贵州梵净山前寒武系甚低级变质作用研究

王河锦[1,2)]，安佳丽[1)]，王冠玉[1)]，晏玉[1)]，陈梦瑶[1)]

1) 北京大学地球与空间科学学院，北京，100871；2)“造山带与地壳演化”教育部重点实验室，北京，100871

内容提要：本文运用伊利石结晶度、绿泥石结晶度、云母 b_0 值和绿泥石地质温度计研究了梵净山前寒武系甚低级变质作用。结果表明经 Kisch 伊利石结晶度标样校正的伊利石结晶度 Kübler 指数为 0.20～0.99°Δ2θ，绿泥石结晶度 Árkai 指数为 0.22～0.63°Δ2θ。由此阐明梵净山前寒武系经历了成岩作用到浅变质作用的影响，迄今依然保留了成岩带、近变质带和浅变质带的岩石记录。成岩岩石具有伊蒙混层特征成岩指示矿物，浅变质带具有钠云母特征变质指示矿物。钾云母(伊利石)b_0 值范围为：0.9000～0.9045nm；平均 0.9018nm，b_0 值累积频率曲线分布介于典型中压—中低压系列之间，估算的压力为 366MPa。峰期变质温度为 293～364℃，平均 342℃，古变质温压梯度为 27℃/km。近变质带界线穿越地层和梵净山背斜轴线，表明甚低级变质作用为成岩-构造运动同期或后期构造增厚引起下部和底部岩石随温压的升高而产生的。

关键词：伊利石结晶度；绿泥石结晶度；云母 b_0 值；甚低级变质作用；梵净山；前寒武系

碎屑岩成岩作用与变质作用的界线划分是地质学界公认的一个未解决的难题。不少沉积学者、变质学家及相关的地质学家已为之奋斗了一个多世纪。50多年前，瑞士学者 Kübler 提出在沉积带(作用)与变质带(作用)之间建立一个转变带(Anchizone 被译为近变质带)的设想，该转变带能够完成由成岩作用到变质作用的转变，转变带的低温侧为成岩带，其高温侧为变质带(浅变质带)。并提出了以伊利石结晶度 0.25～0.42°Δ2θ 作为划分该转变带的界线(Kübler，1964，1967，1968，1984)。历经半个多世纪的实践证明，介于成岩作用与变质作用之间的近变质带(anchizone 带)有效地将二者分开，使得解决这一地质学界公认的难题大步向前迈进。目前，几乎在全世界范围内都开展了这一课题的研究。

有关梵净山前寒武系的甚低级变质作用的研究，尚无报道。而对贵州前寒武系的变质岩的研究基本上还处于描述性的阶段。如贵州省区域地质志中没有关于变质作用的章节，仅在地层的元古宇部分有变质砂岩、板岩、变质火山岩等的描述，并与沉积岩的描述相混。早期有关黔东南前寒武系变质的研究有：Wu Xuehua et al.(1965)描述了黔东上板溪群类复理石遭受了区域轻变质作用。其他的研究还有：Qin Shourong(2000)认为黔东南前寒武系受加里东期的埋深静压变质作用和燕山期的动压变质作用影响；谢俊邦等(2002)认为贵州中上元古界为层状浅变质岩，属区域动力变质产物，达到低绿片岩相变质程度。许多相关该区构造地层年代矿产等方面的研究在变质岩方面更是仅限于岩性的描述(如 Yang Guangzhong，2006；Cui Min et al.，2009；Du Dingquan et al.，2010；Chen Wei et al.，2017；Zhou Qi et al.，2017)，没有涉及变质带的划分、变质温压计算、古地热梯度值等等。目前，对梵净山前寒武系的研究主要有沉积地质特征与原型盆地分析(Fan Qichao et al.，2017)，岩浆活动与火山岩年代地层学分析(Gao Linzhi et al.，2014；Wang Min et al.，2016；Zhang Chuanheng et al.，2014；)，花岗岩年代学与前寒武纪构造演化(Su et al.，2014)，基性岩-砂岩地质年代学研究(Zhou et al.，2009)，锆石年代学与扬子板块的地壳演化研究(Wang et al.，2010)，过 Al 花岗岩与扬子板块南缘的扩展(Wu et

注：本文为国家自然科学基金项目“黔东南前寒武系类复理石甚低级变质作用研究”(编号：41872048)资助的成果。
收稿日期：2018-07-19；改回日期：2018-09-04；网络发表日期：2018-12-10；责任编辑：黄敏。
作者简介：王河锦，男，1958年生，教授。从事碎屑岩甚低级变质作用研究。Email：hjwang@pku.edu.cn。

引用本文：王河锦，安佳丽，王冠玉，晏玉，陈梦瑶. 2019. 贵州梵净山前寒武系甚低级变质作用研究. 地质学报，93(1)：170～178，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019009.
Wang Hejing，An Jiali，Wang Guanyu，Yan Yu，Chen Mengyao. 2019. Very low to low-grade metamorphism of Precambrian in Fanjingshan area，Guizhou，China. Acta Geologica Sinica，93(1)：170～178.

al.，2018)，地球化学与年代学(Wang Jingsong et al.，2012)，沉积地层年代学(Wang Min et al.，2012)和大地构造(Wang Yangeng，2001)研究等。对梵净山群及黔东南前寒武系研究争论的问题主要还有(Ding Xiaozhong et al.，2013；Li Xianhua，1996；Sheng Weizhou et al.，1993)：是否存在中元古宇？“江南造山带”与格林威尔造山是否一致？“江南古陆”与 Rodinia 古陆演化的关系是什么？

本文根据伊利石结晶度、绿泥石结晶度、云母 b_0 值及粘土粒级矿物组合分析研究梵净山前寒武系的甚低级变质作用。其结果不仅可提供梵净山群所遭受的甚低级变质作用强度信息，变质峰期温压条件及区域热演化信息，同时可为探讨“江南古陆”、Rodinia 古陆演化等基础地质问题提供可进行国际对比的甚低级变质的资料。

