

青藏高原东南缘兰坪—思茅盆地 反S型构造属性的古地磁约束

徐颖超¹⁾, 仝亚博^{1, 2)}, 王恒³⁾, 杨振宇⁴⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京, 100081;

3) 中国地震局地质研究所, 北京, 100029; 4) 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京, 100048

内容提要:兰坪—思茅(盆地)内部发育的一系列褶皱和逆冲断层组成了显著的弧形构造,其中部呈现反S形构造形态。该地区地壳构造变形方式及其演化过程与青藏高原东南缘地壳物质新生代侧向挤出逃逸密切相关,对其开展地壳构造变形方式的定量分析,具有重要的意义。本文通过兰坪—思茅盆地中部反S形构造区域四条白垩纪红层剖面的岩石磁学和古地磁学研究,获得南涧牛街地区早白垩世LN-a和LN-b剖面的特征剩磁方向分别为 $D_s = 244.7^\circ, I_s = -47.3^\circ, K_s = 31.6, \alpha_{95} = 16.6^\circ (K_J^1)$,和 $D_s = 245.4^\circ, I_s = -46.4^\circ, K_s = 52.2, \alpha_{95} = 9.4^\circ (K_I n^2)$,两剖面在99%置信度下通过了McFadden(1990)褶皱检验;小湾镇地区早白垩世NX-a和NX-b剖面(两套地层分属轴向不同的两褶皱)特征剩磁方向分别为 $D_s = 244.9^\circ, I_s = -40.2^\circ, K_s = 1067.5, \alpha_{95} = 2.3^\circ (K_J^1)$ 和 $D_s = 182.6^\circ, I_s = -42.1^\circ, K_s = 335.2, \alpha_{95} = 3.7^\circ (K_J^2)$ 。结合前人在兰坪—思茅地体中部获得的可靠古地磁数据及青藏高原东南缘区域新生代断裂活动演化过程的分析,指出兰坪—思茅盆地中部弧形反S形构造的形成和演化,以及兰坪—思茅盆地构造区内部差异性旋转变形作用主要受控于新生代时期青藏高原东南缘地壳块体侧向旋转挤出过程中的相互挤压作用和临沧花岗岩基对兰坪—思茅地体侧向顺时针旋转挤出运动的阻挡等一系列构造因素。

关键词:白垩纪;古地磁;兰坪—思茅盆地;反S形构造成因;旋转变形

兰坪—思茅地体位于青藏高原东南缘,是印度支那地体最北缘部分(Metcalf, 1988, 1992, 1996; Jin Xiaochi, 1996; 许志琴等, 2016)。哀牢山—红河走滑断裂带及崇山—澜沧江缝合带分别构成了兰坪—思茅地体的北东缘和西南缘边界(Wu Haoruo et al., 1995; Metcalf, 1996)(图1a)。贯穿兰坪—思茅地体南北的兰坪—思茅盆地是在海西期基底上发育起来的中新生代陆相裂谷盆地,整体呈北西—南东向带状展布,它的形成和演化与古特提斯的演化和印度板块的向北漂移俯冲关系十分密切(云南省地质矿产局, 1990; 宋昊等, 2015)。由于受到印度—欧亚大陆碰撞及随后印度板块持续向欧亚板块楔入挤压作用的影响,印度支那地块和掸泰地块以哀牢山—红河走滑断裂带和高黎贡走滑断裂带为边界发生了侧向顺时针旋转挤出运动(Wang Erchie and Burchfiel, 1997; Morely, 2007; Otofujii et al.,

2007, 2012; Yin An and Harrisan, 2000; Yin An, 2010),在这一过程中,兰坪—思茅地体内部白垩纪和古近纪陆相沉积地层发生了强烈的构造变形,形成了兰坪—思茅褶皱系(云南省地质矿产局, 1990)。因此,兰坪—思茅地体很好地保存了渐新世以来青藏高原东南缘地壳物质侧向挤出逃逸的信息。古地磁方法作为研究地壳块体长时间尺度运动方式的有效手段,近几年被广泛应用于兰坪—思茅地体白垩纪和古近纪陆相红层,以揭示青藏高原东南缘区域地壳块体渐新世以来的侧向挤出逃逸方式和过程(Funahara et al., 1993; Huang Kainian and Opdyke, 1993; Yang Zhenyu and Besse, 1993; Sato et al., 1999, 2001, 2007; Yang Zhenyu et al., 2001; 杨振宇等, 2001; Tanaka et al., 2008; 张海峰等, 2012; Tong Yabo et al., 2013; 仝亚博等, 2014a)。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41572183)、中国地质调查项目(编号:DD20160268, 12120114002301)和中国地质科学院基
本科研业务费(编号:YYWF201613)的成果。

投稿日期:2016-12-01; 改回日期:2017-04-17; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.002

作者简介:徐颖超,女,1987年生。博士研究生,构造地质学专业。Email:xyuc1118@sina.com。通讯作者:仝亚博,男,1981年生。副研究
员,主要从事大地构造与古地磁学研究。Email:tyb816@163.com。

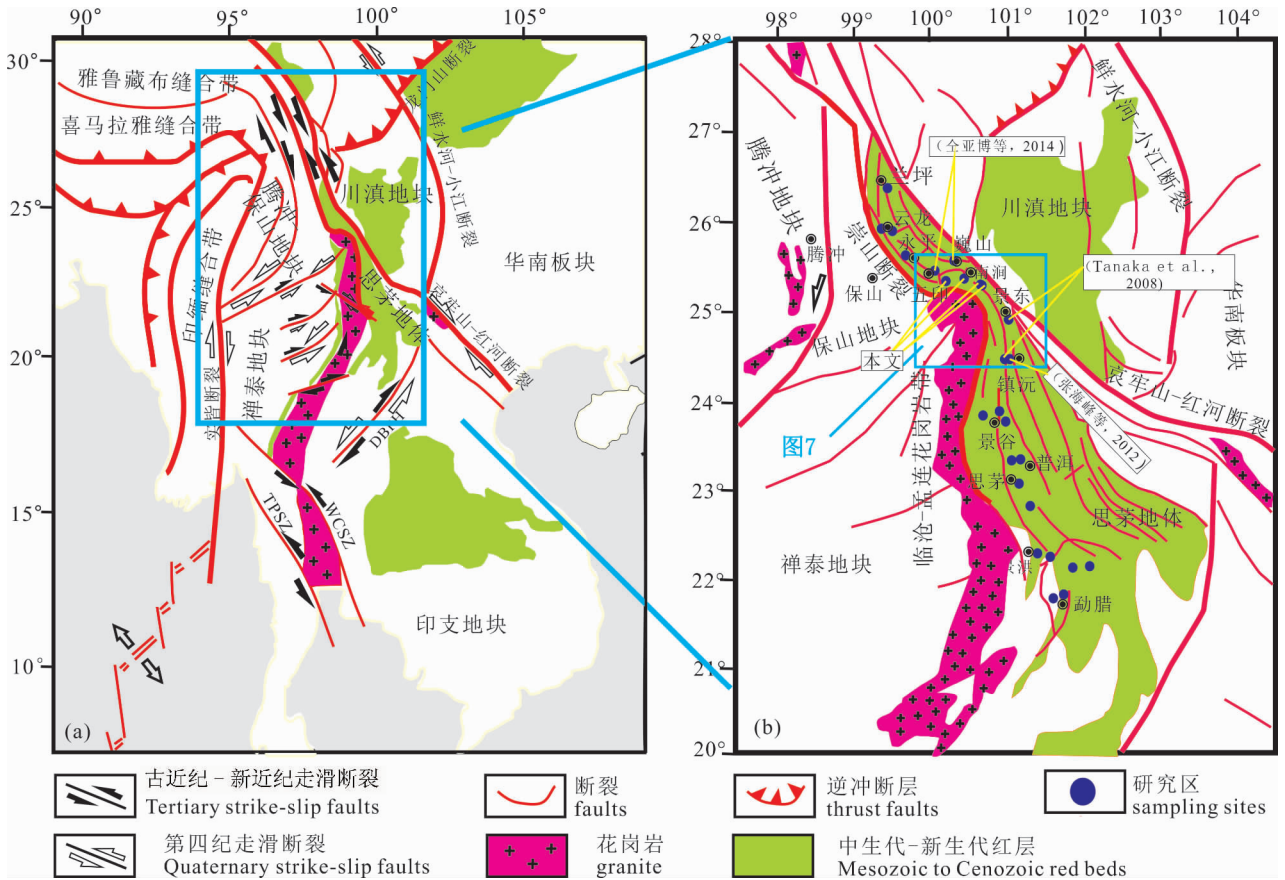


图 1 (a) 东南亚构造简图, 图中方框指示(b)图所在位置; (b) 兰坪—思茅褶皱带及其周缘地区构造简图, 图中方框指示图 7 所在位置 (修改自 Leloup 等, 1995; Tong Yabo 等, 2013)

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map of Southeast Asia. The blue rectangle indicates the position of (b); (b) Schematic map of the Lanping—Simao Terrane and the surrounding area (modified from Leloup et al., 1995; Tong Yabo et al., 2013)

前人对兰坪—思茅地体新生代陆内构造变形和动力学过程提出多种构造演化模型 (Tanaka et al., 2008; Kondo et al., 2012; Tong Yabo et al., 2013; 全亚博等, 2014b; Gao Liang et al., 2015)。这些模型通过兰坪—思茅地体内部白垩纪和古近纪古地磁数据的综合分析, 依据兰坪—思茅地体不同研究区磁偏角方向与兰坪—思茅褶皱系内部弧形构造带构造线行迹间的相关性线性回归分析, 反演兰坪—思茅地体新生代的构造演化过程, 提出兰坪—思茅地体内的差异性旋转变形运动受控于兰坪—思茅后生弧形构造带的形成与演化。但是不同模型对弧形构造带的形成原因和时间还存在较大的差异, 如 Tanaka 等 (2008) 认为弧形构造带形成的关键是兰坪—思茅地体 32 ~ 27 Ma 期间遭受的南北向挤压; Tong Yabo 等 (2013) 和 Kondo 等 (2012) 认为上新世之后川滇微地体发生顺时针旋转时的南向挤出运动是导致弧形构造带形成的主因; 然而 Gao Liang 等

(2015) 提出弧形构造带的形成受控于 27 ~ 20 Ma 临沧花岗岩基内逆冲断裂自西向东的挤压。

兰坪—思茅地体中部由褶皱系构成的反 S 形构造位于巍山至镇沅之间, 其成因普遍被认为与地壳的差异性旋转变形相关, 因此, 旋转变形与褶皱轴向的相关性是验证兰坪—思茅地体内部弧形构造带形成的关键。前人在兰坪—思茅地体北部的兰坪、云龙、永胜地区以及东部的景谷、普洱、勐腊等地区白垩纪和古近纪红层中获得了众多可靠的古地磁数据, 证实兰坪—思茅地体新生代时期发生了极为复杂的差异性顺时针旋转变形 (Funahara et al., 1993; Huang Kainian and Opdyke, 1993; Yang Zhenyu and Besse, 1993; Yang Zhenyu et al., 2001; Sato et al., 1999, 2001, 2007; 李仕虎等, 2012; 张海峰等, 2012; Otofujii et al., 2012; 全亚博等, 2014b; Gao Liang et al., 2015)。虽然前人在兰坪—思茅地体中部反 S 形构造区域进行了少量的古地磁

学研究(Tanaka et al., 2008; 仝亚博等, 2014b)(图1b),但对于弧形构造的形成演化过程和其动力学背景的认识仍不透彻,还需要在反S形构造区域进行更为深入的古地磁学研究。因此,本次研究选择兰坪—思茅地体中部弧形反S形构造带北缘的南涧地区四条白垩纪地层作为采样剖面,对其开展古地磁研究,以进一步深入分析本区域地壳旋转变形特征、构造意义,以及兰坪—思茅地体中部弧形反S形构造部位的成因。

1 构造背景及样品采集

兰坪—思茅地体夹持在多个重要的构造单元之间(图1),西侧以崇山断裂为界与保山地体和腾冲地体相邻,西南侧以临沧花岗岩带为界与掸泰地体相邻,北侧和东侧以金沙江—哀牢山—红河断裂为界与川滇地体相邻。地体北东缘边界金沙江—哀牢山—红河断裂带和澜沧江断裂带构造行迹平直;而西南缘边界崇山—澜沧江缝合带侧呈波状延伸,其中段发生急剧弯转向南成反S状(孙艳云等, 2015; 程杨等, 2015; 方勤方等, 2015),内部白垩纪至古近纪红层广泛发育近NNW—SSE向逆冲走滑断层与褶皱系。

兰坪—思茅地体内部白垩纪地层平行不整合于侏罗纪地层之上,由下至上可依次划为下白垩统景星组、南新组和上白垩统虎头寺组,各组地层间均为整合接触。景星组地层根据岩性可分为两段,下段(K_1j^1)为灰白色砂岩与紫红色泥岩互层,富含早白垩世早期的双壳类(*Koreanaia yunnanensis*、*Nakamuraia mojiangensis*)和介形类化石(*Mantelliana hepingxiangensis*、*Darwinula contracta*);上段(K_1j^2)为紫红色泥岩和粉砂岩,生物化石少见(云南省地质矿产局, 1990)。南新组为一套红色河湖相沉积,由下往上泥质增多,主要特征是大套紫色块状砂岩发育,根据岩性也可分为两段,下段(K_1n^1)岩性较粗,以紫红色砂岩、砾岩为主,夹泥质粉砂岩和砂岩等,生物化石少见;上段(K_1n^2)岩性较细,主要为紫红色泥岩、砂岩,偶夹有含砾粗砂岩,富含早白垩时期双壳类、介形虫、轮藻类及腹足类、叶肢介、昆虫等化石组合。虎头寺组(K_2h)平行整合于南新组之上,岩性以灰白色中至厚层状细粒石英砂岩、含长石石英砂岩,夹有紫红色细砂岩和泥岩,其与上覆古新统云龙组地层为平行不整合接触(1:25万巍山幅区调报告, 2008)。

