

# 藏东昌都地区侏罗纪岩石磁组构研究及其构造意义

刘晨光<sup>1)</sup>, 孙志明<sup>1)</sup>, 李海兵<sup>2)</sup>, 曹勇<sup>1,2)</sup>, 叶小舟<sup>1)</sup>, 吴百灵<sup>1)</sup>, 曹新文<sup>1)</sup>, 李成龙<sup>2)</sup>, 裴军令<sup>1)</sup>

1) 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

**内容提要:** 本文对藏东昌都地区侏罗纪汪布组、东大桥组和小索卡组红层共71个采点开展了磁组构(AMS)研究。磁组构测试结果表明, 早侏罗世汪布组岩石磁线理较磁面理发育, 磁化率各向异性度较高, 磁化率椭球最小轴 $K_3$ 散布于层面缩短方向, 代表了与构造成因相关的磁组构; 中侏罗世东大桥组和晚侏罗世小索卡组岩石则磁面理较磁线理发育, 磁化率各向异性度较低, 磁化率椭球最小轴 $K_3$ 与层面近垂直, 指示了原生沉积磁组构。早侏罗世汪布组地层的磁组构揭示了其构造应力场方向为NE-SW向。中侏罗世东大桥组的磁组构指示了其沉积时的古水流方向为SE向( $138.3^\circ$ ), 而晚侏罗世小索卡组磁组构指示了其沉积时的古水流方向为NNW向( $328.3^\circ$ )。古水流方向的明显变化揭示了昌都地区从中侏罗世到晚侏罗世沉积物物源发生了相应的转变, 表明昌都地区南早北晚的隆升过程。

**关键词:** 古流向; 磁组构; 隆升; 昌都地区; 侏罗纪

磁组构是指岩石中磁性矿物定向分布排列的特点, 广义的磁组构包括磁化率各向异性(AMS)、非磁滞剩磁各向异性(AARM)和等温剩磁的各向异性(AIRM)(McCabe et al., 1985; Jackson, 1991; Pan Yongxin et al., 1998; Wang Kai et al., 2017)。磁化率各向异性的方法已被广泛应用于沉积岩古流向的判断, 其作为古流向判断依据的可行性已经得到了大量野外及室内工作的证实(Veloso et al., 2007; Nils et al., 2013)。沉积岩古流向的确定可以帮助分析沉积物物源, 恢复沉积区古地貌。而物源分析又是沉积盆地的大地构造背景判别、古环境恢复的重要依据, 在盆地分析中具有重要意义(Ma Shouxian et al., 2014)。

近年来, 关于羌塘地块在中生代的沉积演化受到了越来越多的关注。羌塘地块在三叠纪多表现为多岛弧盆构造古地理面貌, 以陆表浅海沉积环境为特征(Kong Lingyao et al., 2014; Luo Mansheng et al., 2014)。印支造山运动使羌塘地块大部分地

区都发育陆源火山弧, 形成了复杂的多岛弧盆系构造格局。其中北羌塘盆地在早-中三叠世经历了由被动大陆边缘盆地向前陆盆地的转化, 于晚三叠世进入了前陆盆地的演化阶段。而昌都盆地中生代都表现为前陆盆地沉积, 并于三叠纪经历了广泛的海侵事件。早、中侏罗世海相沉积范围越来越小, 并逐步向南退去, 羌塘地块除北羌塘盆地和甘孜-理塘地区局部发育海相沉积之外, 其他大部分地区都基本结束了海相沉积的演化历史, 其特征表现为北羌塘盆地于侏罗纪沉积了一套广泛而连续的海相地层, 而位于羌塘地块东部的昌都地区却于该时期沉积了一套连续的陆相红色碎屑岩(Xu Zhiqin et al., 2011, 2016, 2019; He Bizhu et al., 2016)。北羌塘盆地与昌都盆地这一时期截然不同的沉积相表明其必然是经历了不同的构造演化。板块之间的俯冲汇聚及其伴随的周边地区之间的差异隆升可能在沉积环境的演变中扮演了重要的角色。而物源区的演变也是沉积环境变化的直接反映, 它不仅可以确定

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号: 41672218; 91855216; 41802210)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JYYWF 201810; JYYWF 20182102)、中国地质调查局项目(编号: D20160022-03)和自然资源部深地动力学重点实验室开放基金资助成果。

收稿日期: 2019-07-11; 改回日期: 2019-08-20; 网络发表日期: 2019-09-12; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 刘晨光, 男, 1994年生。硕士研究生, 构造地质学专业。Email: 1457786374@qq.com。通讯作者: 孙志明, 男, 1966年生。研究员, 博士生导师, 主要从事古地磁学与区域构造研究。Email: sunzml209@163.com。

**引用本文:** 刘晨光, 孙志明, 李海兵, 曹勇, 叶小舟, 吴百灵, 曹新文, 李成龙, 裴军令. 2019. 藏东昌都地区侏罗纪岩石磁组构研究及其构造意义. 地质学报, 93(10): 2477~2485, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019239.

Liu Chenguang, Sun Zhiming, Li Haibing, Cao Yong, Ye Xiaozhou, Wu Bailing, Cao Xinwen, Li Chenglong, Pei Junling. 2019. Anisotropy of magnetic susceptibility study of the Jurassic rocks in the Qamdo Area, eastern Tibet, and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 93(10): 2477~2485.

造山带的位置,还可以约束相关的构造过程(Cai Jianxin et al., 2014)。一些学者采用不同方法对昌都地区侏罗纪沉积物来源开展了大量研究,试图探讨羌塘昌都地区侏罗纪所经历的构造演化。如 Zhang Yuxiu et al. (2006)对羌塘地块东部侏罗系岩层利用 Dickinson 三角图解法对砂岩碎屑组分进行了分析,认为自晚三叠世以来北羌塘东部砂岩物源来自于其附近的再旋回造山带。Li Cai et al. (2008)和 Chen Xue et al. (2014)对流经昌都地区的澜沧江上游的侏罗纪河流沉积物的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成进行了系统研究,表明北羌塘地块可能为昌都地区澜沧江上游提供了物源。而 Jia Jiancheng et al. (2008)通过对羌塘地块东部侏罗纪沉积记录的综合分析,则认为昌都地区沉积物来源于羌塘地块中央隆起带。可见,关于昌都地区侏罗系沉积岩物源仍然存在较大的分歧,这也导致对于羌塘地块东部昌都地区沉积环境的演变、隆升过程的变化等没有形成统一的认识。

本文通过对昌都地区侏罗系汪布组、东大桥组、小索卡组沉积地层开展磁组构研究,并结合已有的岩石学、地层学和沉积学等成果,试图探讨羌塘地块东部昌都地区于侏罗纪的物源区演变及环境变迁,进而还可以探讨研究区的构造隆升过程。

