

卢海建, 王二七, 李仕虎, 等. 青藏高原东南缘构造旋转变形分析: 以四川盐源盆地古地磁研究为例[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1188–1201.
Lu Haijian, Wang Erqi, Li Shihu, et al. Rotational deformation of the southeastern margin of Tibet: A paleomagnetic study of the Yanyuan basin, Sichuan Province[J]. Geology in China, 2015, 42(5):1188–1201(in Chinese with English abstract).

青藏高原东南缘构造旋转变形分析： 以四川盐源盆地古地磁研究为例

卢海建¹ 王二七² 李仕虎³ 李海兵¹

(1. 中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室, 北京 100037; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所特提斯研究中心, 北京 100029; 3. 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:探究青藏高原东南缘构造旋转变形有助于理解青藏高原内部物质向东南方向的挤出过程。目前,有关青藏高原东南缘的构造旋转研究主要针对于两套地层:侏罗系—始新统和中新统一第四系。对侏罗系—始新统研究表明了大范围的顺时针旋转变形的存在,而对中新统一第四系的研究则表明该区域可能同时存在逆时针旋转变形。然而,对这两种构造旋转变形的时间和幅度仍缺乏充分的制约。位于川滇地块的四川盐源盆地同时出露这两套地层。磁性地层研究表明,上新统一中更新统的时代为 $>3.6\sim 0.6$ Ma。磁偏角数据揭示上新统一中更新统经历了逆时针旋转变形($-14.4^\circ\pm 2.7^\circ$),而古新统一始新统经历了明显的顺时针旋转($10^\circ\sim 21.5^\circ$),两套地层间的旋转幅度高达 36.6° 。鉴于青藏高原东南缘发生大规模顺时针旋转变形的最年轻地层为始新统地层,因此顺时针旋转变形可能发生在始新世—中新世某个时间段。这个时间与红河—哀牢山走滑断裂带的活动时间基本一致,因此顺时针旋转变形可能与该大型断裂带的活动直接相关。盐源盆地记录到的逆时针旋转变形发生于至少3.6 Ma以来,平均旋转速率为 $4^\circ/\text{Ma}$ 。由于磁组构数据表明上新世—中更新世地层并未受到挤压变形作用,因此其逆时针旋转变形可能受周围走滑断裂带的控制。

关键词:磁性地层; 旋转变形; 新生代; 盐源盆地; 青藏高原东南缘

中图分类号: P552; P539.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1188-14

Rotational deformation of the southeastern margin of Tibet: A paleomagnetic study of the Yanyuan basin, Sichuan Province

LU Hai-jian¹, WANG Er-qi², LI Shi-hu³, LI Hai-bing¹

(1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Tethys Research Center, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Investigating rotational deformation of the southeastern margin of the Tibet is the key to understanding how and why the

收稿日期: 2015-03-24; 改回日期: 2015-07-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41472187)、国家自然科学基金重点项目(41130312)资助。

作者简介: 卢海建, 男, 1981年生, 博士, 助理研究员, 从事青藏高原盆山耦合研究; E-mail: haijianlu2007@126.com。

Tibet material extruded to the southeast. Until now there are two sets of strata used to study the rotational deformation on the southeastern margin of the Tibet: the Jurassic–Eocene and the Miocene–Quaternary strata. Paleomagnetic studies of the Jurassic–Eocene strata indicate widespread clockwise rotational deformation, similar studies of the Miocene–Quaternary strata suggest multiple deformation patterns, including clockwise rotation, counter-clockwise rotation and also no rotation. However, it is still not well constrained as to the timing and degree of rotational deformation on the southeastern margin of Tibet. Two sets of strata (the Paleocene–Eocene and Pliocene–Quaternary sediments) are well exposed in the Yanyuan basin, Sichuan Province. Magnetostratigraphic studies indicate an age of $>3.6\text{--}0.6\text{ Ma}$ for the Pliocene–Quaternary strata. Declination data suggest that the Pliocene–Quaternary sediments experienced counter-clockwise rotation (-14.4°), and the Paleocene–Eocene deposits underwent notable clockwise rotation ($10^\circ\text{--}21.5^\circ$). As the age of the youngest strata that experienced clockwise rotational deformation on the southeastern margin of Tibet is the Eocene, the clockwise rotational deformation likely occurred during a time interval between the Eocene and the Miocene. The counter-clockwise rotational deformation recorded in the Yanyuan basin happened before 3.6 Ma with an average rotational rate of $4^\circ/\text{Ma}$. Since anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) data indicate that the Pliocene–Quaternary sediments underwent no compressional deformation at all, the counter-clockwise rotational deformation was initiated most likely by strike-slip faults around the Yanyuan basin.