本次研究选择南涧地区白垩纪地层出露较好的

两个采样区进行构造磁学研究,共设置四条古地磁采样剖面(图2a)。小湾镇采样区位于南涧县城至小湾镇公路上,在地层出露较好的早白垩世景星组下段(NX-a剖面, K_1j^1) (NX7 ~ NX12) ($25^{\circ}01.7'N$, $100^{\circ}28.2'E$)和景星组上段(NX-b剖面, K_1j^2) (NX1 ~ NX6) ($24^{\circ}57.9'N$, $100^{\circ}21.1'E$),各采集6个采点,共71个样品,其中NX-a剖面(K_1j^1 段, 31个样品)位于轴向近南北向斜的西翼, NX-b(K_1j^2 段, 40个样品)剖面位于轴向近东西向的向斜北翼,样品岩性均以紫红色泥质粉砂岩为主(图2b)。牛街采样区位于南涧市龙街至牛街公路旁($24^{\circ}54.1'N$, $100^{\circ}41.3'E$),在地层出露较好的下白垩世景星组下段(LN-a剖面, K_1j^1)和南新组上段(LN-b剖面, K_1n^2),分别采集了4个(LN9 ~ LN12, 48个样品)和8个采点(LN1 ~ LN8, 93个样品),采点位于轴向近南北向同一向斜两翼,样品岩性以紫红色泥质粉砂岩或紫红色泥质石英细砂岩为主(图2c)。

所有样品均使用便携带式汽油钻机沿剖面从地层底部向顶部依次钻取,岩芯直径为25.4 mm,长度一般为50 mm左右,并用磁罗盘和岩芯定向器定向,所有采点均用GPS进行定位。每个采样点的现代地磁场方向都使用国际参考地磁场方向(International Geomagnetism Reference Field)(Finlay et al., 2010)进行了校正。

2 古地磁样品测试及结果

古地磁样品的加工及测试工作均在中国地质科学院地质力学研究所国土资源部古地磁与古构造重建重点实验室完成。每个岩芯样品都被加工成两块高为23 mm、直径为25.4 mm的标准样品。首先根据采点分布情况和样品岩性,挑选代表性样品进行等温剩磁及反向场退磁和三轴等温剩磁热退磁分析等岩石磁学实验,通过揭示磁性矿物的矫顽力和解阻温度来鉴别样品中的主要载磁矿物及其组合类型;之后根据岩石磁学结果,合理的设定热退磁步骤,并对所有样品进行热退磁实验,以此获得样品的原生特征剩磁。所有岩石磁学实验和热退磁实验均在磁屏蔽空间中进行。

2.1 岩石磁学结果

等温剩磁(IRM)及反向场退磁实验中样品的充磁和退磁使用美国ASC Scientific Inc.公司生产的IM-10-30脉冲充磁仪完成,同时用捷克制JR-6A型数字旋转磁力仪进行测试;三轴等温剩磁热退磁实验使用美国ASC Scientific Inc.公司生产的IM-10-

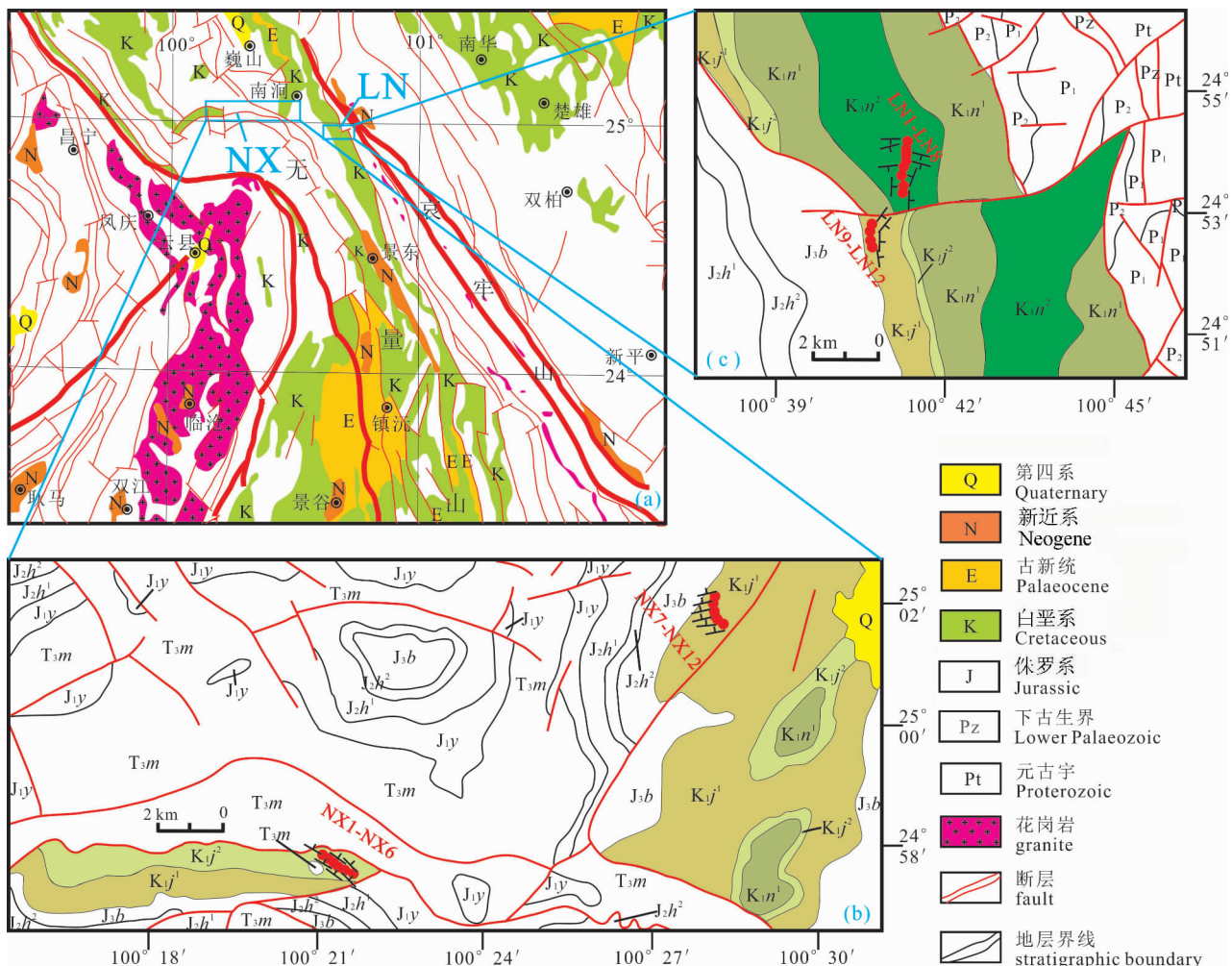


图2 (a) 兰坪—思茅地体中部地质简图,方框指示了图(b)、(c)的位置;(b)兰坪—思茅地体反 S 形构造南涧小湾镇地区两剖面地质简图及古地磁采点分布情况;(c)兰坪—思茅地体反 S 形构造南涧牛街地区两剖面地质简图及古地磁采点分布情况

Fig. 2 (a) Simplified geological map of the central part of the Lanping—Simao Terrane. The rectangle indicates the position of graphs (b) and (c); (b) Simplified geological map showing the distribution of the Xiaowanzhen sampling sites in Nanjian; (c) Simplified geological map showing the distribution of the Niujie sampling sites in Nanjian

J_3b —坝注路组; K_{1j}^1 —景星组下段; K_{1j}^2 —景星组上段; K_1n^2 —南新组上段; K_1n^1 —南新组下段; J_2h^1 —花开左组下段; J_2h^2 —花开左组上段; P_1 —下二叠统; P_2 —上二叠统; T_3m —三叠纪麦初箐组; J_1y —漾江组

J_3b —the Bazhulu Formation; K_{1j}^1 —the lower member of the Jingxing Formation; K_{1j}^2 —the upper member of the Jingxing Formation; K_1n^2 —the upper member of the Nanxin Formation; K_1n^1 —the lower member of the Nanxin Formation; J_2h^1 —the lower member of the Huakaizuo Formation; J_2h^2 —the upper member of the Huakaizuo Formation; P_1 —Lower Permian; P_2 —Upper Permian; T_3m —the Maichuqing Formation; J_1y —the Yangjiang Formation

30 脉冲充磁仪充磁(所加外场 Z 轴方向为 2.4 T, X 轴方向为 0.4 T, Y 轴方向为 0.12 T),由美制 TD-48 大型热退磁仪分步退磁,同时捷克制 JR-6A 型数字旋转磁力仪完成每步对应的剩磁测试工作。

岩石磁学实验结果见图 3。四个代表性样品分别为牛街地区 LN-b 剖面的紫红色泥质粉砂岩(LN8-5)、LN-a 剖面紫红色泥质石英细砂岩(LN9-

11)和小湾镇地区 NX-b 剖面紫红色泥质粉砂岩(NX5-1)、NX-a 剖面紫红色泥质粉砂岩(NX10-2)。四块样品的岩石磁学结果具有相似性,在 IRM 获得曲线实验中,IRM 强度随外部直流场的增加而逐步增大,至 2.5 T 时仍未达到饱和状态,施加反向直流场过程揭示最大剩磁矫顽力在 500 ~ 800 mT 之间,表明主要载磁矿物为赤铁矿。三轴等温剩磁热退磁

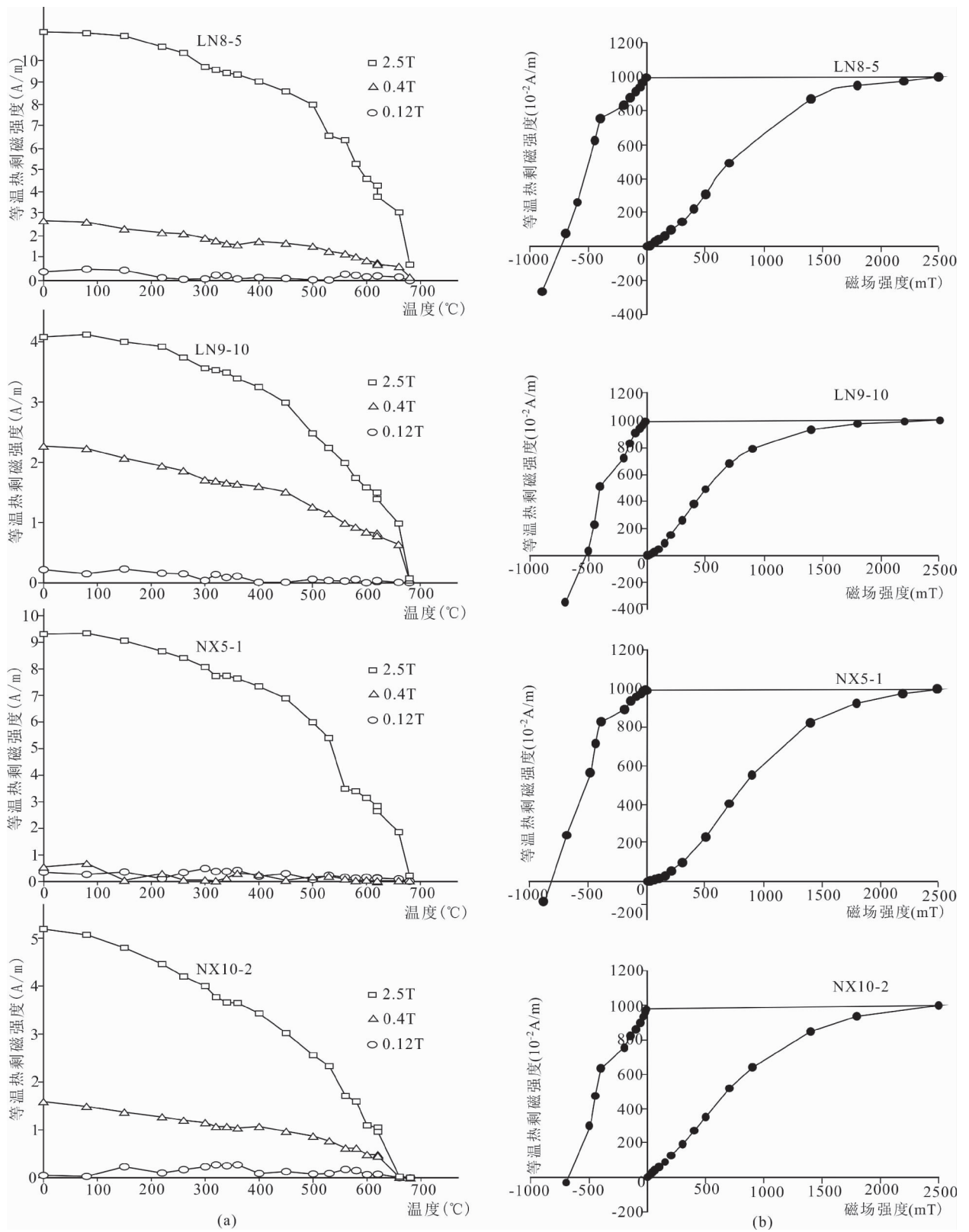


图 3 (a) 牛街地区、小湾镇地区代表性样品三轴等温剩磁退磁实验结果；
 (b) 牛街地区、小湾镇地区代表性样品 IRM 获得曲线及反向场退磁曲线

Fig. 3 (a) The three-component IRM thermal demagnetization curves for representative samples of the Niujie and Xiaowanzhen areas; (b) IRM acquisition curves and SIRM back-field demagnetization curves for representative samples of Niujie and Xiaowanzhen areas