## 1 区域地质背景及样品采集

羌塘地块处于青藏高原腹地,东西延伸约

1200km,其中部宽约 500~600km,西部和东部宽度小于 150km(图 1)。研究区位于羌塘地块东部昌都地区,出露地层主要为上三叠统甲丕拉组( $T_3j$ )、下侏罗统汪布组( $J_1w$ )、中侏罗统东大桥组( $J_2d$ )和上侏罗统小索卡组( $J_3x$ )(图 2)。本次采样地层主要为侏罗系汪布组、东大桥组和小索卡组地层。下侏罗统汪布组为一套紫红色细碎屑岩夹粘土岩、泥灰岩等沉积,产双壳类、腹足类、植物、孢粉等,为河流相沉积;中侏罗统东大桥组为一套海陆交互相细碎屑岩、粘土岩、碳酸盐岩等沉积,产双壳类、腕足类、腹足类、脊椎动物化石等,为河湖相—浅海相沉积;上侏罗统小索卡组由紫红、暗紫红色砂岩、泥岩、页岩等组成,产孢粉、脊椎动物,为河湖相沉积。

利用便携式古地磁钻机在汪布组砂岩钻取了 23 个采点 230 块样品,东大桥组砂岩钻取了 26 个采点 260 块样品,小索卡组砂岩 22 个采点 219 块样品。所有样品均利用专用古地磁定向仪进行了野外定向,全部样品在室内加工成直径为 2.54cm、高 2.2cm 的标准古地磁样品。

## 2 样品测试与分析

### 2.1 测试方法

样品的 AMS 测试均是利用中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室的由捷克 AGICO 公司生产的高灵敏度旋转卡帕桥 KLY-4 完成的。本文选择下侏罗统汪布组 164 块、中侏罗统东大桥组

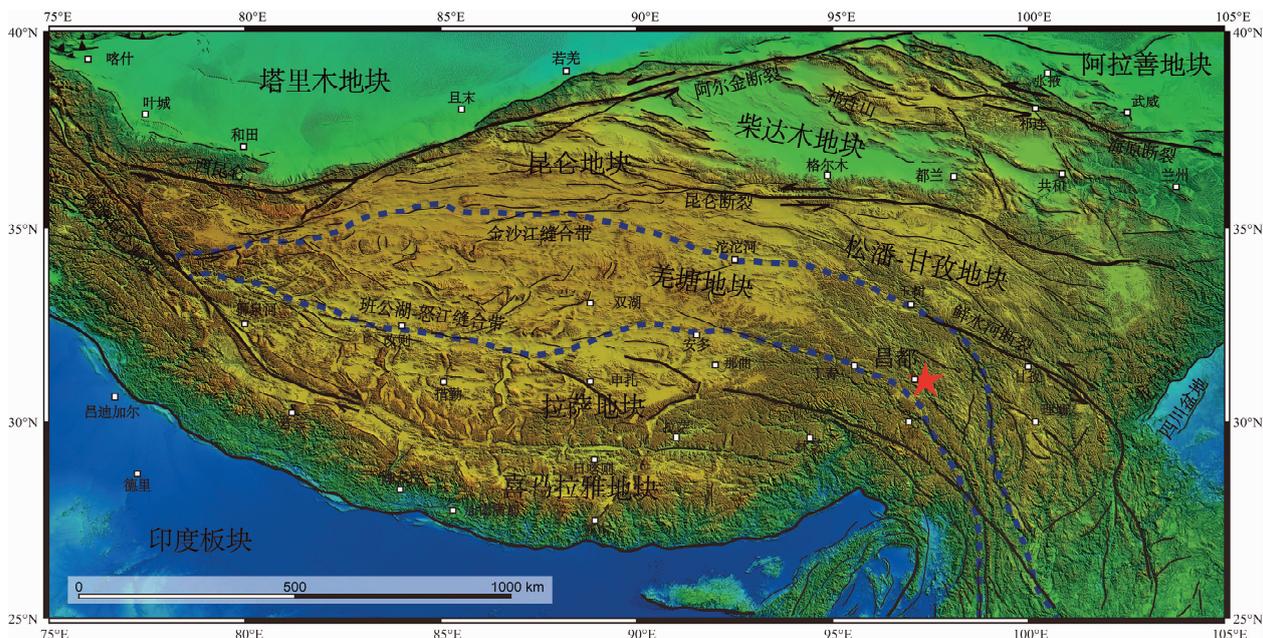


图 1 青藏高原及周边地区构造简图(据 Tapponnier et al., 2001;曹勇等, 2017 修改)