1　地质概况

梵净山前寒武系出露于黔东，大地构造位置处于扬子准地台东南缘(马丽芳等，2002)，是江南造山带的西南缘主体(Huang Jiqing，1941)。梵净山群主要为变质火山-陆源碎屑沉积建造，下部主要为细碧岩-石英角斑岩、基性-超基性岩夹少量陆源碎屑岩，上部以陆源碎屑浊积岩组成的复理石为主。由下到上分为淘金河组、肖家河组、回香坪组、铜厂组、洼溪组和独岩塘组，厚约 10000m。主要岩性为变余砂岩、变余粉砂岩、变余凝灰岩夹板岩、变质基性熔岩和千枚岩，常组成数个旋回(贵州省地质矿产局，1987)。梵净山区还出露了板溪群红子溪组(紫红色砂质板岩夹钙质岩透镜体)，下江群甲路组(底部为变余砂砾岩、粉砂岩，向上逐渐变为夹大理岩透镜体的灰绿色钙质千枚岩、千枚岩、板岩等)，乌叶组(下部主要为灰绿至灰色绢云千枚岩、板岩；上部则以深灰至灰黑色千枚岩、板岩为主)，张家坝组(变余砂岩-粉砂岩、绢云板岩夹凝灰质板岩)，清水江组(一套由变余凝灰岩、变余凝灰质砂岩-粉砂岩及板岩等组成)，震旦系陡山沱组—留茶坡组(硅质岩-硅质白云岩-粘土岩碳质页岩夹白云岩)和南沱组(杂砾岩和泥岩)(贵州省地质矿产局，1987)。新数据表明梵净山群的沉积年代为新元古代(855～815Ma，Wang Min et al.，2012；840Ma，Zhang Chuanheng et al.，2014)。侵入梵净山群的岩浆岩主要为基性—超基性岩，其活动期为晋宁Ⅰ和晋宁Ⅱ期(850～825Ma 和 820～750Ma，Wang Min et al.，2016)。沉积同期至后期(成岩之后)的挤压构造运动形成了梵净山背斜，而晚期(中生界晚期以来)构造运动引起了 NNE—NEE 向的断裂系在梵净山区的发育(谢俊邦等，2002)。目前，有关梵净山群的早期地史发展还有较大争议(在此不予赘述)。梵净山区前寒武系地质图以及采样点分布与伊利石结晶度变化情况见图 1。

2　样品及分析方法

2.1　采样与样品处理

因为研究的对象为＜2μm 至纳米级颗粒，野外采集新鲜的富含粘土矿物(＜2μm)的岩石样品，如泥岩、板岩、页岩和泥灰岩。避免其他岩性因素干扰(伊利石结晶度)。为了得到纳米—微米级携带成岩作用—变质作用信息的矿物颗粒，所采样品用锤式碎样机破碎成粉末(碎样时间＜30s)。并根据 Stocks 沉积原理富集＜2μm 的颗粒，按照＞3mg/cm^2 备制定向片，非定向样品以底部挤压法备制。对含膨胀层的粘土矿物进行膨胀实验并与非膨胀实验的 XRD 数据进行比较，根据 NEWMOD-II(Reynolds，1985)理论计算出的 XRD 混层图谱确定出含膨胀层的粘土矿物的混层物相种类和混层比。根据比较结果选择 375℃ 和(或)500℃用马弗炉对定向样品进行加热实验(2h)，以辅助物相分析。

2.2　伊利石结晶度测试

伊利石结晶度之所以是划分近变质带的定量标准，除了它有建立在结晶学基础上的科学依据以外，还因为碎屑岩中普遍存在伊利石。人们可以连续采集样品并得到伊利石结晶度 Kübler 指数，从而划分出近变质带，并以之确定出成岩作用和变质作用的界线。伊利石结晶度值的测试需要用可进行国际对比的标样进行校正(Kisch，1991；Wang Hejing et al.，2015)。经过标样校正的伊利石结晶度 Kübler 指数，按照 0.25～0.42°Δ2θ 所划分出的近变质带才具有国际对比的意义，才可进行成岩作用与变质作用的划分。根据 Kisch(1991)提供的伊利石结晶度标样以及其与 Kübler 标样的差别，本文的经验校正公式为：

$$KI(ÁI)=1.1823FWHM_{1nm(0.7nm)}+0.0452 \quad (1)$$

式中 KI 为 Kübler 指数，ÁI 为 Árkai 指数，FWHM 为 1nm 或 0.7nm 衍射峰的半高宽。这是因为 1nm 或 0.7nm 衍射峰都是由同一个定向片同时测试且为同一条衍射图谱而具有完全相同的物理背景意义，即 KI 与 ÁI 的测试是采集同一个样品，同样的

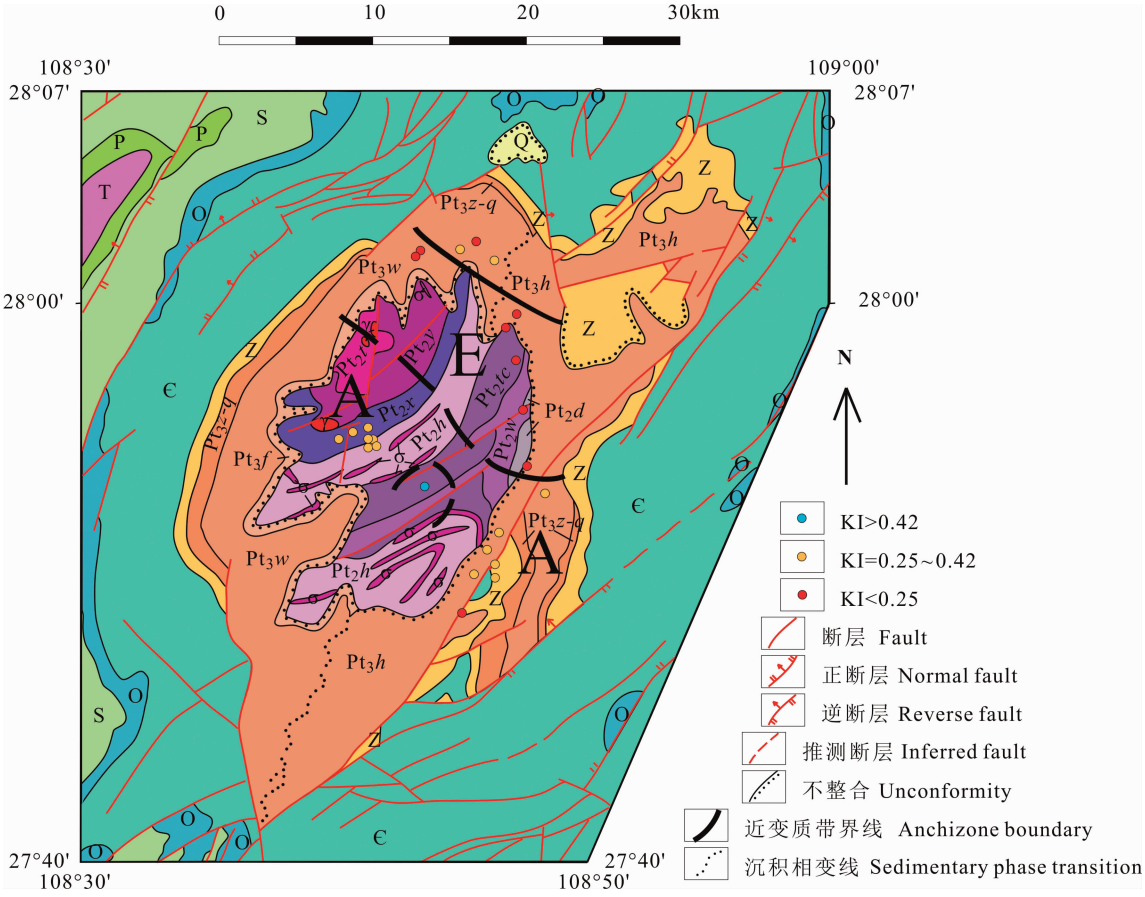


图 1 梵净山区地质图(据贵州区域地质志,1987 修改)、样品采集点与近变质带界线

Fig. 1 Geological map of Fanjingshan (after the Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou Province, 1987), sample location and metamorphic zonation