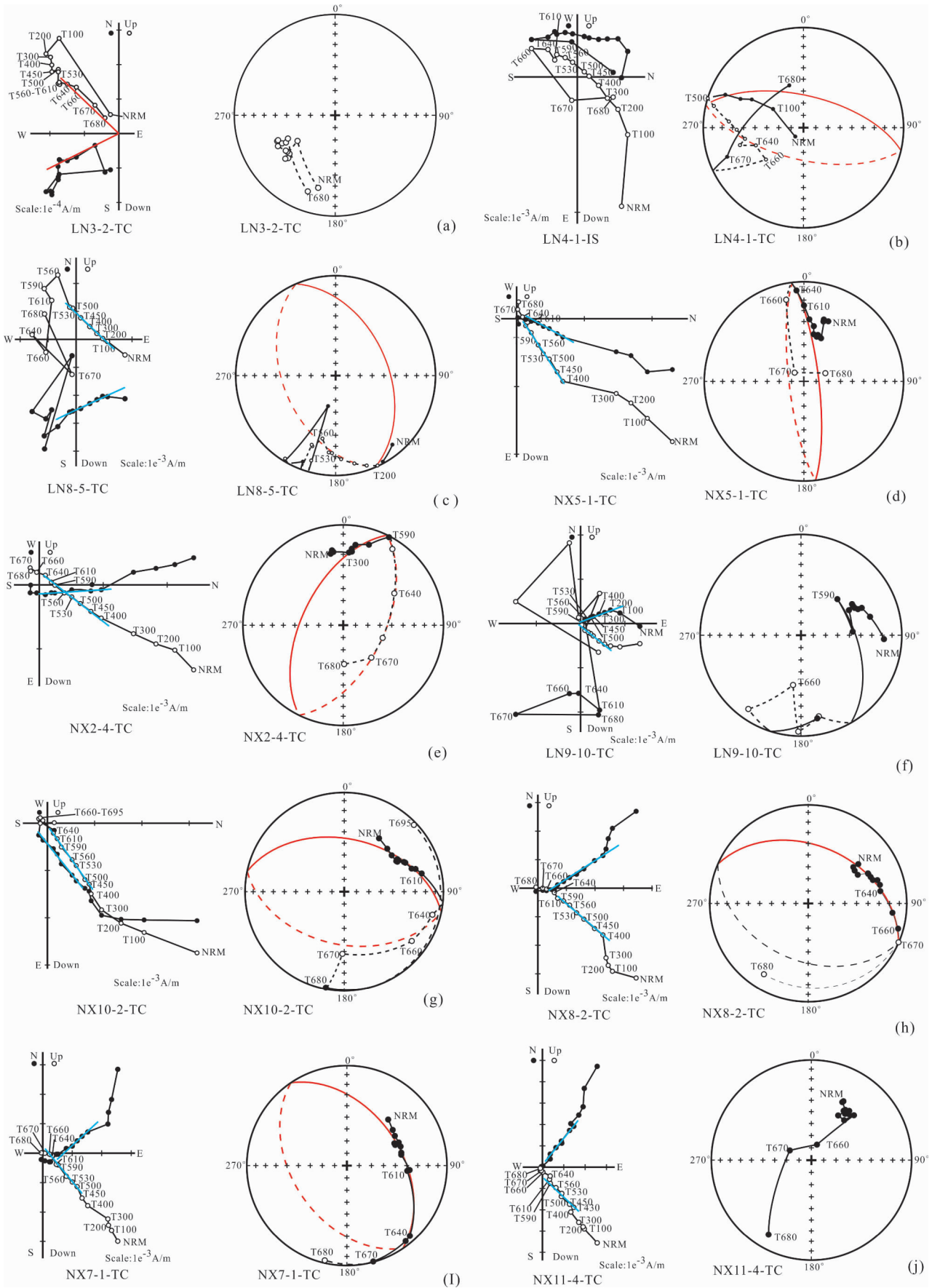


图 4 南涧牛街、小湾镇地区代表性样品系统热退磁结果 Z 氏图和赤平投影图

Fig. 4 The Zijderveld diagrams of thermal demagnetization results for the representative samples of the Niujie and Xiaowanzhen sections
 ●—代表水平投影; ○—代表垂直投影
 ●—vector endpoints projected onto the horizontal planes after tilt correction; ○—vector endpoints projected onto the vertical planes after tilt correction

实验显示当热退磁温度高于 680 °C 后,硬磁组分和中间磁组分剩磁强度突降为零,表明样品的主要载磁矿物为高矫顽力的赤铁矿。另外 NX5-1 和 LN8-5 样品的硬磁组分在 540 ~ 580 °C 出现明显拐点,显示了磁铁矿的信息。因此,可以确定南涧地区小湾镇和牛街地区样品中主要载磁矿物为赤铁矿,并含有少量磁铁矿。

2.2 热退磁结果

所有样品的热退磁实验均由美制 TD-48 大型热退磁仪完成,从室温至 680 °C 经过了 16 步以上的系统热退磁处理,热退磁的温度区间在低温段较大(50 ~ 100 °C),高温段较小(10 ~ 20 °C)。样品剩磁强度使用美制 2G-755 型超导磁力仪进行测试,实验在内部磁场强度低于 300 nT 的磁屏蔽室内进行。四个剖面绝大多数样品 NRM 强度通常为 5×10^{-5} A/m ~ 9×10^{-5} A/m。样品的热退磁特征通过 Zijderveld (1967) 的 Z 氏图进行展示,剩磁分量利用 Kirschvink (1980) 主向量分析法或使用 McFadden and McElhinny (1988) 重磁化大圆弧交汇法进行磁化分量分离,采点乃至剖面的剩磁方向采用球面单位矢量 Fisher (1953) 统计平均。古地磁退磁数据处理使用了 Enkin 等 (1994) 开发设计的 KIRSCH、PMSTAT、PMCALC 程序。

图 4 给出了牛街研究区、小湾镇研究区四个剖面部分代表性样品的系统热退磁矢量正交投影图。系统热退磁实验显示几乎所有样品都在 680 °C 左右解阻,表明赤铁矿为样品剩余磁性的主要载体,与岩石磁学试验结果一致。样品的退磁结果可分为 3 类,第一类集中在牛街 LN-b 剖面的前两个采点(LN1 和 LN2 采点),由于 NRM 强度较小,热退磁过程中剩磁分量方向杂乱,未能分离出特征剩磁分量。第二类样品仅在牛街剖面中存在,在 LN-a 和 LN-b 的 12 块样品中展现,退磁结果表现为双磁分量(图 4a),低温剩磁分量在 300 °C 之前分离出来,随着温度升高剩磁方向呈线性趋向原点,至 660 °C 左右主向量分析法分离出高温分量。第三类样品表现为牛街两剖面的大部分样品和小湾镇两剖面的所有样

品,由三个磁化分量组成:300 °C 以下的低温磁化分量,300 ~ 580 °C 的中温磁化分量和 580 ~ 680 °C 之间的高温磁化分量,大部分该类样品可很好的分离出这三个剩磁分量(图 4c、4d、4f、4g、4h),但也有少量样品仅能分离出两个剩磁分量(图 4b、4e)。所有高温分量分离时的剩磁强度都达到了 10^{-5} A/m 左右,远高于测试仪器测试精度,保证了高温分量免受测试仪器测试本底值的干扰。虽然绝大多数样品高温剩磁分量是通过大圆弧拟合方法分离获得(4b、4c),但是大圆弧交汇结果与其它小部分样品通过主向量分析法获得的高温剩磁分量方向基本一致(图 4a),这证明了大圆弧拟合分析结果的可靠性。

牛街地区两剖面少部分样品在 300 °C 以下分离出的低温剩磁分量,但其方向分散,不具有统计意义。本剖面早、晚白垩世地层共有 12 个采点,其中十个采点分离出了有效的中高温剩磁分量。由于各剖面采点数较少,所以将早白垩世 LN-a 和 LN-b 剖面一起统计并进行褶皱检验。在 300 ~ 580 °C 的热退磁温度区间,可从 9 个采点的样品中利用主向量分析法分离出中温磁化分量。以采点为单位进行 Fisher 统计后,其平均方向在地层校正前为 $D_g = 20.5^\circ, I_g = 48.3^\circ, K_g = 120.7, \alpha_{95} = 4.7^\circ, N = 9$; 地层校正后为 $D_s = 60.0^\circ, I_s = 54.7^\circ, K_s = 13.1, \alpha_{95} = 14.8^\circ, N = 9$ (图 5a、5b,表 1)。褶皱检验显示其在置信度为 95% 和 99% 下褶皱检验结果均为负(McFadden, 1990),说明该分量是褶皱后获得的。在 600 ~ 680 °C 的热退磁温度区间,可从 10 个采点的样品中(12 块样品为主向量分析法,其他样品为大圆弧拟合方法获得)较好的分离出高温剩磁分量(图 5c、5d;表 1)。平均方向在地层产状校正前为 $D_g = 204.3^\circ, I_g = -49.4^\circ, K_g = 11.9, \alpha_{95} = 14.6^\circ, N = 10$,地层校正后为 $D_s = 245.1^\circ, I_s = -46.9^\circ, K_s = 47.1, \alpha_{95} = 7.1^\circ, N = 10, K_s/K_g = 3.47609 > F(18, 18) = 2.94$,在 99% 置信度下通过 McElhinny (1964) 褶皱检验。对高温分量进行 McFadden (1990) 褶皱检验,结果显示地层校正前 $\zeta_{1(\text{in situ})} = 6.002$,地层校正后 $\zeta_{1(\text{tilt corrected})} = 1.120$,

临界值 $\zeta_c = 5.378$, 因此在 99% 置信度下通过了 McFadden (1990) 褶皱检验。可以确定南涧牛街地区两剖面高温剩磁分量 (LN-a 剖面: $D_s = 244.7^\circ, I_s = -47.3^\circ, K_s = 31.6, \alpha_{95} = 16.6^\circ, N = 4$; LN-b 剖面: $D_s = 245.4^\circ, I_s = -46.4^\circ, K_s = 52.2, \alpha_{95} = 9.4^\circ, N = 6$) 是在本区域地层褶皱年代之前获得的。

小湾镇采样区样品采于 K_1j^1 (NX-a 剖面) 和 K_1j^2 (NX-b 剖面) 两个剖面, 其分属两个轴向不同的

褶皱 (图 2), 在 300℃ 以下分离出的低温剩磁分量较为分散, 不具统计意义。在 300~580℃ 的热退磁温度区间可从 12 个采点的样品中利用主向量分析法分离出中温剩磁分量 (表 2), 对两剖面分别进行 Fisher (1953) 统计 (图 6a, 6b), NX-a 剖面平均方向在地层校正前为 $D_g = 83.7^\circ, I_g = 48.5^\circ, K_g = 58.1, \alpha_{95} = 8.9^\circ, N = 6$, 地层校正后为 $D_s = 53.9^\circ, I_s = 43.0^\circ, K_s = 38.7, \alpha_{95} = 10.9^\circ, N = 6$; NX-b 剖面平均方向在地层校正前为 $D_g = 270.5^\circ, I_g =$

表 1 兰坪—思茅地体反 S 形构造南涧地区白垩纪古地磁采样牛街地区 (LN-a 和 LN-b 剖面) 系统热退磁剩磁方向的平均方向统计结果

Table 1 The middle and high temperature magnetization components of red bed samples collected from the Niujie sections (LN - a and LN-b sections) in Najian area from the central part of the Lanping—Simao Terrane

采点	地层	地层产状 (°)		n/N	产状校正前 (°)		产状校正后 (°)		K	α_{95} (°)
		倾向	倾角		D_g	I_g	D_s	I_s		
中温剩磁分量										
LN3	K_1n^2	194	25	9/12	29.5	53.7	52.7	74.1	55.9	10.7
LN4	K_1n^2	195	27	10/13	22.9	56.0	48.3	81.9	61.1	6.2
LN5	K_1n^2	174	24	9/11	33.5	50.8	68.9	65.4	65.0	6.4
LN6	K_1n^2	291	32	9/12	14.9	48.4	3.2	37.4	43.2	7.9
LN7	K_1n^2	92	37	7/10	25.4	49.5	77.5	47.8	188.7	4.4
LN8	K_1n^2	92	37	7/10	22.5	43.1	69.6	44.7	43.6	9.2
LN-b 剖面 Fisher 统计平均方向				6/6	24.6	50.4	—	—	178.0	5.0
					—	—	52.5	61.9	11.6	20.6
LN9	K_1j^1	126	58	8/13	16.4	44.6	71.0	35.1	36.6	9.3
LN10	K_1j^1	129	53	10/13	9.4	47.5	72.4	45.2	57.6	10.2
LN12	K_1j^1	82	28	9/11	13.8	39.3	62.7	40.1	145.6	10.3
LN-a 剖面 Fisher 统计平均方向				3/3	13.3	43.8	—	—	279.1	7.4
					—	—	68.7	40.2	158.8	9.8
牛街两个剖面 Fisher 统计平均方向				9/12	20.5	48.3	—	—	120.7	4.7
					—	—	60.0	54.7	13.1	14.8
高温剩磁分量										
LN3	K_1n^2	194	25	9/12	241.6	-26.7	254.3	-40.9	64.9	8.3
LN4	K_1n^2	195	27	10/13	225.2	-28.0	238.5	-49.9	31.0	10.6
LN5	K_1n^2	174	24	9/11	215.8	-44.8	243.2	-60.0	99.7	5.6
LN6	K_1n^2	291	32	9/12	208.1	-52.9	232.0	-33.9	53.5	10.9
LN7	K_1n^2	92	37	8/10	216.8	-78.0	258.0	-45.2	65.5	7.0
LN8	K_1n^2	92	37	7/10	192.0	-73.1	247.0	-47.2	301.3	5.0
LN-b 剖面 Fisher 统计平均方向				6/6	221.4	-51.4	—	—	11.7	20.5
					—	—	245.4	-46.4	52.2	9.4
LN9	K_1j^1	126	58	9/13	201.0	-41.2	248.1	-31.0	132.9	6.4
LN10	K_1j^1	129	53	9/13	176.7	-55.5	264.7	-53.2	70.0	8.8
LN11	K_1j^1	91	27	10/11	174.9	-35.8	231.3	-53.4	63.1	9.0
LN12	K_1j^1	82	28	10/11	181.1	-36.4	234.5	-48.8	54.0	6.8
LN-a 剖面 Fisher 统计平均方向				4/4	183.6	-42.7	—	—	40.4	14.6
					—	—	244.7	-47.3	31.6	16.6
牛街两个剖面 Fisher 统计平均方向				10/12	204.3	-49.4	—	—	11.9	14.6
					—	—	245.1	-46.9	47.1	7.1

