

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.地球物理学报,2009,52(7):1836~1848,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.018

Sun L S, Huang B C. New paleomagnetic result for Ordovician rocks from the Tarim Block, Northwest China and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7):1836~1848,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.018

# 塔里木地块奥陶纪古地磁新结果及其构造意义

孙丽莎,黄宝春

中国科学院地质与地球物理研究所,岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029

**摘 要** 本文报道塔里木地块阿克苏—柯坪—巴楚地区奥陶纪古地磁研究新结果.对采自 44 个采点的灰岩、泥灰岩及泥质砂岩样品的系统岩石磁学和古地磁学研究表明,所有样品可分成两组:第一类样品以赤铁矿和少量磁铁矿为主要载磁矿物,该类样品通常可分离出特征剩磁组分 A;第二类样品以磁铁矿为主要载磁矿物,系统退磁揭示出这类样品中存在特征剩磁组分 B.特征剩磁组分 A 分布于绝大多数奥陶纪样品中,具有双极性,但褶皱检验结果为负,推测其可能为新生代重磁化.特征剩磁组分 B 仅能从少部分中晚奥陶世样品中分离出,但褶皱检验结果为正,且其所对应古地磁极位置(40.7°S,183.3°E, $d\rho/dm=4.8^\circ/6.9^\circ$ )与塔里木地块古生代中期以来的古地磁极位置显著差别,表明其很可能为岩石形成时期所获得的原生剩磁.古地磁结果表明塔里木地块中晚奥陶世位于南半球中低纬度地区,很可能与扬子地块一起位于冈瓦纳古大陆的边缘;中晚奥陶世之后,塔里木地块通过大幅度北向漂移和顺时针旋转,逐步与冈瓦纳大陆分离,并越过古赤道;至晚石炭世,塔里木地块已到达古亚洲洋构造域的南缘.

**关键词** 塔里木地块,奥陶纪,古地磁,构造演化,古地理

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.018

中图分类号 P318

收稿日期 2009-05-11,2009-06-30 收修定稿

## New paleomagnetic result for Ordovician rocks from the Tarim Block, Northwest China and its tectonic implications

SUN Li-Sha, HUANG Bao-Chun

State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** This paper reports new Ordovician paleomagnetic results from the Aksu-Kalpin-Bachu area of the Tarim Block. Based on the systematic study of rock magnetism and paleomagnetism with limestone, argillaceous limestone, and argillaceous sandstone specimens from 44 sampling sites, all the samples could be divided into two types; the predominant magnetic minerals of the first type are hematite and subordinate magnetite. For the specimens from this type, characteristic remanent magnetization (ChRM) could generally be isolated by demagnetization temperatures larger than 600 °C; we assigned this ChRM as component A; whilst magnetite is the predominant magnetic mineral of the second type; progressive demagnetization yielded another ChRM (component B) with unblocking temperatures of 550~570 °C. The component A obtained from the majority of Ordovician specimens has dual polarity and a negative fold test result; we interpreted it as a remagnetization component acquired during the Cenozoic period. The component B can only be isolated from some Middle-Late Ordovician specimens with unique normal polarity, and has a positive fold test result at 95% confidence. The corresponding

paleomagnetic pole of this characteristic component is at  $40.7^{\circ}\text{S}$ ,  $183.3^{\circ}\text{E}$  with  $dp/dm=4.8^{\circ}/6.9^{\circ}$  and is in great difference with the available post-Late Paleozoic paleopoles for the Tarim Block, indicating that the characteristic component B could be primary magnetization acquired in the formation of the rocks. The new Ordovician paleomagnetic result shows that the Tarim Block was located in the low- to intermediate- latitude regions of the Southern Hemisphere during the Middle-Late Ordovician period, and is very likely to situate, together with the South China Block, in the western margin of the Australian-Antarctic continents of East Gondwana. However, it may have subjected to a large northward drift and clockwise rotation after the Middle-Late Ordovician period, which resulted in the separation of Tarim from the East Gondwanaland and subsequent crossing of the paleo-equator; by the Late Carboniferous period the Tarim Block may have accreted to the southern margin of the Altaiids.

**Keywords** Tarim block, Ordovician, Paleomagnetism, Tectonic evolution, Paleogeography

## 1 引言

塔里木地块位于天山以南青藏高原以北,是中国大陆三大古老陆块之一,其古生代古地理位置及构造演化不仅对古亚洲洋构造域的形成与演化研究具有重要意义,而且是塔里木地区古生代海相油气勘察的重要基础。随着 20 世纪 90 年代中国三大古老陆块显生宙古地磁视极移曲线研究项目的组织和实施,华北和扬子两大陆块古生代古地磁学研究均取得了突破<sup>[1~10]</sup>,为华北和扬子地块早古生代运动学特征及在全球古地理重建中的构造位置等研究提供了可靠制约<sup>[2,11~14]</sup>。然而,对于塔里木地块,一方面由于晚古生代末期古亚洲洋构造域的强烈壳幔相互作用和大规模岩浆活动<sup>[15,16]</sup>和新生代印度和亚洲大陆碰撞和持续挤压所引起的显著构造变形和缩短<sup>[17~24]</sup>;另一方面塔里木盆地中央为塔克拉玛干沙漠所覆盖,古生代地层主要出露于北缘的阿克苏—柯坪—巴楚和库鲁克塔格地区等盆地边缘,受晚古生代以来的多期次构造活动的影响强烈,发生了复杂的构造变形;同时,早古生代地层以海相灰岩和泥灰岩为主,磁性较弱,加之恶劣的自然环境对野外系统古地磁采样的制约,迄今满足现代古地磁数据可靠性标准<sup>[25]</sup>的古生代古地磁数据严重缺乏。特别地,早古生代的古地磁研究几乎是一片空白,目前仅有方大钧等<sup>[26]</sup>从库鲁克塔格地区三个早奥陶世白云岗组的白云质灰岩采点中获得的初步结果。

显然,塔里木地块早古生代古地磁资料的严重缺乏,不仅制约了对塔里木地块古生代古地理环境、洋陆演化变迁过程、海相烃原岩的分布与成藏环境等的认识,而且严重限制了对中国西部地块前寒武

纪和古生代重大地质事件、古亚洲洋构造域的形成与演化过程等重大基础科学问题的深入理解和认识。近年来,我们在相关项目的资助下,对塔里木地块的寒武、奥陶及志留纪开展了系统的古地磁研究,力争在塔里木地块早古生代活动构造古地理研究上有所突破。本文报道塔里木地块奥陶纪的古地磁初步结果。

## 2 区域地层概况和样品采集

地处亚洲内陆地区的塔里木盆地是一个叠加于古生代地台之上的大型中生代复合内陆盆地<sup>[27]</sup>,夹持于天山、昆仑山和阿尔金山之间(图 1a)。由于盆地中央为广阔无垠的塔克拉玛干沙漠所覆盖,早古生代的寒武系和奥陶系,除在南天山西段的哈尔克山南坡有零星出露外,主要出露于塔西北阿克苏—柯坪—巴楚地区和塔东北库鲁克塔格地区。其中,塔西北阿克苏—柯坪—巴楚地区地层出露较全,中元古界至新近系基本均有出露。尤其是古生界比较完整,缺失新元古界下部、泥盆系上统及中生界<sup>[28]</sup>。该区内寒武系和奥陶系以滨-浅海相碳酸盐岩为主,构成了区内山脉的主体(图 1)。其中奥陶系与下伏上寒武统下丘里塔格组和上覆下志留统-上奥陶统柯坪塔格组均为整合接触;奥陶系由老至新依次可划分为上丘里塔格组(中下统)、萨尔干组(中上统)、坎令组、其浪组、印干组(上统);巴楚地区的吐木休克组(中上统)和一间房组(中统)相当于阿克苏—柯坪地区的萨尔干组和坎令组<sup>[27,28]</sup>。上丘里塔格组全区内均有出露,以灰岩和白云质灰岩为主,富含三叶虫和头足类化石;一间房组和吐木休克组出露于巴楚地区,岩性以灰岩、泥灰岩为主,化石丰富;

萨尔干组主要出露于阿克苏—柯坪地区,同样以灰岩及泥灰岩为主,在柯坪县音干村西北大湾沟剖面上发现大量的三叶虫、腕足类、腹足类、笔石、角石等中上奥陶统的典型化石;上奥陶统坎令组、其浪组和音干组在阿克苏—柯坪地区依据岩性的不同而相互区别:上部音干组为页岩夹少量粉砂岩、灰岩、泥岩;中部其浪组为灰色薄层泥屑灰岩及粉砂质页岩等;下部坎令组主要为泥灰岩和泥岩(泥屑灰岩)互层<sup>[28]</sup>。