Key words: magnetostratigraphy; rotational deformation; Cenozoic; Yanyuan basin; southeastern margin of the Tibet

About the first author: LU Hai-jian, male, born in 1981, assistant researcher, mainly engages in basin–mountain range coupling in the northern Tibet; E-mail: haijianlu2007@126.com.

1 前 言

当前,关于青藏高原构造与运动学发展存在许多不同的假说。不过,这些假说基本可以分为三种模式:一种是“块体运动”模式,即均一地壳块体通过大型走滑断层向东挤出^[1];第二种是“薄粘性板”模式,即在上地壳、或下地壳发生的地壳增厚变形或连续变形^[2-3];第三种为“下地壳流”模式^[4-5]。迄今为止,仍不清楚哪种模式在印度–欧亚板块汇聚过程中占主导地位。

自三叠纪至早侏罗纪,不同的构造块体增生至欧亚大陆形成了青藏高原东南缘,这些块体包括扬子地块、华南地块、山泰地块及印支地块。这些块体之间发育了两条大型断裂带:红河–哀牢山和鲜水河–小江断裂带(图1)。研究表明,大型断裂带在青藏高原内部物质向东南向的构造挤出过程中扮演了重要的作用。不过,对青藏高原东南缘的地形分析,结合流体物理学计算表明其地壳中可能广泛地存在物质流动^[4]。随后的大地电磁成像分析也证明了青藏高原东南缘下地壳物质流的存在^[6]。有研究认为块体运动和下地壳流两种模式在新生代青藏高原东南缘构造演化中先后扮演着同样重要的作用。他们认为,在印度–欧亚板块碰撞的早期阶段,块体运动模式在青藏高原内部物质向东挤出

过程中起了重要的作用;而到晚期,高原下地壳粘性流可以很好地解释青藏高原东缘发生的活动构造变形^[7]。

青藏高原东南缘地貌以高海拔、低起伏的为特征,主要发育有金沙江、怒江、澜沧江等河流。GPS测量、地质及古地磁研究均揭示了青藏高原内部物质向东南缘的迁移,并在东喜马拉雅构造结附近发生了顺时针构造旋转。古地磁研究表明新生代从青藏高原东部向南至印支和山泰地块发生了广泛的顺时针构造旋转变形^[8-18]。他们的研究对象主要来自青藏高原东南缘的侏罗系至始新统沉积岩。部分研究还认为这种旋转变形伴随了大尺度东南向的走滑位错^[13,15-18]。现今的GPS观测也清晰地表明东喜马拉雅构造结附近正发生顺时针旋转运动^[19]。不过,对青藏高原东南缘中新世–第四纪地层的古地磁分析给出了不同的结论。泰国北部的Mae Moh盆地的古地磁研究表明中中新世后,该地区发生了大约 13° 的逆时针旋转变形^[20]。Zhu等^[21]对位于川滇地体的元谋盆地的古地磁研究表明从4.9 Ma至1.4 Ma,该地区发生了约 12° 的逆时针旋转运动。上述研究说明,新生代青藏高原东南缘早期可能以顺时针旋转运动为主,但晚期的构造运动变得复杂,还存在逆时针构造旋转作用。不过,关于早期顺时针构造旋转开始和结束的时间,以及后期逆

