究长期没有得到应有的重视,但是随着研究手段和方法的不断完善和提高,将会有大的发展。另外,很低级变质作用与石油、天然气、煤等能源矿产关系密切,因为在成岩-很低级变质阶段,随着变质程度的增加,石油演化阶段从石油-湿气-干气变化,煤则经历由泥煤-烟煤-无烟煤的变化过程。通过对沉积盆地(或含油气盆地)成岩-低级变质作用的研究,对于明确成岩-变质界限,阐明盆地构造-热演化史,指导油气勘探,具有十分重大的理论和实际意义。本文拟从以下几个方面重点介绍很低级变质作用的研究及其在沉积盆地中的应用,并结合实例初步探讨川西北若尔盖坳陷三叠系的很低级变质作用及其研究意义。

1 很低级变质带的划分与盆地成熟度

很低级变质带的研究对象主要有泥岩、页岩以及很低级变质泥质岩相当的板岩、千枚岩等,其次,钙质泥质岩(泥灰岩)和变泥灰岩,在一些地区也有广泛涉及。实验工作认为只要泥质组分超过40%的泥质粉砂岩、泥质细砂岩也适合于本研究。这些岩性在沉积盆地中的分布是最丰富的,有时可达到沉积序列的45%~55%(Tucker, 1981)。

很低级变质带的划分是很低级变质作用研究的中心问题之一。通常以伊利石结晶度的Kübler指数(KI)为0.42和0.25 $\Delta 2\theta$ 为界将很低级变质带划分为成岩带、近变质带和浅变质带,成岩带和近变质带又可进一步划分为早期成岩带、晚期成岩带和低级近变质带、高级近变质带。目前,国内外用来定性或定量划分很低级变质带的标志可归纳为以下几个方面(图1):①岩石的特征(包括岩性、显微构造等);②标志性粘土矿物及矿物组合的变化;③伊利石结晶度、晶层厚度、多型转变以及光谱成熟度;④绿泥石结晶度、绿泥石多型转变、绿泥石与黑云母的堆垛现象等;⑤镜质体反射率、拉曼光谱特征等有机质参数。其中,研究得最清楚、最重要并被广泛使用的划分指标有伊利石结晶度、伊利石的晶层厚度和镜质体反射率。Doublier等(2010)把短波红外光谱(SWIR,

short-wavelength infrared reflectance spectroscopy)技术应用于很低级变质作用研究,引入术语“伊利石光谱成熟度”(ISM, illite spectral maturity),用来测量很低级变质过程中钾质白云母的物理化学变化特征,并将ISM与X射线衍射技术(XRD)获得的伊利石结晶度KI值进行了对比研究,认为它也可以定量判断很低级变质泥质岩的变质级,提出这是研究很低级-低级变质泥质岩石的一种新方法。但由于引入很低级变质作用领域的时间较短,还没有得到广泛应用,其有效性有待更多很低级变质地区的验证。

盆地成熟度(basin maturity)的研究大多凭借有机物为标志,如镜质体反射率。Horsfield & Rullkötter (1994)用镜质体反射率 R_r 值将沉积物中有机质的成熟度划分为与油气、煤生成有关的3个阶段:成岩阶段($R_r < 0.5\%$)形成干酪根,是石油的前身;后生阶段($0.5\% < R_r < 2.0\%$)是石油形成的主要阶段,晚期出现石油裂解产生的碳氢化合物气体(湿气);变生阶段($2.0\% < R_r < 4.0\%$)则只产生干气,主要是甲烷。这些阶段可以与煤的等级、粘土矿物的连续反应以及很低级变质带的划分进行对比,如图1所示。其中粘土矿物方法(如伊利石结晶度)与有机物法(如镜质体反射率)各有优点又彼此互补。例如,虽然在低温下有机物比粘土更易于反应,但它们在许多沉积序列中是一种稀少的物质成分。而粘土矿物几乎总在盆地的沉积物中出现,所以在一些无生物的红层沉积以及一些陆生植物出现以前的盆地研究中,粘土矿物方法是唯一的评估方法。因此,通过对很低级变质作用变质级(或变质带)的研究可以明确盆地的热成熟阶段,为油气、煤的地质条件评价提供重要的参考资料。

我国很低级变质作用(或埋藏变质作用)的研究虽然起步较晚,但是油气勘探的不断发展已经有力地促进了鄂尔多斯盆地(张立飞等, 1992)、右江盆地(索书田等, 1998; 燕守勋等, 2003)、准噶尔盆地(张继军等, 1999)、若尔盖盆地(汤艳等, 2007; Wang *et al.*, 2008)、合肥盆地(刘国生等, 2003, 2009)等靶区很低级变质作用研究的深入。

2 粘土矿物地质温压计与盆地古地温的探讨

地质温度计、压力计是很低级变质作用研究的难点之一。很低级变质泥质岩大多由很细小的粘土矿

变质带	粘土矿物特征										岩石特征		有机质特征		盆地成熟度	油气层	煤级及挥发物 (%)
	伊利石				绿泥石			标志粘土矿物及矿物组合			岩性	显微构造	拉曼光谱 半高宽/cm ⁻¹ (1600峰)	镜质体 反射率 (R _T /%)			
	伊利石结晶度 (Δ°2θ)	伊利石晶层厚度 (Å)	伊利石白云母多型	伊利石光谱成熟度 ISM(A/D)	绿泥石结晶度	绿泥石云母堆垛状况	伊/蒙混层混层比	伊/蒙混层有序度	伊/蒙混层有序度	高岭石-叶腊石							
早期成岩带	1.0				低	不发育	60-80	R=0 R=1 R>1	高岭石 伊/蒙混层 绿泥石								

图 1 很低级变质带与盆地成熟度的对应关系[据 Frey 和 Robinson(1999)修改; 伊利石光谱成熟度数据据 Doublier 等(2010)]

Fig. 1 The correlation between very low-grade metapelitic zones and basin maturity (modified after Frey and Robinson, 1999; data of illite spectral maturity after Doublier *et al.*, 2010)

物组成,它们是泥页岩的主要成分、砂岩中的重要胶结物,在沉积盆地中有广泛的分布,因而粘土矿物成为了重要的考虑对象。研究表明,这些粘土矿物的组成、化学成分、结构有序性、结晶度及粘土矿物的转变等特征可以反映它们形成时的物理化学条件,各种定量和半定量的热成熟度指标可被用来讨论盆地埋藏热历史。目前,定性或定量的粘土矿物地质温度计包括蒙脱石-伊利石的转变、伊利石结晶度地温计、绿泥石地质温度计等等,而钾质白云母的 b_0 值只能作为相对地质压力计推断古地温梯度。Doublier 等(2010)认为钾质白色云母 2 200 nm 波长的光谱特征与 b_0 值一样,也可以用来指示泥质岩石的压力条件,推断变质热梯度。