根据上述岩性特征和出露情况,本次研究选择阿克苏四石场大冲沟剖面(40.84°N,79.83°E)和青松石料场剖面(40.91°N,79.94°E)、柯坪苏巴什大沟剖面(40.53°N,78.83°E)、巴楚一间房剖面(40.09°N,78.84°E)以组为单元进行了古地磁采样(图1b)。其中,阿克苏四石场大冲沟剖面上寒武统到二叠系均有出露,剖面长约2.5 km,倾向南东;剖面上石炭系几乎缺失,与泥盆系之间为不整合接触;志留系至上寒武统连续出露。在萨尔干组碳质页岩之上的上奥陶统坎令组、其浪组和音干组中,共布置采点19个,采集的样品岩性以灰红色和黄褐色砂质泥岩和泥灰岩为主。柯坪苏巴什大沟剖面中寒武统到二叠系皆有出露,剖面长超过2 km;奥陶系顶部与下志留统假整合接触。12个采点分别采自上丘里塔格组和萨尔干组,样品以紫红色和暗紫色砂岩、灰绿色泥灰岩及深灰色白云质灰岩为主。阿克苏青松石料场剖面和巴楚一间房剖面作为辅助剖面,分别采集了上丘里塔格组灰岩(6个采点)和一间房组灰岩及吐木休克组泥灰岩(7个采点)。需要特别指出的是,柯坪苏巴什大沟剖面和巴楚一间房剖面的采点布置均按照石油勘察部门在野外设计的地层划分界限设定的,且在巴楚一间房剖面上发现有大量的直角石等古生物化石。

综上,四条剖面共布置44个采样点,采集古地磁独立定向岩芯432块。样品全部使用便携式汽油钻采集,除部分样品由于无法使用太阳罗盘而采用磁罗盘定向外,其余样品均采用太阳罗盘定向;同时为进行太阳罗盘和磁罗盘的比对,部分样品采用太阳罗盘和磁罗盘同时定向。

### 3 岩石磁学研究

为了鉴定样品中的主要磁性矿物,从每个采样点中选择一至两块代表样品,共48块,分别进行等温剩磁(IRM)获得曲线和反向场退磁曲线的测量、三轴等温剩磁<sup>[29]</sup>的系统热退磁实验。IRM的获得采

用2G660脉冲磁力仪;三轴IRM通过对样品的三个相互正交的Z、Y和X轴分别施加2700 mT、500 mT和50 mT的脉冲磁场获得。IRM的测量采用JR-5旋转磁力仪,而三轴等温剩磁的系统热退磁采用TD-48热退磁炉和2G755R低温超导磁力仪。

如图2所示,由岩石磁学实验所揭示出的样品的矫顽力谱和阻挡温度谱特征,可按照主要载磁矿物的类型将所有代表性样品分为两类。首先,如图2a和图2b所示,部分样品以低矫顽力的磁铁矿为主要载磁矿物,高矫顽力的磁性矿物,如针铁矿、赤铁矿等几乎不存在或微乎其微。通常在较低的磁化场(约小于200 mT)下,这类样品迅速获得IRM而达到准饱和(图2b)或存在显著的迅速获得准饱和的趋势(图2a)。饱和IRM的退磁曲线同样揭示出样品或具有与单畴磁铁矿的理论矫顽力值<sup>[30]</sup>相当的低矫顽力(图2b),或存在一指示低矫顽力矿物存在的IRM的显著衰减趋势(图2a)。三轴等温剩磁的系统热退磁进一步揭示出这类样品中除部分样品含有一定量的高矫顽力、低阻挡温度的针铁矿外,其他高矫顽力矿物几乎不存在;同时,样品的软磁成分和中等矫顽力水平磁成分的热退磁曲线均清晰地揭示出主要载磁矿物具有约580 °C的阻挡温度,进一步说明该类样品的主要载磁矿物为磁铁矿。该类样品主要包括早奥陶世其浪组的as20和as22的部分与中奥陶世萨尔干组的ks89-ks92的大部分。

其次,大部分代表性样品均显示出主要载磁矿物为高矫顽力的赤铁矿或高矫顽力的赤铁矿和低矫顽力磁铁矿共存的特征,个别样品中存在针铁矿或低矫顽力、中等阻挡温度的磁性矿物(图2(c~f))。图2c的IRM获得曲线、饱和IRM的反向场退磁曲线以及三轴IRM的热退磁曲线清楚地揭示出该样品的主要载磁矿物为高矫顽力、高阻挡温度的赤铁矿,同时硬磁成分和中等矫顽力水平磁成分在约80 °C的显著衰减还指示了部分针铁矿的存在。图2d和图2e分别与上述第一类样品的图2b和图2a有一定的相似性,但所不同是,图2d和图2e的三轴IRM的系统热退磁曲线均清晰地指示出高矫顽力、接近680 °C的阻挡温度的赤铁矿的存在。由于磁铁矿的载磁能力远远高于赤铁矿<sup>[31]</sup>,因此,这些样品的主要载磁矿物应为赤铁矿和少量的磁铁矿。此外,少量样品的IRM获得曲线和饱和IRM的反向场退磁曲线仅揭示出低矫顽力矿物的存在,但三轴IRM的退磁曲线指示出三种磁成分均具有约350 °C的阻挡温度(图2f),表明该样品中仅存在如磁黄铁矿、

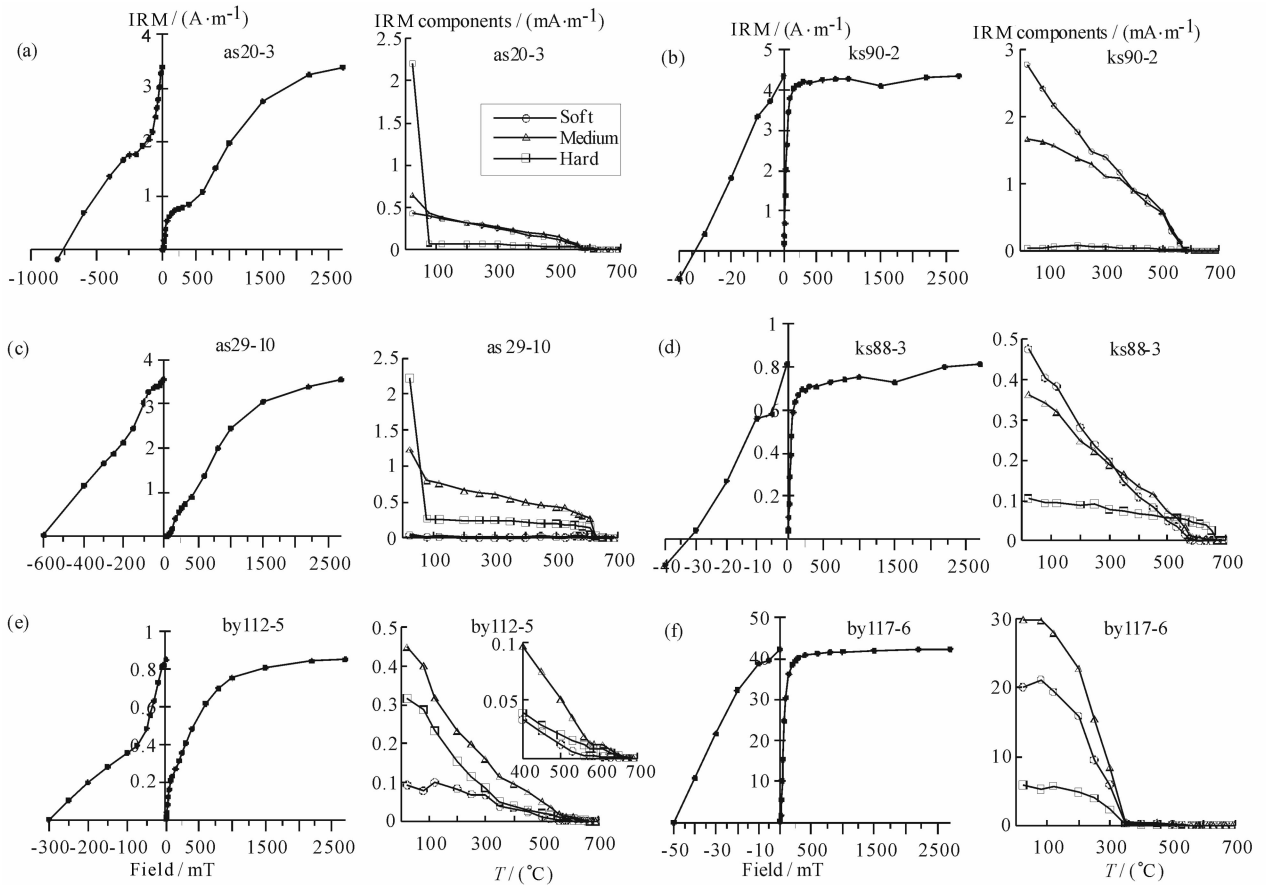


图 2 典型样品的等温剩磁获得曲线、饱和等温剩磁的反向场退磁曲线和三轴等温剩磁的系统热退磁曲线  
Fig. 2 Behavior of the acquisition of isothermal remanent magnetization (IRM) and back-field demagnetization of saturation IRM, and progressive thermal demagnetization curves for the composite IRMs for the pilot samples