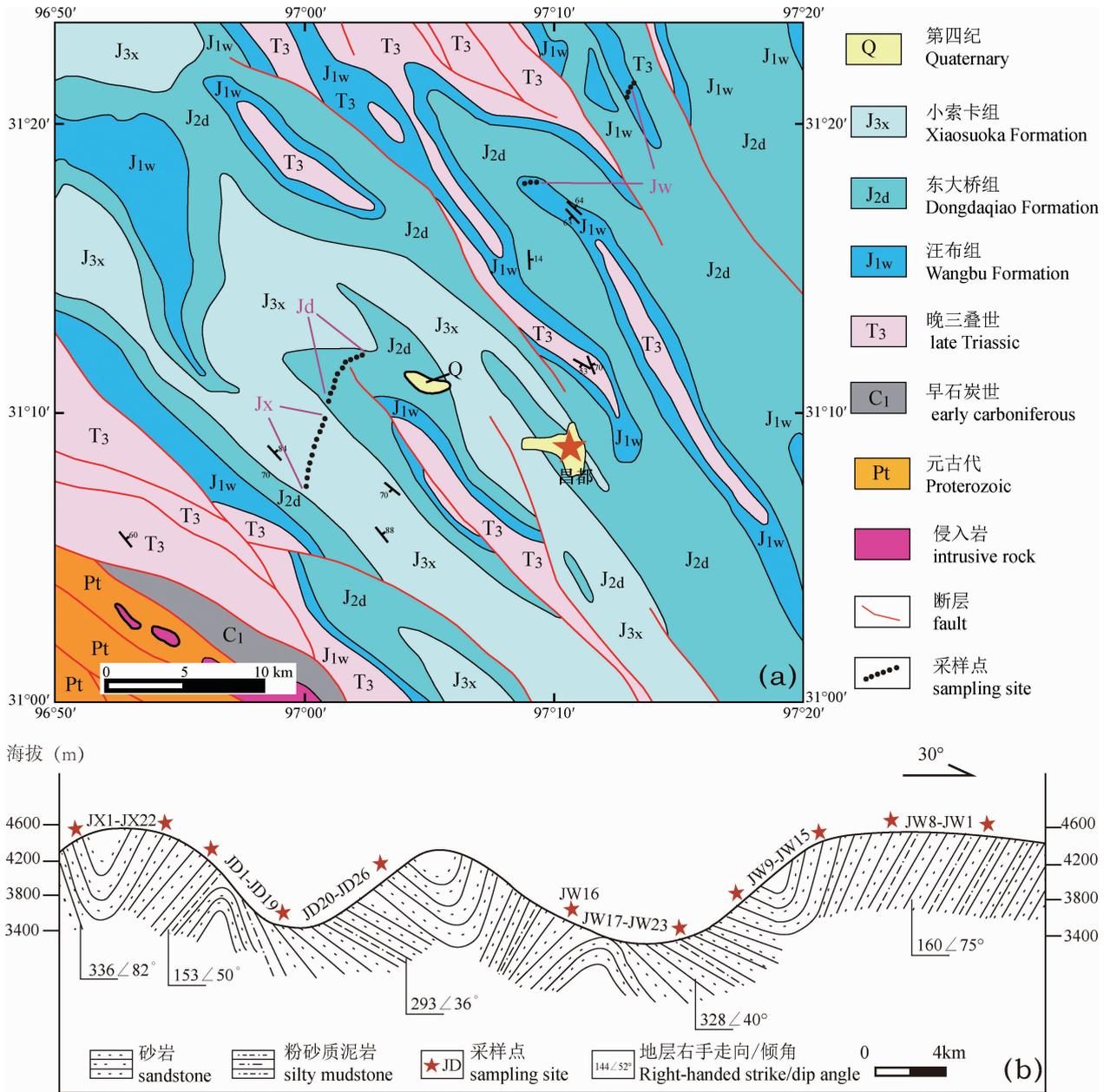


图 2 昌都地区侏罗系采样地区地质简图(a)和采点地质剖面图(b)

Fig. 2 Simplified geological map of sampling area (a) and measured geological section of the sampling area (b)

182 块和上侏罗统小索卡组 100 块样品,进行了磁化率各项异性的测试。常用磁组构参数用磁化率椭球体最大、中间与最小 3 个主轴( $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ )的量值来表示,常用的有:平均磁化率( $K_m$ ) (Nagata, 1961)、各向异性度( $P_j$ ) (Jelinek, 1981)、形状因子( $T$ ) (Tarling and Hroudá, 1993)、磁面理( $F$ ) (Stacey et al., 1960)、磁线理( $L$ ) (Balsley and Buddington, 1960)。

平均磁化率  $K_m$  反映了矿物磁化率的综合特征, $K_1$  的集中分布体现了磁线理( $L$ ) 的方位,磁线理反映了沉积颗粒呈线状排列的程度,而磁面理是由

$K_1$  和  $K_2$  构成的面,反映了沉积颗粒呈面状排列的程度。二者的大小都与沉积时水动力强度或坡降情况密切相关。在流水的沉积环境中,由于水动力的作用,沉积颗粒的磁化率各向异性椭球体的最大磁化率主轴( $K_1$ ) 会有一定的趋向性。当水动力较弱时, $K_1$  轴的方向平行于水流方向,表现为  $K_1$  轴的倾角较小, $K_3$  轴近垂直于岩层面;当水动力较强时,则相反, $K_1$  轴的方向与水流方向垂直(Liu Baozhu et al., 2001; Nils et al., 2013; Cai Jianxin et al., 2014)。磁化率各向异性度( $P_j$ ) 可以反映沉积物中颗粒排列的趋向程度,而形状因子( $T$ ) 则用来反映

磁化率椭球的形状,其大小和变化与磁面理和磁线理的发育程度密切相关。当  $T=0$  时,磁面理和磁线理同等发育;当  $0 < T < 1$  时,为压扁型磁化率椭球,磁面理发育为主;  $T=1$  时,仅有磁面理发育;当  $-1 < T < 0$  时,为拉长型磁化率椭球,磁线理发育为主;当  $T=-1$  时,仅有磁线理发育(Jelinek, 1981; Veloso et al., 2007)。岩石磁化率各向异性和形状因子常常综合用来分析沉积物沉积时所受到的应力变化及沉积物搬运体系的变化。

## 2.2 测试结果与分析

选取下侏罗统汪布组、中侏罗统东大桥组 and 上侏罗统小索卡组部分代表样品进行了磁化率-温度曲线( $K-T$ 曲线)和三轴等温剩磁热退磁测试(图3)。 $K-T$ 曲线的结果显示,侏罗系汪布组、东大桥组、小索卡组代表样品的加热曲线在  $580^{\circ}\text{C}$  左右有一个明显的下降,并在  $680^{\circ}\text{C}$  左右衰减到接近为零,表明了样品中磁铁矿和赤铁矿的解阻。同时汪布组代表样品在冷却过程中,于  $350^{\circ}\text{C}$  左右曲线快速升高,这可能是受到了磁黄铁矿的影响。三轴等温剩磁的热退磁是通过代表样品的  $Z$  轴、 $Y$  轴和  $X$  轴方向依次施加  $2.5\text{T}$ 、 $0.4\text{T}$  和  $0.12\text{T}$  直流场,然后对样品进行系统热退磁。其实验结果表明,汪布组

代表样品的剩磁成分主要由硬磁成分组成,其剩磁强度随着温度的升高逐渐衰减,直到  $680^{\circ}\text{C}$  左右衰减至零,表明样品中的主要载磁矿物为赤铁矿;东大桥组和小索卡组代表样品的剩磁成分主要由硬磁成分和中间磁成分组成,其剩磁强度均随着温度的升高逐渐衰减,直到  $680^{\circ}\text{C}$  左右衰减至零,指示了赤铁矿的解阻,表明了样品中的主要载磁矿物为赤铁矿。同时,中间磁成分在  $580^{\circ}\text{C}$  左右有一个较明显的下降,揭示了磁铁矿的解阻,表明样品中还含有少量的磁铁矿。以上结果表明,侏罗系汪布组、东大桥组及小索卡组岩石主要载磁矿物为赤铁矿和磁铁矿,同时汪布组岩石可能还含有少量的磁黄铁矿。

为了探讨研究区在不同时期古流向的变化,从而进一步研究构造隆升的过程以及物源区的演变,我们对以上参数进行了综合分析并做出了分析图(图4,图5,图6)。

沉积岩在形成过程中,受到沉积作用和压实作用的影响,板状和片状矿物在稳定的水动力条件下会平行层理排列,形成原生的沉积磁组构,表现为磁面理与层面平行。在静水动力条件下岩石的磁线理不发育,但在水流的作用下,可能会形成与磁化率椭球体最大轴( $K_1$ )方向平行的磁线理, $K_1$ 轴的方向即