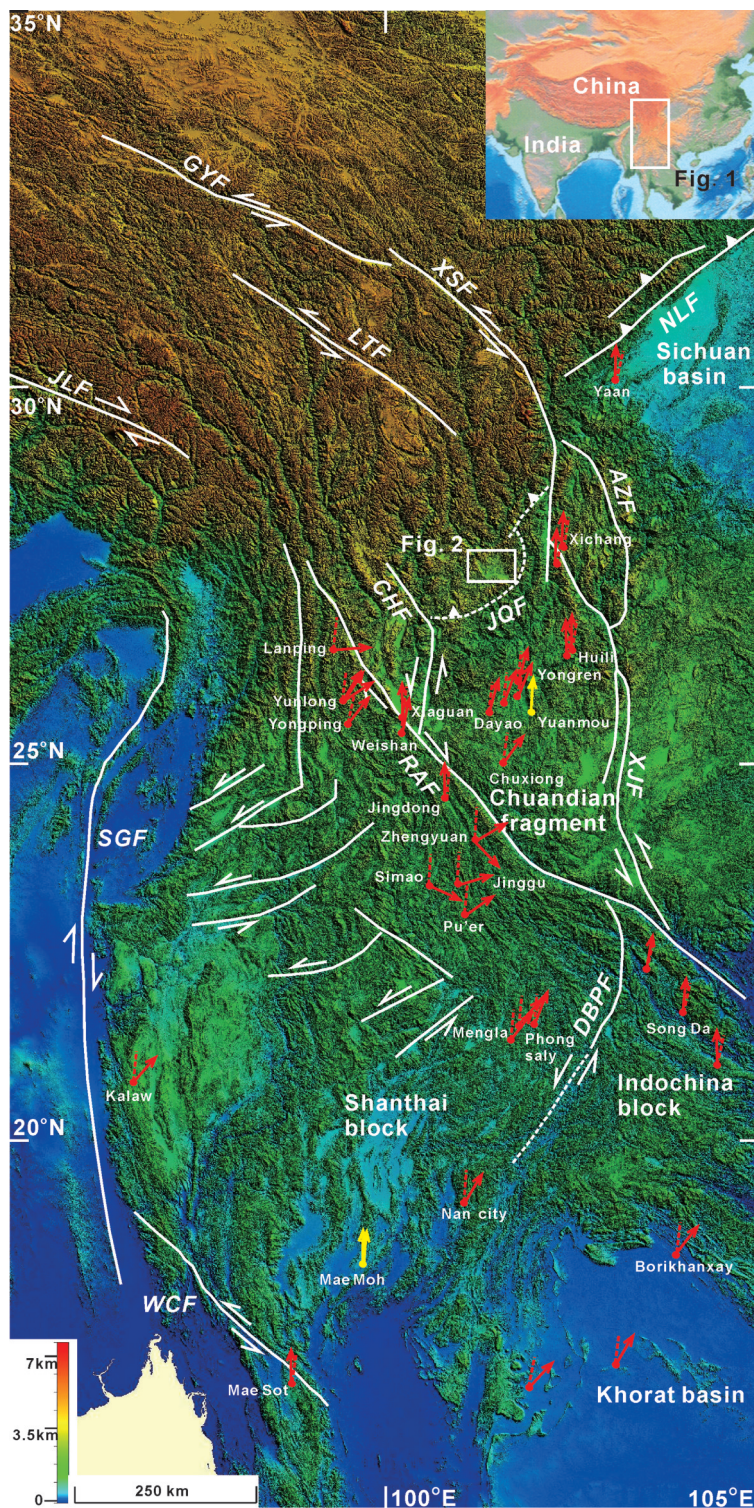


图1 青藏高原东南缘DEM图

图上标明了主要的活动构造带(白线所示)和古地磁磁偏角数据(红线为侏罗纪—始新世地层;黄线为中新世—第四纪地层)。磁偏角数据来自于李仕虎等^[22]。实线箭头代表实测古地磁偏角,虚线代表以思茅(23.5°N, 100.5°E)为参考点,以欧亚大陆视极移曲线为参考极所计算出的偏角期望值。主要的断层包括:GYF—甘孜—玉树断裂带;XSF—鲜水河断裂带;NLF—北龙门山断裂带;LTF—理塘断裂带;AZF—安宁河—泽木河断裂带;XJF—小江断裂带;JQF—金沙江—澜沧江断裂带;JLF—九龙断裂带;CHF—程海断裂带;RAJ—红河—哀牢山断裂带;DBPF—奠边府断裂带;SGF—沙盖断裂带;WCF—王曹断裂带

Fig. 1 Digital elevation map of the southeastern margin of the Tibet with active faults (white lines) and paleomagnetic declination data (red lines and yellow lines represent the Jurassic - Eocene and the Miocene-Quaternary strata, respectively). The declination data are derived from Li et al^[22]