胶黄铁矿、磁赤铁矿等低矫顽力中等阻挡温度的磁性矿物<sup>[32]</sup>。

#### 4 古地磁结果研究

根据样品的岩石磁学特征,选择逐步热退磁,或最高温度小于 300 °C 的逐步热退磁和交变退磁的复合退磁方法对全部样品进行了系统磁清洗.系统热退磁使用 TD-48 热退磁炉,热退磁的温度间隔在低温阶段选择 50~100 °C,高温阶段为 10~30 °C;交变退磁采用 2G600 交变退磁仪,退磁间隔为 5~10 mT.全部样品的剩磁测量均在 2G755R 低温超导磁力仪上完成.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中心小于 300 nT 的磁屏蔽空间中.退磁结果的分析主要采用主向量分析法<sup>[33]</sup>,部分样品使用重磁化大圆弧法<sup>[34]</sup>;剩磁方向的统计平均采用球面单位矢量的 Fisher 统计平均<sup>[35]</sup>或单位矢量和重磁化

大圆弧的混合平均<sup>[36]</sup>。

阿克苏青松石料场和柯坪苏巴什大沟剖面的早奥陶世上丘里塔格组灰岩和白云质灰岩样品(采点 aq56-61, ks94-99)的天然剩余磁化强度(NRM)很弱,其 NRM 平均值分别为  $5 \times 10^{-4}$  A/m(56 块)和  $8 \times 10^{-4}$  A/m(57 块).大多数样品(aq56-61, ks97-98)或 NRM 强度接近仪器的噪声水平,或仅经热退磁 1~3 步后 NRM 降到  $1 \times 10^{-4}$  A/m 以下,无法继续进行退磁;部分 NRM 强度较强的样品(ks94-96, ks99),其系统退磁曲线为双分量特征(图 3d):在 250 °C 以下分离得到低温剩磁分量;高温特征剩磁分量(ChRM)通常出现于 300 °C 以上,但阻挡温度分布在 500~610 °C 之间不等;少量样品在 300 °C 或交变场 40 mT 左右 NRM 被完全清洗,没有分离出 ChRM.

阿克苏四石场剖面晚奥陶世音干、其浪和坎令组的灰岩、泥灰岩及粉砂岩样品(采点 as16-34)的退磁特征可分为两大类:绝大部分样品除在退磁的初始阶段存在一现代地磁场的黏滞分量外,退磁曲线

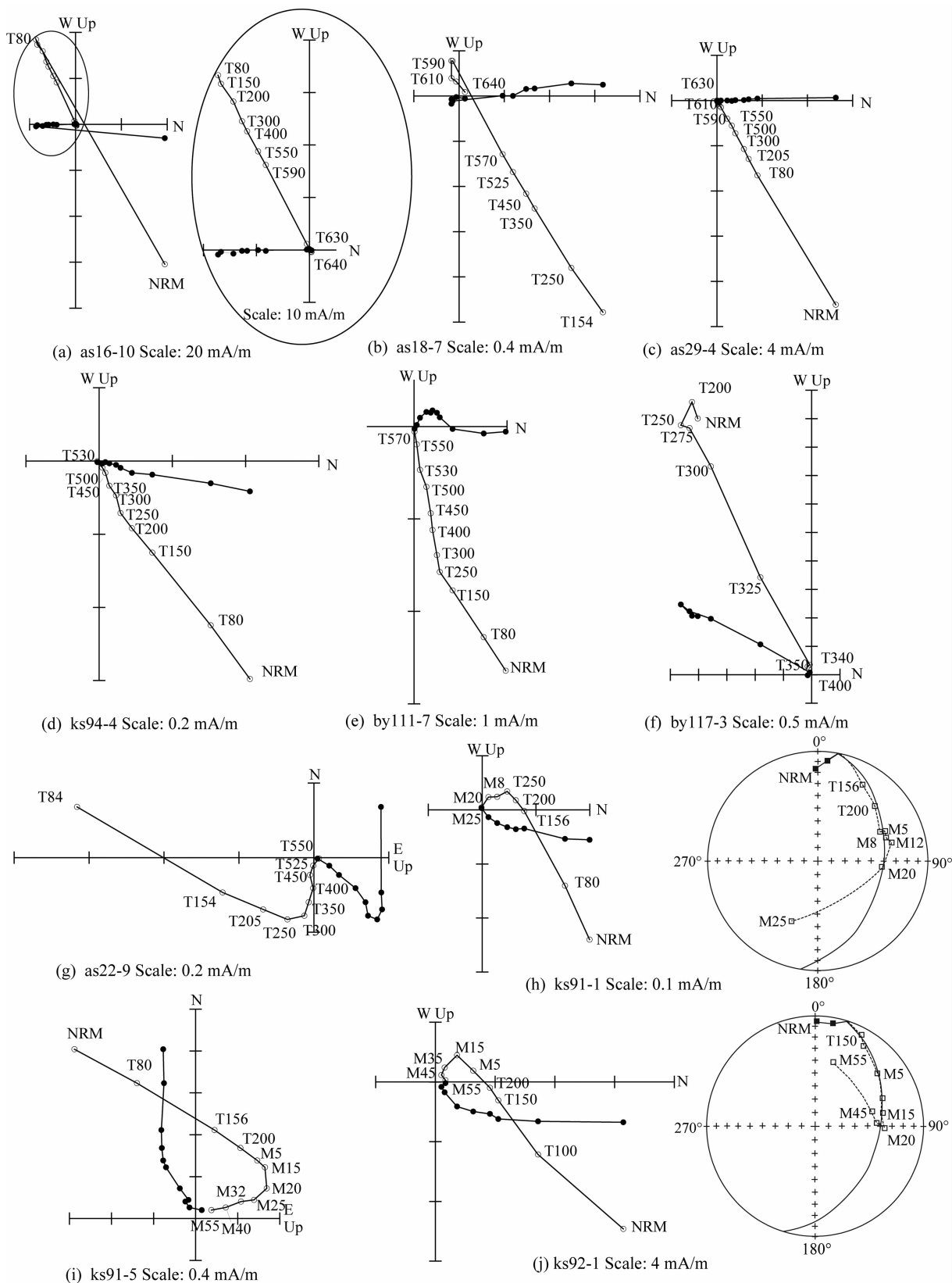


图 3 代表样品倾斜校正前的系统退磁结果的正交矢量图及部分样品地层坐标系下退磁矢量的赤平投影图  
正交矢量图中的实心圆和空心圆分别代表剩磁方向在水平面和铅垂面上的投影;等面积投影图中的  
实心圆和空心圆分别代表下半球和上半球投影。T 和 M 分别代表热退磁 (C) 和交变退磁 (mT)。

Fig. 3 Orthogonal vector plots of representative specimens in-situ and equal-area projections of progressive demagnetization results for some pilot specimens after tilt-correction  
Solid and open circles in orthogonal plots indicate vector endpoints projected onto the horizontal and vertical planes, respectively; whilst solid and open circles in equal-area projections represent directions plotted onto the lower and upper hemispheres, respectively. T and M imply thermal (C) and alternating field (mT) demagnetization, respectively.

表现为单分量特征,阻挡温度出现在 570~650 °C (图 3a,3c);部分样品具典型的双分量剩磁特征(图 3b,3g):低温分量通常在 250 °C 左右被清除,但有时可能直到约 570 °C 才被完全清洗(图 3b);ChRM 或存在于 500~640 °C 之间,或在 25/30~60/89 mT 交变退磁场间被分离出。

柯坪苏巴什大沟剖面的中奥陶世萨尔干组的灰岩和泥灰岩样品(ks88-93)、巴楚地区中奥陶世吐木休克组 and 一间房组的灰岩和泥屑灰岩样品(by111-114),同样具有双分量特征(图 3e,3(h~j)):300 °C 以下的低温分量,和或 500~650 °C 之间的高温 ChRM,或 20/30~89 mT 交变退磁场之间的高场 ChRM;但部分萨尔干组的灰岩样品,高温或高场阶段的退磁曲线显示出较好的重磁化大圆弧的特征,ChRM 难以用常规的主向量分析法<sup>[33]</sup>获得(图 3h,3j)。此外,采自巴楚地区一新修公路边的中奥陶世一间房组的灰岩样品(by116-118)很可能由于其主要载磁矿物为次生的磁黄铁矿等中等阻挡温度的磁性矿物的缘故,大部分样品在 350~400 °C 左右 NRM 即被完全清洗(图 3f),没有 ChRM 被分离出。