Q—第四系;T—三叠系;P—二叠系;S—志留系;O—奥陶系;∈—寒武系;Z—震旦系;Pt_3h—板溪群红子溪组;Pt_3f—下江群番召组;Pt_3z-q—下江群张家坝组—清水江组;Pt_3w—下江群乌叶组;Pt_2d—梵净山群独岩塘组;Pt_2w—梵净山群洼溪组;Pt_2tc—梵净山群铜厂组;Pt_2h—梵净山群回香坪组;Pt_2x—梵净山群肖家河组;Pt_2y—梵净山群余家沟组;Pt_2t—梵净山群淘金河组;γ—花岗岩;σ—基性—超基性辉长岩-辉绿岩与橄榄岩组合;A—近变质带;E—浅变质带

Q—Quaternary; T—Triassic; P—Permian; S—Silurian; O—Ordovician; ∈—Cambrian; Z—Sinian; Pt_3h—Hongzixi formation of Banxi Group; Pt_3f—Fanzhao Formation of Xiajiang Group; Pt_3z-q—Zhangjiaba—Qingshuijiang Formations of Xiajiang Group; Pt_3w—Wuye Formation of Xiajiang Group; Pt_2d—Duyantang Formation of Fanjingshan Group; Pt_2w—Waxi Formation of Fanjingshan Group; Pt_2tc—Tongchang Formation of Fanjingshan Group; Pt_2h—Huixiangping Formation of Fanjingshan Group; Pt_2x—Xiaojiahe Formation of Fanjingshan Group; Pt_2y—Yujiagou Formation of Fanjingshan Group; Pt_2t—Taojinhe Formation of Fanjingshan Group; γ—granite; σ—basic—ultrabasic rocks including gabbro, diabase and peridotite; A—anchizone; E—epizone

处理方式(同一碎样机、同一碎样时间)制备同一定向片,同一衍射仪,同样的测试条件,同一图谱。这样的图谱受到样品处理的影响程度一致,测试时样品与 X 射线相互作用的效应一致,所反映的物理因素对 KI 与 AI 值的影响一致。

2.3 仪器型号和实验条件

所用 X 射线衍射分析的仪器为 PANalytical 公司生产的 X'Pert Pro MPD 衍射仪。万分之一度的测角精度,Cu 靶,40mA 与 40kV 的管流管压;1°~2°防扩散狭缝和 6.6mm 接收狭缝系统,0.017°2θ 扫描步长,20s 扫描速度,X'Celerator 探测器。物相鉴定的扫描范围为 5~65°2θ;伊利石结晶度和绿泥石结晶度测试的扫描范围为 4.3~36°2θ。b_0 值测试扫描范围为 59~63°2θ。Si 标片校正 Bragg 零点。浅变质带样品电子探针分析所使用仪器型号为 JXA-8230,加速电压 15 kV,电流 10 nA,束斑直径 1μm,由 GB/T17359-1998A 国家标准矿物标样校正。

3 结果

样品的伊利石结晶度、绿泥石结晶度、b_0 值、<2μm 矿物组合以及地层、岩性和样品采集位置信息见表 1。

表 1　梵净山区前寒武系伊利石结晶度、绿泥石结晶度、b_0值、<2μm 矿物组合和样品采集位置数据

Table 1　Illite crystallinity (KI), Chlorite crystallinity (ÁI), b_0, mineral assemblage (<2μm) and localities of samples in the Precambrian of Fanjingshan, Guizhou

样号	地层	岩性	<2μm 矿物组合	KI	ÁI	b_0(nm)	东经	北纬
HW-1447	Z_2lc	含砂泥岩	I,Ch	0.355	0.625	0.9029	108°46.522'	27°49.937'
HW-1448	Z_1n	板岩	I,Ch	0.200			108°46.508'	27°50.303'
HW-1449	Pt_3h	板岩	I,Ch	0.252	0.237	0.9013	108°46.779'	27°51.491'
HW-1450	Pt_3h	板岩	I,Ch	0.269	0.256	0.9022	108°47.907'	27°52.922'
HW-1451	Pt_3h	板岩	I,Ch	0.240	0.230	0.9020	108°47.874'	27°53.823'
HW-1452	Pt_2w	板岩	I,Ch	0.237	0.230	0.9027	108°47.692'	27°55.808'
HW-1453	Pt_2tc	板岩	I,Ch	0.240	0.232	0.9045	108°47.450'	27°57.560'
HW-1454	Pt_2tc	砂质板岩	I,Ch	0.238	0.236	0.9036	108°47.110'	27°58.759'
HW-1455	Pt_3h	板岩	I,Ch	0.227	0.223	0.9011	108°47.509'	27°59.162'
HW-1456	Pt_3w	板岩	I,Ch	0.263	0.227	0.9013	108°46.630'	28°01.053'
HW-1457	Pt_3w	板岩	I,Ch	0.238	0.253	0.9002	108°45.930'	28°01.467'
HW-1458-1	Pt_3w	板岩	I,Ch	0.279	0.284	0.9030	108°45.228'	28°01.432'
HW-1459	Pt_3w	板岩	I,Ch	0.245	0.304	0.9007	108°43.714'	28°01.480'
HW-1460	Pt_3w	板岩	I,Ch	0.246	0.239	0.9013	108°43.462'	28°01.232'
HW-1463	Pt_3h	板岩	I,Ch	0.240		0.9020	108°45.272'	27°48.635'
HW-1464	Pt_3h	板岩	I,Pg	0.415			108°45.783'	27°49.970'
HW-1467	Pt_2h	板岩	I,Ch	0.285	0.259		108°41.723'	27°54.701'
HW-1467-1	Pt_2h	板岩	I,Ch	0.275	0.270	0.9004	108°41.723'	27°54.701'
HW-1468	Pt_2x	板岩	I,Ch	0.291	0.279	0.9022	108°40.355'	27°54.846'
HW-1469	Pt_2x	砂质板岩	I,Ch	0.259	0.259	0.9004	108°40.912'	27°55.025'
HW-1470	Pt_2x	板岩	I,Ch	0.253	0.368	0.9022	108°41.603'	27°54.819'
HW-1471	Pt_2h	砂质板岩	I,Ch	0.257	0.249	0.9000	108°41.590'	27°54.548'
HW-1472	Pt_2h	变余砂岩	I,Ch				108°41.833'	27°54.571'
HW-1473	Pt_2tc	砂质泥岩	I,Ch,I/S	0.995			108°43.776'	27°53.107'
HW-1474	Pt_2h	砂质板岩	I,Ch	0.354	0.304		108°46.277'	27°50.864'