时针旋转开始的时间,仍然需要更多的研究去约束。

本文研究区位于川滇地体内的四川盐源盆地。研究对象主要为盆地内的两套不同时代的沉积地层:一套为古新世—始新世地层,位于盆地周缘,海拔较高,倾斜出露,岩性为红色、或紫色砂岩和粉砂岩;另一套为上新世—中更新世地层,位于盆地中部,海拔相对较低,水平出露,岩性为浅黄色、或灰绿色砾石层与褐色、或浅黄色泥岩和大量褐煤层的互层。我们对两套地层进行了详细的古地磁研究:首先在盆地的南缘、北缘、西缘分别选择了三个点对古新世—始新世地层进行古地磁研究;然后在盆地的中部选择了一个约170 m厚的剖面进行了详细的磁性地层研究;最后通过对比研究,发现两套地层之间存在显著的构造旋转运动。通过这些研究,不仅要查明盐源盆地新老地层经历的构造旋转运动历史,而且以期对青藏高原东南缘构造旋转运动提供时间约束。

2 地质背景

受印度—欧亚板块碰撞的影响,青藏高原内部物质在渐新世和中新世发生了向东的构造挤出作用。作为华南板块和印支板块的分界线,红河—哀牢山左旋走滑带被认为在这种构造挤出过程中发挥了重要的作用^[23-27]。红河—哀牢山左旋走滑位移量可达 (700 ± 200) km^[25,28]。不过,红河—哀牢山断裂带从上新世开始右旋走滑^[25,29]。GPS速度测量表明,现今红河—哀牢山断裂带的西北段、中段及南段的右旋走滑速度分别为2, <2 和1~2 mm/a。如此低的走滑速率表明,红河—哀牢山断裂带不再是一条主要的大陆转换断层^[19,30-31]。

在藏东南缘分布着另外一条大型走滑断裂带——鲜水河—小江断裂带。鲜水河—小江断裂带从西北向的羌塘地块一直向南延伸,直至靠近红河—哀牢山断裂带才结束。鲜水河—小江断裂带的左旋走滑位移量约为60 km^[32],走滑速率介于10~30 mm/a^[30-32]。鲜水河—小江断裂带的甘孜—玉树段和鲜水河段的起始走滑时间可能大于13 Ma,但安宁河—泽木河和小江断裂带的起始走滑时间约为5 Ma^[33]。

盐源盆地四周被海拔超过3000 m的山脉所围绕,是一个封闭的内流盆地。盆地东西向延伸超过40 km,南北向为20 km。盆地及其周缘主要的岩石

类型为志留系灰岩和粉砂岩、石炭系灰岩和粉砂岩、二叠系玄武岩、下三叠统海相复理石沉积、上三叠统陆相含煤碎屑岩、古新统一始新统陆相碎屑岩、上新统含大量褐煤的陆相碎屑岩以及第四系砂砾岩沉积^[34](图2)。一般而言,年轻的地层不整合上覆于年老的地层之上。古新统一始新统陆相碎屑岩主要分布于盆地的北侧、南侧和西侧(图2)。本文研究的地层是古新统一始新统陆相碎屑岩、上新统含大量褐煤的陆相碎屑岩以及第四系砂砾岩沉积。在盆地北侧,古新统一始新统陆相碎屑岩为红色粉砂岩和砂岩;在盆地南侧为坚硬的紫色砾岩、砂岩、粉砂岩及少量黄绿色砂岩和粉砂岩;在盆地西侧为具水平层理的红色砂岩、泥岩以及夹杂浅红色粉砂岩和砂岩的砾石层。上新统和第四系碎屑岩主要出露于盐源盆地的中部。钻探研究表明上新统和第四系厚度由北向南逐渐增加,在北侧只有大约13 m的剩余厚度,而在南侧最厚可达640 m^[34]。不过,暴露于地表的厚度不超过170 m。上新统主要由浅黄色、或灰绿色砾石层与褐色、或浅黄色泥岩和大量褐煤层的互层沉积组成。上新统和第四系在合稍地区出露最为连续且完整(图2)。