综上所述,除部分样品 NRM 很弱,或仅经过 300~400 °C 左右的系统退磁,NRM 即下降至超导磁力仪的噪声水平,因而未能分离出 ChRM 外,大部分样品都能分离出两个独立分量,即 250/300 °C 以下的低温分量和高温或高场 ChRM。低温分量除 3 块样品外,表现为单一正极性,且从 192 块样品中分离出的该分量在地理坐标下具有很高的集中程度( $\kappa_g/\kappa_s = 80.5/3.0$ );其平均方向( $D/I = 3^\circ/60^\circ$ ,  $\alpha_{95} = 1.1^\circ$ )与当地的现代地磁场方向( $D/I = 357^\circ/59^\circ$ )基本一致,表明该分量为现代场的黏滞剩磁或近代场的重磁化分量。无论是在地理坐标下还是在层面坐标下,高温或高场 ChRM 分量的分布均显示出明显的分组特征(表 1,图 4)。第一组以赤铁矿或赤铁矿和少量磁铁矿为主要载磁矿物的样品,ChRM 常具有高于 600 °C 的阻挡温度(图 3(a~c)),在地理坐标下主要表现为 NW-NE 方向和高正倾角及其对趾方向。该特征剩磁组分(定义为组分 A),具有双极性特征,分布于奥陶纪早、中、晚各个时期的样品中(图 4a);从 29 个采点中分离出的该组分 A 具有显著的负褶皱检验结果( $\kappa_g/\kappa_s = 51.2/4.6$ );逐步倾斜校正分析<sup>[37]</sup>表明其最大集中程度出现在  $(8.7 \pm 1.8)\%$  的地层倾斜校正水平上,进一步表明其为褶皱后获得的重磁化组分。相反,特征组分 B 仅存在于少量以磁铁矿为主要载磁矿物的样品中

(表 1),通常在低温组分被完全清洗后出现,多出现在复合热退磁和交变退磁的高场阶段(图 3(h~j)),少量样品的系统热退磁显示其阻挡温度约在 550~575 °C 之间(图 3g);但其中部分样品的 ChRM 不能由常规的主向量分析法<sup>[33]</sup>获得(图 3h,3j)。该特征组分 B 为单一极性,无论是在采点水平上还是在样品水平上,其在层面坐标下的集中程度均有显著提高(图 4b,4c)。常规褶皱检验( $\kappa_g/\kappa_s = 50.3/2.7$ )<sup>[37,38]</sup>结果为正,表明其为褶皱之前获得的磁化。如前所述,塔西北阿克苏—柯坪地区早古生界比较连续,上泥盆统和中生界缺失<sup>[28]</sup>,区域性褶皱变形很可能主要发生在晚泥盆世之后的晚古生代和新生代,因此,特征组分 B 的正的褶皱检验结果很可能表明其磁化时间在晚泥盆世之前。

## 5 讨论与结论

岩石磁学和古地磁学研究表明,除采自阿克苏青松石料场剖面 and 柯坪苏巴什大沟剖面的早中奥陶世上丘里塔格组灰岩和白云质灰岩样品,由于 NRM 很弱,绝大多数样品未能分离出稳定的 ChRM 之外,其余的 32 个采点的奥陶纪样品绝大多数均可分离出稳定的特征剩磁组分 A 或 B(图 4 及表 1)。值得特别注意的是,特征剩磁组分 A 主要存在于以赤铁矿及少量磁铁矿为主要载磁矿物的灰岩、泥灰岩或泥质灰岩样品中,且对岩石的形成时代没有依赖性;根据其负的褶皱检验结果及其地理坐标下的平均方向所对应的古地磁极位置( $83.8^\circ\text{N}/121.2^\circ\text{E}$ ,  $dP/dm = 4.6^\circ/5.8^\circ$ ),与塔里木地块视极移曲线<sup>[39]</sup>的新生代古地磁极位置有相类似的特点(图 5),推测其很可能为与中亚地区新生代强烈构造变形相关的重磁化分量。相反,特征组分 B 尽管仅能从以磁铁矿为主要载磁矿物的少量相对较纯的灰岩样品中分离出,但分布于阿克苏四石场和柯坪苏巴什大沟两条剖面的多个采样点中;且无论是在采点水平上还是样品水平上均通过了褶皱检验<sup>[37,38,40]</sup>,表明其很可能是晚泥盆世之前获得的;结合其样品水平上的平均方向( $117.0^\circ, -53.9^\circ, \alpha_{95} = 4.9^\circ$ )所对应的古地磁极位置( $40.7^\circ\text{S}, 183.3^\circ\text{E}$ ,  $dP/dm = 4.8^\circ/6.9^\circ$ )显著区别于塔里木地块志留纪以来的古地磁极位置的特点(图 5),我们相信特征组分 B 很可能是岩石形成时期所获得的原生剩磁。

另一方面,对比携带特征剩磁分量 A 和 B 的样品的岩性及岩石磁学特性,可以发现重磁化分量 A

表 1 塔里木地块阿克苏—柯坪—巴楚地区奥陶纪古地磁采样及特征剩磁分量数据表  
Table 1 Summary of paleomagnetic sampling details and the site-mean characteristic remanences for Ordovician rocks from the Aksu-Kalpın-Bachu area, Tarim

采点号	采样位置		地层	年代	倾向/倾角	n/N	D <sub>g</sub>	I <sub>g</sub>	D <sub>s</sub>	I <sub>s</sub>	κ	α <sub>95</sub>
	经度(°E)	纬度(°N)										
特征分量 A												
as28	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	168/71	8/10	7.7	63.1	155.8	43.9	454.5	2.6
as29	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	167/70	9/10	6.3	60.4	153.0	47.4	424.8	2.5
as30	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	167/74	9/10	6.2	63.8	156.0	40.4	137.8	4.4
as31	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	163/66	9/10	1.8	62.3	149.5	50.1	251.3	3.5
as32	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	167/75	9/11	11.9	63.2	152.1	39.1	58.3	6.8
as33	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	165/73	7/10	185.2	-59.7	330.7	-44.9	335.4	3.3
as34	79.834	40.839	音干组	O <sub>3</sub>	163/75	8/10	356.3	60.6	154.0	43.3	83.4	6.1
as16	79.834	40.840	坎令组	O <sub>3</sub>	171/60	9/10	176.7	-60.8	345.6	-58.9	338.8	2.8
as17	79.834	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	168/70	6/10	172.4	-35.2	336.0	-74.1	39.4	10.8
as18	79.834	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	167/66	5/10	165.4	-62.9	349.2	-50.6	78.3	8.7
as19	79.834	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	168/52	7/10	3.7	70.2	158.5	56.7	64.0	7.6
as20	79.835	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	169/61	7/10	172.0	-60.3	346.1	-58.6	125.9	5.4
as21	79.835	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	167/61	10/11	170.1	-60.4	344.1	-58.5	98.1	4.9
as22	79.835	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	171/66	4/10	186.2	-65.0	341.5	-47.8	220.5	6.2
as23	79.835	40.840	其浪组	O <sub>3</sub>	169/51	8/10	172.4	-58.0	343.4	-70.9	95.4	5.7
as24	79.834	40.839	其浪组	O <sub>3</sub>	160/66	11/12	187.0	-66.0	325.0	-44.7	91.4	4.8
as25	79.834	40.839	其浪组	O <sub>3</sub>	162/63	8/10	180.7	-61.7	328.0	-53.2	134.1	4.8
as26	79.834	40.839	其浪组	O <sub>3</sub>	157/68	10/11	163.7	-61.7	332.6	-50.0	36.5	8.1
as27	79.834	40.839	其浪组	O <sub>3</sub>	160/72	4/10	37.4	59.9	130.2	31.6	42.2	14.3
ks90	78.921	40.558	萨尔干组	O <sub>2-3</sub>	323/39	9/9	353.7	66.4	336.6	29.7	126.2	4.6
ks91	78.922	40.558	萨尔干组	O <sub>2-3</sub>	329/42	7/11	1.8	68.6	342.1	29.2	267.0	3.7
by111	78.840	40.089	吐木休克组	O <sub>2-3</sub>	272/19	8/10	346.2	77.5	301.2	64.7	43.4	8.5
by112	78.840	40.089	吐木休克组	O <sub>2-3</sub>	279/11	8/9	325.5	71.4	309.3	62.6	192.6	4.0
by113	78.840	40.089	一间房组	O <sub>2</sub>	282/20	8/9	60.1	58.6	23.8	69.2	55.5	7.5
by114	78.840	40.089	一间房组	O <sub>2</sub>	283/19	7/9	53.7	55.7	23.5	64.2	379.9	3.1
by116	78.820	40.151	一间房组	O <sub>2</sub>	69/16	9/11	201.1	-64.9	217.9	-52.4	917.1	1.7
by117-118	78.820	40.151	一间房组	O <sub>2</sub>	55/16	7/18	201.9	-59.1	211.6	-45.0	60.8	7.8
ks94	78.935	40.562	上丘里塔格	O <sub>1-2</sub>	306/30	8/9	9.3	61.3	340.4	40.7	110.2	5.3
ks95-96	78.935	40.561	上丘里塔格	O <sub>1-2</sub>	305/30	10/19	197.6	-60.6	165.0	-42.8	41.4	7.6
采点平均-反极性						(14/29)	180.3	-60.3	323.2	-66.8	68.1 6.9	4.7 16.3
采点平均-正极性						(15/29)	12.5	66.1	131.6	79.5	46.9 3.5	5.6 24.2
采点平均						(29/29)	5.9	63.4	139.8	72.9	51.2 4.6	3.7 14.0
特征分量 B												
as20	79.8345	40.8396	其浪组	O <sub>3</sub>	169/61	3/10	140.1	-6.8	112.5	-54.9	54.6	16.8
as22	79.8345	40.8396	其浪组	O <sub>3</sub>	171/66	3/10	138.0	-0.3	112.7	-50.1	48.7	17.9
ks89+90	78.9203	40.5585	萨尔干组	O <sub>2-3</sub>	324.5/41	10/18	16.4	-80.2	128.9	-56.0	29.4	9.7
ks91	78.9218	40.5587	萨尔干组	O <sub>2-3</sub>	329/42	10/11	2.8	-74.9	132.4	-59.6	51.8	6.8
ks92	78.9240	40.5586	萨尔干组	O <sub>2-3</sub>	330/39	8/9	56.9	-53.0	98.4	-39.9	216.8	3.8
采点平均						(5/5)	111.9	-54.9	115.3	-52.8	2.7 50.3	58.2 10.9
样品平均						34/58	86.3	-72.7	117.0	-53.9	4.3 26.7	13.3 4.9
褶皱检验						1)McFadden's fold test (1990) <sup>[38]</sup> : 倾斜校正前 ξ <sub>2</sub> =4.767; 倾斜校正后 ξ <sub>2</sub> =1.119, N=5, 95%置信水平下的临界值 ξ 为 2.609, 通过褶皱检验.						
						2)Watson's fold test (1993) <sup>[37]</sup> :N=5,(98.6±8.1)% 置信度下通过褶皱检验.						