注:Z_2lc—震旦系留茶坡组;Z_1n—震旦系南沱组;Pt_3h—板溪群红子溪组;Pt_3w—下江群乌叶组;Pt_2tc—梵净山群铜厂组;Pt_2h—梵净山群回香坪组;Pt_2x—梵净山群肖家河组。I—伊利石;Ch—绿泥石;Pg—钠云母;I/S—伊蒙混层。KI—伊利石结晶度 Kübler 指数;ÁI—绿泥石结晶度 ÁrKai 指数。

3.1　伊利石结晶度与绿泥石结晶度

由 25 个梵净山区前寒武系样品测试得到的伊利石结晶度 Kübler 指数范围为 0.995～0.200°Δ2θ,表明梵净山区前寒武纪岩石保存了成岩作用到浅变质作用的记录(图 2,表 1)。根据伊利石结晶度 KI 指数,梵净山区前寒武系可划分为浅变质带和近变质带,其中中心处还保留有成岩带岩石(见图 1)。绿泥石结晶度 ÁI 指数为 0.625～0.222°Δ2θ。根据 Wang et al. (2012, 2013)的研究结果,绿泥石在地表条件下易受到风化作用的影响(主要是氧化,水化和淋漓,当然也包括物理风化作用的影响),使得其结构中的 Fe^{+2} 发生氧化转变为 Fe^{+3},结构的电价失去平衡,结构为此发生调整,导致其结晶度变差(ÁI 值)变大。更甚者可转化出 Fe 的氧化物。在 XRD 图谱上表现为 1nm 衍射峰 KI 值小,而 0.7nm 衍射峰异常的宽化。这种现象会导致不规则的 KI-ÁI 关系。故在探讨 KI-ÁI 关系时应该去除风化产生的影响。图 3 给出了 KI 与 ÁI 的关系。由该图可得到 KI 与 ÁI 的关系式为:

$$KI=0.5171ÁI+0.1187 \quad r^2=0.8727 \quad (2)$$

由此得出绿泥石结晶度 ÁI 指数的近变质带界线为 0.25～0.34°Δ2θ。近变质带上下界线 ÁI 指数宽 0.09°Δ2θ。与文献中 ÁI 指数近变质带的界线 0.259～0.348°Δ2θ (Wang et al.,2013)非常接近,而与其他界线略有差别(0.262～0.331°Δ2θ, Árkai and Ghabrial, 1997; 0.284～0.348°Δ2θ, Árkai et al., 1995; 0.247～0.324°Δ2θ, Árkai, 1991)。根据此 ÁI 近变质带界线,所得的绿泥石结晶度 ÁI 与 KI 指数对近变质带的划分总体一致。

3.2　粘土粒级的矿物组合

梵净山前寒武系粘土粒级的矿物组合以伊利石+绿泥石为特征,伊蒙混层 I/S 出现在中部的成岩带样品中。钠云母出现在近变质带中。详见图 4。

3.3　钾云母(伊利石)b_0值特征与变质压力估计

碎屑岩不论是成岩的还是甚低级变质的岩石,组成的自生-变质的矿物(非碎屑矿物)主要是蒙脱

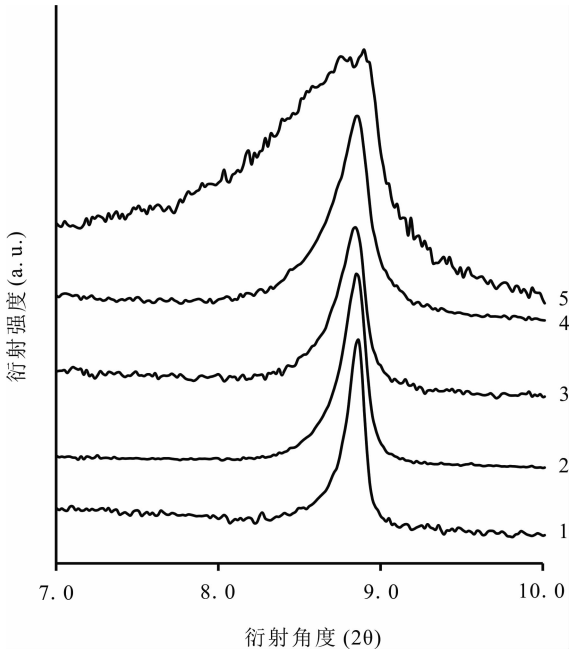


图 2 梵净山区前寒武系伊利石结晶度 Kübler 指数 KI 的变化 0.20～0.99°Δ2θ

Fig. 2 Variation of illite crystallinity Kübler index (KI) from 0.20 to 0.99°Δ2θ in the Precambrian of Fanjing shan, Guizhou

1—KI=0.20, HW-1448; 2—KI=0.25, HW-1449; 3—KI=0.29, HW-1468; 4—KI=0.35, HW-1447; 5—KI=0.99, HW-1473

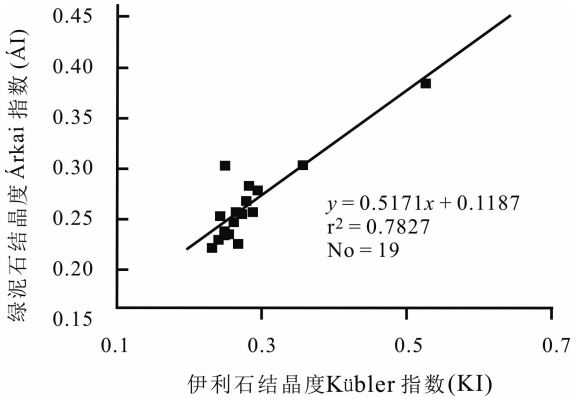


图 3 梵净山区前寒武系伊利石结晶度 Kübler 指数(KI)与绿泥石结晶度 Árkai 指数(ÁI)的关系

Fig. 3 Relationship between KI and ÁI in the Precambrian of Fanjing shan, Guizhou

石-伊蒙混层-伊利石-白云母系列和绿泥石。能够记录变质压力信息的主要是伊利石和白云母(钾云母),即云母当中所含有的压力分子绿磷石(celandonite)。当云母中绿磷石含量增高,反映压力高,其在云母结构中的 b_0 值增大。在不同压力类型的变质地体中的统计分析表明,随着变质压力的变化,云母 b_0 值相应发生变化,从而,由统计分析得

