

塔里木盆地西缘上寒武统下丘里塔格群热液白云岩改造时限:来自古地磁的约束

陈代钊^{1,2,3}, 张艳秋^{1,4}, 周锡强^{1,2}, 董少锋^{1,2}

(1. 中国科学院 油气资源研究重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院 地球科学研究院, 北京 100029;

3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037)

摘要:成岩流体活动时间的确定一直都是学界难以解决的问题。上寒武统下丘里塔格群广泛发育有热液白云石,但热液改造的时间缺乏可靠约束。基于热液改造形成的广泛重磁化对热液改造时间进行约束,在巴楚永安坝和柯坪水泥厂下丘里塔格群中共采集43个热液白云石脉定向古柱状样品,并制样测试了64件古地磁样品,再对其中的29件样品进行了岩石磁学分析。大多数样品磁性在580℃时也没有被完全清洗掉,一部分在高外部磁场上才得到饱和等温剩磁,指示高矫顽力、高阻挡温度载磁矿物,推测为赤铁矿;另一部分样品在低外部磁场上迅速达到饱和,指示低矫顽力、高阻挡温度载磁矿物,推测为磁铁矿。许多样品的退磁数据较离散,但少数样品退磁曲线具有典型的双分量特征。柯坪水泥厂2号采样点和永安坝2号采样点的高温特征剩磁分量对应的古地磁极位置能与前人在同地区测的早二叠世与晚二叠世古磁极位置良好对应。考虑到所测样品均为热液白云石脉,这部分高温特征剩磁分量显然是热液活动引起化学重磁化的结果,说明热液白云岩改造与塔里木板块二叠纪强烈的岩浆活动有关系。

关键词:重磁化;古地磁定年;热液白云岩改造;下丘里塔格群;二叠纪;上寒武统;塔里木盆地

中图分类号:P631.2

文献标识码:A

Timing of hydrothermal alteration on the Lower Qiulitag Group dolomites of the Upper Cambrian, western margin of Tarim Basin: Palaeomagnetic constraint

Chen Daizhao^{1,2,3}, Zhang Yanqiu^{1,4}, Zhou Xiqiang^{1,2}, Dong Shaofeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resource Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Timing of fluid activity during diagenetic process keeps to be a difficult problem, notably in carbonate successions. The Lower Qiulitag Group dolomites of the Upper Cambrian in the Tarim Basin experienced extensive hydrothermal alteration through fracturing, crystallization and saddle dolomite precipitation; however, the timing of hydrothermal alteration was poorly constrained. To solve this problem, the extensive remagnetization data are used to constrain the timing of hydrothermal alteration on the Upper Qiulitag Group dolomites. We drilled 43 oriented plugs from saddle dolomite veins of the Lower Qiulitag Group in Keping and Yong'anba in the western flank of Tarim Basin, from which 64 samples were prepared for paleomagnetic analysis and 29 samples for rock magnetic studies. The magnetism of most samples cannot be washed out at a temperature over 580℃, and only some samples can yield saturation isothermal remanent magnetism in a high magnetic field, which resides in the high-coercivity, high-unblocking temperature magnetic carrier minerals, i. e., hematite. However, the other samples can rapidly reach saturation isothermal remanent magnetism in a low magnetic field, which is likely yielded by the low-coercivity, high-temperature magnetic carrier such as magnetite. Although many samples yield discrete demagnetization data, minor samples do yield bimodal fractions on the demagnetization curves.

收稿日期:2019-09-03;修订日期:2019-10-09。

第一作者简介:陈代钊(1963—),男,博士、研究员,层序地层与古大陆边缘盆地演化,碳酸盐沉积学与成岩作用。E-mail: dzh-chen@mail.iggcas.ac.cn。

基金项目:国家自然科学基金-石化联合基金项目(U1663209);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(41242040);国家重大油气专项(41121690)。

zation curve. The paleomagnetic polar positions calculated from the characteristic high-temperature, remanent magnetism fractions from the two sampling sites (Keping and Yong'anba) agree well with those of the Early Permian and Late Permian in the study area, respectively. Considering that the measured samples are mainly obtained from hydrothermal dolomite veins, the high-temperature characteristic remanent magnetism fractions apparently resulted from chemical remagnetization induced by hydrothermal activity, which was temporally linked to the intense Permian large igneous province (LIP) activity in the Tarim block initiated in the Early Permian.

Key words: remagnetization, paleomagnetism dating, hydrothermal alteration of dolomite, Lower Qiulitag Group, Permian, Upper Cambrian, Tarim Basin

“白云岩问题”是沉积学家和石油地质学家广泛关注的地质问题^[1-2]。目前,学者们提出了多种白云石(岩)化模式来解释地质历史时期不同类型的白云石(岩)成因。其中,“构造-热液白云石化”是古老白云岩形成的主要模式之一^[3-5]。针对成岩期及更后期形成的白云岩,人们通常利用野外露头(或岩心)、薄片观察以及氧-碳同位素、锶同位素、流体包裹体等地球化学手段,较好地约束了热液白云石(岩)形成的温度、流体性质及来源^[3,6-10]。但由于碳酸盐岩地层中,成岩矿物类型单调,非常缺乏适用于同位素定年的矿物材料,相比之下,如何确定热液改造或白云石化作用时间一直都是学界难以解决的问题。因此,大多数情况下会根据共生岩序列以及盆地构造演化的匹配关系,来约束主要成岩事件的相对时限,但这往往存在很大的不确定性。