注:n/N 为参加统计的样品数和参加退磁的样品数(圆括号内为参加统计的采点数/系统退磁的采点数); D<sub>g</sub>, I<sub>g</sub>, D<sub>s</sub>, I<sub>s</sub> 分别代表地理坐标下和地层坐标系下的剩磁偏角和倾角; κ 为 Fisher 统计精度参数; α<sub>95</sub> 为 95% 置信圆锥半顶角.

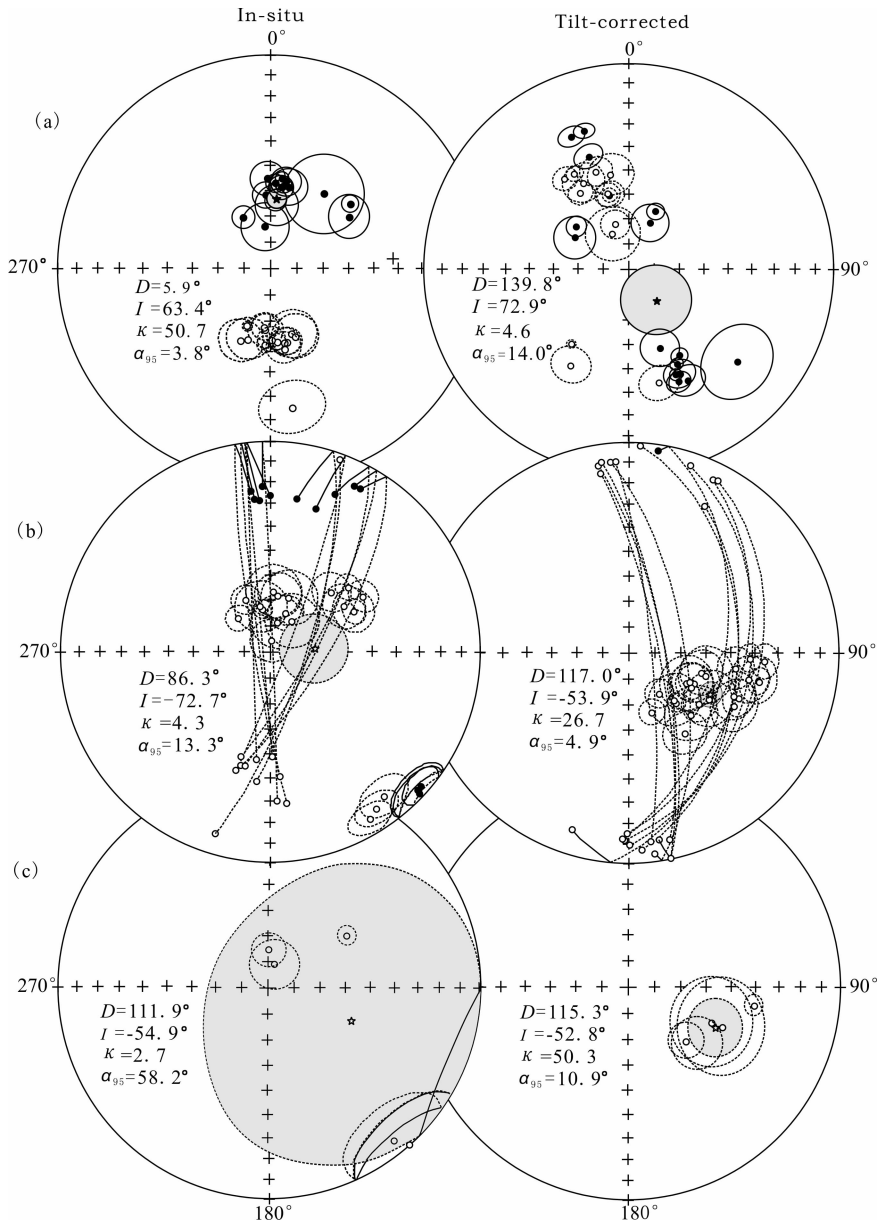


图 4 塔西北阿克苏—柯坪—巴楚地区奥陶纪样品的特征剩磁方向及采点平均方向的 95% 置信椭圆的等面积投影图,左侧为倾斜校正前,右侧为倾斜校正后

(a)特征分量 A 的采点平均方向;(b)特征分量 B 的样品平均方向,其中包括 11 个样品的重磁化大圆弧;(c)特征分量 B 的采点平均方向.五角星代表总平均方向,实心和空心符号分别代表上半球和下半球投影.

Fig. 4 Equal-area projections of directions of the characteristic remanences isolated from Ordovician rocks from the Aksu-Kalpin-Bachu area, northwestern Tarim before (left) and after (right) tilt-correction

(a) Site-mean directions for the component A; (b) Directions for component B in which 11 remagnetization circles were joined into final group-mean statistics; (c) The site-mean directions for the component B. Stars imply the group-mean directions, solid and open symbols represent directions plotted onto the lower and upper hemispheres, respectively.

的存在主要与碳酸盐样品中高矫顽力赤铁矿密切相关.从岩性上看,泥质灰岩、泥灰岩等含泥质成分的碳酸盐岩通常以赤铁矿和少量磁铁矿为主要载磁矿物,由于碳酸盐岩中的赤铁矿通常与赤铁矿化和泥质条带的楔入有关,尽管大量赤铁矿的加入显著地提高了碳酸盐岩样品的 NRM,但同时次生的化学

剩磁也很可能部分地或完全地掩盖了原生的碎屑磁铁矿所携带的碎屑剩磁,因此很难或完全不能从这类含泥质成分的碳酸盐岩样品中分离出原生的碎屑剩磁.类似的重磁化机制还可能与后生的磁黄铁矿、胶黄铁矿、磁赤铁矿等具中等阻挡温度磁性矿物的形成有关.总之,通常情况下,尽管纯灰岩样品的



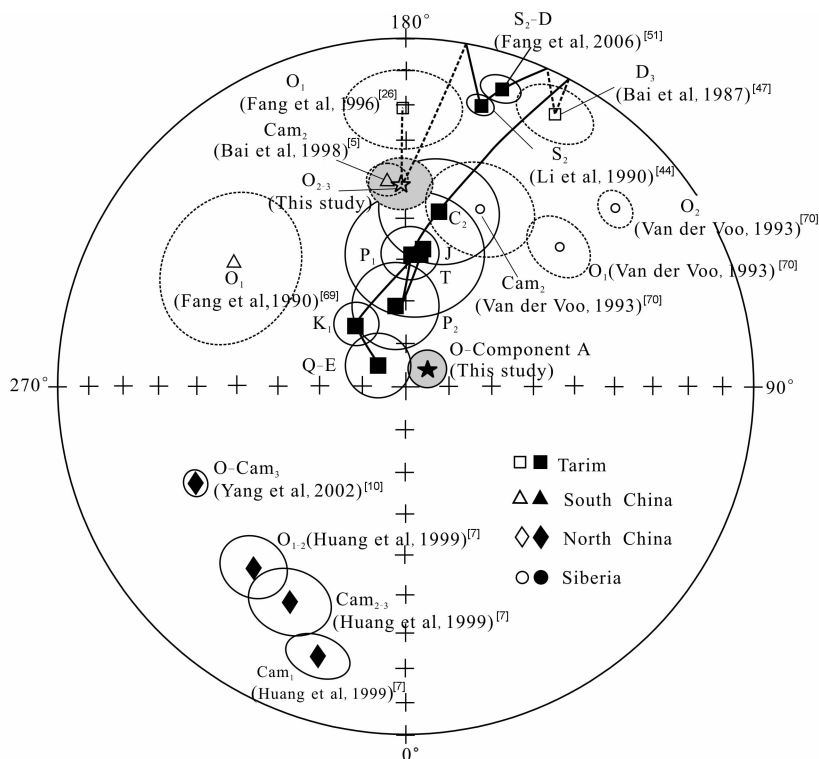


图 5 塔里木地块显生宙视极移曲线及华北、华南和西伯利亚早古生代古地磁极位置的等面积投影图  
实心和空心符号分别代表北半球和南半球的投影。

Fig. 5 Equal-area projection of Phanerozoic apparent polar wander path and early-Paleozoic paleomagnetic poles for North China, South China and Siberia

Solid and open symbols represent paleopoles plotted onto the Northern and Southern hemispheres, respectively.