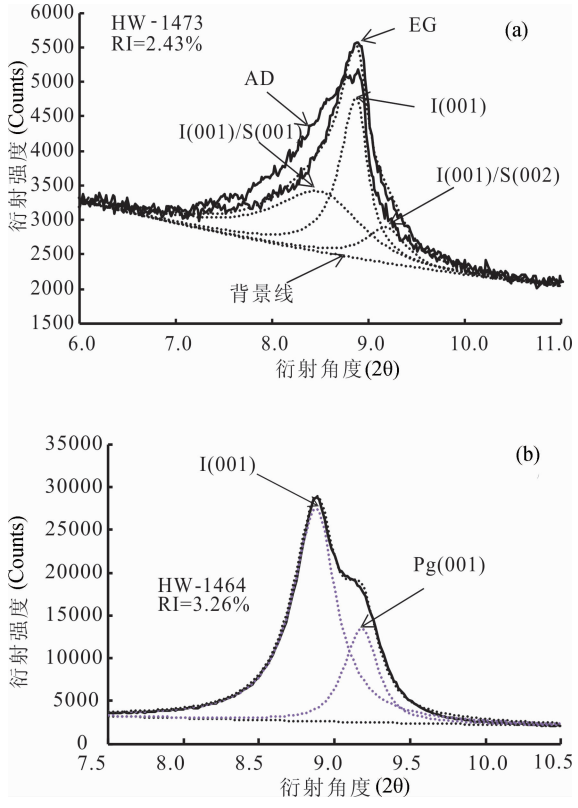


图 4 (a)样品 HW-1473 自然干燥(AD)条件下 XRD 图谱与乙二醇(EG)膨胀 XRD 图谱的比较。乙二醇(EG)膨胀实验后,1nm 衍射峰发生低衍射角度一侧收缩而高衍射角度一侧膨胀,表明在低角度一侧形成伊蒙混层(I/S)的 I(001)/S(001)衍射峰,而在高角度一侧形成伊蒙混层(I/S)的 I(001)/S(002)衍射峰。I(001)即伊利石 1nm 衍射峰。拟合置信度(RI)为 2.43%。根据 $d_{(001/002)}$ = 0.963nm(2θ=9.18°),可得伊蒙混层类型 Reichweite=1,混层比为伊利石占 81%。(b)样品 HW-1464 自然干燥(AD)条件下 XRD 图谱。I(001)为伊利石 10nm 衍射峰,Pg(001)为钠云母(001)衍射峰。拟合置信度(RI)为 3.26%

Fig. 4 (a) XRD patterns of sample HW-1473 in air-dried (AD) and glycolated (EG). After glycol treatment, 1nm complex swells on higher diffraction angle side and shrinks on lower angle side, indicating the appearances of the I(001)/S(001) reflection on lower angle side and the I(001)/S(002) reflection on higher angle side. I(001) is the 1nm reflection. According to Merig's regulation from $d_{(001/002)}$ = 0.963nm (2θ=9.18°), it derives Reichweite=1 with illite occupying 81% layers in mixed I/S. Fitting reliability is 2.43%. (b) XRD pattern of sample HW-1464 in air-dired. I(001) shows the 1nm reflection and Pg(001) marks the (001) reflection of paragonite. Fitting reliability is 3.26%

出了不同压力条件下的 b_0 值分布曲线(图 5)。当对一个变质应力区域统计测量云母的 b_0 值时就可得到该区的变质压力条件(Sassi et al., 1974)。本区

19 个变质钾云母(伊利石)b_0 值范围为:0.9000～0.9045nm;平均 0.9018nm,约为 366MPa。在累积曲线分布图(图 5)中介于典型中压与中－低压曲线之间。这表明了梵净山区前寒武纪岩石所遭受的变质作用的压力条件。

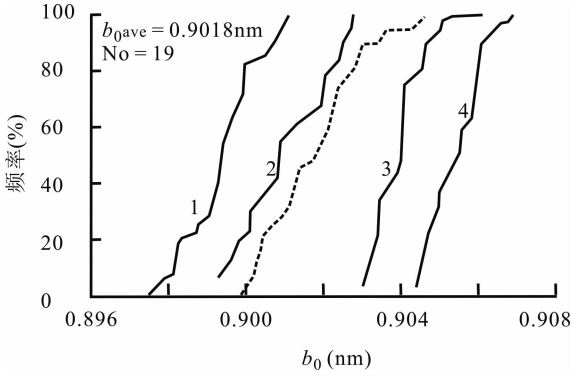


图 5　梵净山区前寒武系伊利石(钾云母)b_0 值累积曲线(虚线)分布图

Fig. 5　Cumulative frequency pattern of b_0 of K-mica (illite) from the Precambrian in Fanjingshan area (dashed line)

实线 1—Bosost 低压 b_0 值累积曲线;实线 2—N. New Hampshire 中低压 b_0 值累积曲线;实线 3—Otago 中高压 b_0 值累积曲线;实线 4—Sanbagawa 高压 b_0 值累积曲线

Solid line 1—Bosot low pressure type; 2—N. New Hampshire low-intermediate pressure type; 3—Otago intermediate-high pressure type; 4—Sanbagawa high pressure type

3.4　绿泥石地质温度计与峰期变质温度估计

作为碎屑岩中最普通的粘土矿物之一,绿泥石普遍存在于成岩带、近变质带、浅变质带或绿片岩相岩石中。因而,绿泥石地质温度计最适合研究甚低级变质作用的形成条件。绿泥石地质温度计可分为结构温度计(Battaglia, 1999)和成分温度计(Cathelineau, 1988; Vidal et al., 2001; Inoue et al., 2009; Bourdelle et al., 2015)。前者反映绿泥石与形成温度条件平衡而发生的结构调整,后者反映绿泥石在成分上与形成温度条件达到平衡的成分记录。而成分温度计又分为 IV 占位温度计(Cathelineau,1988)和 VI＋IV 成分温度计(Vidal et al., 2001; Inoue et al., 2009)。结构温度计需要由绿泥石结构信息 d 值求出温度值,而成分温度计需要确定绿泥石分子式来求出温度值。本文根据 IV 占位温度计(Cathelineau,1988),由绿泥石分子式(HW-1455,浅变质带)求出的变质温度为 293～364℃,平均 342℃。这与黔东南雷公山—从江前寒武系的甚低级变质温度条件一致(An Jiali et al.,2018)。

绿泥石 d 值地质温度计,由非定向片求出经石英校正后的绿泥石 d_{001} 和 d_{060} 值,引用公式(3)计算其形成温度。求 d 值时 Kα2 需去除,否则将引起 d_{001} 偏小和估算的温度偏高。只有绿泥石 001 衍射峰强度较大且石英作为内标测定的样品才可进行 d 值温度计的应用。根据公式(3)计算出的形成温度为 305℃。这与 Cathelineau(1988)计算的平均温度相差 38℃。但依然在 293～364℃范围内。

$$T(℃) = -1000d^{c}_{001} + 14379 \text{(Battaglia, 1999)} \quad (3)$$

式中,d^{c}_{001} 为校正后的绿泥石 001 衍射峰 d 值。绿泥石电子探针数据及估计的形成温度见表 2,绿泥石 d_{001} 与 d_{060} 数据及估计的形成温度见表 3。