2.1 蒙脱石-伊利石转变

从成岩作用向低级变质作用的转变过程中,随着变质级的增加,在变质泥质岩石中会出现二八面体矿物的转变系列,即蒙脱石→伊/蒙混层(I/S)→伊利石→白云母。通过对蒙脱石-伊利石的转变过程及其与油气形成、运移和聚集关系的研究,认为蒙脱石向伊利石的转换是在一定的埋藏深度和有限的温度范围内进行的,蒙脱石-伊利石的转化系列可以作为成岩作用程度和古地温的指标。例如伊/蒙混层比(即伊/蒙混层中伊利石层所占的比例,%)和层间的有序度可以指示温度的变化。随着埋藏深度的增加即温度的升高,上述转变系列向右进行,伊/蒙混层中的蒙脱石层不断减少而伊利石层不断增加,即伊/蒙混层比会逐渐增大,且伊/蒙混层(I/S)的有序性从无序结构($R=0$)不断地向有序结构($R \geq 1$)转变。有不少学者研究了伊/蒙混层比、层间的有序度及其稳定存在的温度范围。Ma & Browne (1991)建立了伊/蒙混层比与其形成温度的经验公式: $Y = 0.34 + 2.74 \times 10^{-3} t$,其中 Y 代表伊/蒙混层中伊利石层的百分含量, t 表示形成温度,适用于 90~230℃ 温度范围。Hoffman & Hower (1979)认为伊/蒙混层(I/S)的有序性从 $R=0$ 转变成 $R=1$ 的温度为 100~110℃,从 $R=1$ 转变成 $R=3$ 的温度为 170~178℃。Pollastro (1993)将伊/蒙混层(I/S)中有序性 $R=0$ 变成 $R=1$ 的转变温度视为油形成高峰的开始,因为由无序到有序的转变温度吻合于“生油窗”的温度。

2.2 伊利石结晶度地温计

目前国际上通用 Kübler (1967)提出的利用伊利石-白云母 10 Å 衍射峰的半高宽来反映伊利石结晶度,这一测量值被称为 Kübler 指数(Kübler Index,

KI),单位为 $\Delta^\circ 2\theta$ 。随着变质级的增加,伊利石结晶度的 KI 值会变小(表现为峰形越尖锐),表明伊利石的结晶程度越好。伊利石结晶度主要受控于温度,因而一直以来是划分很低级变质带的主要指标,也可以间接地指示盆地的热演化程度。需要强调的是,在应用伊利石结晶度进行沉积盆地古地温研究时,应考虑自生伊利石,而不是碎屑伊利石。

前人对伊利石结晶度与其形成温度间的关系做了大量的研究。Ma 等(1992)提出伊利石结晶度(自然干燥下的 KI 值)与其测得的钻孔温度存在如下的经验关系: $t(^\circ\text{C}) = 249 - 89.3 \text{ IC}(r = 0.92)$,其中 t 是在 90~230℃ 的温度范围,IC 代表的是伊利石结晶度的 Kübler 指数。Ji & Browne(2000)对新西兰活动地热区伊利石结晶度值与测井温度进行了相关分析,发现两者之间也具有较明显的线性关系。尽管伊利石结晶度与其形成温度间的内在关系还不是很确定,但是已有众多地质事实(燕守勋等, 2003; 赵明等, 2006; 汤艳等, 2007; Tang *et al.*, 2012)证明了随着埋藏深度的增加(或是温度的升高),伊利石结晶度的数值会逐渐变小。

2.3 绿泥石地质温度计

大量的研究发现在成岩和地热系统中,随着埋藏深度的增加,绿泥石中四次配位 Al 的含量逐渐增加,四次配位 Si 的含量逐步降低。Cathelineau & Nieva (1985)、Cathelineau (1988)通过研究墨西哥 Los Azufres 和 Salton Sea 地热体系中的绿泥石,发现 Al^{IV} 和温度之间呈正相关关系,并先后提出了线性方程式 $t = 212 \text{ Al}^{\text{IV}} + 18$ 以及修正后的表达式 $t = -61.92 + 321.98 \text{ Al}^{\text{IV}}$,其中温度 t 的单位为℃。Kranidiotis & MacLean (1987)、Jowett (1991)考虑到全岩 Fe/(Fe+Mg)值对四次配位 Al 的影响,分别提出了修正公式 $t = 212 \text{ Al}^{\text{IV}} \text{C} + 18$ 和 $t = 319 \text{ Al}^{\text{IV}} \text{C} - 69$,其中前者的 $\text{Al}^{\text{IV}} \text{C} = \text{Al}^{\text{IV}} + 0.35 [\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})]$,后者 $\text{Al}^{\text{IV}} \text{C} = \text{Al}^{\text{IV}} + 0.1 [\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})]$ 。Battaglia (1999)提出了绿泥石面网间距 d_{001} 和温度之间的线性方程式 $T = (14.379 - d_{001})/0.001$,其中 d_{001} 值可以利用 Rausell-Colom 等(1991)提出、后经 Nieto (1997)修改的绿泥石化学成分与 d_{001} 之间的关系式计算得出: $d_{001} = 14.339 - 0.1155 \text{ Al}^{\text{IV}} - 0.0201 \text{ Fe}^{2+}$ 。目前,这 5 种绿泥石地质温度计应用最广泛,都是基于温度作为化学成分变化的经验公式。因此,在实际的应用研究中最好能够结合相关的指标(如伊利石结晶度、镜质体反射率等)或其他温度资料(如流体

包裹体测温)相互校正,以做出慎重选择。

2.4 钾质白云母的 b_0 值及波长2 200 nm 的光谱特征

在低级-很低级变质泥质岩石中,钾质白云母的晶胞 b 值大小常常用来进行相对地质压力计算,习惯上用 b_0 表达。Guidotti & Sassi (1986)将已经发表的 b_0 值划分为 3 个压力相系列,并认为 b_0 值可以用于相对地质压力计,也可以用来推断古地温梯度(表 1)。另有研究发现, b_0 值还可以反映大地构造环境(据 Frey & Robinson, 1999):洋脊增生背景的 b_0 值为 $9.02 \times 10^{-10} \sim 9.06 \times 10^{-10} \text{ \AA}$, 伸展盆地的 b_0 值为 $8.98 \times 10^{-10} \sim 9.01 \times 10^{-10} \text{ \AA}$, 阿尔卑斯碰撞背景的 b_0 值为 $9.00 \times 10^{-10} \sim 9.03 \times 10^{-10} \text{ \AA}$ 。

表 1 钾质白云母的 b_0 值和压力相系列
(Guidotti & Sassi, 1986)

Table 1 Potash muscovite b_0 values and pressure facies series (after Guidotti & Sassi, 1986)		
相系列	$b_0/\text{\AA}$	推断的地温梯度
低压	<9.000	$>35^\circ\text{C}/\text{km}$
中压	$9.000 \sim 9.040$	$25 \sim 35^\circ\text{C}/\text{km}$
高压	>9.040	$<25^\circ\text{C}/\text{km}$