3 样品采集

古地磁采样在盐源盆地内的4个点进行,分别是位于盆地北侧的大河乡(DH)、盆地西侧的红崖子(HYZ)、盆地南侧的刘家坪(LJP)以及位于盆地中下部的合稍(HS)(图2)。整体而言,地层岩石硬度不大,特别是上新统和第四系地层硬度相对较小,更适合采集手标本。野外古地磁样品采集的步骤包括:首先使用地质罗盘定向,测量地层的倾向和倾角;然后,在所定向的地层上修理水平采样面,在水平面上标明指北方向;接着将含指北方向的水平面切割下来,切下的样品大小和形状必须保证不小于6 cm×6 cm×4 cm的立方体;最后,将所采集的样品包装、编号以及在记录本上记录样品信息。在大河乡、红崖子以及刘家坪以2 m间距分别采集了25、25和16块手标本。在大河乡采集的样品主要为红色粉砂岩和砂岩;红崖子采集的样品主要为红色、浅红色粉砂岩和砂岩;刘家坪则主要为坚硬的紫色、或灰绿色砂岩和泥岩(图3)。在合稍剖面古地磁采样分两段进行,南段采样地层厚度为107.2 m,北段采样地层

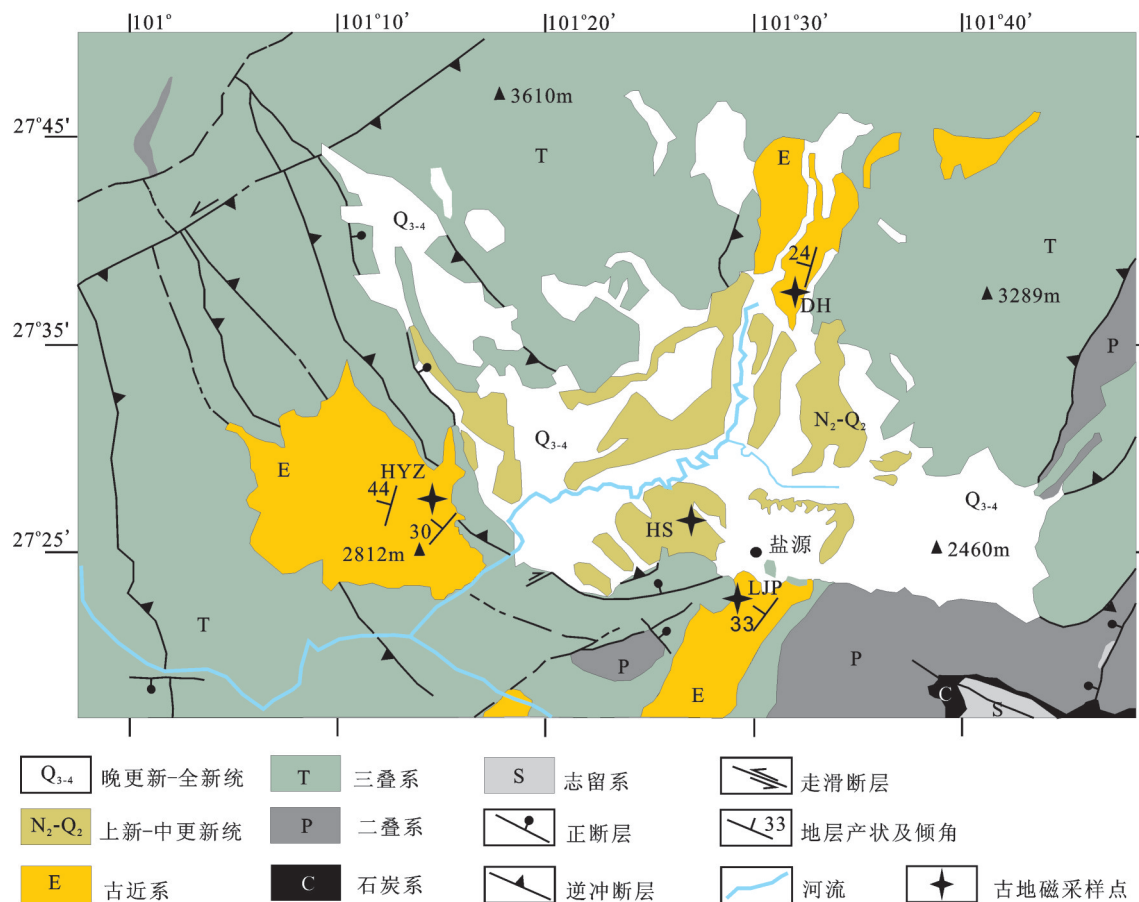


图2 盐源盆地及其周边地质图(改编自四川地质调查局^[34])

黑色四角星为本文讨论的4个古地磁采样点,他们分别为大河乡(DH)、红崖子(HYZ)、刘家坪(LJP)以及合稍(HS)