沉积岩的重磁化(或次生磁化)是一个非常普遍的现象,在被发现的近60年时间里,一直被古地磁学家普遍认为是一个难缠和头疼的“问题”,是恢复沉积盆地古地磁数据(信号)时需要尽量避免的问题,这是因为重磁化会模糊(掩盖)、甚至完全清除沉积时的原始地磁特征(或信号)。而从另外一个方面来看,广泛的重磁化则进一步坐实了曾经发生的成岩(或热液)改造作用,因此,反过来也可以利用沉积岩的重磁化现象来约束成岩(构造-热液)作用的时限^[11]。近年来,一些学者尝试运用古地磁方法来约束碳酸盐岩成岩作用(包括热液流体的活动)的时限,而且取得了很好的成果,尤其是一些加拿大学者的一系列研究^[12-15]。该方法通过采集在成岩(或热液)流体中形成而被强烈改造的碳酸盐岩样品,用交变磁场退磁和热退磁方法确定成岩(包括白云化)流体改造形成的次生剩磁方向,并计算古地磁极位置,再将所得的古地磁极位置投影到沉积盆地所处板块的视极移曲线上,视极移曲线上古地磁极位置对应的时代即为成岩流体改造发生的时间^[12-16]。

上寒武统下丘里塔格群为一套以白云岩为主的碳

酸盐岩地层,同时也是塔里木盆地重要的潜在油气储层。前人研究表明,热液白云岩改造作用是下古生界(包括下丘里塔格群)成岩期白云岩的主要成因,并推断热液白云岩改造与塔里木板块早二叠世强烈的岩浆活动有成因关系^[7-10],但热液白云岩改造发生的时间尚缺少直接年代约束。为此,本文采用古地磁的方法尝试对下丘里塔格群热液改造白云岩的年代进行约束。

1 地质概况

塔里木盆地位于中国西北地区,南接昆仑山-阿尔金山,北以天山为界,可以划分为柯坪断隆、巴楚凸起、库车坳陷等十几个现今构造单元(图1)。自震旦纪以来,塔里木盆地可以划分为6个构造演化阶段:震旦纪-奥陶纪克拉通盆地拉张阶段,志留纪-泥盆纪克拉通盆地挤压阶段,石炭纪-二叠纪弧后伸展盆地阶段,三叠纪弧后前陆盆地阶段,侏罗纪-古近纪前陆盆地阶段,中新世以来碰撞后继盆地阶段^[17-18]。其中,早二叠世塔里木盆地经历了一次强烈的火山事件或大火成岩省活动^[19-20]。

研究区位于塔里木盆地西缘柯坪-巴楚地区。早古生代晚寒武世至早奥陶世,该区发育有稳定的碳酸盐岩台地,碳酸盐岩沉积厚度可达2 000 m^[7-8]。其中,上寒武统的下丘里塔格群厚度在400~700 m左右,主要为白云岩夹少量灰质白云岩、硅质白云岩。本次研究共涉及2个剖面寒武系顶部(下丘里塔格群)的热液改造白云岩:①柯坪水泥厂剖面,位于柯坪断隆东南缘,坐标为北纬40°33'21.29",东经78°56'39.40";②巴楚永安坝剖面,位于巴楚凸起西北缘,坐标为北纬39°48'24.8",东经79°01'21.9"(图1)。

在柯坪-巴楚隆起区,发育有前寒武系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、中-上三叠统以及侏罗系和白垩系等地层(图2)。寒武系下丘里塔格群白云岩沉积于低缓的碳酸盐缓坡内^[21],初始坡

度低(一般 $<1^{\circ}$),所以沉积层的产状也非常平缓。在寒武系沉积埋藏后,虽然在泥盆纪晚期经历过短暂的微小抬升,但总体处于一种持续沉积、埋藏过程,这种状况一致持续到二叠纪末(或三叠纪开始),在这个过程中,寒武系原始产状基本得以保持。随后下古生界

经历了快速、大幅(3 000~4 000 m)抬升至近地表,晚三叠世后再次经历小幅沉降或大致保持平稳,在中生代末期,由于天山的向南冲断和推覆,该地区再次经历抬升及至地表^[22](图2),同时地层发生大幅变形,形成现在的地形-地貌格局(图3a)。

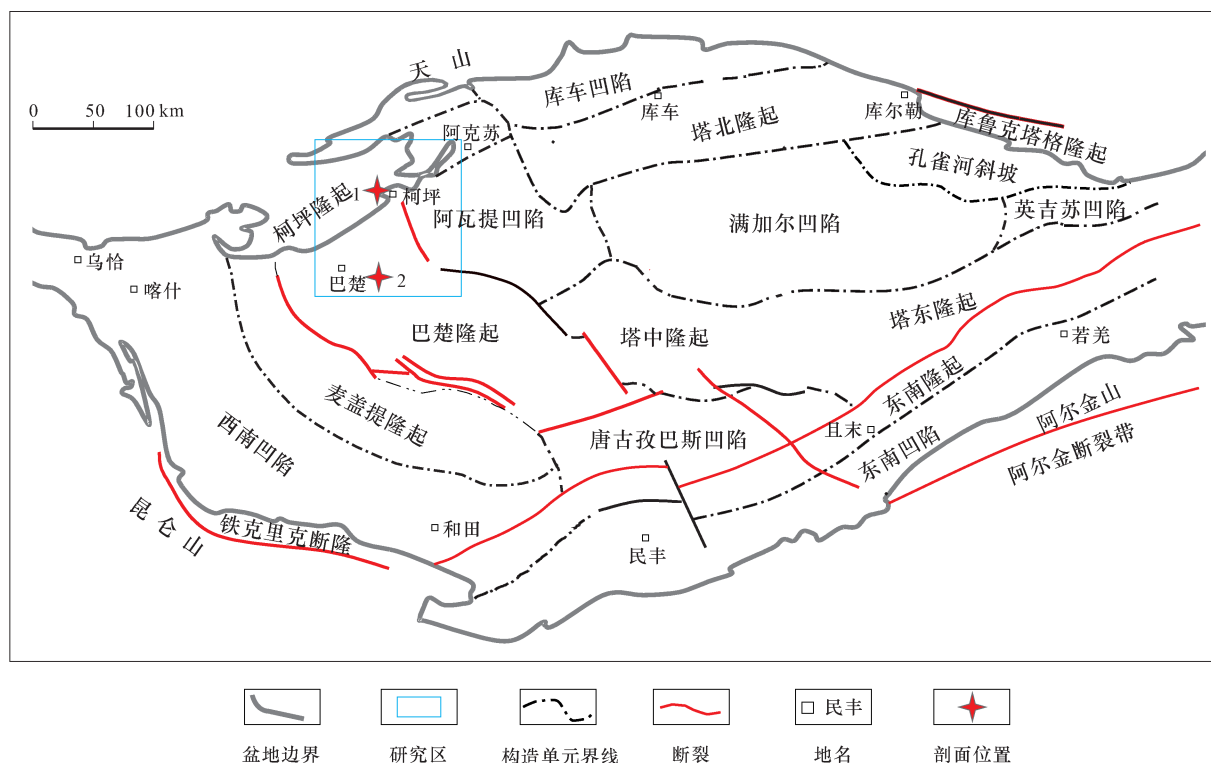


图1 塔里木盆地构造分区简图及研究剖面位置

Fig. 1 Structural division and location of studied sections in the Tarim Basin

(剖面1为柯坪水泥厂;剖面2为巴楚永安坝。)