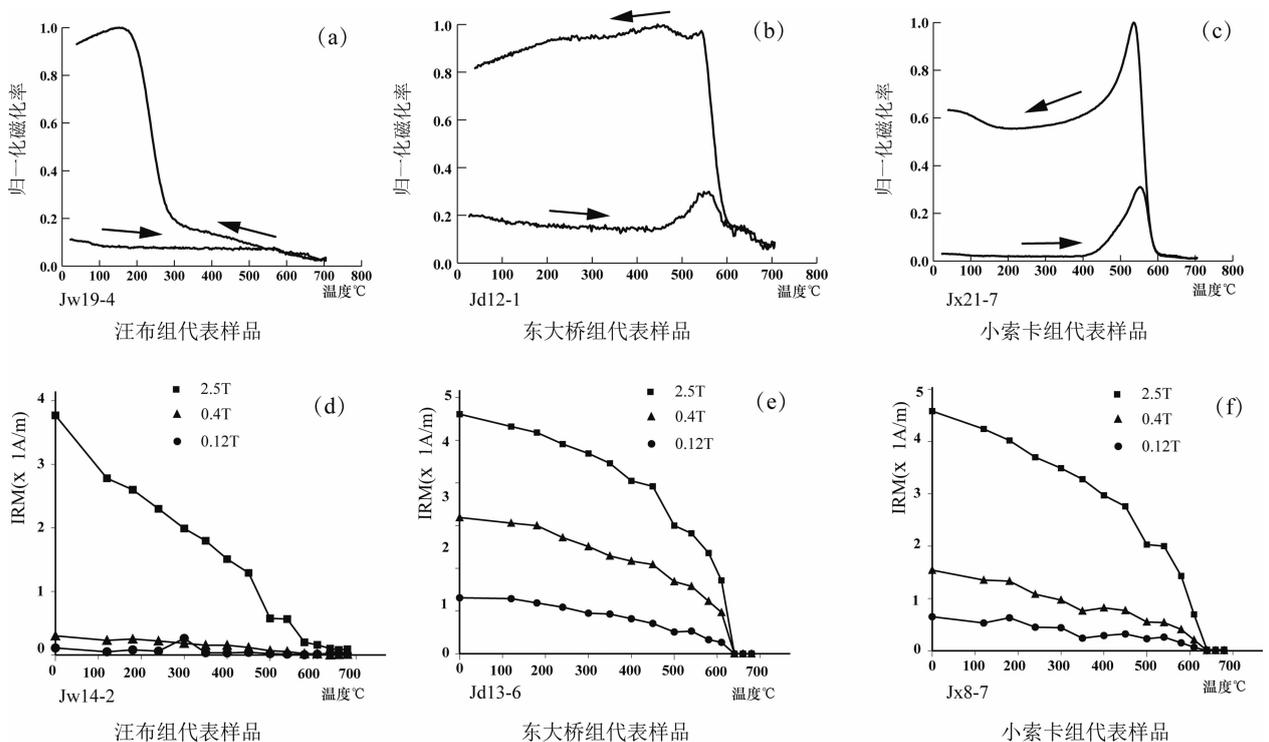


图3 昌都地区侏罗系代表样品的磁化率-温度曲线图(a-c)和三轴等温剩磁热退磁结果图(d-f)

Fig. 3 Thermomagnetic curves of magnetic susceptibility versus temperature (a-c) and thermal demagnetization (d-f) of a three-component IRM of representative samples in the studied areas

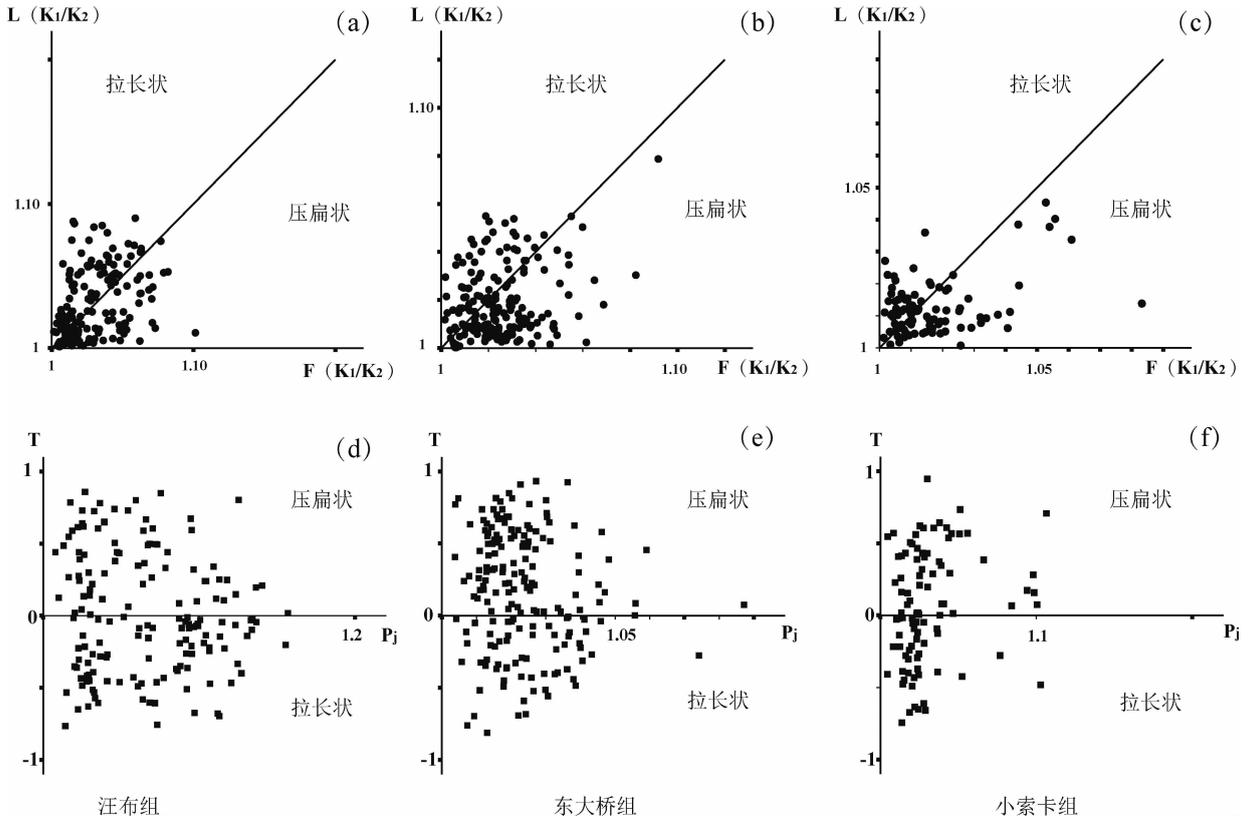


图 4 昌都地区侏罗系代表样品磁面理  $F$  与磁线理  $L$  图(a-c)和磁化率各向异性度  $P_j$  与磁化率椭球形状因子  $T$  图(d-f)  
 Fig. 4 Flinn-type( $F-L$ ) (a-c) and  $P_j-T$  Plots (d-f) of representative samples in the studied areas