Fig.2 Geological map of the Yanyuan basin and its surrounding areas(modified after Sichuan Geological Survey Bureau^[34])

Black stars indicate four paleomagnetic localities mentioned in the text

厚度为64 m,两段地层的顶底部存在部分重复。采样间距约为0.5 m/样,共采集了342个样品。

2个ESR样品分别采自合稍剖面南段的14.8 m和24 m深度,主要为砾岩中的砂岩夹层。采样时尽量避免直接暴露于地表的样品,应剥离暴露面30~50 cm。在样品采集、包装和运输过程中,避免阳光直接照射。

4 实验分析

4.1 古地磁分析

在室内,把每块定向样品切割成2套2 cm×2 cm×2 cm大小的立方体定向样品。室内热退磁和剩磁测量在中国科学院地球环境研究所古地磁实验室进行。热退磁使用的是MMTD-48热退磁炉。退磁温度步骤总共有17步,分别为天然剩磁(NRM)、80°C、160°C、240°C、320°C、360°C、400°C、

440°C、480°C、520°C、550°C、580°C、600°C、620°C、640°C、660°C、690°C。剩磁测试使用2G-755R超导磁力仪。分析结果采用Zijderveld图解法^[35]。特征剩磁方向计算采用主分量分析法^[36],使用至少4个温度点进行计算。最后用费舍尔(Fisher)统计方法^[37]计算不同地点的平均特征剩磁方向。所有古地磁数据均使用PMGSC 4.2软件^[38]分析处理。

4.2 AMS分析

磁化率各向异性测试使用的是AGICO公司的KLY-3S bridge仪器。磁化率各向异性分析根据Tarling and Hrouda^[39],各向异性参数包括磁化率椭球体最大轴、中间轴和最小轴(Kmax、Kint和Kmin)、校正后的各向异性度(Pj)以及形状参数(T)等。