表 2　梵净山区前寒武系绿泥石电子探针分析数据与形成温度计算

Table 2　Chlorite data of electron microprobe analysis (EMPA) and evaluated formation temperature in the Precambrian of Fanjing shan, Guizhou

样号	HW-1455-1	HW-1455-2	HW-1455-3	HW-1455-4	HW-1455-5	HW-1455-6
SiO_2	24.34	24.56	26	24.64	24.37	25.05
TiO_2	0.04	0.03	0.01	0.02	—	0.05
Al_2O_3	21.03	21.66	20.7	22.22	21.91	21.62
Cr_2O_3	0.07	0.11	0.17	0.11	0.09	0.21
FeO	32.85	33.18	30.67	31.35	32.63	31.69
MnO	0.33	0.36	0.37	0.33	0.28	0.35
NiO	—	—	0.08	0.1	0.05	0.08
MgO	7.69	7.88	6.9	7.49	8.13	7.57
CaO	0.05	0.04	0.08	0.08	0.06	0.11
Na_2O	0.06	—	0.03	0.03	0.03	0.07
K_2O	0.04	0.06	0.59	0.28	0.03	0.28
Total	86.51	87.88	85.6	86.64	87.59	87.07
Si	5.437	5.395	5.795	5.443	5.357	5.516
Ti	0.007	0.005	0.002	0.003	—	0.008
Al	5.536	5.608	5.438	5.785	5.676	5.611
Cr	0.012	0.019	0.030	0.019	0.016	0.037
Fe^{+2}	6.136	6.095	5.717	5.791	5.998	5.836
Ni	—	—	0.014	0.018	0.009	0.014
Mn	0.062	0.067	0.070	0.062	0.052	0.065
Mg	2.561	2.580	2.293	2.466	2.664	2.485
Ca	0.012	0.009	0.019	0.019	0.014	0.026
Na	0.026	—	0.013	0.013	0.013	0.030
K	0.011	0.017	0.168	0.079	0.008	0.079
T(℃)①	351	357	293	350	364	338

注:①由 Cathelineau (1988) 方法 $T(℃) = -61.92 + 321.98Al^{VI}$ (以 14 个 O 为基础)计算。"—"低于检测限。

4　讨论

由温压计算表明,梵净山区前寒武纪岩石所遭受的变质作用类型为介于中压和中低压系列之间,其温压梯度约 93℃/kbar 或 27℃/km(按 50km≈

1.5Gbar 计算)。略低于正常地热梯度。根据贵州区域地质志(5～39 页,贵州地质矿产局,1987),梵净山群厚 10km 以上,加上其上的下江群、板溪群和震旦系(＞7526～12101m),总共＞17526～22101m。按照平均＞19844m 计算,由埋藏深度推算梵净山区前寒武纪地层底部的温度将超过 600℃。这是角闪岩相变质程度达到的温度。而实际上,本区的峰期变质温度仅为 340℃左右。表明本区前寒武纪岩石所遭受的变质作用不是埋藏变质作用。习惯上低温变质作用常常被当作埋藏变质作用,这与最早提出这一解释有一定关系(葡萄石-绿纤石相,沸石相为埋藏变质的产物。Coombs et al., 1959; Coombs, 1961),也与后人引用有关。

表 3 梵净山区前寒武系绿泥石 *d* 值测量数据与温度计算(Battaglia, 1999)

Table 3 Structural data of chlorite and formation temperature (HW-1455) in the Precambrian of Fanjing shan, Guizhou

d^{m}_{001}	d^{m}_{060}	b	Fe/Fe+Mg	d^{c}_{001}	d^{R}_{001}	T(℃)①
14.116	1.552	9.314	2.817	13.969	14.069	305

注:①由 Battaglia (1999) 方法计算。m代表测量,c代表校正,R代表 FeMg 校正。

根据梵净山区前寒武系出露的面积约 820km^2,该范围不仅有近变质带和浅变质带岩石出露,而且,还保留了成岩带岩石,故这不是区域变质的情况。另外,侵入梵净山区前寒武系中的岩浆岩为基性和超基性岩,分布有限,没有构成区域内的接触变质。动力变质作用的特点是具有线性分布和动力变质岩,梵净山区岩石并非糜棱岩碎裂岩,而是变余结构的(沉积)变质岩、变质火山岩。由于梵净山区变质带界线穿越地层界线,梵净山群与上覆下江群板溪群之间为不整合接触,下江群和板溪群与震旦系之间也为不整合接触,因此,甚低级变质作用应该是在前寒武纪地层褶皱同时或之后产生的构造增厚引起下部和底部岩石随温压的升高而产生的低温变质,其强度自然不高。

5 结论

(1)梵净山区前寒武系经历了成岩到浅变质作用的影响,迄今依然保留了成岩作用到浅变质作用的记录。

(2)其峰期变质作用的温度达到 293～364℃,变质压力介于中压—中低压系列之间(366MPa),变质温压梯度约 27℃/km。

(3)近变质带等变线穿越地层和褶皱轴线,表明变质作用为成岩—构造运动同期或后期构造增厚引起下部和底部岩石随温压的升高而产生的。

致谢:对二位匿名审稿专家提出的宝贵意见表示诚挚谢意!

References

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).

Árkai 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: 723～734.

Árkai P, Sassi F P, Sassi R. 1995. Simultaneous measurements of chlorite and illite crystallinity: a more reliable geothermometric tool for monitoring low- to very low-grade metamorphism in metapelites. A case study from Southern Alps (NE. Italy). European Journalof Mineralogy, 7: 1115～1128.

Árkai 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: 205～222.

Battaglia S. 1999. Applying X-ray goethermometer diffraction to a chlorite. Clays and Clay Minerals, 47(I): 54～63.

Bourdelle F, Cathelineau M. 2015. Low-temperature chlorite geothermometry: a graphical representation based on a T-R^{2+}-Si diagram. European Journal of Mineralogy, 27: 617～626.

Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. Clay Minerals, 23: 471～485.

Chen Wei, Kong Zhigang, Liu Fengxian, Wang Xuewu, Deng Mingguo, Zhao Jianxing, Liu Yang, Zhang Xinghua. 2017. Geology, geochemistry, ore and genesis of the Nayongzhi Pb-Zn deposit, Guizhou Province, NW. China. Acta Geologica Sinica, 91(6): 1269～1284 (in Chinese with English abstract).

Coombs D S. 1961. Some recent work on the lower grades of metamorphism. Australian Journal of Science, 24: 203～215.

Coombs D S, Ellis A J, Fyfe W S, Taylor A M. 1959. The zeolite facies, with comments on the interpretation of hydrothermal syntheses. Geochimca et Cosmochimica Acta, 17: 53～107.