Doublier 等(2010)将钾质白色云母中波长2 200 nm 的吸收光谱特征与 b_0 值进行了对比研究,发现它们具有很好的正相关性(图 2): $y = 390.02x - 1305.8$ ($R^2 = 0.85$),其中 x 代表 b_0 值, y 代表波长2 200 nm 的吸收光谱特征,并将2 204和2 220 nm 分别作为划分低/中压相系、中/高压相系的分界值,认为它是指示压力相系列、推断变质热梯度的一种新方法。

如前所述,通过短波红外光谱技术获得的伊利石光谱成熟度(ISM)、钾质白云母波长2 200 nm 的光谱特征分别能与 X 射线衍射技术(XRD)获得的伊利石结晶度 KI 值、 b_0 值进行对比,既可以定量判断很低级变泥质岩的变质级,又能指示压力相系列,推断变质热梯度,有望在很低级-低级变质泥质岩石中得到广泛应用。

3 变质作用 p - T - t 轨迹与盆地构造-热演化史

变质作用 p - T - t 轨迹就是“岩石在变质作用过程中温度压力(p - T)条件随时间(t)的变化而变化的历程”(Miyashiro, 1994)。反演的变质作用 p - T - t 轨迹是根据变质岩石中获得的不同时代的温压信息而

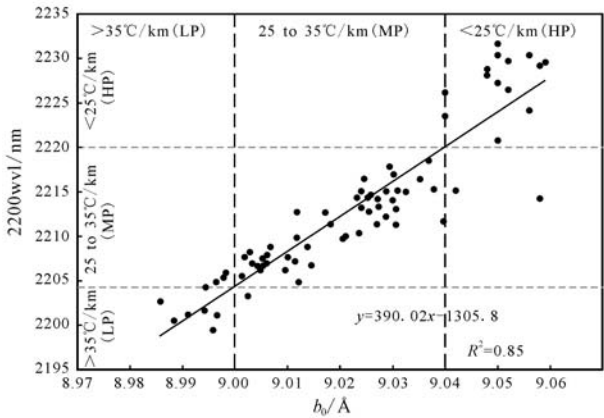


图 2 钾质白云母波长2 200 nm 的光谱特征与 b_0 值的相关性(Doublier *et al.*, 2010)

Fig. 2 Correlation between potash muscovite 2 200 wvl (wave-length) in nm and b_0 values (after Doublier *et al.*, 2010)

确定的。贺高品(1991)将确定变质作用 p - T - t 轨迹分为野外地质观察、岩相学研究、矿物学研究、确定变质作用 p - T 条件、确定 p - T - t 轨迹和探讨构造环境 6 个步骤。魏春景(2011)将反演变质作用 p - T - t 轨迹的方法归纳为 3 种:传统地质温压计方法、吉布斯/微分热力学方法和变质相图方法,其中变质相图方法即利用内洽性热力学数据库(Holland and Powell, 1998, 2003)和有关的计算机软件 THERMOCALC 定量计算一系列相图,从而定量地阐述天然岩石在 p - T - x 空间内的相平衡关系,确定岩石形成的 p - T 条件和 p - T - t 轨迹(魏春景等,2003)。变质岩所经历的实际 p - T - t 轨迹的特点与变质作用构造环境密切相关,通过研究盆地中变质沉积岩石的 p - T - t 轨迹,可以更好地理解岩石的变质作用过程以及盆地的构造-热演化历史。但是,上述方法大多被广泛应用在中高级变质岩石中(如大别山片岩、片麻岩和榴辉岩,胶北麻粒岩以及混合岩等),相比之下,很低级-低级变质岩石(亚绿片岩相-绿片岩相)由于变质程度很低,主要由很细小的粘土矿物组成且大多处于准稳定状态,缺乏严格意义上的定量温压计,这直接影响到很低级变质条件下岩石 p - T 轨迹的构建。

目前,绝大多数人只能利用粘土矿物温压计(如前所述的蒙脱石-伊利石转变、伊利石结晶度温度计、绿泥石地质温度计、钾质白云母 b_0 值等)对很低级变质岩石的热峰条件进行定性或半定量的估测,只有极少数人讨论了很低级变质条件下的 p - T 轨

迹。例如 Rice 和 Williams(2010)在研究爱尔兰加里东山系 Galway Bay-Clew Bay 地区时,通过投影伊利石结晶度和 b_0 值数据,反演了不同岩层的 p - T - t 演化历史。但是,它只能记录岩石的热峰条件,而无法获取退变质条件下的温压条件,其进变质、退变质部分都是推断的,这种轨迹还不是严格意义上的 p - T - t 轨迹。近年来,Massonne & Willner(2008)和 Massonne(2010)强调 Holland 和 Powell(1998, 2003)建立的热力学数据库,其中也包括了很低级-低级变质的范围,这种数据库被应用来估测很低级-低级变质岩石的 p - T 轨迹。例如 Massonne(1995)重建了中欧 Taunus 山脉很低级变质(热峰温度低于 300℃)镁铁质和长英质岩石所经历的 p - T 轨迹,该轨迹是基于岩石中钾质白云母和钠-钙角闪石等矿物的化学可变性,并将这些矿物建立的热力学数据进行了扩增。随后,不少国外学者(Vidal *et al.*, 2000, 2006; Willner *et al.*, 2000, 2009; Parra *et al.*, 2002; Willner, 2005; Jolivet *et al.*, 2010; Kryza *et al.*, 2011; Cruciani *et al.*, 2011)对很低级-低级变质条件下的各种岩石类型(包括镁铁质岩石、钙质和非钙质变质杂砂岩以及变质碱性火山岩等等)进行了热力学数据处理,根据计算的 p - T 视剖面建立了各种低温变质岩石的 p - T 轨迹。国内却鲜见很低级-低级变质岩石 p - T 轨迹的报道,但是,随着 p - T 视剖面不断地被成功应用,很低级变质岩石(尤其是变质沉积岩)的变质演化过程将会得到广泛的研究,进而有助于深入理解盆地的构造-热演化过程。

至于变质作用 p - T - t 轨迹中时间 t 的确定,目前,在很低级变质岩石中进行同位素定年的方法主要有 K-Ar 或 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法、裂变径迹法等。

(1) K-Ar 或 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法

利用 K-Ar 或 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法进行很低级变质岩的变质年代分析时,需要选取在变质作用条件下结晶形成的矿物,尤其是自生的伊利石和白云母较常见。其中伊利石 K-Ar 或 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法相对比较成功,它是在成岩过程中形成的低温含水粘土矿物,其成分类似于白云母而富 K, Rb, Sr, Ar 等亲 K 放射性元素因而容易进入其晶格并占据 K 的晶格。因此在伊利石形成之后,如果其 K/Ar 同位素体系不受后期温度干扰而保持封闭,则可以记录其形成时代。此外,一些学者利用储层自生伊利石的 K-Ar(或 ^{40}Ar - ^{39}Ar) 年龄来限定油气成藏时间,其理论依据在于:在含钾的水介质条件下,砂岩矿物颗粒间发育自生伊利石,油