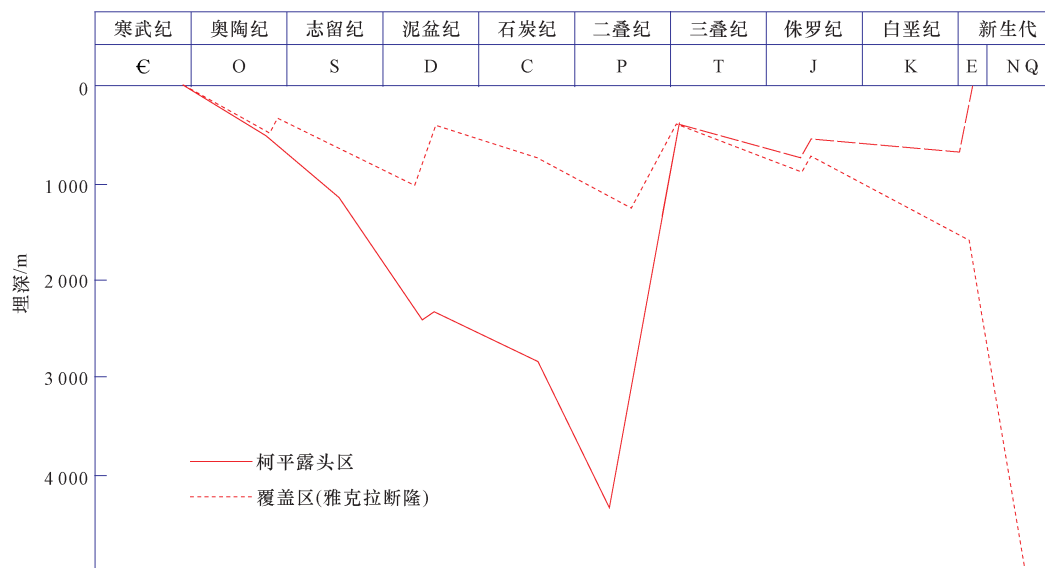


图2 塔里木盆地北部寒武系-奥陶系埋藏史(修改自叶德胜,1994)^[22]

Fig. 2 Burial curves of the Cambrian-Ordovician successions in the northern Tarim Basin(modified from Ye,1994)^[22]

在柯坪和永安坝剖面,受热液改造白云岩的形成与构造裂缝密切相关(图3),但周边并没有出露侵入岩体或喷发岩。这些裂缝切割白云岩原岩,成不规则状分布(图3a—d, f),使得原岩(基质)的白云石矿物发生广泛的重结晶,形成相互嵌合、紧密排列的曲面他形嵌晶(图3e, g)。这些裂缝和扩容的晶洞大多被鞍形白云石充填,随后局部有少量的

石英及更后的巨晶方解石(图3b—g)。前期研究^[8]表明这些鞍形白云石形成于110~170℃热流体中,其 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB)和 $\delta^{13}\text{C}$ (VPDB)值分别介于-8‰~-15‰和-0.4‰~-1.6‰。强烈的重结晶、广泛分布的鞍形白云石胶结物及较高形成温度表明被构造裂缝切割的白云岩层受到了强烈的热流体的改造。