可指示古水流向。但在长期的地质演化过程中,岩石在形成过程中形成的沉积磁组构往往会被后期的构造变形所改造,因此所观察到的磁组构可能是原生的沉积磁组构与后期构造成因的磁组构的叠加,并不能正确反映初始磁化率各向异性的特征,同时也不能正确反映沉积岩的古水流向。因此,正确区分原生的沉积磁组构与后期构造成因的磁组构就显得至关重要。

表 1 侏罗系汪布组、东大桥组和小索卡组磁组构参数  
 Table 1 Magnetic fabric parameters of the Wangbu, Dongdaqiao and Xiaosuoka formations

地层	磁组构参数(平均值)			
	$L$	$F$	$P_j$	$T$
汪布组	1.029	1.006	1.037	-0.646
东大桥组	1.008	1.010	1.017	0.120
小索卡组	1.010	1.017	1.028	0.252

从代表样品的  $P_j-T$  图解以及磁面理与磁线理的  $F-L$  图解(图 4)可以看出,下侏罗统汪布组磁线理较磁面理更为发育,磁化率各向异性椭球形状以拉长状为主,其磁面理平均值为 1.006,磁线理平均值为 1.029,具有较大的磁化率各向异性度,另外,其磁化率椭球主轴的等面积投影图显示其  $K_3$  散布

于层面缩短方向,呈带状展布,并没有垂直层面,而  $K_1$  轴则具有较明显的优选方向,这表明其原生磁组构已经被改造,受到了构造变形的影响,代表了早期的弱变形磁组构(图 5a)。而中侏罗统东大桥组和上侏罗统小索卡组均是磁面理较磁线理发育,磁化率椭球形状以压扁状为主,其中东大桥组磁面理平均值为 1.01,磁线理平均值为 1.008,而小索卡组磁面理平均值为 1.017,磁线理平均值为 1.01,二者均具有较小的磁面理和磁线理值;同时东大桥组和小索卡组 90% 以上的样品的磁化率各向异性的在 1~1.05 之间,其中东大桥组全部样品的平均磁化率各向异性度为 1.017,小索卡组全部样品的平均磁化率各向异性度为 1.028。磁化率椭球体最小轴  $K_3$  近垂直于层面,相对发育的磁面理以及相对较低的磁面理、磁线理值和磁化率各向异性度等特征表明了中侏罗统东大桥组和上侏罗统小索卡组地层保持了其原生的沉积磁组构(图 5b,c)(表 1)。

中侏罗统东大桥组和上侏罗统小索卡组代表样品的磁化率椭球体的等面积投影图显示倾斜校正后的磁化率椭球最小轴  $K_3$  均近垂直于层面, $K_1$  轴具有明显的优选方向,指示了岩石沉积时的古水流方向。中侏罗世东大桥组和晚侏罗世小索卡组磁化率椭球

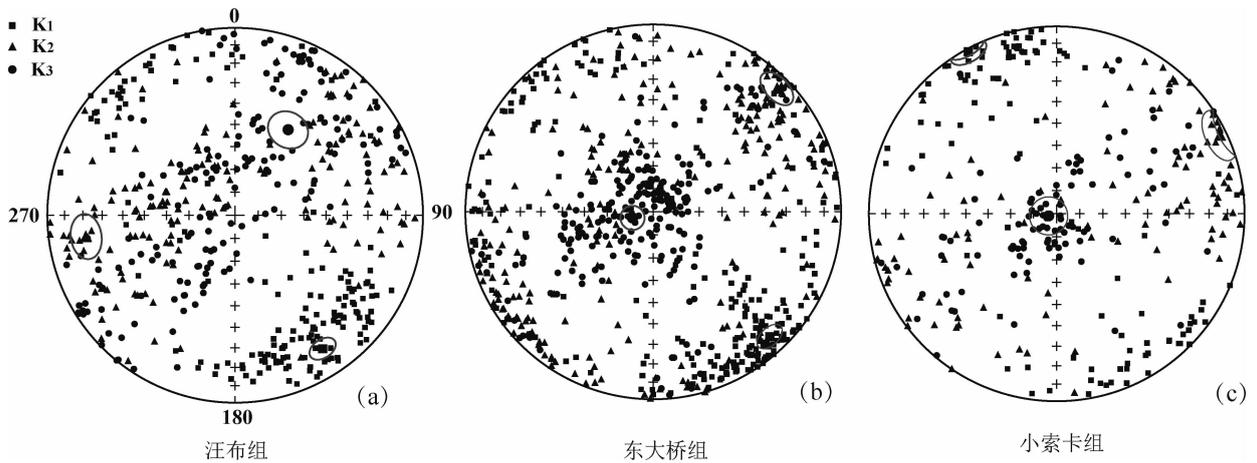


图5 昌都地区侏罗系汪布组(a)、东大桥组(b)和小索卡组(c)倾斜校正后 AMS的下半球等面积图

Fig. 5 Lower hemisphere, equal-area projections of the AMS data of the Wangbu (a), Dongdaqiao (b) and Xiaosuoka (c) formation after bedding correction

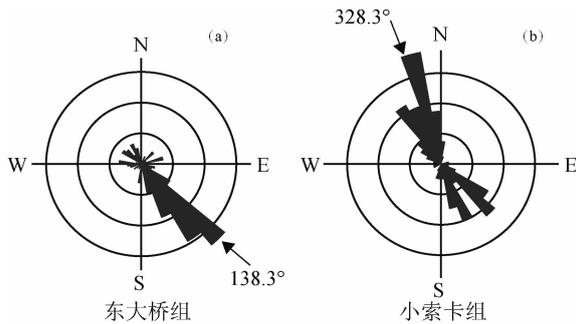


图6 昌都地区中侏罗统东大桥组(a)和上侏罗统小索卡组(b)磁化率椭球体最大轴  $K_1$  玫瑰花图

Fig. 6 Rose diagram of maximum susceptibility axes  $K_1$  directions of the Dongdaqiao (a) and Xiaosuoka (b) formation