Cui Min, Tan Liangjie, Guo Tonglou, Ning Fei, Tian Haiqin, Hu Dongfeng. 2009. Structural style and thrust breakthrough model of fold in southeast Guizhou. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 34(6): 907～913 (in Chinese with English abstract).

Ding Xiaozhong, Gao Linzhi, Liu Xueyan, Han Kunying, Pang Jianfeng. 2013. Framework and geochronology constrains on Newproterozoic in Jiangnan palaeo-tereau. Journal of Straigraphy, 37(4): 626～627 (in Chinese with English abstract).

Du Dingquan, Liu Zhichen, Sun Shijun, Guo Shanyi, Chen Pan. 2010. Spatial correlation analysis for the structure controlling gold deposits in the southeastern Guizhou Province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 29 (4): 380～387 (in Chinese with English abstract).

Fan Qichao, Zhang Chuanheng, You Guoqing, Dong Linlin, Liu Qubo, Lu Chenming. 2017. Sedimentary features and basin prototype of Fanjingshan Group. Acta Geoscientica Sinica, 38 (4): 513～522 (in Chinese with English abstract).

Frey M. 1987. Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. In: Frey M, ed. Low Temperature Metamorphism.

LondonUK: Blackie, 9～58.

Gao Linzhi, Chen Jianshu, Dai Chuangu, Ding Xiaozhong, Wang Xuehua, Liu Yanxue, Wang Min, Zhang Heng. 2014. SHRIMP zircon U-Pb dating of tuff in Fanjingshan Group and Xiajiang Group from Guizhou and Hunan Provinces and its stratigraphic implications. Geological Bulletin of China, 33(7):949～959 (in Chinese with English abstract).

Huang Jiqing. 1941. Chiangnania: Caledonides of the south of the Yangtze River. Geological Review, 6(Z2): 293～294 (in Chinese with English abstract).

Inoue A, Meunier A, Patrier-Mas P, Rigault C, Beaufort D, Vieillard P. 2009. Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites. Clays and Clay Minerals, 57: 371～382.

Kisch H J. 1991. Illite crystallinity: Recommendations on samples preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. Journal of Metamorphic Geology, 9: 665～670.

Kübler B. 1964. Les argiles, indicateurs de metamorphisme. Rev. Inst. Fr. Pétrol., 19: 1093～1112.

Kübler B. 1967. La cristallinité de l'illite et les zones tout à fait supérieures du métamorphisme. Etages tectoniques, Colloque à Neuchâtel 1966. Neuchâtel, Suisse: A la Baconnière. 105～121.

Kübler B. 1968. Evaluation quantitative du métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Bull Cent Rech Pau-SNPA, 2: 385～397.

Kübler B. 1984. Les indicateurs des transformations physiques et chimiques dans la diagenese, température et calorimétrie. In: Lagache M, ed. Thermobarométrie et Barométrie Géologiques Societe de Francais Minéalogie et Cristallographie, Paris, 489～596. Baconniere, Neuchâtel Vols. 105～121.

Li Xianhua. 1996. Sm-Nd isotopic systematic of Sibao group from the southern margin of Yangtze block: implications for the crustal evolution. Scientia Geologica Sinica, 31(3): 218～228 (in Chinese with English abstract).

Qin Shourong. 2000. Major metamorphic phases of regional metamorphic rocks of Precambrian System of Guizhou. Guizhou Geology, 17(3):180～182(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, release 2017.

Sassi F P, Scolari A. 1974. b0 value of the potassium white micas as a barometric indicator in low-grade metamorphism of pelitic schists. Contributions to Mineralogy and Petrology, 45: 143～152.

Shen Weizhou, Ling Hongfei, Zhang Bangtong. 1993. Sm-Nd isotopic studies on metamorphic basement rocks of the Jianan Proterozoic paleo-island Arc. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 29(3): 460～467(in Chinese with English abstract).

Su Jinbao, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Chen Xuanhua, Li Yong, Cui Jianjun. 2014. Geochronology and Hf isotopes of granite gravel from Fanjingshan, South China: Implication for the Precambrian tectonic evolution of western Jiangnan orogen. Journal of Earth Science, 25(4): 619～629.

Vidal O, Parra T, Trotet F. 2001. A thermodynamic model for Fe-Mg aluminous chloriteusing data from phase equilibrium experiments and natural politic assemblages in the 100 to 600℃, 1 to 25 kb range. American Journal of Science, 301: 557～592.

Wang H J, Ma Y S, Zhou J, Xu T J. 2012. Diagenesis and very low-grade metamorphism in a 7,012 m-deep well Hongcan 1, eastern Tibetan plateau. Swiss Journal of Geosciences, 105: 249～261.

Wang H J, Rahn M, Zhou J, Tao X F. 2013. Tectonothermal evolution of the Triassic flysch in the Songpan-Garzê orogen, eastern Tibetan plateau. Tectonophysics, 608: 505～516.

Wang H J, Rahn M, Zhou J. 2018. Tectonothermal evolution of the Triassic flysch in the Banyan Har orogen, Tibetan plateau. Tectonophysics, 723: 277～297.

Wang Hejing, 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 Jingsong, Zhou Jiaxi, Yang Dezhi, Liu Jinhai. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb age of the Zaibian diabase, SE Guizhou Province, SW China. Acta Geologica Sinica, 86(3): 460～469(in Chinese with English abstract).

Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, O'Reilly S Y. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. Precambrian Research, 177: 131～144.

Wang Min, Dai Chuangu, Wang Xuehua, Chen Jianshu, Ma Huizhen, Peng Chenglong, Yang Gaidi. 2012. Sedimentation age of the Fanjingshan Group in east Guizhou Province: Evidence from in-situ zircon LA-ICP-MS U-Pb dating. Acta Petrologicaet Mineralogica, 31(6): 843～857(in Chinese with English abstract).

Wang Min, Dai Chuangu, Chen Jianshu, Wang Xuehua, Ma Huizhen. 2016. Neoproterozoic geochronologic framework of magmatism in Fanjingshan area and its tectonic implications. Geology in China, 43(3):843～856(in Chinese with English abstract).

Wang Yangeng. 2001. The Grenville-age orogenic belt in the Fanjing Mountain area and the Rodinia supercontinent. Guizhou Geology, 18(4): 211～216(in Chinese with English abstract).

Wu Tao, ZhouJiaxi, Wang Xuance, Li Wuxian, Wild S A, Sun Hairui, Wang Jingsong, Li Zhen. 2018. Identification of ca. 850 Ma high-temperature strongly peraluminous granitoids in southeastern Guizhou Province, South China: A result of early extension along the southern margin of the Yangtze Block. Precambrian Research, 308:18～34.

Wu Xuehua, Ling Changfu, Jiang Chaoyang, Li Deming. 1965. Primary study on volcanic clastic rocks from upper Banxi Group in eastern Guizhou. Geological Review, 23(1):54～60 (in Chinese with English abstract).