注: n/N 为参加统计的样品数和实测样品数; $D_g, I_g (D_s, I_s)$ 分别为地理坐标下 (地层坐标下) 的磁偏角和磁倾角; K 为 Fisher (1953) 统计。精度参数; α_{95} 为 95% 置信度下圆锥半顶角; K_1j^1, K_1n^2 见图 2。

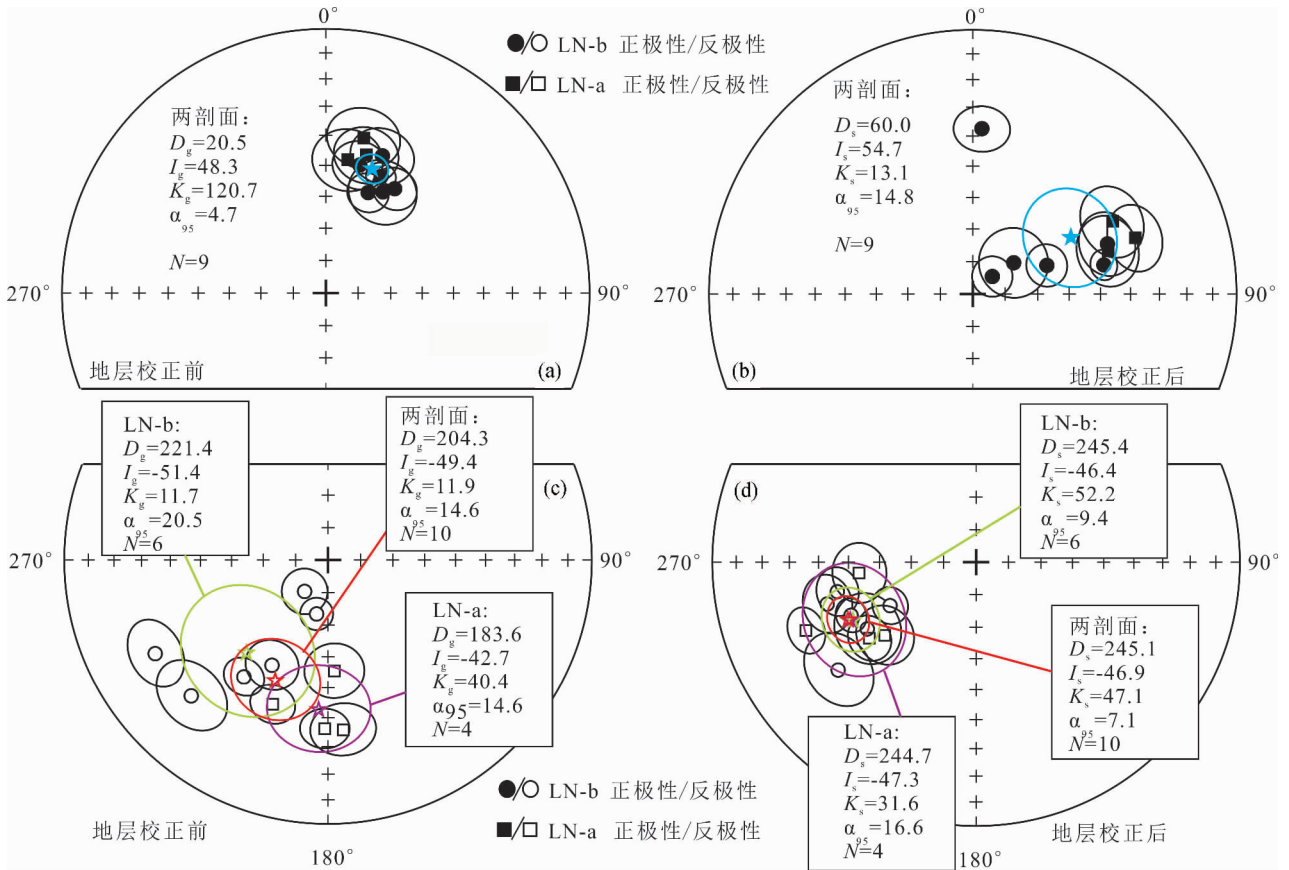


图 5 牛街采样区 (LN-a 和 LN-b 剖面) 剩磁分量等面积投影图: (a)、(b) 中温; (c)、(d) 高温

Fig. 5 Equal-area projections of middle-temperature (a), (b) and high-temperature (c), (d) component of the Niujie sections
五角星代表各剖面中温和高温剩磁平均古地磁方向

The stars represent the mean middle-temperature and the high-temperature paleomagnetic directions of the two sampling sections

67.9°, $K_g = 45.4, \alpha_{95} = 10.0^\circ, N = 6$, 地层校正后为 $D_s = 10.0^\circ, I_s = 42.2^\circ, K_s = 55.3, \alpha_{95} = 9.1^\circ, N = 6$, 由于各剖面内部采点间地层产状变化不大, 且采点较少, 无法进行褶皱检验, 不能确定中温剩磁获得年代是否早于褶皱形成年代。在 580 ~ 680 °C 的热退磁温度区间, 共从 11 个采点的样品中利用大圆弧拟合法分离出高温剩磁分量 (表 2), 分别对隶属不同褶皱的两剖面的高温分量进行 Fisher 统计, NX-a 剖面平均方向在地层校正前为 $D_g = 269.5^\circ, I_g = -41.2^\circ, K_g = 495.7, \alpha_{95} = 3.4^\circ, N = 5$, 地层校正后为 $D_s = 244.9^\circ, I_s = -40.2^\circ, K_s = 1067.5, \alpha_{95} = 2.3^\circ, N = 5$; 而 NX-b 剖面平均方向在地层校正前为 $D_g = 95.4^\circ, I_g = -61.2^\circ, K_g = 119.9, \alpha_{95} = 6.1^\circ, N = 6$, 地层校正后为 $D_s = 182.6^\circ, I_s = -42.1^\circ, K_s = 335.2, \alpha_{95} = 3.7^\circ, N = 6$ (图 6c, 6d)。NX-a 剖面采样地层产状较为统一, 无法进行褶皱检验。NX-b 剖面各采点同样由于较为一致的地层产状无

法进行褶皱检验。虽然两剖面的采样地层产状不同, 但是, 两条剖面的古磁偏角存在明显差别, 表明两条剖面间存在差异性旋转变形, 因此无法将两条剖面数据放在一起进行褶皱检验。但是, 两个剖面都显示其平均剩磁方向统计精度参数 K 值在地层校正前明显小于校正后的 K 值, 且校正前的 α_{95} 值明显大于校正后的 α_{95} 值, 表明其应当为褶皱前获得的剩磁。若对隶属不同褶皱两个剖面的所有有效采样点进行磁倾角的 Fisher 统计, 结果显示 11 个采样点校正前 $I_g = -51.8^\circ, K_g = 29.1, \alpha_{95} = 8.6^\circ$, 地层校正后 $I_s = -41.2^\circ, K_s = 351.7, \alpha_{95} = 2.4^\circ$, 可以发现地层校正后的 K 值显著增大, α_{95} 显著减小, 表明高温剩磁分量应为褶皱前获得。另外, NX-a 剖面与小湾镇两个剖面所处的褶皱轴向相近, 地层校正后的高温剩磁平均方向也保持一致 (图 5d、图 6d), 也表明小湾镇两剖面高温剩磁分量应当为褶皱前获得。

兰坪—思茅地体白垩纪地层褶皱作用发生时代为中—晚始新世时期(云南省地质矿产局,1990;张海峰等,2012),表明牛街研究区的 LN-a、LN-b 剖面和小湾镇研究区的 NX-a、NX-b 剖面的高温剩磁分量获得时间早于晚始新世,应代表岩石沉积过程中获得的沉积剩磁。

3 讨论

新生代时期由于欧亚板块和印度板块间的碰撞和持续挤压作用,兰坪—思茅地体内部自北向南发育一系列由褶皱轴和断裂带组成的构造形迹。兰坪及其以北地区构造行迹主要为近南北延伸;兰坪至巍山地区,构造行迹逐渐转变为近北西向,构造线迹延伸方向基本平行于红河断裂带展布,同时发育一

表 2 兰坪—思茅地体反 S 形构造南涧地区白垩纪古地磁采样小湾镇地区 (NX-a 和 NX-b 剖面) 系统热退磁剩磁方向的平均方向统计结果

Table 2 The middle and high temperature magnetization components of red bed samples collected from the Xiaowanzen sections (NX-a and NX-b sections) in Najian area from the central part of the Lanping—Simao Terrane

采点	地层	地层产状(°)		n/N	产状校正前(°)		产状校正后(°)		K	α_{95} (°)
		倾向	倾角		D_g	I_g	D_s	I_s		
中温剩磁分量										
NX1	K_{1j}^2	30	68	7/8	257.8	60.1	0.0	42.9	170.7	8.8
NX2	K_{1j}^2	30	59	6/6	262.5	62.7	1.4	40.3	90.5	5.1
NX3	K_{1j}^2	36	60	5/5	262.9	61.7	3.1	50.4	138.2	5.1
NX4	K_{1j}^2	36	52	5/5	219.5	79.6	35.1	42.2	128.9	6.4
NX5	K_{1j}^2	46	44	7/7	296.1	65.5	9.5	38.2	75.6	7.0
NX6	K_{1j}^2	46	54	9/9	302.0	67.9	11.0	35.3	32.9	10.7
NX-b 剖面 Fisher 统计平均方向				6/6	270.5	67.9	—	—	45.4	10.0
					—	—	10.0	42.2	55.3	9.1
NX7	K_{1j}^1	347	30	5/5	86.7	47.5	54.9	44.1	129.2	6.8
NX8	K_{1j}^1	347	30	5/5	89.4	46.9	57.4	44.9	135.7	7.9
NX9	K_{1j}^1	347	30	6/6	80.7	46.7	51.6	40.7	99.4	7.7
NX10	K_{1j}^1	347	30	5/5	84.8	47.5	53.6	43.2	119.7	7.0
NX11	K_{1j}^1	355	36	5/5	73.2	35.7	54.0	22.0	92.7	9.6
NX12	K_{1j}^1	349	20	5/5	93.1	65.5	50.7	62.8	124.5	5.5
NX-a 剖面 Fisher 统计平均方向				6/6	83.7	48.5	—	—	58.1	8.9
					—	—	53.9	43.0	38.7	10.9
高温剩磁分量										
NX1	K_{1j}^2	30	68	7/8	86.0	-59.3	178.8	-38.5	227.2	9.7
NX2	K_{1j}^2	30	59	6/6	77.2	-60.4	182.4	-39.2	201.6	8.5
NX3	K_{1j}^2	36	60	5/5	96.2	-66.6	186.3	-44.2	557.9	2.5
NX4	K_{1j}^2	36	52	4/5	117.5	-62.2	181.4	-37.9	125.9	5.9
NX5	K_{1j}^2	46	44	7/7	99.2	-58.6	184.5	-46.2	91.9	7.7
NX6	K_{1j}^2	46	54	8/9	97.6	-56.8	182.6	-46.5	82.0	10.9
NX-b 剖面 Fisher 统计平均方向				6/6	95.4	-61.2	—	—	119.9	6.1
					—	—	182.6	-42.1	335.2	3.7
NX7	K_{1j}^1	347	30	5/5	270.2	-38.7	245.3	-39.1	100.0	11.2
NX8	K_{1j}^1	347	30	5/5	266.0	-41.3	239.9	-39.1	82.3	7.6
NX9	K_{1j}^1	347	30	5/6	273.6	-38.9	247.2	-41.0	95.5	8.2
NX10	K_{1j}^1	347	30	5/5	265.4	-44.1	247.0	-41.0	141.9	10.9
NX12	K_{1j}^1	349	20	5/5	272.2	-42.9	245.2	-40.8	189.2	5.4
NX-a 剖面 Fisher 统计平均方向				5/6	269.5	-41.2	—	—	495.7	3.4
					—	—	244.9	-40.2	1067.5	2.3
小湾镇研究区两剖面磁倾角 Fisher 统计平均方向				11/12	—	-51.8	—	—	29.1	8.6
					—	—	—	-41.2	351.7	2.4

注: n/N 为参加统计的样品数和实测样品数; D_g, I_g, D_s, I_s 分别为地理坐标下和地层坐标下的磁偏角和磁倾角; K 为 Fisher(1953) 统计精度参数; α_{95} 为 95% 置信度下圆锥半顶角; K_{1j}^1, K_{1j}^2 见图 2。