最大轴  $K_1$  轴的玫瑰花图表明研究区古流向从中侏罗世到晚侏罗世发生了较明显的变化,即中侏罗统东大桥组古水流方向为 SE( $138.3^\circ$ ),到上侏罗统小索卡组则总体转变为 NNW 向( $328.3^\circ$ ) (图 6a,b) (表 2)。

表 2 昌都地区侏罗系汪布组、东大桥组和小索卡组磁化率主轴方向(倾斜校正后)

Table 2 Direction of principal axes of magnetic anisotropy from Wangbu, Dongdaqiao and Xiaosuoka formation after tilt correction

地层	$K_1$		$K_2$		$K_3$	
	偏角( $^\circ$ )	倾角( $^\circ$ )	偏角( $^\circ$ )	倾角( $^\circ$ )	偏角( $^\circ$ )	倾角( $^\circ$ )
汪布组	146.8	15.9	261.8	20.8	31.7	45.4
东大桥组	138.3	5.4	46.4	5.9	276.2	82.6
小索卡组	328.3	1.2	58.3	3.0	241.3	87.0

### 3 讨论

#### 3.1 早侏罗世 AMS 结果分析

昌都地区下侏罗统汪布组的 AMS 结果表明该

组地层在形成之后,并未能保持其原生的沉积磁组构,而是可能在区域应力场的影响下,产生了较明显的构造变形。其初始磁化率各向异性受到了后期构造变形的改造,产生了与构造成因相关的磁组构,其磁化率椭球体最大轴  $K_1$  具有较明显的 NW-SE 优选方向(图 5a)。在构造变形过程中,通常构造应力场的最大主压应力方向与  $K_1$  轴近垂直。据此可以推测研究区在早侏罗世可能受到了印支造山运动 NE-SW 向构造应力的作用。已有的地质资料表明,印支运动是青藏高原羌塘地区一次具有划时代意义的重大变革,可以分为两幕,第 I 幕指中三叠统与上三叠统前诺利阶之间的角度不整合,第 II 幕发生于晚三叠世和中侏罗世巴柔期之间,印支运动在班公湖-怒江缝合带以北表现为强烈的造山运动(Yang Guangquan et al., 2009)。沉积学的证据表明受印支运动第 II 幕的影响,在昌都地区形成了近 NE-SW 向的挤压,以抬升造陆运动为特征,海水自东向西全面退去,结束了海相沉积的历史,自侏罗纪及其以后大多数地层为陆相红色碎屑岩堆积(Liu Shikun et al., 1998; Yang Guangquan et al., 2009)。而根据羌塘地块内部构造变形特征的研究,如褶皱、断层擦痕、节理等,表明羌塘地块变形始于印支运动,主变形期为燕山期和喜马拉雅期,以 SN 向挤压为主,其次为 NE-SW 向,这与本次昌都地区侏罗系地层的磁组构研究结果较一致。而班公湖-怒江洋盆于侏罗纪向北的俯冲消减也与研究区构造应力场具有很好的一致性(He Bizhu et al., 2016)。

#### 3.2 中晚侏罗世 AMS 结果分析

中侏罗统东大桥组和上侏罗统小索卡组岩石的

磁组研究表明,其磁组未受到后期构造变形的影响,保持了较好的原生沉积磁组特征。根据中侏罗统东大桥组 and 上侏罗统小索卡组磁组的磁化率椭圆体最大轴  $K_1$  揭示的古水流向的明显变化,表明研究地区中侏罗世和晚侏罗世时期物源发生了显著的改变,这一物源方向的改变可能与区域构造隆升过程的变化有着密不可分的关系。中侏罗统东大桥组 SE-NW 的古水流向表明当时研究区的地貌特征为南东高北西低,而上侏罗统小索卡组古水流向转变为 NW-SE 向,但此时 NW-SE 向古水流动力条件较弱,导致古水流优选性减弱,但仍以 NW 向为主,表明此时研究地区的地貌已经发生了非常显著的变化,即地貌特征由南东高北西低变为北西高南东低或南东-北西侧的隆升接近。这表明研究区中侏罗世-晚侏罗世时期发生了明显的差异隆升作用,即研究区南部的隆升作用可能早于北部或是其隆升幅度要高于北部。以上利用 AMS 分析所揭示的昌都地区中侏罗世-晚侏罗世时期的古水流向的转变和差异构造隆升作用的变化,与班公湖-怒江洋盆于中晚侏罗世向北的强烈俯冲消减有关,使得羌塘地块(包括羌塘东部)大幅隆升(He Bizhu et al., 2016)。大量的证据表明,班公湖-怒江洋盆在晚中生代发生拼合时,存在自东向西的穿时性(Wu Fuyuan et al., 2008),班公湖-怒江带东部更早更强烈的俯冲汇聚造成了研究区东部及南部的隆升更或是隆升幅度更大。随着班公湖-怒江洋盆持续的俯冲消减,研究区北部的隆升幅度超过了其南部及东部,最终使得研究区地貌发生了如此显著的变化,同时该时期古水流向和物源也发生了相应的转变。

最近的古地磁研究结果暗示了自白垩纪以来羌塘地块东部经历了近  $40^\circ$  的顺时针旋转运动(Otofujii et al., 2010; Chen Weiwei et al., 2012),那么东大桥组和小索卡组受到了同样的影响,研究区南早北晚的构造隆升模式仍然成立,但为了更精细地恢复侏罗纪以来的构造隆升过程,更进一步的古地磁工作需要加强。

南早北晚或南强北弱的隆升模式可能对羌塘盆地的物源演变分析仍有一定的适用性。羌塘地块于中侏罗世已经形成了明显的两坳夹一隆的构造格局,即北羌塘坳陷(北羌塘盆地)、南羌塘坳陷(南羌塘盆地)和中央隆起带。北羌塘盆地此时为裂陷盆地,其沉积物具有多物源的特点,主要来自北部的可可西里造山带和南部的中央隆起带,沉降速度快,沉积厚度巨大。晚侏罗世羌塘盆地遭受了第二次海

侵,全盆地为碳酸盐岩沉积,形成北东部较高,向西南部倾斜的古地理面貌。可见,北羌塘盆地于中侏罗世隆升较晚或隆升幅度较小,分别接受了南北两侧的沉积,晚侏罗世北羌塘盆地北东部已发生明显隆升作用,向盆地中心提供物源。这与本次研究南部早于北部或隆升幅度大于北部的模式具有较好的一致性,同时也验证了本次研究的正确性。