4.3 ESR测年

ESR测年在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室进行。分析标准和流程参考王

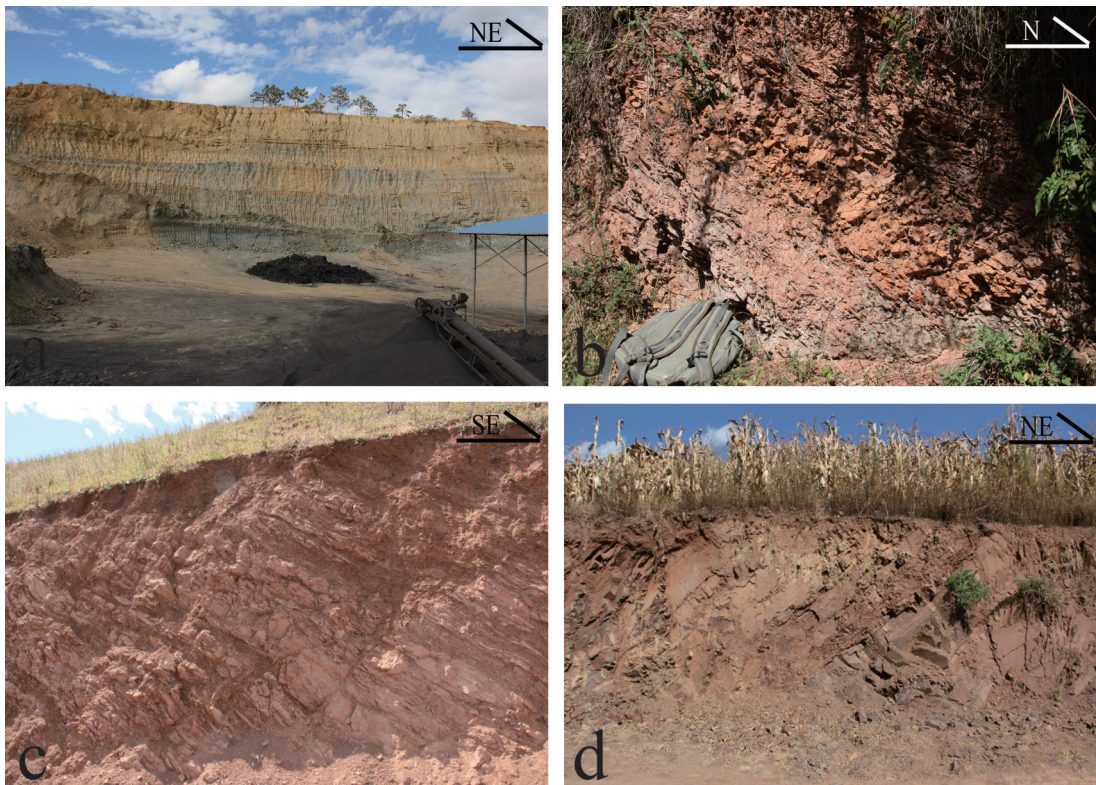


图3 合稍剖面水平出露的河湖相沉积(a)和在大河乡、红崖子以及刘家坪以 15° ~ 45° 倾角倾斜出露的古新统一始新统紫红色、或黄褐色砂岩、粉砂岩以及粉砂质泥岩等(b, c, d)

Fig.3 Subhorizontal fluvia-lacustrine deposits of the Heshao section(a)and Paleocene-Eocene deposits (mainly purple, red or brown sandstones, siltstones and mudstones) of the other three localities (Dahexiang, Hongyazi and Liujiaping) with dip angles from 15° to 45° (b, c, d)

萍等^[40]的实验方法。

5 实验结果

5.1 热退磁结果

多数样品的退磁曲线显示了双组分的特征:低温磁组分在温度低于 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 即被清洗(图4),可能是地层褶皱后形成,受现代地磁场影响的粘滞剩磁^[41];高温磁组分一般当温度 $>300^{\circ}\text{C}$ 时开始直线趋向原点,直到 580°C 、或 690°C 时古磁场强度才完全降下来。从解阻温度(约 575°C 和约 680°C)(图4)可以初步判断磁铁矿和赤铁矿是研究区(大河乡、刘家坪、红崖子以及合稍)地层中的主要原生载磁矿物。

确定样品的特征剩磁方向至少使用4个点,一般是5~9个。有些样品因为剩磁方向不稳定,或者最大角偏差(MAD)大于 15° ,而不被考虑用于建立磁性地层。合稍剖面用于剩磁测量的342块样品中,225块样品获得了稳定的特征剩磁方向,剩余的

117块样品被舍弃。大河乡用于剩磁测量的25块样品中,15块获得了稳定的特征剩磁方向;红崖子用于剩磁测量的25块样品中,18块被认为获得了稳定的特征剩磁方向;刘家坪用于剩磁测量的16块样品中,14块获得了稳定的特征剩磁方向。因为合稍地层为水平出露,所以本文未进行褶皱和倒转检验。不过,实测古地磁方向中既含有正极性方向,也含有负极性方向,因此其可能记录了原生的古磁场方向。而大河乡、刘家坪及红崖子三处地层均为单斜出露,因此也未能进行褶皱检验。

5.2 磁组构结果

合稍剖面的磁化率各向异性主要表现为扁圆的椭球体特征。磁化率各向异性数据表明磁化率椭球体最大轴和中间轴方向倾角较浅,几乎均匀地分布在椭球体四周,没有一定的优势方向(图5)。而椭球体最小轴方向倾角较陡,多围绕投影中心分布(图5)。该磁组构为典型的沉积组构的分布特