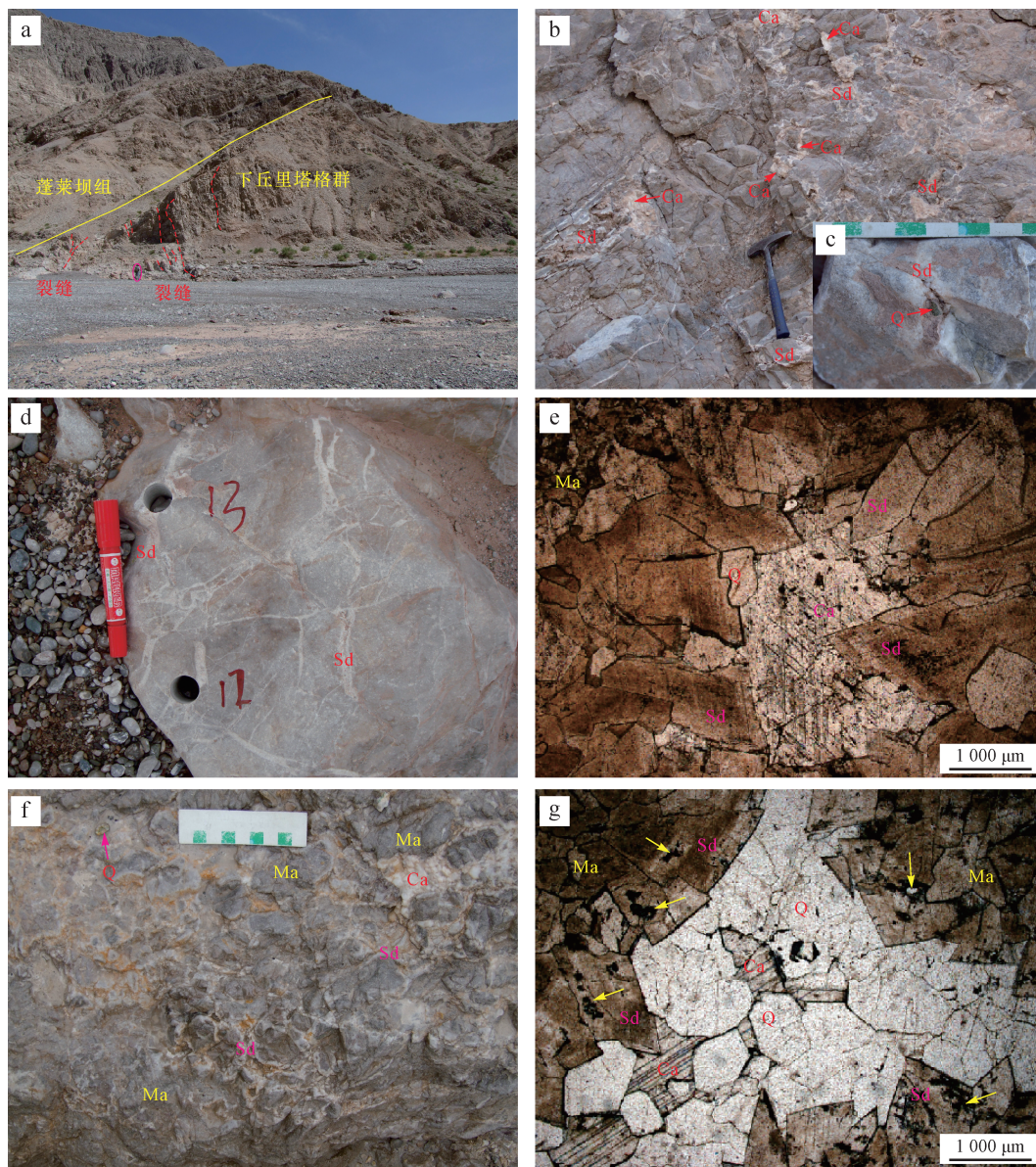


图3 塔里木盆地西部柯坪水泥厂(a—e)和巴楚永安坝(f, g)剖面热液改造白云岩岩石学特征

Fig. 3 Petrographic features of hydrothermally-altered dolomites in the Upper Qulitag Group of the Upper Cambrian at Keping(a—e) and Yong'anba(f, g), northwestern flank of the Tarim Basin

a. 柯坪水泥厂剖面下丘里塔格群热液改造白云岩宏观特征,这些白云岩常与构造裂缝共生或伴生,站立者为1.75 m(圆圈内);b. 充填于不规则构造裂缝和扩容晶洞的鞍形白云石(Sd)及更后期方解石矿物(Ca),大部分缝洞都被填满;c. 充填于裂缝中的鞍形白云石(Sd)和石英(Q, 暗绿色);d. 充填于不规则裂缝中的鞍形白云石(Sd),注意古地磁柱状样位置(圆孔);e. 热液改造白云岩成岩序列显微照片,依次可见非曲面它形基质白云石(Ma),鞍形白云石(Sd),石英(Q)以及巨晶方解石(Ca),正交偏光;f. 永安坝热液改造白云岩宏观特征,裂缝及孔洞切割基质白云石(Ma),并被鞍形白云石(Sd)、少量石英(Q)及更后的巨晶方解石(Ca)充填;g. 热液改造白云岩成岩序列,依次为基质白云石(Ma)、鞍形白云石(Sd)、石英(Q)及更后期的巨晶方解石(Ca),注意鞍形白云石中广泛的热液溶蚀(箭头),正交偏光

2 取样及研究方法

本次研究主要以鞍形白云石脉为主,所采标本为新鲜、未风化、未经挪动的岩石(图3d)。采样使用便携式汽油钻,并用磁罗盘采集样品所处地层的产状,用太阳罗盘采集样品钻取方向的方位角和倾角。使用GPS测定采样点的经纬度值。

在柯坪水泥厂剖面共选择了3个采样点(KM1, KM2, KM3)采集27个样品,制备成49块标本。其中,对27块标本进行了热退磁处理,22块样品进行了交变退磁处理。永安坝剖面共选择了2个采样点(YM1, YM2)采集15个样品,制备了22块标本。其中,对15块标本进行了热退磁处理,7块样品进行了交变退磁处理。为了鉴定样品中的主要磁性矿物,选择了29块样品进行了等温剩磁(IRM)的测量,并在其中选取11块样品进行了饱和等温剩磁(SIRM)的交变退磁实验。

所有样品的磁清洗及剩磁测量均是在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室完成。磁力仪和热退磁炉等试验设备均安装在小于300 mT的磁屏蔽空间(即零磁场空间)中。其中,系统热退磁使用TD-48热退磁炉,分为20步(100~580℃)进行逐步热退磁。交变退磁采用2G-760超导磁力仪分为20步(2~120 mT)进行逐步交变退磁。热退磁和交变退磁样品的剩磁均采用2G-755R超导磁力仪测量。等温剩磁和饱和等温剩磁采用VSM3900型振动样品磁力仪,先将29个样品在500 mT交变场下退磁,再在直流磁场下分15步(60~900 mT)获得等温剩磁。等温剩磁和饱和等温剩磁的测量采用2G-760超导磁力仪上测量。退磁结果的分析主要采用主向量分析法^[23],剩磁方向的统计平均采用球面单位矢量的Fisher统计平均^[24]。

3 数据结果分析

3.1 岩石磁学结果

260℃以下分离出低温剩磁分量,高温特征剩磁分量一般在280℃以上获得,阻挡温度分布在500℃以上,大多数样品磁性在580℃时也没有被完全清洗掉(图4a),说明主要载磁矿物可能为高阻挡温度的矿物,如赤铁矿,其最高阻挡温度为675℃。另外一小部分样品在200℃以上快速退磁,580℃时磁性基本完全清洗掉(图4b),说明这部分样品含有较高阻挡温度的矿物,如磁铁矿,其最高阻挡温度575℃^[25]。