气注入储集层达到较高的油气饱和度后,自生伊利石便终止生长,因此可以利用储集层中自生伊利石的最小年龄限定油气充注的最大年龄(Lee *et al.*, 1985; Hogg *et al.*, 1993)。国外不少学者(Lee *et al.*, 1985; Liewig *et al.*, 1987; Hamilton *et al.*, 1992; Hogg *et al.*, 1993; Robinson *et al.*, 1993)在北海油田广泛开展了 K-Ar 定年的研究工作,旨在确定油气藏的最大成藏时间。随后,该项技术也受到了国内油气勘探工作者的广泛重视,陆续有一些学者(王飞宇等, 1997; 辛仁臣等, 2000; 张有瑜等, 2002, 2004; 王龙樟等, 2005)对此进行了初步探讨。

(2) 裂变径迹法

裂变径迹热年代学定年技术是 20 世纪 60 年代开始兴起的一种新的同位素年代学方法。自 Naeser(1990)提出将裂变径迹定年用于盆地热史以来,这种方法逐渐得到重视,应用范围逐渐扩展到盆地热史、构造史、沉积物来源、地层年代等方面。裂变径迹法的基本原理是依据矿物(磷灰石、锆石)裂变径迹的退火特征,也就是裂变径迹具有随温度增加,径迹密度增加和长度缩短直到完全消失的特性。由于该方法携带着年龄、长度及其分布特征等丰富的热历史信息,在确定各种岩石的地质年代及反演盆地的热历史方面具有其他方法无法比拟的定量性与系统性,因而迅速成为定量研究盆地古地温、古构造史的关键方法(任战利, 1999; 周祖翼等, 2001; 陈刚等, 2005; 邱楠生等, 2006)。笔者认为在很低级变质作用研究中,将变质作用 p - T - t 轨迹与裂变径迹热年代学方法相结合,更能准确有效地反映盆地的构造-热演化史。

4 实例分析:川西北若尔盖坳陷三叠系很低级变质作用研究

川西北若尔盖坳陷(图 3)所处的松潘-阿坝地区位于中国大陆的中心部位,该区既是华北、扬子和羌塘地块的交接转换地带,也是青藏高原的东北缘的重要组成部分。作为中国主要地块和造山带汇聚和叠加的重要构造单元(Sengör, 1984; 黄汲清等, 1987; 许志琴等, 1992),因其独特的构造位置一直以来都是研究的热点区域。同时,该地区又地处特提斯构造域的中东段,而特提斯构造域是全球油气资源最为丰富的地区,在该构造域的西段及东段均已发现了大量的油气田,因此,加强松潘-阿坝地区油气地质方面的研究,对于该区乃至整个青藏地区

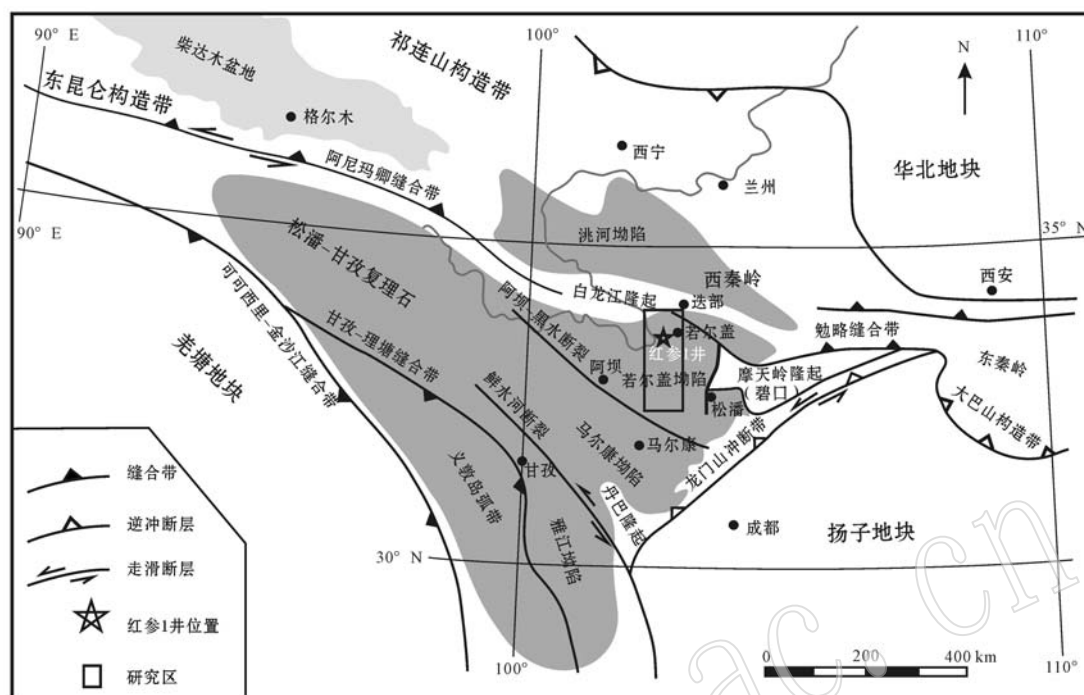


图3 松潘-阿坝地区及邻区构造略图(据王志鹏,2009)

Fig. 3 Tectonic sketch map of the Songpan-Aba area and surroundings (after Wang Zhipeng, 2009)

的油气勘探而言,具有打开高原海相油气勘探新领域、建立油气资源接替区的重要战略意义。

若尔盖坳陷是松潘-甘孜三叠纪复理石盆地的一个次级坳陷,从整体性质上可以看作是松潘-甘孜地块的缩影。为了进一步深化对本区油气地质条件的认识,中石化南方勘探公司在四川若尔盖县唐克乡附近钻探了参数井“红参1井”(位于若尔盖坳陷内,终孔深度7012.8 m)。它是我国中西部地区油气勘探与探索的重点参数井。笔者通过对川西北若尔盖坳陷(具体工区包括红参1井钻遇地层及周边三叠系露头区)初步开展的很低级变质作用研究,取得了如下的阶段性成果与认识:①利用伊利石结晶度并结合矿物共生分析方法,确定了研究区的变质程度,认为红参1井钻遇地层处于成岩-近变质带内,其变质程度不至于破坏油气保存(汤艳等,2007);②利用伊利石结晶度数据绘制出本区的变质图(图4),明确了区内变质作用类型及其宏观分布特征(Tang Yan *et al.*, 2012)。图4很好显示了埋藏变质和接触变质是本区的最主要类型,接触变质叠加在埋藏变质之上,其影响由南向北逐渐减弱。研究区北部,变质级分布主要受地层控制,显示了明显的埋藏变质特点。往南这种特点逐渐变得不明显,变质级界线与地层界线逐渐斜交,深成侵入体影响越来越明显,而在南