系列近东南向的走滑断裂带,并错断了近北西向的构造形迹;中部巍山至镇沅地区是兰坪—思茅地体

(Sato et al., 1999; 2007; 张海峰等, 2012; Tong Yabo et al., 2013)。本次研究同样选取华南板块稳

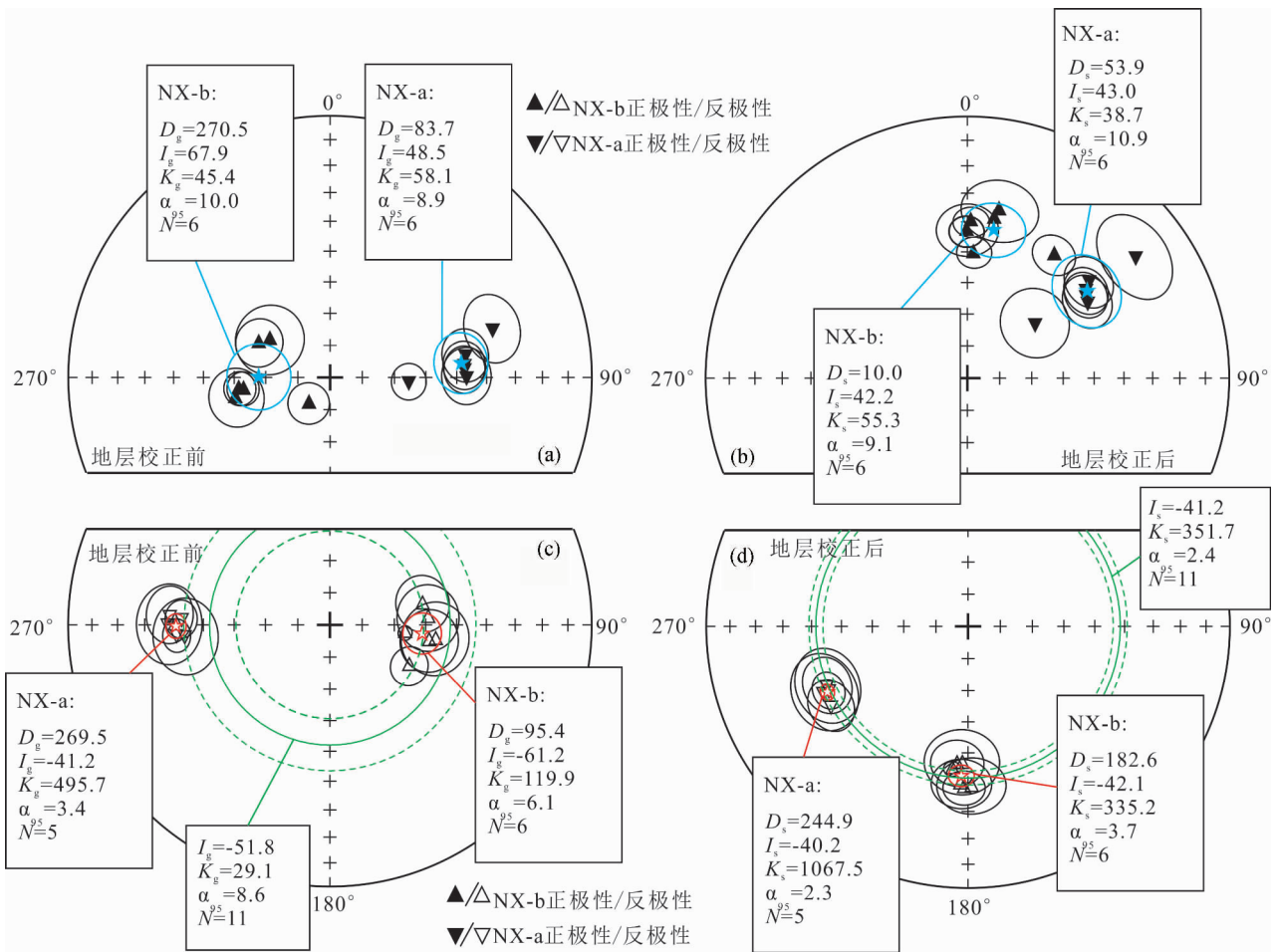


图 6 小湾镇采样区(NX-a 和 NX-b 剖面)中温(a)、(b)和高温(c)、(d)剩磁分量等面积投影图
Fig. 6 Equal-area projections of middle-temperature (a), (b) and high-temperature (c), (d) component of the Xiaowan sections

五角星分别代表两个剖面中温和高温剩磁平均古地磁方向;(c)、(d)图中的弧线为两个剖面的平均磁倾角方向

The stars represent the mean middle-temperature and the high-temperature paleomagnetic directions of the two sampling sections. Arcs on the (c) and (d) graphs represent the mean inclinations of the two sampling sections

内部构造变形最为强烈的地区,本区域一系列褶皱和断裂组成了形态特征极为显著的反 S 型状的弧形构造带形式;镇沅至最南边的景洪地区,构造形迹延伸方向与兰坪—巍山地区的相近,为近北西向,主构造线行迹延伸方向与红河断裂带的展布一致;最东南边的江城至绿春地区构造形迹大体上沿北西向展布(云南省地质矿产局,1990)(图 1b)。

白垩纪以来由于华南板块未遭受明显的陆内构造变形(Morinaga and Liu, 2004; Zhu Zongmin et al., 2006; Tsuneki et al., 2009),且与兰坪—思茅地体相邻,因此常被选做参考极来进行青藏高原东南缘区域白垩纪以来构造变形的古地磁学研究

定区的古地磁极作为参考古地磁极(Yang Zhenyu et al., 2001),来讨论兰坪—思茅地体反 S 形构造地区白垩纪以来的旋转变形运动。白垩纪地层可分为三个极性段:早白垩世早期的混合极性带(145 ~ 125.5 Ma);早白垩世中晚期至晚白垩世中期的超静磁正极性带(125.5 ~ 83.5 Ma);晚白垩世中期之后的混合极性带(83.5 ~ 65.5 Ma)(Ogg et al., 2004)。在南涧地区四个剖面中采集的三套地层(K_{1j}^1 、 K_{1j}^2 、 K_1n^2)古地磁样品的原生剩磁分量均显示为负极性,表明 K_{1j}^1 、 K_{1j}^2 和 K_1n^2 三套地层样品均形成于早白垩世早期的混合极性带(145 ~ 125.5 Ma),根据 Yang Zhenyu 等(2001)获得的华南板块

稳定区白垩纪古地磁极,计算得牛街地区 LN-a 剖面 (K_1j^1 段地层) 相对于华南稳定区发生了 $51.5^\circ \pm 12.6^\circ$ 的顺时针旋转, LN-b 剖面 (K_1n^2 段地层) 相对于华南稳定区发生了 $52.2^\circ \pm 8.7^\circ$ 的顺时针旋转 (表 3), 本结果与仝亚博等 (2014b) 从巍山地区获得的顺时针旋转量基本一致 ($46.7^\circ \pm 6.6^\circ$)。同时计算得小湾镇地区 NX-a 剖面 (K_1j^1 段地层) 相对于华南稳定区发生了 $51.7^\circ \pm 3.7^\circ$ 的顺时针旋转运动, NX-b 剖面 (K_1j^2 段地层) 相对于华南稳定区发生了 $10.6^\circ \pm 4.6^\circ$ 的逆时针旋转运动 (表 3)。

为了进一步探讨兰坪—思茅地体中部弧形反 S 形构造部位差异性旋转与弧形构造带的关系, 本文使用线性回归分析法 (Van der Voo et al., 1980; Schwartz and Vander Voo, 1983, 1984) 来分析构造旋转变形与弧形构造带的相关关系。前人在研究兰坪—思茅地体构造旋转与弧形构造关系时, 均采用构造形迹方向平直、新生代时期受周缘构造作用影响较小的红河断裂带中段作为研究区初始构造线行迹参考方向 ($Sr = 145^\circ$) (Tanaka et al., 2008; Kondo et al., 2012; Tong Yabo et al., 2013; Gao Liang et al., 2015)。但是, 由于红河断裂带位于兰坪—思茅地体外侧, 其是否能充分代表地体内部构造线行迹的原生方向还不得而知。对兰坪—思茅地体内部构造线行迹的系统分析显示, 兰坪—思茅地体北端的兰坪地区至地体最南端的景洪地区, 构造

线行迹总体表现为北西向展布, 仅在地体中部反 S 型构造区域发生巨大变化, 由此将地体内部构造线行迹总体方向作为研究区构造线行迹的参考原生方向 ($Sr = 150^\circ$)。对兰坪—思茅地体反 S 形构造区 (巍山至镇沅) 已有古地磁数据进行总结, 同时统计了各研究区白垩纪以来相对于华南构造稳定区发生的旋转变形量 (图 7, 表 3)。兰坪—思茅地体反 S 形构造部位白垩纪地层褶皱发育, 褶皱轴向明显呈线性伸展, 以褶皱轴向为基础统计了各古地磁研究区主要构造形迹行迹的伸展方向 (Sa)。以各古地磁采样剖面构造形迹行迹的变化量 ($Sr - Sa$) 为横坐标, 以各古地磁研究区白垩纪以来相对于华南板块构造稳定区的旋转变形量为纵坐标, 通过线性回归分析法 (Van der Voo, 1990), 计算得出兰坪—思茅地体中部反 S 形构造部位磁偏角变化量和构造线行迹变化量间的相关系数为 $R = 0.9649$ (图 8)。较高的线性相关性表明兰坪—思茅地体中部的弧形反 S 形构造的形成和演化受控制于本区域地壳构造的差异性旋转变形。

牛街 LN-a、LN-b 和巍山 (仝亚博等, 2014b) 采样区位于兰坪—思茅盆地的东部边缘 (图 7)。兰坪—思茅盆地东部褶皱轴和断层所构成的构造线迹方向基本沿 NNW (北北西) 向伸展, 极少发育其他方向的构造线迹, 表明地体东部线性构造是受同一期构造挤压作用的结果。LN-a 和 LN-b 剖面分布于

表 3 兰坪—思茅地体中部反 S 形构造区白垩纪古地磁数据及构造线迹方向统计对比结果

Table 3 Available Cretaceous paleomagnetic and tectonic line directions for the middle part of Lanping—Simao Terrane

研究区	剖面位置		地层	N(n)	实测结果			极位置			旋转变形 (°)	参考极	Sa	Sr—Sa	参考文献
	纬度 (°N)	经度 (°E)			Dec. (°)	Inc. (°)	α_{95}	Lat. (°N)	Lon. (°E)	A_{95}					
五印	25.1	100.1	K_1	7(45)	15.4	44.8	4.6	76.2	184.2	4.6	$+0.8 \pm 5.4$	B	75	75	仝亚博等, 2014b
巍山	25.3	100.4	K_2	18(177)	64.3	48.5	4.7	33.5	170.5	5.0	$+46.7 \pm 6.0$	A	172	-22	仝亚博等, 2014b
NX-b	24.95	100.35	K_1j^1	6(37)	182.6	-42.1	3.7	87.6	204.9	3.7	-10.6 ± 4.6	C	90	60	本次研究
NX-a	25.0	100.46	K_1j^1	5(25)	244.9	-40.2	2.3	31.2	177.8	2.3	$+51.7 \pm 3.7$	C	185	-35	本次研究
LN-b	24.9	100.7	K_1n^2	6(52)	245.4	-46.4	9.4	32.0	172.4	9.9	$+52.2 \pm 8.7$	C	173	-23	本次研究
LN-a	24.9	100.7	K_1j^1	4(38)	244.7	-47.3	16.6	32.8	171.7	16.6	$+51.5 \pm 12.6$	C	173	-23	本次研究
镇沅	23.9	101.1	K_1	8(71)	52.4	45.5	6.3	42.9	175.9	6.4	$+38.0 \pm 6.5$	B	167	-17	张海峰等, 2012
镇沅	24.0	101.0	K_{1-2}	7(55)	61.8	46.1	8.1	38.0	173.2	8.3	$+47.4 \pm 7.9$	B	167	-17	Tanaka et al., 2008
景东	24.5	100.8	K_2	13(102)	8.3	48.8	7.7	81.0	153.7	8.2	-6.2 ± 7.9	B	100	50	Tanaka et al., 2008
华南板块稳定区古地磁极	A: 83.5 ~ 65.5 Ma 平均古地磁极				N = 8			Lat = 72.6°N		Long = 208.0°E		A ₉₅ = 6.5		Yang Zhenyu et al., 2001	
	B: 超净磁正极性带 (125.5 ~ 83.5 Ma) 平均古地磁极				N = 5			Lat = 76.4°N		Long = 200.4°E		A ₉₅ = 4.9		Yang Zhenyu et al., 2001	
	C: 145.5 ~ 125.5 Ma 平均古地磁极				N = 11			Lat = 76.8°N		Long = 210.2°E		A ₉₅ = 3.1		Yang Zhenyu et al., 2001	

注: K_1 为早白垩世, K_2 为晚白垩世, K_1j^1 为早白垩世景星组下段, K_1j^2 为早白垩世景星组上段, K_1n^2 为晚早白垩世南新组上段, N(n) 为参加统计的采点数 (样品数), Dec. 为磁偏角, Inc. 为磁倾角, Lat. 为古地磁极的纬度, Lon. 为古地磁极的经度, α_{95}/A_{95} 为 95% 置信度下圆锥半顶角, Sa 为研究区局部构造线迹方向, Sr 为构造线行迹参考原生方向 ($Sr = 150^\circ$)。