IRM曲线结果表明,即使在外场加到300 mT,大部分样品的感应磁化仍未到达饱和,在高磁场上才得到饱和等温剩磁,而且获得的速率比较缓慢(图4c),说明可能含有高矫顽力的磁性矿物,如针铁矿或赤铁矿,进一步说明高矫顽力、高阻挡温度的赤铁矿(矫顽力在1.5~5T)的存在。但是,在柯坪剖面中,个别样品(如KM1-7, KM1-2, KM2-4, KM3-1, KM3-5)显示了低矫顽力的特征,即在较低的磁化场下(200~300 mT)有迅速获得饱和等温剩磁的趋势(图4d),且阻挡温度较高,所以推测这些样品的载磁矿物主要为磁铁矿(矫顽力<0.3 T)。基于这些样品的岩石磁学特征,认为绝大多数样品的载磁矿物主要由赤铁矿和少量的磁铁矿组成。

3.2 系统退磁结果

系统退磁的结果表明样品中的天然剩余磁化强度很弱,其中永安坝剖面的天然剩磁平均值为 4.54×10^{-4} A/m($1.17 \times 10^{-4} \sim 16.5 \times 10^{-4}$ A/m);柯坪水泥厂剖面天然剩磁平均值为 1.15×10^{-4} A/m($0.155 \times 10^{-4} \sim 23.9 \times 10^{-4}$ A/m)。许多样品的退磁数据较离散,如柯坪剖面的3个采样点数据均不好,磁化强度接近仪器的噪声,无法分离出特征剩磁,仅在2号采样点选择了几个相对较好的数据进行了特征剩磁组分的判断。另一方面,本次研究热退磁处理的效果要远远好于交变退磁。永安坝的两个采样点的数据相对较好,通过热退磁分离出了特征剩磁分量。如前所述,在寒武系沉积后及至二叠纪末,虽然在泥盆纪晚期经历过短暂的微小抬升,研究区总体处于一种持续沉积、埋藏过程(图2)^[9,22],在这个过程中,寒武系原始产状得以保持。因此,仅通过现今地层产状进行地层校正就能够恢复二叠纪的大地水平面。

剩磁分离结果显示两个磁组分:①低温不稳定组分,一般在260℃以下或者10~20 mT被清洗,在永安坝采样点1获得其平均方向[D (磁偏角)= 6.6° , I (磁倾角)= 59° , α_{95} (95%置信圆锥半顶角)= 27.7°]与该地区的现代地磁场方向($D=357^\circ$, $I=59^\circ$)基本一致,可能为现代地磁场的粘滞剩磁或近代磁场的重磁化分量^[26];②高温特征剩磁组分,一般280℃以上获得,但阻挡温度多大于580℃,剩磁方向稳定(图5a),显示为存留于赤铁矿的特征剩磁组分,另外也有少量的高温特征剩磁组分在280~420℃向原点收敛,并在近600℃时基本被清除(图4b,图5b),这部分特征剩磁分量可能由磁铁矿携带。由于样品中的载磁矿物主要由赤铁矿组成,因此稳定的高温特征剩磁方向也应主要

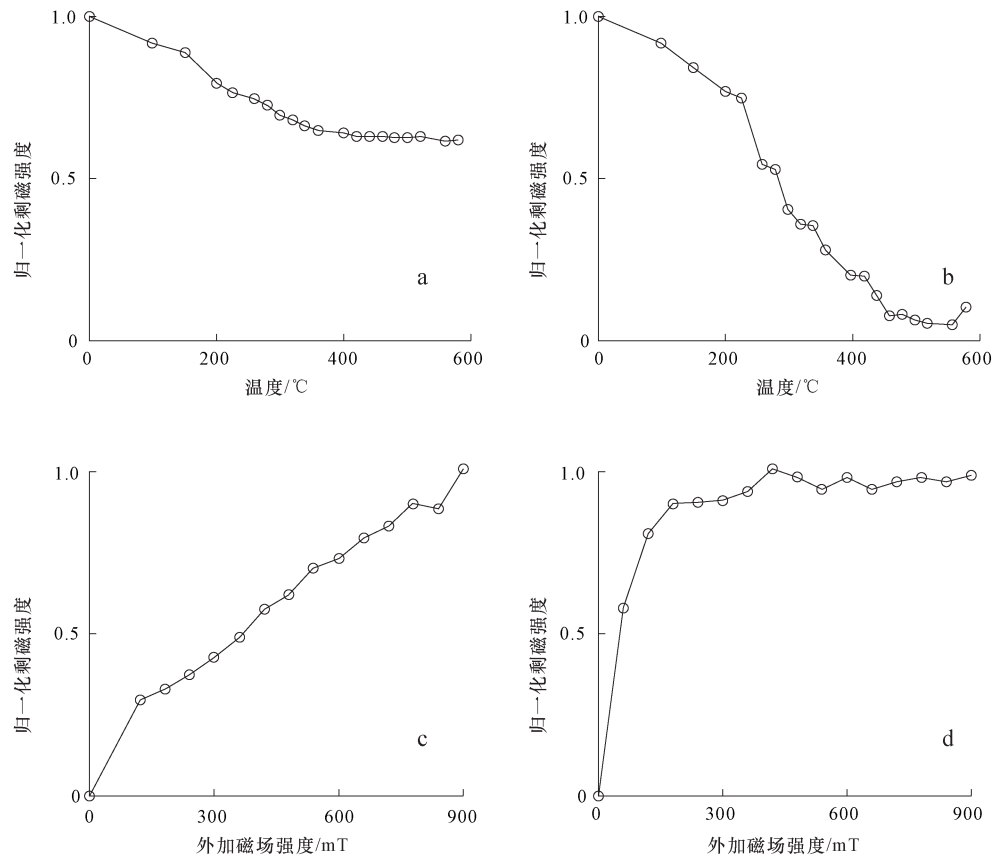


图 4 典型热液白云岩脉样品热退磁曲线(a,b)和等温剩磁获得曲线(c,d)。

Fig. 4 Thermal demagnetization decay curves(a,b) and isothermal remanent magnetism acquisition curves(c,d) of typical specimens from hydrothermal dolomite veins

a. 样品永安坝 YM1-6; b. 样品永安坝 YM2-7; c. 样品永安坝 YM1-5; d. 样品柯坪 KM2-4

存留在此类载磁矿物中。基于这些高温特征剩磁组分,在永安坝(39.48°N,79.01°E)采样点 1 获得了平均高温特征磁化方向 D (磁偏角) = 9.8°, I (磁倾角) = 62.2°, $\alpha_{95} = 13.6^\circ$ 。由此计算的古地磁极位置为 λ (磁极纬度) = 81.7°N, ψ (磁极经度) = 137.3°E, 古纬度为 43.5°N(图 6a)。在永安坝采样点 2 获得平均高温特