部龙日坝,则出现典型的接触晕围绕龙日坝岩体分布;③综合利用绿泥石地质温度计、流体包裹体测温,并结合钾质白云母 b_0 值,获得了研究区很低级变泥质岩的 p - T 轨迹(图5),说明该区在晚三叠世古特提斯洋闭合后经历了隆升和侵蚀过程(Tang Yan *et al.*, 2014)。为了进一步探讨变质作用与构造隆升对油气保存条件的影响程度,笔者拟将变质作用 p - T - t 轨迹与磷灰石裂变径迹方法相结合,对若尔盖坳陷三叠系开展低温热年代学研究,结合区域构造地质背景,综合分析研究区所经历的构造抬升期次、规模以及三叠纪以来的构造-热演化历史,以期对本区油气地质条件评价提供参考。

5 结语

很低级变质作用研究作为一个前沿领域,起步较晚,发展迅速,但与中、高级变质作用研究相比,没有得到应有的重视,其研究程度不高,存在着较多的不确定性,有待深入研究。实际上很低级变质作用广泛分布于洋中脊、年轻造山带、沉积盆地等多种地体中,尤其是沉积盆地中经历的成岩-埋藏变质作用,对许多大型能源盆地煤、石油、天然气的形成和运移中发挥了重要作用。