NRM 强度可能相对较弱,但由于其作为主要载磁矿物的磁铁矿主要为碎屑来源,因而更可能获得岩石形成时期的碎屑剩磁。

如图 4b 所示,特征剩磁分量 B 具有单一极性。依据中奥陶世后期(晚 Darriwilian 期)及晚奥陶世地磁场以正极性为主的特点<sup>[41]</sup>,及建立古地磁视极移曲线的最短路径原理,特征剩磁分量 B 的极性应为正极性。据此,新获得的塔里木盆地中晚奥陶世古地磁结果表明该时期塔里木地块处于南半球中低纬度地区,参考点柯坪(40.5°N, 79.0°E)的古纬度为 34.4°S。这与 Zhao 等<sup>[42]</sup>在塔东北库鲁克塔格地区晚寒武世和中奥陶世灰岩中获得的古纬度结果(分别为 27.8°S 和 36.5°S)相一致,进一步表明早古生代期间塔里木地块位于南半球中低纬度地区。

同时,比较本次研究获得的塔里木地块中晚奥陶世古地磁极位置与前人报道的志留纪和石炭纪古地磁结果<sup>[43~46]</sup>可以发现,中晚奥陶世至中志留世是塔里木地块发生大规模北向移动,由南半球中低纬度地区越过古赤道,北向漂移至北半球低纬度地带的关键时期;该时期内塔里木地块经历了约 50° 的北向漂移和约 30° 的顺时针水平旋转。中志留世至

晚石炭世期间,塔里木地块的北向漂移速率虽显著减慢(这期间塔里木地块发生了约 10° 的北向漂移),但仍发生了约 30° 的顺时针水平旋转。晚石炭世时,塔里木地块已北向漂移至 25°N ~ 30°N 左右,并很可能与哈萨克斯坦地块相碰撞<sup>[47~51]</sup>;之后很可能通过顺时针旋转由东及西地逐步与哈萨克斯坦地块拼合,于晚二叠世在快速北移的昆仑地块的驱动下,完成了与西伯利亚地块南缘的碰撞和拼合<sup>[49,52~55]</sup>。

早古生代期间,塔里木与扬子地块及冈瓦纳古大陆的亲缘性已为大量的地质、古生物和古地磁资料所证实。概括起来主要包括:(1) 扬子和塔里木地块的基底最终形成时代、早古生代沉积建造和成矿作用均与澳大利亚大陆有明显的相似性<sup>[12,56]</sup>;(2) 奥陶纪期间,扬子、塔里木和澳大利亚在几丁虫、托盘藻、牙形石等古生物群面貌上十分相似,很可能同属生物群分异度很高的“太平洋型”<sup>[12,57~60]</sup>,且三叶虫古地理研究表明,华北、扬子与澳大利亚同属亚澳生物大区,但华北与扬子之间存在显著差异<sup>[61]</sup>;(3) 塔里木、扬子和澳大利亚早古生代期间具有相似的古纬度变化<sup>[62,63]</sup>,且古地磁数据支持早古生代,甚至包括晚新元古代,扬子和塔里木地块均毗邻冈瓦

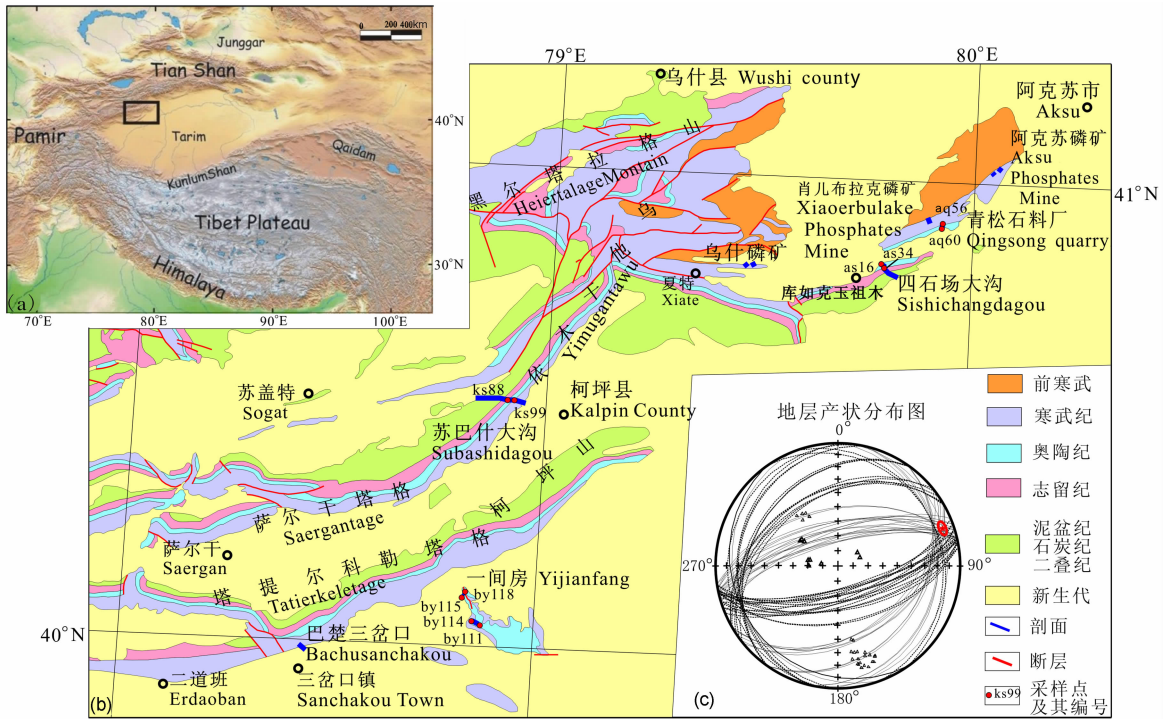


图 1 (a)青藏高原和中亚地区地貌及主要构造单元划分;(b)塔西北阿克苏—柯坪—巴楚地区地质简图及古地磁采样点分布图;(c)古地磁采样剖面地层产状的赤平投影图,指示研究地区区域性褶皱的枢纽轴近水平

Fig.1 (a) Topographic map of the Tibetan Plateau and Central Asia showing the tectonic framework of the study area and its surroundings; (b) Simplified geologic map of the Aksu-Kalpin-Bachu area, northwestern Tarim showing distribution of paleomagnetic sampling sites; (c) Stereonet of bedding planes from this study on the upper hemisphere showing nearly horizontal fold axis of Ordovician strata in the northwestern Tarim

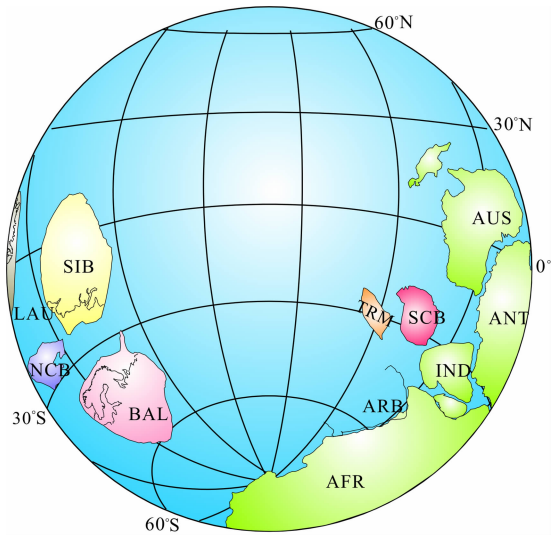


图 6 中晚奥陶世塔里木及周边块体现代地理坐标系下的古地理重建图,修改自黄宝春等<sup>[14]</sup>,等面积投影的中心为 20°S,50°E

Fig.6 Equal-area projection showing paleogeographic reconstruction of Tarim and its surroundings during the Middle and Late Ordovician in geographic coordinates after Huang et al. <sup>[14]</sup>, the projection centre is at 20°S and 45°E

ARB: 阿拉伯板块 Arabia; AFR: 非洲板块 Africa; IND: 印度板块 India; ANT: 南极洲板块 Antarctica; AUS: 澳大利亚板块 Australia; SCB: 华南地块 South China Block; TRM: 塔里木地块 Tarim; BAL: 波尔的地块 Baltica; SIB: 西伯利亚板块 Siberia; NCB: 华北地块 North China Block; LAU: 劳亚大陆 Laurasia

纳古大陆的古地理重建<sup>[5,11,12,14,62~68]</sup>.为此,根据本次研究所获得的塔里木地块中晚奥陶世古地磁新结果,我们对 2000 年华北、扬子及周边地块中奥陶世古地理重建(黄宝春等,2000)<sup>[14]</sup>进行了修改(图 6).