## 4 结论

(1)昌都地区下侏罗统汪布组地层的磁组揭示了其构造应力场方向为 NE-SW 向。

(2)中侏罗统东大桥组地层的磁组指示了其沉积时的古水流方向为 SE 向( $138.3^\circ$ ),而上侏罗统小索卡组地层的磁组指示了其沉积时的古水流方向为 NNW 向( $328.3^\circ$ ),其古水流方向的明显变化揭示了昌都地区从中侏罗世到晚侏罗世沉积物物源发生了相应的转变,表明昌都地区南早北晚的隆升过程。

(3)昌都地区中晚侏罗世南早北晚或南强北弱的隆升模式仍然适用于羌塘盆地,其物源演变可能经历了同样的过程。

**致谢:**野外工作中得到了吴建国、周伦和黄永忠的大力协助;黄宝春教授和杨天水教授对文稿提出了宝贵意见;在此一并致谢。

## References

- Baldsley J R, Buddington A F. 1960. Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. *American Journal of Science*, 258: 6~20.
- Cai Jianxin, Tan Xiaodong, Wu Yi. 2014. Magnetic fabric and paleomagnetism of the Middle Triassic siliciclastic rocks from the Nanpanjiang Basin, South China: Implications for sediment provenance and tectonic process. *Journal of Asian Earth Sciences*, 80: 134~147.
- Cao Yong, Sun Zhiming, Liu Dongliang, Zhang Lei, Ye Xiaozhou, Zheng Yong, He Xiangli. 2017. Late Cretaceous paleomagnetic results in the Nyima area from the northern margin of the Lhasa block and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (12): 3989~3998 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weiwei, Yang Tianshui, Zhang Shihong, Yang Zhenyu, Li Haiyan, Wu Huaichun, Zhang Junhong, Ma Yiming, Cai Fulong. 2012. New early Cretaceous paleomagnetic results from the Zenong Group volcanic rocks in Cuogin area, Tibet and their paleogeographic implications. *Gondwana Research*, 22: 461~469.
- Chen Xue, Chen Yuelong, Bao Chuang, Li Guangqi, Yan Jiapan, Li Dapeng. 2014. U-Pb Dating and Hf Isotopic Composition of Detrital Zircons in the Sediments from the Lancang River and Its Geological Significance. *Geoscience*, 28(6): 1170~1182 (in Chinese with English abstract).
- He Bizhu and Zheng Menglin. 2016. Structural characteristics and formations dynamics: A review of the main sedimentary basins in the continent of China. *Acta Geologica Sinica*, 904: 1156~1194.
- Jackson M. 1991. Anisotropy of magnetic remanence: A brief review

- of mineralogical sources, physical origins, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure and Applied Geophysics*, 136(1): 1~28.
- Jelinek V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: 63~67
- Jia Jiacheng. 2008. Tectono paleogeographic characteristics and evolution of the Mesozoic in eastern Qiangtang Basin, Tibet. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 613~625 (in Chinese with English abstract).
- Kong Lingyao, Yao Huazhou, Xu Yadong, Luo Mansheng, Luo Liang, Wu Jing. 2014. Evolution of sedimentary basins in Qiangtang-Sanjiang from Paleozoic to Mesozoic. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(08): 1217~1229 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai. 2008. A review on 20 years study of the Longmu Co-Shuanghu-Lancang River Suture Zone in Qinghai-Xizang(Tibet) Plateau. *Geological Review*, 54(1): 105~119 (in Chinese with English abstract).
- Liu Baozhu, Yoshiki S, Toshitsugu Y, Abdelaziz A, Hirokuni O, Kazuaki H, Zhao Quanhong. 2001. Paleocurrent analysis for the Late Pleistocene-Holocene incised-valley fill of the Yangtze delta, China by using anisotropy of magnetic susceptibility data. *Marine Geology*, 176: 175~189.
- Liu Shikun and Xu Kaifeng. 1998. Trassic lithostratigraphy and Indosinian movement in the Qiangbei-Qamdo area, Tibet. *Regional Geology of China*, 17(1): 25~29 (in Chinese with English abstract).
- Luo Mansheng, Lu Longqiao, Jia Jian, Wang Shengdong, Xu Yadong, He Weihong. 2014. Evolution of sedimentary basins in China during Mesozoic. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(08): 954~976 (in Chinese with English abstract).
- Ma Shouxian, Meng Qingren, Qu Yongqiang. 2014. Development on provenance analysis of light minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 597~608 (in Chinese with English abstract).
- McCabe R, Jackson M, Ellwood B B. 1985. Magnetic anisotropy in the Trenton limestone; results of a new technique, anisotropy of anhysteretic susceptibility. *Geophysical Research Letters*, 12: 333~336.
- Nagata T. 1961. *Rock Magnetism*, 2nd ed. Maruzen, Tokyo.
- Nils L, Harald B, Matthias H, Jens H. 2013. Paleocurrent direction measurements in a volcanic setting by means of anisotropy of magnetic susceptibility: A case study from the Lower Miocene Tepoztlán Formation (Transmexican Volcanic Belt, Central Mexico). *Sedimentary Geology*, 290: 1~14.
- Otofuji Y, Yokoyama M, Kitada K, Zaman H. 2010. Paleomagnetic versus GPS determined tectonic rotation around eastern Himalayan syntaxis in East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37: 438~451.
- Pan Yongxin and Zhu Rixiang. 1998. The recent progress in magnetic fabrics. *Progress in Geophysics*, 13(1): 2~59 (in Chinese with English abstract).
- Pei Junling, Sun Zhiming, Li Haibing, Si Jialiang, Pan Jiawei, Liu Jing, Liu Xuegang, Zhao Yue. 2008. Paleocurrent direction of the Late Cenozoic sedimentary sequence of the Tibetan plateau north western margin constrained by AMS and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1613~1620 (in Chinese with English abstract).
- Stacey F D, Joplin G, Lindsay J. 1960. Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from SE Australia. *Pure and Applied Geophysics*, 47: 30~40.
- Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang Jingsui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Tarling D H and Hrouda F. 1993. *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman and Hall, London, 217.
- Veloso E E, Anma R, Ota T, Komiya T, Kagashima S and Yamazaki T. 2007. Paleocurrent patterns of the sedimentary sequence of the Taitao ophiolite constrained by anisotropy of magnetic susceptibility and paleomagnetic analyses. *Sedimentary Geology*, 201(3~4): 446~460.
- Wang Kai, Jia Dong, Luo Liang, Dong Shuwen. 2017. Magnetic fabric and structural deformation. *Progress in Geophysics*, 60(3): 1007~1026 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Huang Baochun, Ye Kai, Fang Aimin. 2008. Collapsed Himalayan-Tibetan orogeny and the rising Tibetan Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 1~30 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, Ji Shaocheng, Zhang Zeming, Liu Yan. 2011. On the tectonics of the India-Asia collision. *Acta Petrologica Sinica*, 85(1): 1~33 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zhao Zhongbao, Peng Miao, Ma Xuxuan, Li Huaqi, Zhao Junmeng. 2016. Review of "orogenic plateau". *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3557~3571 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zhao Zhongbao, Ma Xuxuan, Chen Xijie, Ma Yuan. 2019. From Andean orogen to Gangdese orogeny: from ocean continent subduction to continent-continent collision. *Acta Geologica Sinica*, 93(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Yang Guangquan, Wang Genhou. 2009. Discussion on the Indosinian movement in Qinghai-Tibet area, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1188~1190 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yongyao, He Peifeng, Zhao Tao, Qi Hongmei, Zhao Peizhi, Gao Lei, Wang Jianshe, Zhang Wei. 2018. Magnetic Parameters of the Late Jurassic Xiali Formation, Qiangtang Basin; Implications for Sedimentary Environmental and Salt Formation. *Acta Geologica Sinica*, 92(3): 618~628.
- Zhang Yuxiu, Zhang Kaijun, Xia Bangdong, Xie Yaowu. 2006. Mesozoic sandstone composition in the Qiangtang block Tibet implications for Tectonic setting. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(2): 165~174 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Li Shimin, Cawood P A, Wang Qin, Zhao Zhidan, Liu Shengao, Wang Liquan. 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction. *Lithos*, 245: 7~17.