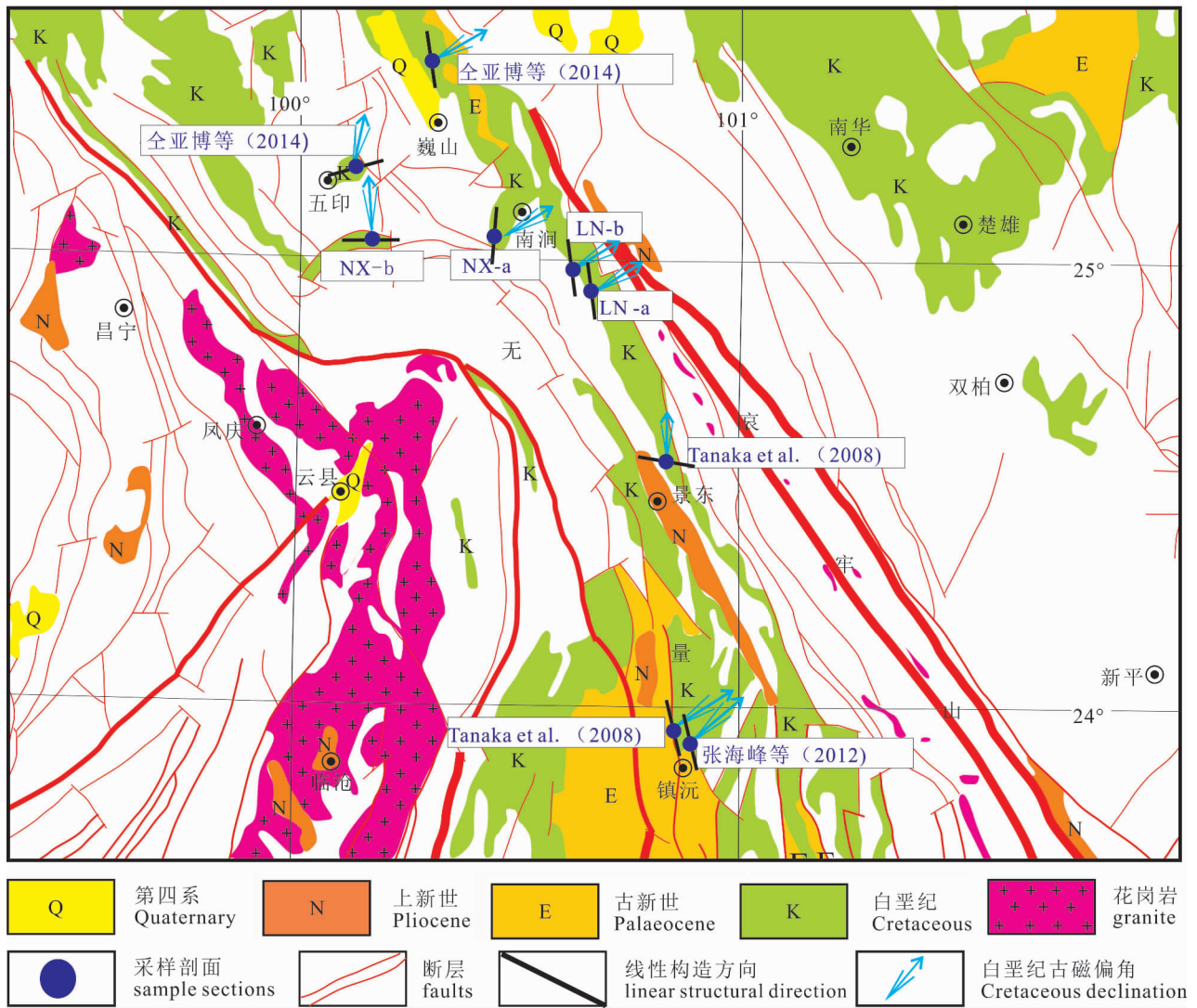


图 7 兰坪—思茅地体中部反 S 形构造部位研究区的分布及其古磁偏角 (统一为正极性场) 和局部构造形迹方向
 Fig. 7 The declinations and main linear structural directions of different paleomagnetic sampling sections in the central part of the Lanping—Simao Terrane

以白垩纪南新组为核部的向斜中,且两条剖面被走滑断层分割。巍山剖面位于以古新世云龙组为核部的向斜之中。在 LN-a 和 LN-b 剖面所在褶皱的北部地区(距牛街剖面约 20 km)古新世云龙组地层与下覆地层晚白垩世虎头寺组、南新组和早白垩世景星组整合接触。但是晚始新世—渐新世山麓河流相类磨拉石沉积的勐腊组角度不整合于南新组地层之上,表明 LN-a (景星组)和 LN-b 剖面(南新组)自晚始新世之前就已开始发生褶皱作用,其应该与喜马拉雅运动第一幕相关(云南省地质矿产局,1990)。另外,在兰坪—思茅地体其他构造线行迹为 NNW 的区域也可发现相同的地质接触关系,如兰坪、景东和墨江等。小湾镇地区 NX-a 剖面紧靠兰坪—思茅

盆地的东部边缘,与巍山剖面类似(全亚博等,2014b),位于被多条近北东向伸展的走滑断裂所切割的轴向近 NNW 向的大型褶皱之中(图 7)。因此, NX-a 剖面所在地区褶皱的形成时代与巍山剖面相同(晚始新世之前),与喜马拉雅运动第一幕相关。小湾镇地区位于大型褶皱的末端,被多条断层围限,受后期构造运动影响而成,发生了一定的顺时针旋转,轴向转变为北北东向。

景东剖面(Tanaka et al., 2008)褶皱近 NNW 向,本研究区早白垩世景星组至晚白垩世的勐野井组之间为整合接触,但两者被上新世地层角度不整合覆盖。在采样剖面西北约 25 km 处轴向相同的褶皱中可见晚始新世—渐新世的勐腊组不整合于晚白

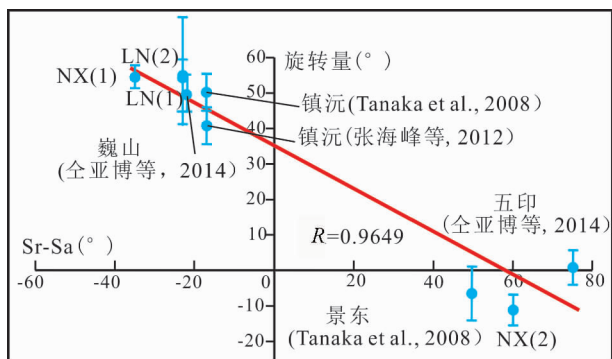


图8 兰坪—思茅地体中部反S形构造部位不同古地磁研究区磁偏角变化量与古地磁采样区构造线行迹变化量间关系分析图

Fig. 8 The correlation analysis of declination changing of each paleomagnetic sampling area and the tectonic line changing in the central Lanping—Simao Terrane

Sr, Sa—构造线迹变化量; R—线性相关系数。红线为最佳拟合线

Sr, the striking direction of reference tectonic line; Sa, the average tectonic line striking; R—the correlation coefficient. The red line is the best-fit linear regression for paleomagnetic data

垩纪地层之上,表明早白垩世景星组至晚白垩世的勐野井组地层发生褶皱的时间为晚始新世之前。景东剖面与LN-a、LN-b和巍山剖面均位于兰坪—思茅盆地的东部边缘(图7),形成时代相同,但白垩纪地层的旋转变形差异却很大,景东剖面相对于华南稳定区的旋转变形为 -6.2° ,而其他三个剖面的旋转变形为 50° 左右。对景东地区构造分析表明景东地区发育与LN-a、LN-b和巍山剖面轴向相似的NNW向褶皱,而采样区所在NWW向局部褶皱,应是采样区经历了更为复杂的局部旋转变形造成的。

小湾镇地区NX-b剖面、五印剖面(全亚博等, 2014b)和镇沅剖面(Tanaka et al., 2008; 张海峰等, 2012)分别位于轴向各不相同的褶皱之中,与其他靠近临沧花岗岩基的褶皱共同组成了一个与临沧花岗岩基弯曲形态基本一致的弧形弯曲,这表明褶皱的产生可能与临沧花岗岩基的楔入有关(Gao Liang et al., 2015)。前人对临沧花岗岩基进行的研究指出花岗岩体南部首先开始抬升冷却,并逐渐向北演化(26 - 15 Ma)(施小斌等, 2006a),由此推测临沧花岗岩基周边的弧形褶皱带应形成于中新世。兰坪—思茅地体内部普遍缺失中新世地体,上新世地层角度不整合于白垩纪地层之上。临沧花岗岩基中段东侧的景谷地区上新世地层角度不整合于渐新世地层之上,这种不整合接触关系不仅在兰坪—思茅地体内部的勐腊、维西等地区存在,在保山地体和川

滇地体中也存在(Tong Yabo et al., 2015, 2016),其应与喜马拉雅运动第二幕构造作用相关(云南省地质矿产局, 1990)。因此,兰坪—思茅地体中部地区与临沧花岗岩基轮廓形态相近的弧形褶皱轴应该是在中新世以来开始形成的。

兰坪—思茅地体西南侧以临沧花岗岩带为界与掸泰地体相邻,施小斌等(2006b)对临沧花岗岩基中二长花岗岩进行磷灰石裂变变迹研究,发现其至少经历了三期冷却事件,约36 ~ 27 Ma时期,临沧花岗岩基南部首先开始抬升,自26.5 ~ 21 Ma时期其中段和北段开始抬升,糜棱岩 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 同位素测年显示临沧花岗岩基自西向东的逆冲推覆体年龄为25.6 ~ 15.4 Ma(杨振德等, 1996);东侧和北侧以金沙江—哀牢山—红河断裂为界与川滇地体相邻,红河—哀牢山走滑断裂带的早期运动形式为左行走滑(约36 - 17 Ma),总走滑位移约700 km(Tapponnier et al., 1982; Leloup et al., 1995, 2001; Chuang et al., 1997; Gilley et al., 2003),自上新世开始(约5 Ma)转变为右行走滑断裂,走滑位移约几千米至几十千米(Tapponnier et al., 1982; Leloup et al., 1995; Wang Erchie and Burchfiel, 1997; Replumaz et al., 2003);西侧以崇山断裂为界与保山—腾冲地体相连,崇山断裂左旋走滑活动开始于34 Ma左右,结束于17 Ma(Wang Yuejun et al., 2006; Akciz et al., 2008; 王丹丹等, 2013),根据同构造变形期形成的白云母结果显示其19 ~ 14 Ma开始右旋走滑(Zhang Bo et al., 2010);地体中部反S形构造区南侧发育南汀河断裂,南汀河断裂右旋走滑于始新世时期,自上新世开始转变为左旋走滑运动(Tapponnier et al., 1982; 杨振宇等, 2001),走滑位移约40 ~ 50 km(Wang Erchie and Burchfiel, 1997),兰坪—思茅地体的陆内变形可能与这些临近地体与构造带的形成与演化密切相关。

位于兰坪—思茅地体和川滇地体之间的哀牢山—红河断裂自晚始新世—早中新世开始左旋走滑运动。保山地体东缘边界的崇山断裂自渐新世开始左旋走滑运动。因此不同地块间边界走滑断裂带相似的初始走滑时间表明兰坪—思茅地体、川滇地体以及保山地体在晚始新世—早中新世之前应经历相似的构造旋转运动,最新研究表明兰坪—思茅地体东西两侧的川滇地体和保山—腾冲地体在古新世至渐新世之间未经历明显的顺时针旋转运动(Tong Yabo et al., 2015, 2016)。可以推断,古新世时期随着印度板块与欧亚板块的碰撞和持续挤压,在喜

马拉雅东构造结与哀牢山—红河断裂带之间首先发生了近似南北向的地壳构造挤压缩短,造成兰坪—思茅地体发生强烈的褶皱作用,形成了兰坪—思茅地体的东部边缘一系列近东西向褶皱,这一时期兰坪—思茅地体并未发生旋转运动(全亚博等, 2014b; Tong Yabo et al., 2016)(图 9b)。本次研究采样剖面 LN-a、LN-b、NX-a 所在区域,以及景东和巍山剖面的褶皱形成于晚始新世之前,渐新世以来的旋转变形造成 LN-a、LN-b、NX-a 和巍山剖面的褶皱轴向由近东西向转变为近北西西向,而景东剖面褶皱轴向则变为北北西向。Kornfeld 等(2014a,b)对保山地体和腾冲地体进行古地磁研究,发现二者具有几乎一致的旋转量,认为这两个地体自 30 Ma 以来应经历了相同的构造旋转过程, Tong Yabo 等(2016)进一步提出这两个地体一起自中新世早期开始顺时针旋转运动,至今累计了约 80°的顺时针旋转。前人的古地磁数据显示兰坪—思茅地体自 32 Ma 以来,整体发生了约 35°的顺时针旋转,并叠加了局部地区的差异性旋转(Sato et al., 2001, 2007; Tanaka et al., 2008; 张海峰等, 2012; 全亚博等, 2013)。Tong Yabo 等(2015)和 Wang Heng 等(2016)提出川滇地体自中新世开始顺时针旋转挤出运动,至今累积了 20°左右的顺时针旋转。川滇地体的顺时针旋转挤出运动对兰坪—思茅地体的近南向挤压作用以及临沧花岗岩基对兰坪—思茅地体顺时针旋转侧向挤出的阻碍作用导致了哀牢山—红河走滑断裂带中段的弯曲变形(Tong Yabo et al., 2015; Wang Heng et al., 2016)。渐新世以来由于腾冲地体和保山地体距东喜马拉雅构造结最近,其所受的北北东向挤压也最为强烈,从而发生最大角