征磁化方向为 $D = 21.3^\circ$, $I = 54.2^\circ$, $\alpha_{95} = 8.9^\circ$ 。据此计算的古地磁极位置为 $\lambda = 72.4^\circ$ N, $\psi = 178^\circ$ E, 古纬度为 34.7°N(图 6b)。在柯坪水泥厂剖面采样点 2(40.3°N, 78.6°E)获得平均高温特征磁化方向为 $D = 219.7^\circ$, $I = 53.7^\circ$, $\alpha_{95} = 19.3^\circ$, 由此计算出的古地磁极位置为 $\lambda = 58^\circ$ N, $\psi = 166.7^\circ$ E, 古纬度为 34.2°N(图 6c)。

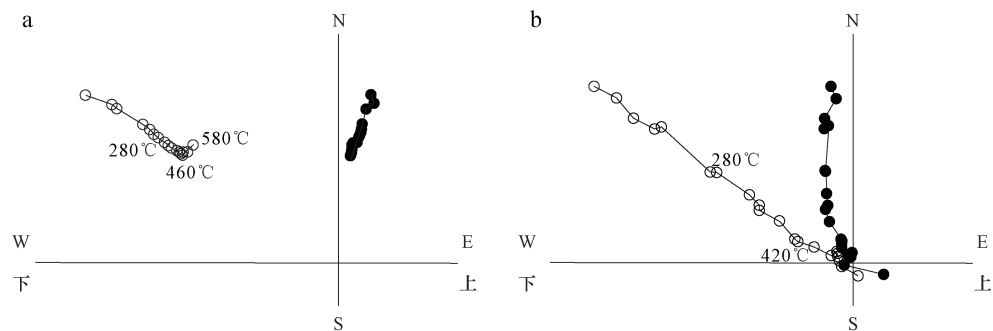


图 5 代表性热退磁正交矢量图(经倾斜改正)

Fig. 5 Orthogonal projection diagrams of thermal demagnetization vectors(tilting corrected) for typical samples

a. 样品永安坝 YM1-6; b. 样品永安坝 YM2-7。

(实心圆和空心圆分别代表剩磁方向在水平面和铅垂面上的投影。)

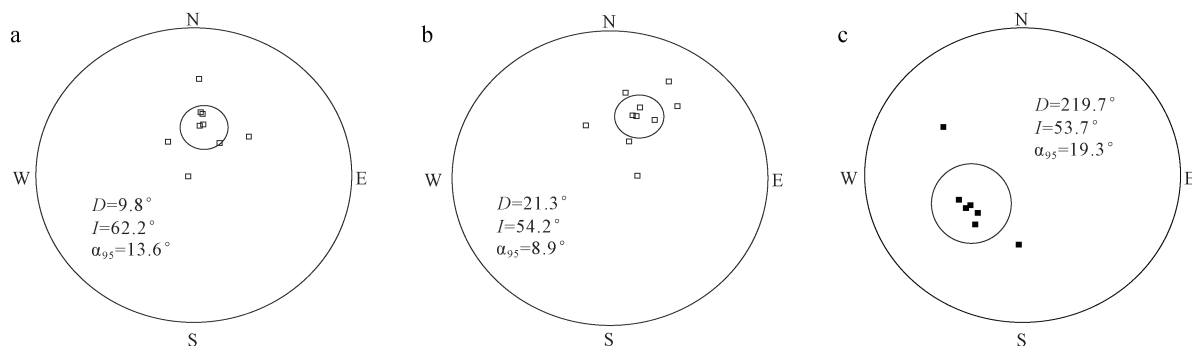


图6 采样点高温特征分量平均方向的等面积赤平投影图

Fig. 6 Equal-area stereogram projections of average directions obtained from characteristic high-temperature fractions at different sampling sites

a. 永安坝采样点 1; b. 永安坝采样点 2; c. 柯坪水泥厂采样点 2

(实心方块和空心方块分别代表上、下球面投影。)

4 讨论与结论

在柯坪水泥厂剖面仅在采样点 2 所获得了有效的特征剩磁方组分,由此计算的古磁极位置 $\lambda = 58^\circ\text{N}$, $\psi = 166.7^\circ\text{E}$, 古纬度为 34.2°N , 与塔里木地块(盆地)早二叠世的特征剩磁方向相似($\lambda = 56.1^\circ\text{N}$, $\psi = 179.4^\circ\text{E}$, 古纬度为 27.6°N)^[27-28], 与塔里木盆地似极移曲线^[29]匹配发现其古磁极位置落入了早二叠世古地磁极范围(95%置信椭圆内 $<16^\circ$)内(图 7), 说明此处上寒武统白云岩有效的记录了早二叠世热液改造引起的重磁化过程。

在永安坝采样点 1 获得的古磁极位置为 $\lambda = 81.7^\circ\text{N}$, $\psi = 137.3^\circ\text{E}$, 古纬度为 43.5°N 。与塔里木板块视极移曲线的新生代古地磁极位置有相似的特点($\lambda = 81.4^\circ\text{N}$, $\psi = 230.3^\circ\text{E}$)^[29], 推测其可能为与新生代强烈构造变形相关的重磁化的结果(图 6)。但新生代时, 研究区古生代地层已经露出地表^[8-9, 22], 渗入地层表层的大气淡水已经不具备白云石交代或沉淀的水化学(如 $\text{Mg}/\text{Ca} > 1$)和热动力学(温度在 $50 \sim 60^\circ\text{C}$)条件, 不可能形成温度大于 100°C 的鞍形白云石^[7-9]。因此, 基本可以排除此次重磁化是造成广泛白云石重结晶和鞍形白云石沉淀为代表的热液活动改造时间。这与野外观察到的最后期无胶结矿物充填的裂缝系统的事实是吻合的。