Xiao Xudong, Li Jichun. 2009. Some considerations about the gold deposits in Southeast Guizhou. Guizhou Geology, 26(1):22～26(in Chinese with English abstract).

Yang Guangzhong. 2006. Metallogenesis of the thermal-type gold deposit in Southeast Guizhou and its model. Guizhou Geology, 22(3): 197～202(in Chinese with English abstract).

Zhang Chuanheng, Gao Linzhi, Shi Xiaoying, Han Yao, Liu Yueming. 2014. Shrimp age of the volcanic rock from the Fanjingshan Group and its chronostratigraphic significances. Earth Science Frontiers, 21(2): 139～143 (in Chinese with English abstract).

Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation. Precambrian Research, 170: 27～42.

Zhou Qi, Du Yuansheng, Yuan Liangjun, Zhang Sui, Yang Binnan, Pan Wen, Yu Wenchao, Wang Ping, Xue Yuan, Qi Liang, Liu Yu, Qing Yongjun, Xie Xiaofeng. 2017. Exploration models of ancient natural gas seep sedimentary-type manganese ore deposit: a case study of the Nanhua period "Datangpo" type manganese ore in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing. Acta Geologica Sinica, 91(10): 2285～2298 (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.

陈伟,孔志岗,刘凤祥,王学武,邓明国,赵剑星,刘阳,张兴华. 2017.

贵州纳雍枝铅锌矿床地质、地球化学及矿床成因. 地质学报,91(6):1269～1284.
崔敏,汤良杰,郭彤楼,宁飞,田海芹,胡东风. 2009. 黔东南地区褶皱构造样式及其断层突破模式. 地球科学(中国地质大学学报),34(6):907～913.
丁孝忠,高林志,刘燕学,韩坤英,庞健峰. 2013. 江南古陆新元古代地层格架及年代学制约. 地层学杂志,37(4):626～627.
杜定全,刘志臣,孙士军,顾尚义,陈璠. 2010. 黔东南地区金矿控矿构造的空间关系分析. 矿物岩石地球化学通报,29(4):380～387.
范启超,张传恒,游国庆,董琳琳,刘典波,陆晨明. 2017. 梵净山群沉积地质特征与原型盆地分析. 地球学报,38(4):513～522.
高林志,陈建书,戴传固,丁孝忠,王雪华,刘燕学,王敏,张恒. 2014. 黔东地区梵净山群与下江群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报,33(7):949～959.
贵州地质矿产局. 1987. 贵州区域地质志. 北京:地质出版社,5～48.
黄汲清. 1941. 江南大陆——扬子江以南之加里东宁山脉. 地质论评,6(s2):293～294.
李献华. 1996. 扬子块体南缘四堡群 Sm-Nd 同位素体系及其他壳演化意义. 地质科学,31(3):218～228.
马丽芳. 2002. 中国地质图集. 北京:地质出版社.
秦守荣. 2000. 贵州前寒武系区域变质岩的主要变质时期. 贵州地质,17(3):180～182.
沈渭洲,凌洪飞,章邦桐. 1993. 江南元古宙古岛弧基底变质岩的 Sm-Nd 同位素研究. 南京大学学报(自然科学版),29(3):460～467.
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.
王劲松,周家喜,杨德智,刘金海. 2012. 黔东南宰便辉绿岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究. 地质学报,86(3):460～469.
王敏,戴传固,陈建书,王雪华,马会珍. 2016. 贵州省梵净山区新元古代岩浆活动的年代学格架及其大地构造意义. 中国地质,43(3):843～856.
王敏,戴传固,王雪华,陈建书,马会珍,彭成龙,杨凯迪. 2012. 贵州梵净山群沉积时代——来自原位锆石 U-Pb 测年证据. 岩石矿物学杂志,31(6):843～857.
王砚耕. 2001. 梵净山区格林威尔期造山带与 Rodinia 超大陆,贵州地质,18(4):211～216.
吴雪华,凌长富,江朝洋,李德明. 1965. 黔东上板溪羣地层中变质火山碎屑岩的初步认识. 地质论评,23(1):54～60.
肖旭东,李吉春. 2009. 关于黔东南金矿几个问题的思考. 贵州地质,26(1):22～26.
谢俊邦,王砚耕. 2002. 贵州省地质. 见:马丽芳主编. 中国地质图集. 北京:地质出版社,285～291.
杨光忠. 2006. 黔东南地区热液型金矿的成矿作用及其模式. 贵州地质,22(3):197～202.
张传恒,高林志,史晓颖,韩瑶,刘耀明. 2014. 梵净山群火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其年代地层学意义. 地学前缘,21(2):139～143.
周琦,杜远生,袁良军,张遂,杨炳南,潘文,余文超,王萍,徐源,齐靓,刘雨,覃永军,谢小峰. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪"大塘坡式"锰矿为例. 地质学报,91(10):2285～2298.

Very low to low-grade metamorphism of Precambrian in Fanjingshan area, Guizhou, China

WANG Hejing*[1,2], AN Jiali[1], WANG Guanyu[1], YAN Yu[1], CHEN Mengyao[1]

1) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*;

2) *Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Ministry of Education, Beijing* 100871, *China*

* *Corresponding author: hjwang@pku.edu.cn*

Abstract

The very low to low-grade metamorphism overprinting on the Precambrian in Fanjingshan area was investigated with illite crystallinity, chlorite crystallinity, b_0 value of K-micas (illite) and geothermometry of chlorite. The results demonstrate that illite crystallinity Kübler index (KI), calibrated with Kisch IC set, ranges from 0.20～0.99°$\Delta 2\theta$, and the Árkai index of chlorite crystallinity ranges as 0.22～0.63°$\Delta 2\theta$, indicating the Precambrian in Fanjingshan area encountered with the geological processes from diagensis to epimetamorphism, and it remains diagenetic, anchizonal and epizonal records in rocks in the area studied. The diagenetic rock contains diagenetic index mineral illite-montmoriolite mixed-layer phase while anchizonal rock bears metamorphic index mineral paragonite. The b_0 of K-micas (illite) ranges 0.9000～0.9045 nm, and on average 0.9018 nm or roughly equivalent to 366 MPa. The cumulative frequency curve of b_0 stands in between the curves of N. New Hampshire and Otago, indicating the metamorphic pressures condition in between low-intermediate pressure and intermediate pressure facies. Peak metamorphic temperature was evaluated at 293～364℃ and average 342℃. Therefore the palaeo-gradient was derived at 27℃/km. The anchizonal boundaries across strata and folding axis of the Fanjingshan anticline, clarifying the syn-to post-sedimentary or structural movement of epimetamorphism, which caused the increasing in depth and the rising of temperature and pressure in rocks at the bottom or lower part of basin due to structural burial.

Key words: illite crystallinity; chlorite crystallinity; mica b_0; very-low-grade metamorphism; Fanjingshan; Precambrian