## 参 考 文 献

- 曹勇, 孙知明, 刘栋梁, 张蕾, 叶小舟, 郑勇, 何祥丽. 2017. 拉萨地块北缘尼玛地区晚白垩世古地磁结果及其构造意义. *岩石学报*, 33(12): 3989~3998.
- 陈雪, 陈岳龙, 包创, 李光琪, 闫家盼, 李大鹏. 2014. 澜沧江河流沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *现代地质*, 28(6): 1170~1182.
- 贾建称. 2008. 西藏羌塘盆地东部中生代构造古地理特征及演化. *古地志学报*, 10(6): 613~625.
- 孔令耀, 姚华舟, 徐亚东, 骆满生, 罗亮, 吴旌. 2014. 羌塘-三江古生代-中生代沉积盆地演化. *地球科学-中国地质大学学报*, 39(08): 1217~1229.
- 李才. 2008. 青藏高原原木错-双湖-澜沧江缝合带研究 20 年. *地质论评*, 54(1): 105~119.
- 骆满生, 卢隆桥, 贾健, 王盛栋, 徐亚东, 何卫红. 2014. 中国中生代沉积盆地演化. *地球科学-中国地质大学学报*, 39(08): 954~976.
- 刘世坤, 徐开锋. 1998. 西藏羌北-昌都地区三叠纪岩石地层及印支运动. *中国区域地质*, 17(1): 25~29.
- 马收先, 孟庆任, 曲永强. 2014. 轻矿物物源分析研究进展. *岩石学报*, 39(5): 597~608.
- 潘永信, 朱日祥. 1998. 磁组构研究现状. *地球物理学进展*, 13(1): 52~59.
- 裴军令, 孙知明, 李海兵, 司家亮, 潘家伟, 刘静, 刘雪刚, 赵越. 2008. 青藏高原西北缘晚新生代沉积岩古流向的磁化率确定及其构造意义. *岩石学报*, 24(7): 1613~1620.
- 王开, 贾东, 罗良, 董树文. 2017. 磁组构与构造变形. *地球物理学学报*, 60(3): 1007~1026.

吴福元, 黄宝春, 叶凯, 方爱民. 2008. 青藏高原造山带的垮塌与高原隆升. 岩石学报, 24(1): 1~30.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1~33.

许志琴, 赵中宝, 彭森, 马绪宣, 李化启, 赵俊猛. 2016. “论造山的高原”. 岩石学报, 32(12): 3557~3571.

许志琴, 赵中宝, 马绪宣, 陈希节, 马元. 2019. 从安第斯到冈底斯: 从洋-陆俯冲到陆-陆碰撞. 地质学报, 93(1): 1~11.

杨广全, 王根厚. 2009. 初论青藏地区的“印支运动”. 地质通报, 28(9): 1188~1190.

曾永耀, 何沛锋, 赵涛, 祁红梅, 赵培植, 高磊, 王建设, 张伟. 2018. 羌塘盆地晚侏罗世夏里组磁学参数指示的沉积环境及其成盐意义. 地质学报, 92(3): 618~628.

张玉修, 张开均, 夏邦栋, 谢尧武. 2006. 西藏羌塘地体三叠纪-侏罗纪海相砂岩颗粒组分及其构造意义. 沉积学报, 24(2): 165~174.

## Anisotropy of magnetic susceptibility study of the Jurassic rocks in the Qamdo Area, eastern Tibet, and its tectonic implications

LIU Chenguang<sup>1)</sup>, SUN Zhiming<sup>\*1)</sup>, LI Haibing<sup>2)</sup>, CAO Yong<sup>1,2)</sup>, YE Xiaozhou<sup>1)</sup>,  
WU Bailing<sup>1)</sup>, CAO Xinwen<sup>1)</sup>, LI Chenglong<sup>2)</sup>, PEI Junling<sup>1)</sup>

1) *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*

2) *Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

*\* Corresponding author: sunzm1209@163.com*

### Abstract

In this paper, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was measured on samples from 71 sites of the Jurassic Wangbu Formation, Dongdaqiao Formation and Xiaosuoka Formation in the Qamdo area of eastern Tibet. The AMS of the Lower Jurassic Wangbu Formation indicates that the magnetic lineation is more developed than the magnetic foliation, the anisotropy degree is very high, and the minimum axis K3 of magnetic axis ellipsoid is scattered in the layer shortening direction, which is related to the structural cause. The AMS of the Middle Jurassic Dongdaqiao Formation and the Upper Jurassic Xiaosuoka Formation implies that the magnetic foliation is more developed than the magnetic lineation, the anisotropy degree is very low, and the minimum axis K3 of magnetic susceptibility ellipsoid is near vertical to the beds. These findings indicate the primary sedimentary fabric for the Middle Jurassic Dongdaqiao Formation and the Upper Jurassic Xiaosuoka Formation. The AMS of the Lower Jurassic Wangbu Formation means that the direction of the tectonic stress field was close to NE-SW direction during the Early Jurassic. The obvious change of the paleocurrent direction between the Dongdaqiao Formation and the Xiaosoka Formation suggests that the uplifting process in the southern part of the Qamdo area was earlier than the north, and the provenance of the sediment had also undergone a corresponding transformation.

**Key words:** Paleocurrent directions; Magnetic fabrics; Uplift; Qamdo area; Jurassic