而在永安坝采样点 2 获得的古磁极位置为 $\lambda = 72.4^\circ\text{N}$, $\psi = 178^\circ\text{E}$, 古纬度为 34.7°N , 与方大钧等.(2001)^[30]实测的巴楚小海子侵入到上志留统砂岩中的二叠纪辉绿岩岩脉特征剩磁数据吻合较好($\lambda = 71.9^\circ\text{N}$, $\psi = 179.7^\circ\text{E}$, 古纬度为 35.0°N),

亦与 Li 等.(1988)^[31]在巴楚地区所测的晚二叠世岩脉的古地磁数据具有相似的特征($\lambda = 65.6^\circ\text{N}$, $\psi = 181.2^\circ\text{E}$, $\alpha_{95} = 3.9^\circ$, 古纬度为 30.4°N), 在塔里木盆地的视极移曲线^[29]上落入了晚二叠世的古地磁极范围(95%置信大圆弧内, 图 7), 说明此处的上寒武统热液白云岩脉记录了晚二叠世热液改造的特征剩磁方向。

来自柯坪水泥厂和巴楚永安坝剖面热液改造白云岩样品的这部分高温特征剩磁分量分别记录了早二叠世和晚二叠世热液活动引起的重磁化。由于本次研究样品主要为鞍形白云石脉发育的热液改造白云岩地层, 二叠纪的重磁化应该是热液流体改造(重结晶)和白云石沉淀形成的化学剩磁结果。因此, 研究区下丘里塔格群发生广泛的热液白云岩改造时间应发生在二叠纪, 与当时整个塔里木盆地强烈的大火成岩省岩浆活动基本同时; 尽管火山活动主幕发生在早二叠世, 但可持续到晚二叠世^[33-34]。说明寒武系(或其他层系)白云岩的热液改造与二叠纪的火山活动有成因联系, 而多幕火山活动也会造成该盆地前期地层的多次热液活动叠加改造。该结果进一步验证了前期通过间接年代约束获得的认识^[9-10], 特别是在巴楚三岔, 此处鞍形白云石胶结物的 Sr 同位素值, 部分甚至低于(围岩)基质白云石的 Sr 同位素值, 说明在其形成过程中有大量非放射性幔源 Sr 的加入, 很可能由其周边大量发育的早二叠世辉绿岩侵入体供给^[9]。塔里木盆地二叠纪岩浆活动广泛发育, 引起的广泛异常热事件不仅对寒武系碳酸盐岩的改造有重要影响, 同时也会对二叠纪以前的所有碳酸盐岩古老地层的热液改造产生重

要影响^[9]。

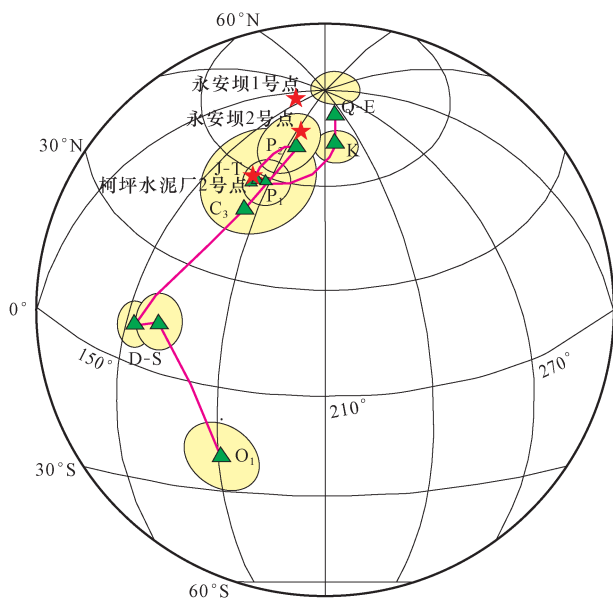


图7 塔里木盆地西缘下丘里塔格群热液白云石脉所获古地磁极位置(星号)与塔里木盆地显生宙视极(三角)移曲线(古磁极95%置信度(椭圆) $<16^\circ$)^[29]对比

Fig. 7 Paleomagnetic polar positions (stars) obtained from hydrothermal dolomite veins in the Lower Qilutag Group (Upper Cambrian) dolomites in the western flank of Tarim Basin, compared with the polar (triangles) wandering (APW) path of Tarim block during the Phanerozoic (with 95% error ellipses $<16^\circ$)^[29]

O₁. 早奥陶世; S. 志留纪; D. 泥盆纪; C₃. 晚石炭世; P₁. 早二叠世;