总之,新的古地磁结果及古地理重建(图 6)完全支持我们早期根据前人的早古生代初步古地磁数据<sup>[26,42]</sup>对塔里木地块的构造古地理位置和运动学

特征的推测<sup>[14]</sup>.寒武至奥陶纪期间,塔里木地块处于南半球中低纬度地区,很可能与同处于冈瓦纳古大陆边缘的扬子地块一起发生了一定量的南移<sup>[5,14,26,69]</sup>;中晚奥陶世之后,扬子地块与冈瓦纳古大陆之间的密切联系很可能一直持续到泥盆纪中期<sup>[62]</sup>,而位于冈瓦纳古大陆最外侧边缘的塔里木地块则随着冈瓦纳古大陆的快速顺时针旋转<sup>[70]</sup>而与

之分离,并在中晚奥陶世至中志留世期间快速北移,越过古赤道;至晚石炭世,北向漂移至  $25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$  左右<sup>[47~51]</sup>;之后通过顺时针旋转由东及西地逐步与哈萨克斯坦地块拼合<sup>[54]</sup>,控制或调节着晚古生代古亚洲洋构造域的形成和演化<sup>[15,71]</sup>。

**致谢** 感谢李永安和庄忠海等先生在本项研究野外考察和古地磁采样过程中所提供的帮助和很多有益的讨论,衷心感谢中国石油化工股份有限公司“中国西北部地区构造—岩相古地理的古地磁研究”项目对本次研究的资助。

## 参考文献(References)

- [1] Zhao X X, Coe R S, Liu C, et al. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the North China block and their paleogeographic implications. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**:1767~1788
- [2] Zhao X X, Coe R S, Wu H N, et al. Silurian and Devonian paleomagnetic poles from North China and implications for Gondwana. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, **117**:497~506
- [3] 杨振宇, 马醒华, 黄宝春等. 华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学: D 辑, 1998, **28**(增刊):44~56  
Yang Z Y, Ma X H, Huang B C, et al. Apparent polar wander path and tectonic movement of the North China Block in Phanerozoic. *Science in China (Ser. D)*, 1998, **41**(Suppl.): 51~65
- [4] 杨振宇, 孙知明, 马醒华等. 豫西地区早古生代古地磁研究的初步结果及构造意义. 科学通报, 1996, **42**:401~405  
Yang Z Y, Sun Z M, Ma X H, et al. Preliminary paleomagnetic results from the Lower Paleozoic of North China (Henan Province) and its implications. *Chinese Sci. Bull.* (in Chinese), 1996, **42**:401~405
- [5] 白立新, 吴汉宁, 朱日祥等. 扬子地块中寒武世古地磁新结果. 中国科学, 1998, **28**(增刊):57~62  
Bai L X, Wu H N, Zhu R X, et al. New Cambrian paleomagnetic pole for Yangtze block. *Science in China (Ser. D)*, 1998, **41**(Suppl.):66~71
- [6] 吴汉宁, 朱日祥, 白立新等. 扬子地块湖北兴山—秭归剖面古生界至中生界构造古地磁研究. 中国科学: D 辑, 1999, **29**(2):144~154  
Wu H N, Zhu R X, Bai L X, et al. Paleomagnetic results of the Paleozoic and Mesozoic rocks from the Xingshan-Zigui section in Hubei Province, South China. *Science in China (Ser. D)*, 1999, **42**(2):182
- [7] Huang B C, Yang Z Y, Otofujii Y, et al. Early Paleozoic paleomagnetic poles from the western part of North China block and their implications. *Tectonophysics*, 1999, **308**(3): 377~402
- [8] Huang B C, Otofujii Y, Yang Z Y, et al. New Silurian and Devonian palaeomagnetic results from the Hexi Corridor terrane, Northwest China and their tectonic implications. *Geophys. J. Int.*, 2000, **140**(1):132~146
- [9] Huang B C, Otofujii Y, Zhu R X, et al. Paleomagnetism of Carboniferous sediments in the Hexi corridor: its origin and tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, **194**(1/2):135~149
- [10] Yang Z Y, Otofujii Y, Sun Z M, et al. Magnetostratigraphic constraints on the Gondwanan origin of North China: Cambrian/Ordovician boundary results. *Geophys. J. Int.*, 2002, **151**:1~10
- [11] Zhao X X, Coe R, Gilder S A, et al. Paleomagnetic constrains on the paleogeography of China: implications for Gondwanaland. *Australia J. Earth Sci.*, 1996, **43**:643~672
- [12] 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学: D 辑, 1998, **28**(增):1~16  
Zhu R X, Yang Z Y, Wu H N, et al. Paleomagnetic constrains on the tectonic history of the major blocks of China since the Phanerozoic. *Science in China (Ser. D)*, 1998, **41**(Suppl.):1~19
- [13] 杨振宇, Otofujii Y, 黄宝春等. 华北陆块冈瓦纳大陆亲缘性的古地磁证据. 地质评论, 1999, **45**(4):402~407  
Yang Z Y, Otofujii Y, Huang B C, et al. Paleomagnetic evidence of the affinity of the North China Block with Gondwana. *Geological Rev.*, 1999, **45**(4):402~407
- [14] 黄宝春, 朱日祥, Otofujii Y 等. 华北等中国主要地块早古生代古地理位置探讨. 科学通报, 2000, **45**(4):337~345  
Huang B C, Zhu R X, Otofujii Y, et al. The Early Paleozoic paleogeography of the North China block and the other major blocks of China. *Chinese Sci. Bull.*, 2000, **45**:1057~1065
- [15] Natal'in B A, Sengör A M C. Late Palaeozoic to Triassic evolution of the Turan and Scythian platforms: the pre-history of the palaeo-Tethyan closure. *Tectonophysics*, 2005, **404**:175~202
- [16] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, doi: 10.1007/s00531-008-0407-z, in press
- [17] Monlar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia; effects of continental collision. *Science*, 1975, **189**:419~426
- [18] Le Pichon X, Fournier M, Jolivet J. Kinematics, topography, shortening and extrusion in the India-Asia collision. *Tectonics*, 1992, **11**:1085~1098
- [19] Avouac J P, Tapponnier P, Bai P, et al. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:11791~11808
- [20] Chen Y, Courtillot V, Cogné J P, et al. The configuration of Asia prior to the collision of India Cretaceous paleomagnetic constraints. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:21927~21941
- [21] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. // Jeanloz R, Albee A L, Burke K C eds.