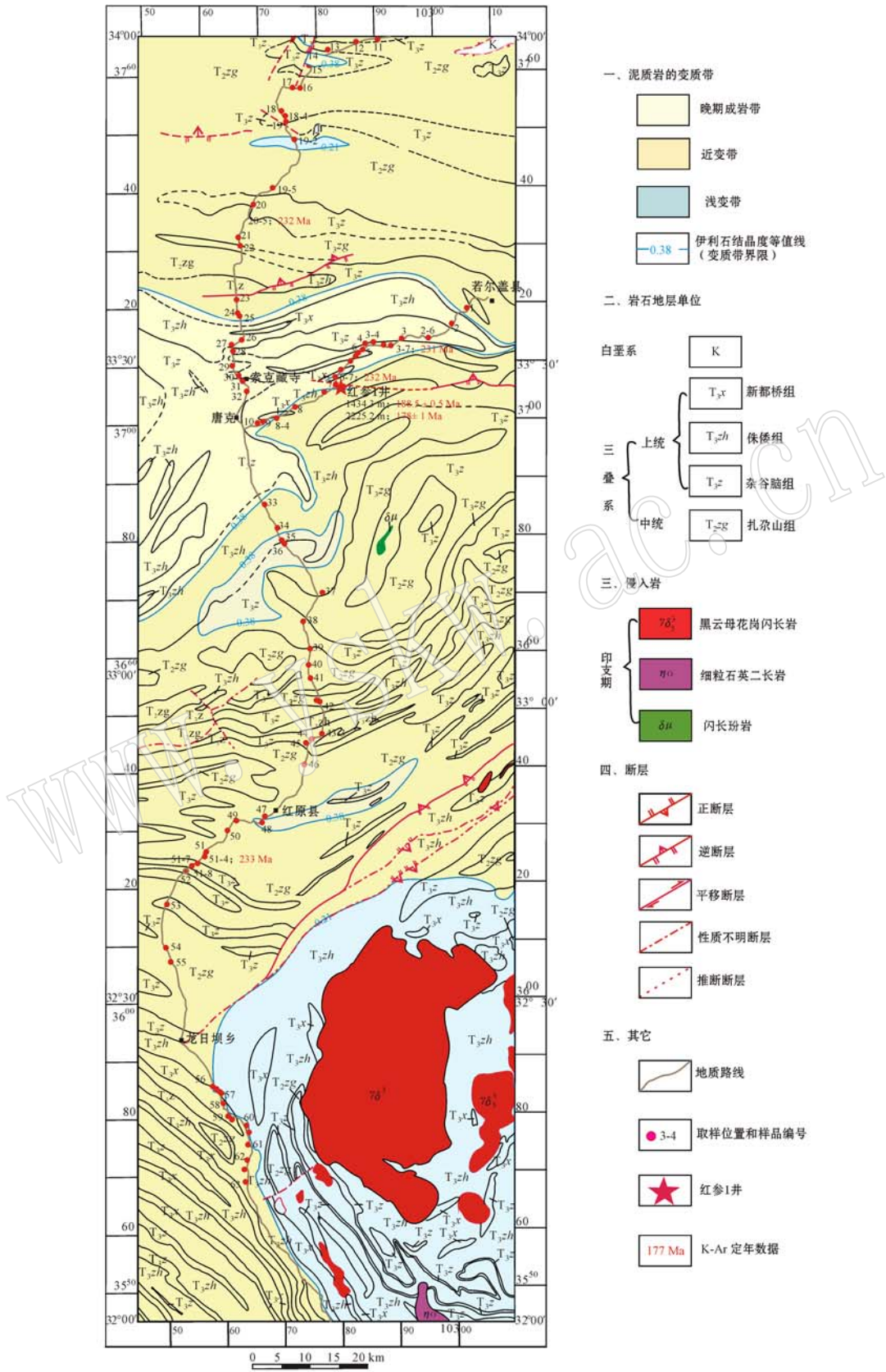


图 4 若尔盖-红原地区三叠系变质图

Fig. 4 The Triassic metamorphic map of the Zoigê-Hongyuan area

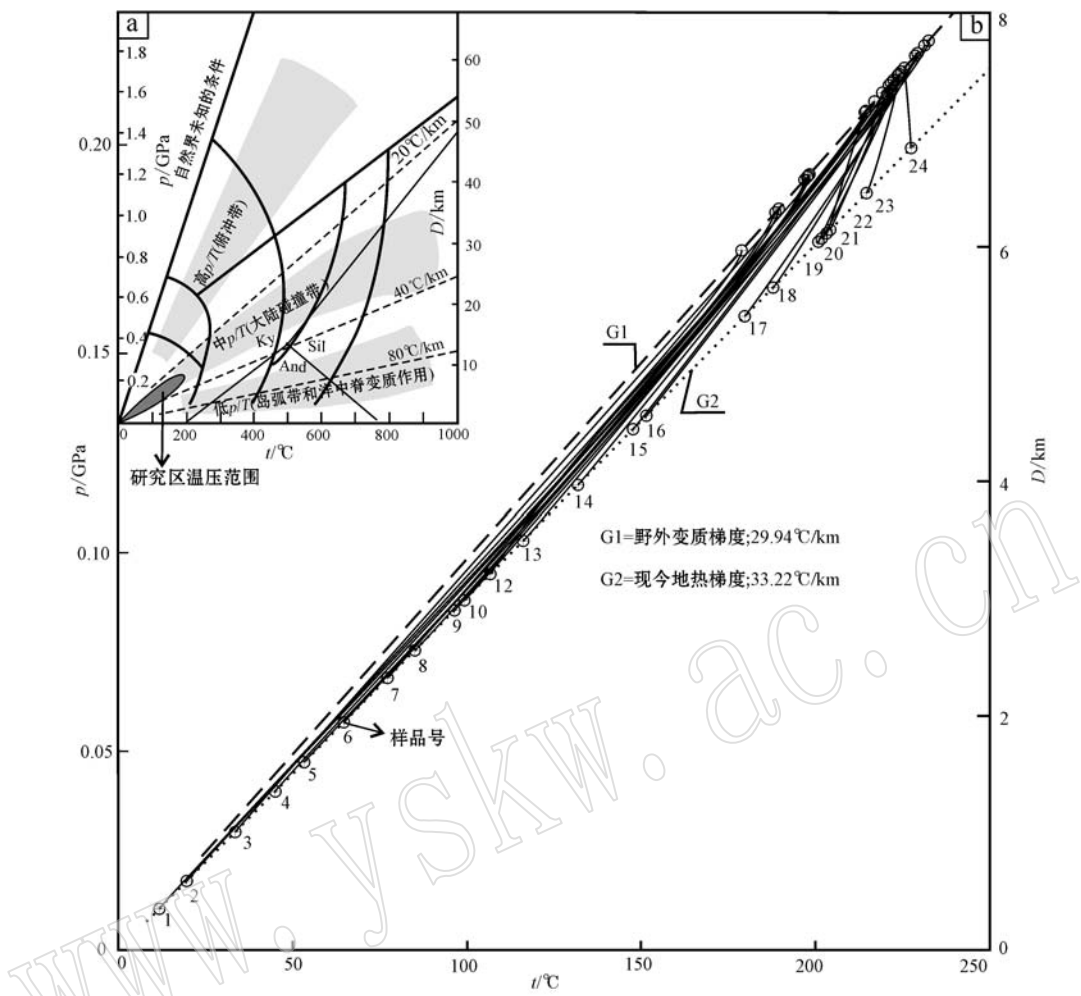


图 5 不同变质相系列及其对应的构造环境[a, 据 Spear(1993)修改]和红参 1 井三叠系变泥质岩热峰后的 p - T 轨迹图(b)

Fig. 5 p - T diagram showing different types of metamorphic facies series with the corresponding tectonic environments (a) and retrograde p - T paths for the Triassic very low-grade metapelites from Hongcan Well 1 (b)

很低级变质岩石由于变质程度低,组成的矿物颗粒细小,在露头、手标本及薄片很难进行矿物晶体结构、成分及组合的鉴别和研究,需要应用先进的微束分析技术,尤其是 X 射线衍射技术(XRD)、透射电镜技术(TEM)以及电子探针分析(EMPA)等等。此外,短波红外光谱(SWIR)技术也可以示踪钾质白云母的矿物化学结构、有序度、多型转换等特征,具有高灵敏度、高分辨率等优点,有望成为研究很低级-低级变质泥质岩石的一种新方法。总之,随着测试技术和研究方法的不断改善和提高,有关很低级变质作用的研究将会有大的发展,特别是在成岩作用与变质作用的界线问题、不少层状硅酸盐成分和结构的不断认识、很低级变质带与很低级变质相对应关系的研究、很低级变质岩的温压计问题、很低温条

件下的 p - T - t 轨迹及其构造意义等方面的研究会有所突破和发展。其次,随着很低级变质作用研究的不断深入,它将会更广泛应用于油气、煤田地质和各种粘土矿物的研究中,为石油、煤及有用粘土矿物的形成、迁移和变化提供基础资料。

References

Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite[J]. Clays and Clay Minerals, 47: 54~63.
Cathelineau M and Nieva D. 1985. A chlorite solid solution geothermometer: The Los Azufres (Mexico) geothermal system[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 91: 235~244.
Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a

- function of temperature[J]. *Clay Mineralogy*, 23: 471~485.
- Chen Gang, Zhao Zhongyuan, Li Piling, *et al.* 2005. Fission track evidence for the tectonic-thermal history of the Hefei Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(6): 1 366~1 374(in Chinese with English abstract).
- Cruciani G, Franceschelli M I and Massonne H J. 2011. Low-temperature metamorphic evolution of a pre-Variscan gabbro: a case study from the Paleozoic basement of northwest Sardinia, Italy[J]. *Mineralogical Magazine*, 75: 2 793~2 812.
- Doublier M P, Roache T and Potel S. 2010. Short-wavelength infrared spectroscopy: A new petrological tool in low-grade to very low-grade pelites[J]. *Geology*, 38: 1 031~1 034.
- Frey M and Robinson D. 1999. *Low-grade Metamorphism*[M]. Oxford: Blackwell Publishing, 10~75.
- Guidotti C V and Sassi F P. 1986. Classification and correlation of metamorphic facies series by means of muscovite b_0 data from low-grade metapelites[J]. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, 153: 363~380.
- Hamilton P J, Giles M R and Ainsworth P. 1992. K-Ar dating of illites in Brent Group reservoir: A regional perspective[A]. Morton A C, Hazeldine R S, Giles M R, *et al.* *Geology of the Brent Group* Geological Society, London, Special Publications[C], 61: 377~400.
- He Gaopin. 1991. Petrological research methods of metamorphic p - T - t path[J]. *Foreign Precambrian Geology*, (3): 20~30(in Chinese).
- Hoffman J and Hower J. 1979. Clay mineral assemblages as low grade metamorphic geothermometers: Application to the thrust-faulted disturbed belt of Mintana, USA[A]. Schoole P A. *Aspects of Diagenesis*, SEPM Spec[C], 26: 55~79.
- Hogg A J C, Hamilton P J and Macintyre R M. 1993. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir: K-Ar dating in the Alwyn area (UK North Sea) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 10: 279~294.
- Holland T J B & Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16: 309~343.
- Holland T J B & Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 492~501.
- Horsfield B & Rullkötter J. 1994. Diagenesis, catagenesis, and metagenesis of organic matter[A]. Magoon L B & Dow D G. *The Petroleum System- from Source to Trap*[C]. American Association of Petroleum Geologist Memoir, 60: 189~199.
- Huang Jiqing and Chen Bingwei. 1987. *The Evolution of Tethys in China and Its Adjacent Areas*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~50(in Chinese).
- Ji J F and Browne P R L. 2000. Relationship between illite crystallinity and temperature in active geothermal systems of New Zealand[J]. *Clays & Clay Minerals*, 48: 139~144.
- Jolivet L, Trotet F, Monié P, *et al.* 2010. Along-strike variations of P-T conditions in accretionary wedges and syn-orogenic extension, the HP-LT Phyllite-Quartz Nappe in Crete and the Peloponnese[J]. *Tectonophysics*, 480: 133~148.
- Jowett E C. 1991. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer[A]. Abstracts of GAC/MAC/SEG Joint Annual Meeting, Toronto, 27~29 May[C].
- Kranidiotis P and MacLean W H. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec[J]. *Economic Geology*, 82: 1 898~1 911.
- Kryza R, Willner A P, Massonne H J, *et al.* 2011. Blueschist-facies metamorphism in the Kaczawa Mountains (Sudetes, SW Poland) of the Central-European Variscides: p - T constraints by a jadeite-bearing metatrichyte[J]. *Mineralogical Magazine*, 75: 241~263.
- Kübler B. 1967. La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme[A]. étages Tectoniques, Colloque de Neuchatel[C], 105~121.
- Lee M, Aronson J L and Savin S M. 1985. K-Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendes sandstone, Netherlands[J]. *AAPG Bulletin*, 69 (9): 1 381~1 385.
- Liewig N, Clauer N and Sommer F. 1987. Rb-Sr and K-Ar dating of clay diagenesis in Jurassic sandstone oil reservoir, North Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 71(12): 1 467~1 474.
- Liu Guosheng, Xu Fei, Xu Chunhua, *et al.* 2009. X-ray diffraction study of clay minerals in Well Ancan 1 of Hefei Basin and its diagenesis degree[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 32(12): 1 911~1 915(in Chinese).
- Liu Guosheng, Zhu Guang, Wang Daoxuan, *et al.* 2003. The XRD analysis on the Zhuxiang Formation in the eastern part of Hefei Basin and its significance in the oil and gas[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 26(1): 31~36(in Chinese).
- Ma C and Browne P R L. 1991. Alteration mineralogy of sediments in the Huka Falls Formation of the Temihi Area, Wairakei[A]. Preceeding 13th NZ Geothermal Workshop[C], 185~191.
- Ma C, Browne P R L and Harvey C C. 1992. Crystallinity of subsurface clay minerals in the Te Mihi Sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand[A]. 14th New Zealand geothermal Workshop [C], 267~272.
- Massonne H J. 1995. P-T evolution of metavolcanics from the southern Taunus Mountains[A]. Dallmeyer R D, Franke W and Weber K. *Pre-Permian Geology of Central and Eastern Europe*[C], 132~137.
- Massonne H J. 2010. Phase relations and dehydration behaviour of calcareous sediments at very-low to low grade metamorphic conditions [J]. *Periodico di Mineralogia*, 79: 21~43.