度的顺时针旋转逃逸,而川滇地体距离最远,所受挤压作用最弱,导致其顺时针旋转逃逸开始时间较晚,且旋转角度最小。因此来自喜马拉雅东构造结持续的挤压作用和保山地体、兰坪—思茅地体以及川滇地体间的差异性旋转运动是造成崇山断裂与哀牢山—红河断裂发生强烈右旋走滑的主因(Tapponnier et al., 1982; Leloup et al., 1995, 2001; Chuang et al., 1997; Gilley et al., 2003)。兰坪—思茅地体西部的崇山断裂在 19 - 14 Ma 时由左旋走滑转变为右旋走滑运动(Zhang Bo et al., 2010),这与临沧花岗岩基内部逆冲推覆的时间基本一致(26.5 - 15 Ma)(杨振德等, 1996),而地体东部的哀牢山—红河断裂在 36 - 17 Ma 间发生左旋走滑运动,崇山断裂的右旋走滑与红河断裂的左旋走滑造成临沧花岗岩基发生逆冲推覆作用(杨振德等, 1996; Tanaka et al., 2008; Gao Liang et al., 2015),在这样的构造背景下,发生顺时针旋转挤出运动的兰坪—思茅地体中部地区受到临沧花岗岩基的阻碍开始弧形弯曲。受挤压最剧烈的云县地区有临沧花岗岩基楔入,造成地体中部弧形变形加剧,在临沧花岗岩基楔入的过程中,兰坪—思茅地体紧邻花岗岩基北侧的地区受到向北的挤压、东侧地区受到向东的挤压、南侧地区受到向南的挤压,由于不同地区受不同方向的挤压作用形成了轴向各不同的褶皱,共同组成了与临沧花岗岩基弯曲形态一致的弧形弯曲,导致兰坪—思茅地体中部反 S 型构造的形成。由此可见兰坪—思茅地体中部反 S 型构造的形成和演化、以及差异性旋转变形作用受控于新生代时期青藏高原东南缘不同地壳块体侧向旋转挤出过程中的相互挤压作用,以及临沧花岗岩基对兰坪—思茅地体侧向顺

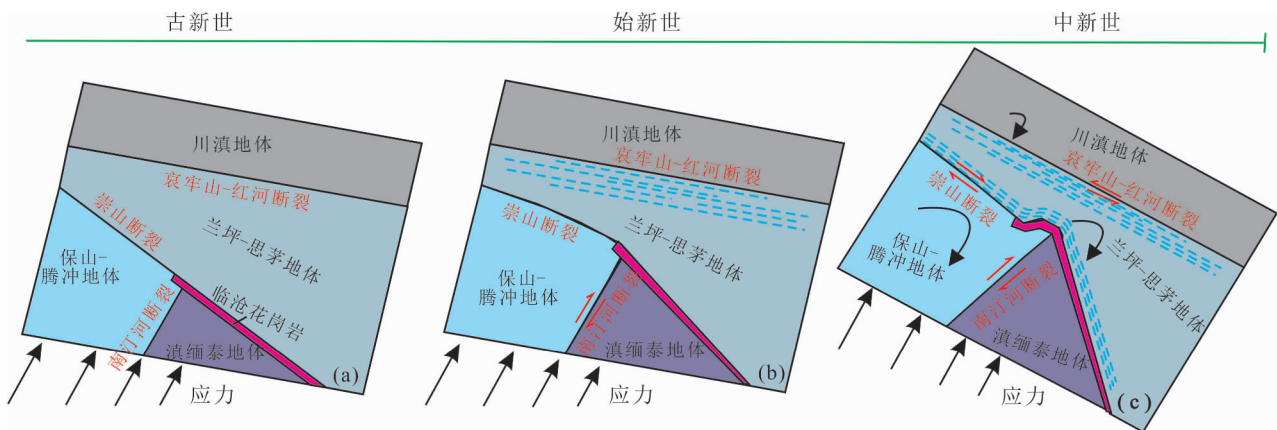


图 9 兰坪—思茅地体中部反 S 形构造成因模型

Fig. 9 The evolutionary model of the reversed S-shaped structure in the middle part of the Simao Terrane

时针旋转挤出运动的阻挡等一系列构造因素。

4 结论

(1)在兰坪—思茅地体中部弧形反 S 形构造部位的南涧地区白垩纪地层中采集了牛街地区(LN-a, LN-b 剖面)和小湾镇地区(NX-a 和 NX-b 剖面)四条构造古地磁剖面,经系统热退磁获得了四个剖面的原生剩磁,以华南稳定区同时代的古地磁极为参考极,可得牛街采样区相对于华南稳定区发生了 $51.5^\circ \pm 12.6^\circ$ (LN-a; K_1j^1) 和 $52.2^\circ \pm 8.7^\circ$ (LN-b; K_1n^2) 的顺时针旋转运动,小湾镇采样区相对于华南稳定区发生了 $51.7^\circ \pm 3.7^\circ$ (NX-a; K_1j^1) 的顺时针旋转运动和 $-10.6^\circ \pm 4.6^\circ$ (NX-b; K_1j^2) 的逆时针旋转运动。

(2)通过线性回归分析法对兰坪—思茅地体中部弧形反 S 形构造部位磁偏角变化量和兰坪—思茅褶皱带内弧形构造区构造线迹变化量的相关性进行分析,确定兰坪—思茅地体中部弧形反 S 形构造是后生弧形构造。综合前人的研究,提出兰坪—思茅地体反 S 形构造的形成和演化,以及差异性旋转变形作用受控于新生代时期青藏高原东南缘地壳块体侧向旋转挤出过程中的相互挤压作用,以及临沧花岗岩基对兰坪—思茅地体侧向顺时针旋转挤出运动的阻挡等一系列构造因素。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 程杨,宋玉财,薛传东,黄世强. 2015. 滇西茅草坪脉状铜矿床脉体构造与成矿时代研究. 地质学报, 89(3): 583 ~ 598.
- 方勤方,高翔,彭强,姚薇,董娟. 2015. 云南兰坪—思茅盆地勒野井矿区钾石盐的特征及其沉积环境. 地质学报, 89(11): 2108 ~ 2113.
- 李仕虎,黄宝春,朱日祥. 2012. 青藏高原东南缘构造旋转的古地磁学证据. 地球物理学报, 55(1): 76 ~ 94.
- 施小斌,丘学林,刘海龄,储著银,夏斌. 2006a. 滇西临沧花岗岩基冷却的热年代学分析. 岩石学报, 22(2): 465 ~ 479.
- 施小斌,丘学林,刘海龄,储著银,夏斌. 2006b. 滇西临沧花岗岩基新生代剥蚀冷却的裂变径迹证据. 地球物理学报, 49(1): 135 ~ 142.
- 宋昊,倪师军,何政伟,徐争启,宋世伟. 2015. 西南三江南段地质构造演化与铜金多金属成矿. 地质论评, 61(增刊): 534 ~ 535.
- 孙艳云,杨文采,侯遵洋,于常青. 2015. 青藏高原刻痕与地壳分层构造. 地质论评, 61(2): 269 ~ 280.
- 全亚博,杨振宇,张旭东,吴中海,赵越,王恒,徐颖超,高亮,安纯志. 2014a. 青藏高原东南缘晚新生代川滇地体旋扭构造体系地壳变形特征的古地磁学分析. 地质学报, 88(11): 2057 ~ 2070.
- 全亚博,杨振宇,王恒,张旭东,安纯志,徐颖超,赵越. 2014b. 中国

- 西南兰坪—思茅地体中部白垩纪古地磁结果及陆内地壳变形特征. 地球物理学报, 57(1): 179 ~ 181.
- 王丹丹,李宝龙,李建清,宋述光,魏春景,龚俊锋. 2013. 滇西高黎贡变质带热史演化与变形时限研究. 地质学报, 87(12): 1887 ~ 1900.
- 许志琴,王勤,李忠海,李化启,蔡志慧,梁风华,董汉文,曹汇,陈希节,黄学猛,吴婵,许翠萍. 2016. 印度—亚洲碰撞:从挤压到走滑的构造转换. 地质学报, 90(1): 1 ~ 23.
- 杨振德. 1996. 云南临沧花岗岩的冲断叠瓦构造与推覆构造. 地质科学, 31(2): 130 ~ 139.
- 杨振宇,孙志明,马醒华,尹济云, Otofujii Yo-ichiro. 2001. 红河断裂两侧早第三纪古地磁研究及其地质意义. 地质学报, 75(1): 35 ~ 44.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志. 北京:地质出版社: 1 ~ 728.
- 张海峰,全亚博,王恒,杨振宇. 2012. 印支地体兰坪—思茅地区早白垩世古地磁结果及其构造意义. 地质学报, 86(6): 923 ~ 939.
- Akciz Sinan, Burchfiel B. Clark, Crowley James L., Yin Jiyun, Chen Liangzhong. 2008. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China. Geosphere, 4(1): 292 ~ 314.
- BGMRY. 1990#. Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional Geology of Yunnan Province, Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 728
- Cheng Yang, Song Yucai, Xue Chuandong, Huang Shiqiang. 2015&. A synthetic study of veins structure and mineralogenetic Epoch of Maocaoping vein - type Cu deposit, Western Yunnan. Acta Geologica Sinica, 89(3): 583 ~ 598.
- Chung Sunlin, Lee Tungyi, Lo Chinghua, Wang Peiling Chen Chinyu, Yem Nguyen Trong, Hoa Tran Trong, Wu Genyao. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan — Red River shear zone. Geology, 25(4): 311 ~ 314.
- Enkin Randolph J. 1994. A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, 16: 1 ~ 16.
- Fang Qinfang, Gao Xiang, Peng Qiang, Yao Wei, Dong Juan. 2015&. Characteristics of sylvite at the Menyeying Potash Deposit in the Lanping — Simao Basin, Yunnan. Acta Geologica Sinica, 89(11): 2108 ~ 2113.
- Finlay C C, Maus S, Beggan C D, Bondar T N, Chambodut A, Chernova T A, Chulliat A, Golovkov V P, Hamilton B, Hamoudi M, Holme R, Hulot G, Kuang W, Langlais B, Lesur V, Lowes F J, Lühr H, Macmillan S, Mandea M, McLean S, Manoj C, Menvielle M, Michaelis I, Olsen N, Rauberg J, Rother M, Sabaka T J, Tangborn A, Tøffner - Clausen L, Thébaud E, Thomson A W P, Wardinski I, Wei Z, Zvereva T I. 2010. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. Geophysical Journal International, 183(3): 1216 ~ 1230.
- Fisher Ronald. 1953. Dispersion on a sphere. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 217: 295 ~ 305.
- Funahara Shoubu, Nishiwaki Nobukazu, Murata Fumiyuki, Otofujii Yo-ichiro, Wang Yizhao. 1993. Clockwise rotation of the Red River fault inferred from paleomagnetic study of Cretaceous rocks in the Shan—Thai—Malay block of western Yunnan, China. Earth and Planetary Science Letters, 117(1): 29 ~ 42.
- Gao Liang, Yang Zhenyu, Tong Yabo, Wang Heng, An Chunzhi. 2015. New paleomagnetic studies of Cretaceous and Miocene rocks