- Annual Reviews of Earth and Planetary Science. California, 2000, **28**:211~280
- [22] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau. *Science*, 2001, **294**:1671~1677
- [23] Johnson M R W. Shortening budgets and the role of continental subduction during the India-Asia collision. *Earth-Science Rev.*, 2002, **59**:101~123
- [24] Huang B C, Piper J D A, Zhu R X. Paleomagnetic constraints on neotectonic deformation in the Kashi depression of the southwest Tarim Basin, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, doi: 10.1007/s00531-008-0401-5, in press
- [25] Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 1990, **96**:4029~4050
- [26] 方大钧, 金国海, 姜丽萍等. 塔里木盆地古生代古地磁结果及其构造地质意义. *地球物理学报*, 1996, **39**(4):522~532  
Fang D J, Jin G H, Jiang L P, et al. Paleozoic paleomagnetic result of Tarim Basin and its tectonic significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(4):522~532
- [27] 周志毅. 塔里木盆地各纪地层. 北京: 科学出版社, 2001  
Zhou Z Y. Stratigraphy of the Tarim Basin (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001
- [28] 贾承造, 张师本, 吴绍祖. 塔里木盆地及周边地层(上下册). 北京: 科学出版社, 2004. 1063  
Jia C Z, Zhang S B, Wu S Z. Stratigraphy of the Tarim Basin and Adjacent Areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 2004. 1063
- [29] Lowrie W. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(2):159~162
- [30] Dunlop D J, Özdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. New York: Cambridge University Press, 1997. 573
- [31] Collinson D W. *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instruments*. London: Chapman and Hall, 1983. 503
- [32] 黄宝春, 魏青云, 朱日祥. 华北地块早古生代岩石单元的岩石磁性特征研究. *地球物理学报*, 1995, **38**(5):796~805  
Huang B C, Wei Q Y, Zhu R X. Magnetic features of Early Paleozoic rock units in the North China block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1995, **38**(5):796~805
- [33] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1980, **62**:699~718
- [34] Halls H C. The use of converging remagnetization circles in paleomagnetism. *Physics Earth Planet Inter.*, 1978, **16**:1~11
- [35] Fisher R A. Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 1953, **217**:295~305
- [36] McFadden P L, McElhinny M W. The combined analysis of remagnetisation circles and direct observations in paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1988, **87**:161~172
- [37] Watson G S, Enkin R J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**:2135~2137
- [38] McFadden P L. A new fold test for paleomagnetic studies. *Geophys. J. Int.*, 1990, **103**:163~169
- [39] 黄宝春, 周桃秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程. *地学前缘*, 2008, **15**(3):348~359  
Huang B C, Zhou Y X, Zhu R X. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, **15**(3):348~359
- [40] McElhinny M W. Statistical significance of the fold test in Palaeomagnetism. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 1964, **8**:338~340
- [41] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. *A Geological Time Scale*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 1~500
- [42] Zhao X, Coe R S, Smith R M, et al. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles from Tarim and their paleogeographic implications. AGU, Fall Meeting, 1997
- [43] 白云虹, 程国良, 孙青格等. 新疆塔里木地块晚古生代古地磁极移曲线及其地质构造含义. *地震地质*, 1985, **7**:71~83  
Bai Y H, Cheng G L, Sun Q G, et al. Late Paleozoic polar wander path for the Tarim Block and tectonic significance. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1985, **7**:71~83
- [44] Li Y P. An apparent polar wander path for the Tarim Block, China. *Tectonophysics*, 1990, **181**:31~41
- [45] 方大钧, 金国海, 陈汉林等. 塔里木板块北缘晚古生代、中生代古地磁结果与构造演化的初步探讨. //中国塔里木盆地北部油气地质研究, 第2辑, 构造油气. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 96~104  
Fang D J, Jin G H, Chen H L, et al. Preliminary discussion on Paleozoic and Mesozoic paleomagnetic results and tectonic evolution of north Tarim. //Oil and Gas Geology of North Tarim Basin, China, Series 2, Tectonics and Petroleum (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992. 96~104
- [46] 方大钧, 陈汉林, 王朋岩等. 塔里木盆地中生代古地磁研究及构造意义. *地球物理学报*, 1997, **40**(1):47~55  
Fang D J, Chen H L, Wang P Y, et al. Paleomagnetic study and its tectonic significance for Tarim Basin in Mesozoic. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(1):47~55
- [47] Bai Y H, Cheng G L, Sun Y, et al. Late Palaeozoic polar wander path for the Tarim platform and its tectonic significance. *Tectonophysics*, 1987, **139**:145~153
- [48] 翟永建, 李永安, 李燕平等. 塔里木地块上石炭统的古地磁研究. *现代地质*, 1988, **2**(1):43~56  
Zhai Y J, Li Y A, Li Y P, et al. A study of Upper Carboniferous paleomagnetism for the Tarim block. *Geosciences* (in Chinese), 1988, **2**(1):43~56
- [49] 李燕平, Sharps R, 李永安等. 塔里木地块二叠纪古地磁结果及二叠纪中国古大陆的重建. *新疆地质*, 1989, (2):22~32

- Li Y P, Sharps R, Li Y A, et al. Lower Permian paleomagnetism of the Tarim craton and reconstruction of Chinese Blocks during Permian. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 1989, (2): 22~32
- [50] 李永安, 孙东江, 郑洁. 新疆及周边古地磁研究与构造演化. *新疆地质*, 1999, **17**(3): 97~139
- Li Y A, Sun D J, Zheng J. Paleomagnetic study and tectonic evolution of Xinjiang and its neighboring regions. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 1999, **17**(3): 97~139
- [51] 方大钧, 沈忠悦, 谈晓冬等. 塔里木盆地显生宙古地磁与板块运动学. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 1~364
- Fang D J, Shen Z Y, Tan X D, et al. Paleomagnetism of Tarim Basin and the Plate Motion (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 1~364
- [52] Li Y P, Zhang Z, McWilliams M, et al. Mesozoic paleomagnetic results of the Tarim Craton: Tertiary relative motion between China and Siberia. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**: 217~220
- [53] Sharps R, McWilliams M, Li Y P, et al. Lower Permian paleomagnetism of the Tarim block, northwestern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1989, **92**: 275~291
- [54] Zhao X X, Coe R S, Zhou Y X, et al. New paleomagnetic results from the northern China, collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 1990, **181**: 43~81
- [55] 方大钧, 王朋岩, 沈忠悦等. 塔里木地块新生代古地磁结果及显生宙视极移曲线. *中国科学*, 1998, **28**(增刊): 90~96
- Fang D J, Wang P Y, Shen Z Y, et al. Cenozoic paleomagnetic results and Phanerozoic apparent polar wandering path of Tarim Block. *Science in China* (in Chinese), 1998, **28**(Suppl.): 90~96
- [56] Nie S Y. Paleoclimatic and paleomagnetic constraints on the Paleozoic reconstructions of south China, north China and Tarim. *Tectonophysics*, 1991, **196**(3/4): 279~308
- [57] Burrett C, Long L, Stait B. Early-Middle Paleozoic biogeography of Asian terranes derived from Gondwana// Mckerrow W S, Scotese C R. Paleogeography and Biogeography. Bath England: Geol. Soc. Mem., 1990, **12**: 163~174
- [58] 段吉业, 葛肖虹. 论塔里木-扬子板块及其古地理格局. *长春地质学院学报*, 1992, **22**(3): 260~268
- Duan J Y, Ge X H. Tarim-Yangzi and its paleogeographic pattern. *Journal of Changchun University of Earth Science* (in Chinese), 1992, **22**(3): 260~268
- [59] 段吉业, 葛肖虹. 中国西北地区各构造单元之间地层和生物古地理的亲缘关系——兼论西北地区构造格局. *地质通报*, 2005, **24**(6): 558~563
- Duan J Y, Ge X H. Stratigraphic and paleobiogeographic affinities between different tectonic units in northwestern China-With a discussion of the tectonic framework of northwestern China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2005, **24**(6): 558~563
- [60] 陈孝红, 汪啸风, 李志宏. 华南阿伦尼格世几丁虫生物地层与古生物地理. *地质评论*, 1996, **42**(3): 200~208
- Chen X H, Wang X F, Li Z H. Arenigian chitinozoan biostratigraphy and paleobiogeography in South China. *Geological Review* (in Chinese), 1996, **42**(3): 200~208
- [61] 杨家骝. 中国及邻区寒武纪生物古地理和古大陆再造. // 王鸿祯, 杨森楠, 刘本培等主编. 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990. 265~285
- Yang J L. Cambrian biogeography and paleogeographic reconstruction of China and adjacent areas. // Wang H Z, Yang S N, Liu B P eds. Tectonogeography and Biogeography of China and Adjacent Areas (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990. 265~285
- [62] Yang Z Y, Sun Z M, Yang T S, et al. A long connection (750-380 Ma) between South China and Australia: paleomagnetic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, **220**: 423~434
- [63] Huang B C, Xu B, Zhang C X, et al. Paleomagnetism of the Beiyixi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim, Northwest China: a continental fragment of Neoproterozoic Western Australia? *Precambrian Res.*, 2005, **142**(3/4): 83~92
- [64] Lin J L, Fuller M, Zhang W Y. Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 1985, **313**: 444~449
- [65] Li Z X, Zhang L, Powell C Mc A. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1996, **43**: 593~604
- [66] Li Z X. Tectonic history of the major East Asian lithospheric blocks since the mid-Proterozoic-a synthesis. *Geodynamics*, 1998, **27**: 221~243
- [67] Chen Y, Xu B, Zhan S, et al. First mid-Neoproterozoic paleomagnetic results from Tarim Basin (NW China) and their geodynamic implications. *Precambrian Res.*, 2004, **133**: 271~281
- [68] Zhan S, Chen Y, Xu B, et al. Late Neoproterozoic paleomagnetic results from the Sugetbrak Formation of the Aksu area, Tarim basin (NW China) and their implications to paleogeographic reconstructions and the snowball Earth hypothesis. *Precambrian Res.*, 2007, **154**: 143~158
- [69] Fang W, Van der Voo R, Liang Q Z. Ordovician paleomagnetism of eastern Yunnan, China. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**: 953~956
- [70] Van der Voo R. Paleomagnetism of Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans. Cambridge University Press, 1993. 1~411
- [71] Van der Voo R, Levashova N M, Skrinnik L I, et al. Late orogenic, large-scale rotations in the Tien Shan and adjacent mobile belts in Kyrgyzstan and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 2006, **426**: 335~360