- Massonne H J & Willner A P. 2008. Phase relations and dehydration behaviour of psammopelite and mid-ocean ridge basalt at very low-grade to low-grade metamorphic conditions[J]. *European Journal of Mineralogy*, 20: 867~879.
- Miyashiro A. 1994. *Metamorphic Petrology*[M]. London: UCL Press.
- Naeser N D, Naeser C W and McCulloh T H. 1990. Thermal history of rocks in southern San Joaquin Valley, California: Evidence from fission track analysis[J]. *AAPG*, 74: 13~29.
- Nieto F. 1997. Chemical composition of matapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. *European Journal of Mineralogy*, 9: 829~841.
- Parra T, Vidal O and Jolivet L. 2002. Relation between the intensity of deformation and retrogression in blueschist metapelites of Tinos Island (Greece) evidenced by chlorite-mica local equilibria[J]. *Lithos*, 63: 41~66.
- Pollastro R M. 1993. Considerations and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon bearing rocks of Micene to Mississippian age[J]. *Clays and Clay Minerals*, 41: 119~133.
- Qiu Nansheng, Su Xiangguang, Li Zhaoying, *et al.* 2006. The Cenozoic tectonic-thermal evolution of Jiyang Depression [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1 127~1 135.
- Rausell-Colom J A, Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relation between composition and d_{001} for chlorite[J]. *American Mineralogy*, 76: 1 373~1 379.
- Ren Zhanli. 1999. *The Research on Tectonic-thermal Evolution History in Sedimentary Basin in Northern China*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~50(in Chinese).
- Rice A H N and Williams D M. 2010. Caledonian strike-slip terrane accretion in W. Ireland: insights from very low-grade metamorphism (illite-chlorite crystallinity and b_0 parameter) [J]. *Geological Magazine*, 147(2): 281~298.
- Robinson A G, Coleman M L and Gluyas J G. 1993. The age of illite cement growth, Village Fields area, southern North Sea: Evidence from K-Ar ages and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios[J]. *AAPG Bulletin*, 77(1): 68~80.
- Sengör A M C. 1984. The Cimmeride Orogenic System and the Tectonics of Eurasia[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 195.
- Spear F S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*[M]. Washington D C: Mineralogical Society of America, 19~799.
- Suo Shutian, Bi Xianmei, Zhao Wenxia, *et al.* 1998. Very low-grade metamorphism and its geodynamical significance of Triassic strata within the Youjiang Basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(4): 395~405(in Chinese).
- Tang Yan, Sang Longkang, Liu Rong, *et al.* 2007. The application of mineral paragenesis analysis in the research of very low-grade metamorphism[J]. *Geoscience*, 21(3): 457~461(in Chinese).
- Tang Yan, Sang Longkang, Liu Rong, *et al.* 2014. Derivation of p - T paths for Middle-Late Triassic very low-grade metapelite from Hongcan Well 1 in the Zoige Depression and their tectonic implications[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 59(1): 82~99.
- Tang Yan, Sang Longkang, Yuan Yanming, *et al.* 2012. Illite crystallinity mapping of very low grade metamorphism of Triassic metapelites in the Zoige area, western China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(1): 96~105.
- Tucker M E. 1981. *Sedimentary Petrology: An Introduction*[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Vidal O, De Andrade V, Lewin E, *et al.* 2006. P - T -deformation- $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ mapping at thin section scale and comparison with XANES mapping: application to a garnet-bearing metapelites from the Sambagawa metamorphic belt (Japan)[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 669~683.
- Vidal O and Parra T. 2000. Exhumation paths of high pressure metapelites obtained from local equilibria for chlorite-phengite assemblages[J]. *Geological Journal*, 35: 139~161.
- Wang Feiyu, He Ping, Zhang Shuichang, *et al.* 1997. Timing of hydrocarbons into the reservoir by authigenic illite K-Ar dating[J]. *Geological Review*, 43(5): 540~546(in Chinese).
- Wang Hejin, Rahn M, Tao Xiaofeng, *et al.* 2008. Diagenesis and metamorphism of Triassic Flysch along profile Zoige-Lushan, Northwest Sichuan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 917~926.
- Wang Longzhang, Dai Tongmo and Peng Pingan. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of diagenetic illites and its application in timing gas emplacement in gas reservoirs[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 78~81(in Chinese).
- Wang Zhipeng. 2009. Triassic sandstone compositions in the northern Songpan-Ganzi fold belt and West Qinling, China: implication for tectonic setting[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 36(5): 465~474(in Chinese).
- Wei Chunjing. 2011. Approaches and advancement of the study of metamorphic p - T - t paths[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Wei Chunjing and Zhou Xiwen. 2003. Progress in the study of metamorphic phase equilibrium[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 341~352(in Chinese).
- Willner A P. 2005. Pressure-temperature evolution of an Upper Paleozoic paired metamorphic belt in Central Chile ($34^{\circ}\sim 35^{\circ}30'\text{S}$)[J]. *Journal of Petrology*, 46: 1 805~1 833.
- Willner A P, Herve F and Massonne H J. 2000. Mineral chemistry and pressure-temperature evolution of two contrasting levels within an accretionary complex in the Chonos Metamorphic Complex, Southern Chile[J]. *Journal of Petrology*, 41: 309~330.