- from Jinggu, western Yunnan, China: Evidence for internal deformation of the Lanping - Simao Terrane. *Journal of Geodynamics*, 89: 39 ~ 59.
- Gilley Lisa D, Harrison T Mark, Leloup P H, Ryerson F J, Lovera Oscar M, Wang Jianghai. 2003. Direct dating of left - lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 1 ~ 13
- Huang Kainian, Opdyke Neil D. 1993. Paleomagnetic results from Cretaceous and Jurassic rocks of South and Southwest Yunnan; evidence for large clockwise rotations in the Indochina and Shan—Thai—Malay terranes. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3 ~ 4): 507 ~ 524.
- Jin Xiaochi. 1996. Tectono-stratigraphic units of western Yunnan, China and their counterparts in Southeast Asia. *Continental Dynamics*, 1(2): 123 ~ 133.
- Kirschvink J L. 1980. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 62(3): 699 ~ 718.
- Kondo Koichiro, Mu Chuanlong, Yamamoto Tatsuhiro, Zaman Haider, Miura Daisuke, Yokoyama Masahiko, Ahn Hyeon - Seonh, Otofujii Yo-ichiro. 2012. Oroclinal origin of the Simao Arc in the Shan — Thai Block inferred from the Cretaceous palaeomagnetic data. *Geophysical Journal International*, 190(1): 201 ~ 216.
- Korfeld Daniela, Eckert Sabine, Appel Erwin, Ratschbacher Lothar, Pfänder Jörg, Liu Deliang, Ding Lin. 2014a. Clockwise rotation of the Baoshan Block due to southeastward tectonic escape of Tibetan crust since the Oligocene. *Geophysical Journal International*, 197: 149 ~ 163.
- Korfeld Daniela, Eckert Sabine, Appel Erwin, Ratschbacher Lothar, Sonntag Benita-Lisette, Pfänder Jörg, Ding Lin, Liu Deliang. 2014b. Cenozoic clockwise rotation of the Tengchong block, southeastern Tibetan Plateau; A paleomagnetic and geochronologic study. *Tectonophysics*, 628: 105 ~ 122.
- Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, Kienast, J R, Harrison, T M, Phan Trong, T T, Replumaz A, Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan—Red River shear zone, SE Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4): 6683 ~ 6732.
- Leloup Philippe Hervé, Lacassin Robin, Tapponnier Paul, Schärer Urs, Zhong Dalai, Liu Xiaohan, Zhang Liangshang, Ji Shaocheng, Trinh Phan Trong. 1995. The Ailao Shan—Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251(1): 3 ~ 84.
- Li Shihu, Huang Baochun, Zhu Rixiang. 2012. Paleomagnetic constraints on the tectonic rotation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(1): 76 ~ 94.
- Metcalfe I. 1988. Origin and assembly of south-east Asian continental terranes. Geological Society, London, Special Publications, 37(1): 101 ~ 118.
- Metcalfe I. 1992. Ordovician to Permian evolution of Southeast Asian terranes; NW Australian Gondwana connections. In Webby B D, Laurie J R (Eds.). *Global perspectives on Ordovician Geology*. Balkema: Rotterdam; 293 ~ 305.
- Metcalfe I. 1996. Pre-Cretaceous evolution of SE Asian terranes. Geological Society, London, Special Publications, 106(1): 97 ~ 122.
- McElhinny M W. 1964. Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International*, 8(3): 338 ~ 340.
- McFadden P L, McElhinny M W. 1988. The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism. *Earth Planetary Science Letters*, 87(1 ~ 2): 161 ~ 172.
- McFadden P L. 1990. A new fold test for paleomagnetic studies. *Geophysical Journal International*, 103(1): 163 ~ 169.
- Morinaga Hayao, Liu Yuyan. 2004. Cretaceous paleomagnetism of the eastern South China Block; establishment of the stable body of SCB. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(3 ~ 4): 971 ~ 988.
- Morley C K. 2007. Variations in late Cenozoic—Recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina; The influence of pre-existing fabrics. *Journal of Structural Geology*, 29(1): 36 ~ 58.
- Ogg J G, Agterberg F P, Gradstein F M. 2004. *A Geologic Time Scale*. New York: Cambridge University Press; 344 ~ 383.
- Otofujii Yo-ichiro, Mu Chuan Long, Tanaka Kenji, Miura Daisuke, Inokuchi Hiroo, Kamei Rieko, Tamai Masato, Takemoto Kazuhiro, Zaman Haider, Yokoyama Masahiko. 2007. Spatial gap between Lhasa and Qiangtang Blocks inferred from Middle Jurassic to Cretaceous Paleomagnetic data. *Earth Planetary Science Letters*, 262(3 ~ 4): 581 ~ 593.
- Otofujii Yo-ichiro, Tung Van Duc, Fujihara Makoto, Tanaka Masayuki, Yokoyama Masahiko, Kitada Kazuya, Zaman Haider. 2012. Tectonic deformation of the southeastern tip of the Indochina Peninsula during its southward displacement in the Cenozoic time. *Gondwana Research*, 22(2): 615 ~ 627.
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks. *Journal of Geophysical Research*, 108(B6): 1-1 ~ 1-24.
- Sato Ken, Liu Yuyan, Wang Yongbiao, Yokoyama Masahiko, Yoshioka Shinya, Yang Zhenyu, Otofujii Yo-ichiro. 2007. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China; evidence of internal deformation of the Indochina block. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1): 1 ~ 15.
- Sato Ken, Liu Yuyan, Zhu Zhicheng, Yang Zhenyu, Otofujii Yo-ichiro. 2001. Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China; further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1): 185 ~ 198.
- Sato Ken, Liu Yuyan, Zhu Zhicheng, Yang Zhenyu, Otofujii Yo-ichiro. 1999. Paleomagnetic study of middle Cretaceous rocks from Yunlong, western Yunnan, China; evidence of southward displacement of Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 165(1): 1 ~ 15.
- Schwartz Susan Y, Van der Voo Rob. 1983. Paleomagnetic evaluation of the orocline hypothesis in the central and southern Appalachians. *Geophysical Research Letters*, 10(7): 505 ~ 508.
- Schwartz Susan Y, Van der Voo Rob. 1984. Paleomagnetic study of thrust sheet rotation during foreland impingement in the Wyoming—Idaho overthrust belt. *Journal of Geophysical Research*, 89(B12): 10077 ~ 10086.
- Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Liu Hailing, Chu Zhuyin, Xia Bin. 2006a. Thermochronological analyses on the cooling history of the Lincang Granitoid Batholith, Western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 465 ~ 479.
- Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, Liu Hailing, Chu Zhuyin, Xia Bin. 2006b. Cenozoic cooling history of Lincang granitoid batholith, western Yunnan; Evidence from Fission track data. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 135 ~ 142.
- Song Hao, Yan Junshi, He Zhengwei, Xu Zhengqi, Song Shiwei. 2015. The tectonic evolution and copper—gold polymetallic

- mineralization of the southern Sanjiang area in Southwest China. *Geological Review*, 61: 534 ~ 535.
- Sun Yanyun, Yang Wencai, Hou Zunze, Yu Changqing. 2015&. Deformation scratches and crustal structures in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 61(2): 269 ~ 280.
- Tanaka Kenji, Mu Chuanlong, Sato Ken, Takemoto Kazuhiro, Miura Daisuke, Liu Yuyan, Zaman Haider, Yang Zhenyu, Yokoyama Masahiko, Iwamoto Hisanori, Uno Koji, Otofujii Yo-ichiro. 2008. Tectonic deformation around the eastern Himalayan syntaxis; constraints from the Cretaceous palaeomagnetic data of the Shan—Thai Block. *Geophysical Journal International*, 175(2): 713 ~ 728.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia; New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12): 611 ~ 616.
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Zheng Liandi, Xu Yanlong, Wang Heng, Gao Liang, Hu Xuzhi. 2013. Internal crustal deformation in the northern part of Shan—Thai Block; New evidence from paleomagnetic results of Cretaceous and Paleogene redbeds. *Tectonophysics*, 608: 1138 ~ 1158.
- Tong Yabo. Yang Zhenyu, Zhang Xudong, Wu Zhonghai, Zhao Yue, Wang Heng, Xu Yingchao, Gao Liang, An Chunzhi. 2014a&. The paleomagnetic analysis about the Later Cenozoic crustal deformation characteristics of the Chuandian Terrane clockwise rotation system in the Southeast edge of Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 88(11): 2057 ~ 2070.
- Tong Yabo, Yang Zhenyu, Wang Heng, Zhang Xudong, An Chunzhi, Xu Yingchao, Zhao Yue. 2014b&. The Cretaceous paleomagnetic results from the central part of the Simao Terrane in the southwest part of China and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(1): 179 ~ 198.
- Tong Yabo. Yang Zhenyu, Wang Heng, Gao Liang, An Chunzhi, Zhang Xudong, Xu Yingchao. 2015. The Cenozoic rotational extrusion of the Chuan Dian Fragment; New paleomagnetic results from Paleogene red-beds on the southeastern edge of the Tibetan Plateau; *Tectonophysics*, 658: 46 ~ 60.
- Tong Yabo. Yang Zhenyu, Jing Xianqing, Zhao Yue, Li Chenhao, Huang Dianjun, Zhang Xudong. 2016. New insights into the Cenozoic lateral extrusion of crustal blocks on the southeastern edge of Tibetan Plateau: Evidence from paleomagnetic results from Paleogene sedimentary strata of the Baoshan Terrane; *Tectonics*, 35(11): 2494 ~ 2514.
- Tsuneki Yosuke, Morinaga Hayao, Liu Yuyan. 2009. New palaeomagnetic data supporting the extent of the stable body of the South China Block since the Cretaceous and some implications on magnetization acquisition of red beds. *Geophysical Journal International*, 178(3): 1327 ~ 1336.
- Van der Voo Rob, Channell James E T. 1980. Paleomagnetism in orogenic belts. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 18(2): 455 ~ 481.
- Van der Voo Rob. 1990. Phanerozoic paleomagnetic poles from Europe and North America and comparisons with continental reconstructions. *Reviews of Geophysics*, 28(2): 167 ~ 206.
- Wang Dandan, Li Baolong, Ji Jianqing, Song Shuguang, Wei Chunjing, Gong Junfeng. 2013&. The thermal evolution and deformation time limit of the Gaoligong Metamorphic Belt in Western Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1887 ~ 1900.
- Wang Erchie, Burchfiel B C. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right - lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis. *International Geology Review*, 39(3): 191 ~ 219.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Zhang Yanhua, Peng Touping, Chen Xinyue, Xu Yigang. 2006. Kinematics and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China; Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia. *Tectonophysics*, 418(3): 235 ~ 254.
- Wang Heng, Yang Zhenyu, Tong Yabo, Gao Liang, Jing Xianqing, Zhang Haifeng. 2016. Palaeomagnetic results from Paleogene red beds of the Chuan — Dian Fragment, southeastern margin of the Tibetan Plateau; implications for the displacement of the Xianshuihe—Xiaojiang fault systems. *International Geology Review*, 58(11): 1363 ~ 1381.
- Wu Haoruo, Boulter C A, Ke Baojia, Stow D A V, Wang Zhongcheng. 1995. The Changning—Menglian suture zone; a segment of the major Cathaysian—Gondwana divide in Southeast Asia. *Tectonophysics*, 242(3): 267 ~ 280.
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Li Zhonghai, Li Huaqi, Cai Zhihui, Liang Fenghua, Dong Hanwen, Cao Hui, Chen Xijie, Huang Xuemeng, Wu Chan, Xu Cuiping. 2016&. Indo—Asian collision; tectonic transition from compression to strike slip. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1 ~ 23.
- Yang Zhende. 1996&. Thrust-imbriate structure and nappe of Lincang granite. *Scientia Geologica Sinica*, 31(2): 130 ~ 139.
- Yang Zhenyu, Besse Jean. 1993. Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina. *Earth and Planetary Science Letters*, 117(3): 525 ~ 552.
- Yang Zhenyu, Yin Jiyun, Sun Zhiming, Otofujii Yo-ichiro, Sato Ken. 2001. Discrepant Cretaceous paleomagnetic poles between Eastern China and Indochina; a consequence of the extrusion of Indochina. *Tectonophysics*, 334(2): 101 ~ 113.
- Yang Zhenyu, Sun Zhiming, Ma Xinghua, Yin Jiyun, Otofujii Yo-ichiro. 2001&. Palaeomagnetic study of the early Tertiary on both sides of the red river fault and its geological implications. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 35 ~ 44.
- Yin An. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia; A preliminary synthesis. *Tectonophysics*, 488, 293 ~ 325.
- Yin An, Harrison T Mark. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 ~ 280.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Zhong Dalai. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. *Journal of Structural Geology*, 32(4): 445 ~ 463.
- Zhang Haifeng, Tong Yabo, Wang Heng, Yang Zhenyu. 2012&. Early Cretaceous paleomagnetic results from Simao of Indochina block and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 86(6): 923 ~ 939.
- Zhu Zongmin, Morinaga Hayao, Gui Renju, Xu Shiqiu, Liu Yuyan. 2006. Paleomagnetic constraints on the extent of the stable body of the South China block since the Cretaceous; new data from the Yuanma Basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1): 533 ~ 544.
- Zijderveld J D A. 1967. A. C. demagnetization of rocks; analysis of results. In *Conclusion D W, Creer K M, Runcorn S K (Eds). Methods in paleomagnetism*. New York; Elsevier; 254 ~ 286.

Paleomagnetic Constrains on the Reversed S-shaped Structure Deformation of the Lanping—Simao Basin in the Southeastern Xizang (Tibet) Plateau

XU Yingchao¹⁾, TONG Yabo^{1, 2)}, WANG Heng³⁾, YANG Zhenyu⁴⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*

2) *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction, the Ministry of Land and Resources, Beijing, 100081;*

3) *Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029;*

4) *College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, 100048*

Objective: A series of folds and thrust faults was formed in the central part of Lanping—Simao Basin that constituted of a reversed S-shaped structure. The quantitative analysis on the way and process of the Lanping—Simao crust evolution has an important geological implication, because the crustal surface deformation and tectonic evolution are closely related to the tectonic evolution of the southeastern Tibetan Plateau. Based on paleomagnetic studies of the Early Cretaceous red beds and the tectonic evolution process of regional active faults in the Lanping—Simao basin, the paper discusses the originated model of the reversed S-shaped structure in the central Lanping—Simao Terrane.

Methods: There are 211 representative paleomagnetic samples picked out from the Early Cretaceous red beds at four sections in Nanjian area of the central part of the Lanping—Simao basin, and then the rock magnetic and paleomagnetic studies were carried out.

Results: The characteristic remnant magnetization (ChRM) directions obtained from two sections at Niujie area are $D_s = 244.7^\circ, I_s = -47.3^\circ, K_s = 31.6, \alpha_{95} = 16.6$ (K_1j^1) in the LN-a section, and $D_s = 245.4^\circ, I_s = -46.4^\circ, K_s = 52.2, \alpha_{95} = 9.4$ (K_1n^2) in the LN-b section, respectively. A fold test was performed on the two sections and was positive at the 99% confidence level (McFadden, 1990). The tilt corrected site—mean directions from two sections at the Xiaowanzhen area are $D_s = 244.9^\circ, I_s = -40.2^\circ, K_s = 1067.5, \alpha_{95} = 2.3$ (K_1j^1) in the NX-a section, and $D_s = 182.6^\circ, I_s = -42.1^\circ, K_s = 335.2, \alpha_{95} = 3.7$ (K_1j^2) in the NX-b section, where the two sections are located in different limbs of the folds

Conclusion: We propose the originated model of the reversed S-shaped structure in the central Lanping—Simao Terrane, showing that the formation, its evolution and differential rotations of reversed S-shaped structure were controlled by the extrusion effect of different small crustal blocks in the southeastern Tibetan Plateau during the India/Eurasia collision since the early Tertiary, and the response of compression on the resistance of the Lincang granite batholith.

Keywords: Cretaceous; Paleomagnetism; the Lanping—Simao Basin; the mechanics of the Reversed S-shaped structure; Rotational deformation

Acknowledgements: This paper was funded by the National Science Foundation of China (Nos. 41572183), China Geological Survey (Nos. DD20160268, 12120114002301) and Chinese Academy of Geological Sciences Basal Research Fund (Nos. YYWF201613).

First author: XU Yingchao, female, born in 1987, doctor, focus on structural geology. Email: xuyc1118@sina.com

Corresponding author: TONG Yabo, male, born in 1981, associate professor, focus on tectonic and paleomagnetic. Email: tyb816@163.com

Manuscript received on: 2016-12-01; Accepted on: 2017-04-17; Edited by: LIU Zhiqiang.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.002