P₂. 晚二叠世; K. 白垩纪; E. 始新世; Q. 第四纪

致谢:丁一博士协助整理数据和论文初稿,团队其他学生(魏文文和郭增辉)共同参加了野外工作并协助取样;邓成龙研究员在学术上给予了宝贵的指导和建议,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Hardie L. Dolomitization: A critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(1): 166–183.
- [2] Warren J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1–3): 1–81.
- [3] Qing H, Mountjoy E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoir in the Presqu' ile Barrier, Western Canada Sedimentary Basin [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78: 55–77.
- [4] Davies G R, Smith B S Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [5] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614–622.
Chen Daizhao. Structural-hydrothermal dolomitization and dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 614–622.
- [6] Chen D, Qing H, Yang C. Multistage hydrothermal dolomites in the Middle Devonian (Givetian) carbonates from the Guilin area, South China [J]. Sedimentology, 2004, 51: 2019–2051.
- [7] Zhang J, Hu W, Qian Y, et al. Formation of saddle dolomites in Upper Cambrian carbonates, western Tarim Basin (northwest China): Implications for fault-related fluid flow [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(8): 1428–1440.
- [8] Dong S, Chen D, Qing H, et al. In situ stable isotopic constraints on dolomitizing fluids for the hydrothermally-originated saddle dolomites at Keping, Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23): 2877–2882.
- [9] Dong S, Chen D, Qing H, et al. Hydrothermal alteration of dolomites in the Lower-Ordovician, Tarim Basin, NW China: Multiple constraints from petrology, isotope geochemistry and fluid inclusion microthermometry [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 46: 270–285.
- [10] Guo C, Chen D, Qing H, et al. Multiple dolomitization and later hydrothermal alteration on the Upper Cambrian-Lower Ordovician carbonates in the northern Tarim Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 295–316.
- [11] Elmore R D, Muxworthy A R, Aldana Met al. Remagnetization and chemical alteration of sedimentary rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 371: 1–21.
- [12] Lewchuk M, Symons D, Al-Aasm I, et al. Dolomitization of mississippian carbonates in the shell waterton gas field, southwestern alberta: insights from paleomagnetism, petrology and geochemistry [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1998, 46(3): 387–410.
- [13] Symons D, Enkin R, Cioppa M. Paleomagnetism in the Western Canada Sedimentary Basin: Dating fluid flow and deformation events [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1999, 47(4): 534–547.
- [14] Cioppa M, Al-Aasm I, Symons D, et al. Correlating paleomagnetic, geochemical and petrographic evidence to date diagenetic and fluid flow events in the Mississippian Turner Valley Formation, Moose Field, Alberta, Canada [J]. Sedimentary Geology, 2000, 131: 109–129.
- [15] Cioppa M, Al-Aasm I, Symons D, et al. Dating penecontemporaneous dolomitization in carbonate reservoirs: Paleomagnetic, petrographic, and geochemical constraints [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(1): 71–88.
- [16] Elmore R, Parnell J, Engel M, et al. Palaeomagnetic dating of fluid flow events in dolomitized rocks along the Highland Boundary Fault, central Scotland [J]. Geofluids, 2002, 2(4): 299–314.
- [17] Li D. Hydrocarbon occurrences in the petroliferous basins of western China [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(1): 26–34.
- [18] 卢华复, 王胜利, 贾东, 等. 塔里木盆地与天山山脉晚新生代盆山耦合机制 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 493–503.

- Lu HuaFu, Wang Shengli, Jia Dong, et al. The Late Cenozoic Basin/Mountain coupling mechanics of the Tarim Basin and the Tianshan Mountains [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11 (4): 493 – 503.
- [19] 陈汉林, 杨树锋, 董传万. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义[J]. 地球化学, 1997, 26(6): 77 – 87.
Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan. Determination of Permian basic rock belt in the Tarim Basin and tectonic significance [J]. Geochemica, 1997, 26(6): 77 – 87.
- [20] 汤良杰, 张一伟, 金之钧. 塔里木盆地、柴达木盆地的开合旋回[J]. 地质通报, 2004, 23(3): 254 – 260.
Tang Liangjie, Zhang Yiwei, Jin Zhijun, et al. Opening-closing cycles of the Tarim and Qaidam basins, northwestern China [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(3): 254 – 260.
- [21] Zhang Y Q, Chen D Z, Zhou X Q, et al. Depositional facies and strata cyclicity of dolomites in the Lower Qiulitag Group (Upper Cambrian) in northwestern Tarim Basin, NW China [J]. Facies, 2014, 61(1): 417.
- [22] 叶德胜. 塔里木盆地北部寒武 – 奥陶系碳酸盐岩的深部溶蚀作用[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 66 – 71.
Ye D S. Deep dissolution of Cambrian-Ordovician carbonates in northern Tarim Basin [J]. Acta Sediment Sinica, 1994, 12(1): 66 – 71.
- [23] Kirschvink J. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1980, 62: 699 – 718.
- [24] Fisher R. Dispersion on a sphere [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1953, 217: 295 – 305.
- [25] Lowrie W. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties [J]. Geophysical Research Letters, 1972, 17(2): 159 – 162.
- [26] 孙丽莎, 黄宝春. 塔里木地块奥陶纪古地磁新结果及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1836 – 1849.
Sun Lisha, Huang Baochun. New paleomagnetic result for Ordovician rocks from the Tarim Block, Northwest China and its tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1836 – 1849.
- [27] 白云虹, 程国良, 孙青格, 等. 新疆塔里木地台晚古生代古地磁极移曲线及其地质构造含义[J]. 地震地质, 1985, 7(1): 71 – 80.
Bai Yunhong, Chen Guoliang, Sun Qingge, et al. Late Paleozoic polar wander path for the Tarim Block and tectonic significance [J]. Seismology and Geology, 1985, 7(1): 71 – 80.
- [28] 方大钧, 金国海, 姜莉萍, 等. 塔里木盆地古生代古地磁结果及其构造地质意义[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 522 – 532.
Fang Dajun, Jin Guohai, Jiang Liping, et al. Paleozoic paleomagnetic results and the tectonic significance of Tarim Plate [J]. Acta Geophysica Sinica, 1996, 39(4): 522 – 532.
- [29] 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 348 – 359.
Huang Baochun, Zhou Yaoxiu, Zhu Rixiang. Discussion on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(3): 348 – 359.
- [30] 方大钧, 沈忠悦, 王朋岩. 塔里木地块古地磁数据表 [J]. 浙江大学学报, 2001, 28(1): 92 – 99.
Fang Dajun, Shen Zhongyue, Wang Pengyan. Paleomagnetic data of Tarim Block [J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 28(1): 92 – 99.
- [31] Li Y, McWilliam M, Cox A, et al. Late Permian paleomagnetic pole from dikes of the Tarim craton, China [J]. Geology, 1988, 16(3): 275 – 278.
- [32] Tian W, Campbell I H, Allen C M, et al. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160: 407 – 425.
- [33] Yu X, Yang S, Chen H, et al. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics [J]. Gondwana Research, 2011, 20: 485 – 497.
- [34] Zhang C, Xu Y, Li Z, et al. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? [J]. Lithos, 2010, 119: 537 – 552.

(编辑 张玉银)