- Willner A P, Sepulveda F A, Herve F, *et al.*. 2009. Conditions and timing of pumpellyite-actinolite facies metamorphism in the Early Mesozoic frontal accretionary prism of the Madre de Dios Archipelago (52°20'S; S-Chile) [J]. *Journal of Petrology*, 50: 2 127~2 155.
- Xin Renchen, Tian Chunzhi and Dou Tongjun. 2000. The study of oil-gas reservoir formation time[J]. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 48~54(in Chinese).
- Xu Zhiqin. 1992. The Orogeny of Songpan-Ganzi Orogenic Belt in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~50(in Chinese).
- Yan Shouxun, Wang Zhigang and Huang Yongquan. 2003. Very low-grade regional metamorphism in the Youjiang region, Western Guangxi, Using illite crystallinity[J]. *Chinese Journal of Geology*, 38(1): 107~113(in Chinese).
- Zhang Jijun and Bi Xianmei. 1999. Diagenesis and very low-grade metamorphism and significance of oil-gas exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(2): 251~258(in Chinese).
- Zhang Lifei, Wang Qiming and Ren Leifu. 1992. The transformation of clay minerals during burial metamorphism process of Triassic mudstone in Ordos Basin, in the northern of Shaanxi province[J]. *Science in China Series B*, 7: 759~767(in Chinese).
- Zhang Youyu, Luo Xiuquan and Song Jian. 2002. Discussions on K-Ar isotopic geochronological studies of authigenic illites in hydrocarbon reservoirs[J]. *Geoscience*, 16(4): 403~407(in Chinese).
- Zhang Youyu, Zwingmann H, Todd A, *et al.*. 2004. K-Ar dating of authigenic illite and its applications to study of oil-gas charging histories of typical sandstone reservoirs, Tarim basin, Northwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 637~646(in Chinese).
- Zhao Ming, Chen Xiaoming, Ji Junfeng, *et al.*. 2006. Diagenetic and paleogeothermal evolution of the clay minerals in the Paleogene Changwei prototype basin of Shangdong province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2 195~2 204(in Chinese).
- Zhou Zuyi, Liao Zongting, Yang Fengli, *et al.*. 2001. Fission track analysis and its application in the study of sedimentary basins[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(3): 332~337(in Chinese).
- (12): 1 911~1 915.
- 刘国生, 朱光, 王道轩, 等. 2003. 合肥盆地东部朱顶组 X 射线分析及其油气意义[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 26(1): 31~36.
- 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 2006. 济阳拗陷新生代构造-热演化历史研究[J]. *地球物理学报*, 49(4): 1 127~1 135.
- 任战利. 1999. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1~50.
- 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.
- 汤艳, 桑隆康, 刘嵘, 等. 2007. 矿物共生分析在很低级变质作用研究中的应用——以松潘-阿坝地区红参 1 井为例[J]. *现代地质*, 21(3): 457~461.
- 王飞宇, 何萍, 张水昌, 等. 1997. 利用自生伊利石 K-Ar 定年分析烃类进入储集层的时间[J]. *地质论评*, 43(5): 540~546.
- 王龙樟, 戴童谟, 彭平安. 2005. 自生伊利石⁴⁰Ar/³⁹Ar 法定年技术及气藏成藏期的确定[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(1): 78~81.
- 王志鹏. 2009. 松潘-阿坝和西秦岭三叠系砂岩组分特征及其构造意义[J]. *成都理工大学学报*, 36(5): 465~474.
- 魏春景. 2011. 变质作用 *P-T-t* 轨迹的研究方法与进展[J]. *地学前缘*, 18(2): 1~14.
- 魏春景, 周喜文. 2003. 变质相平衡研究进展[J]. *地学前缘*, 10(4): 341~352.
- 辛仁臣, 田春志, 窦同君. 2000. 油藏成藏年代学分析[J]. *地学前缘*, 7(3): 48~54.
- 许志琴. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1~50.
- 燕守勋, 王志刚, 黄永权. 2003. 由伊利石结晶度研究桂西右江地区区域极低级变质作用[J]. *地质科学*, 38(1): 107~113.
- 张继军, 毕先梅. 1999. 成岩-极低级变质作用及油气勘探意义[J]. *地学前缘*, 6(2): 251~258.
- 张立飞, 王启明, 任磊夫. 1992. 陕北鄂尔多斯盆地三叠系泥岩中粘土矿物在埋藏变质过程中的转化[J]. *中国科学(B 辑)*, 7: 759~767.
- 张有瑜, 罗修泉, 宋健. 2002. 油气储层中自生伊利石 K-Ar 同位素年代学研究若干问题的初步探讨[J]. *现代地质*, 16(4): 403~407.
- 张有瑜, Zwingmann H, Todd A, 等. 2004. 塔里木盆地典型砂岩油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素测年研究与成藏年代学探讨[J]. *地学前缘*, 11(4): 637~646.
- 赵明, 陈小明, 季峻峰, 等. 2006. 山东昌潍古近系原型盆地粘土矿物的成岩演化与古地温[J]. *岩石学报*, 22(8): 2 195~2 204.
- 周祖翼, 廖宗廷, 杨凤丽, 等. 2001. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用[J]. *石油实验地质*, 23(3): 332~337.

附中文参考文献

- 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等. 2005. 合肥盆地构造热演化的裂变径迹证据[J]. *地球物理学报*, 48(6): 1 366~1 374.
- 贺高品. 1991. 变质作用 *P-T-t* 轨迹的岩石学研究方法[J]. *国外前寒武纪地质*, (3): 20~30.
- 黄汲清, 陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯的演化[M]. 北京: 地质出版社, 1~50.
- 刘国生, 徐菲, 徐春华, 等. 2009. 合肥盆地安参 1 井粘土矿物 XRD 及成岩程度分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 32