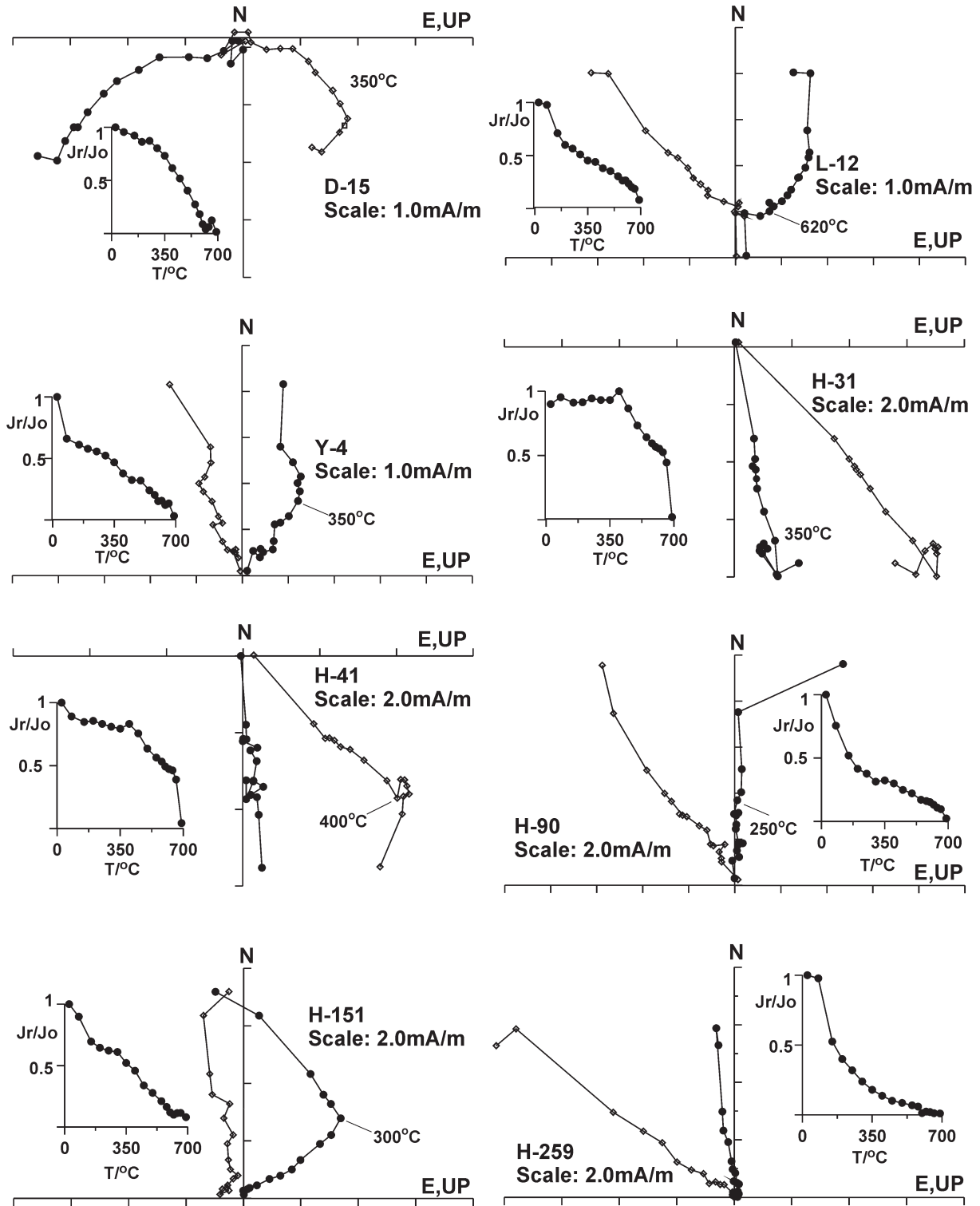


图4 盐源盆地8个代表性样品的正交退磁曲线

样品分别来自大河乡(D-15)、刘家坪(L-12)、红崖子(Y-4)以及合稍(H-31, H-41, H-90, H-151和H-259);退磁曲线中实心(空心)圆代表地理坐标系下水平(垂直)面上的投影

Fig. 4 Orthogonal demagnetization diagrams of eight representative specimens from the Yanyuan basin. Solid (open) symbols refer to the projection on the horizontal (vertical) plane in geographic coordinates

征,表明后期没有经历重要的构造扰动。其他三个点(大河乡、刘家坪以及红崖子)的各向异性数据也显示了原生沉积组构特征,但明显受到了轻微的构造变形作用。各向异性度(P_j)与形状参数(T)相关图显示, P_j 值介于1.02~1.04,而 T 值变化较大,位于-0.8~1之间(图5),这表明原有的沉积组构已经被改造。经过倾斜校正后的磁化率各向异性数据显示,磁化率椭球体最大轴主要分布在南北和东西两个方向,而大约一半的最小轴方向垂直于层面分布(图5),这表明仍有部分沉积组构被保留下来。因此,其他3个点(大河乡、刘家坪以及红崖子)的各向异性数据表明了复合磁组构特征,也即原生的沉积组构受到后期的弱构造变形作用^[42]。

5.3 ESR测年结果

从表1中得出,两个ESR样品深度分别为14.8 m和24 m,对应的年龄分别为 (942 ± 141) ka和 (1213 ± 182) ka。

6 讨论

6.1 合稍剖面的年龄

实测合稍剖面的平均正极性方向为 $D=346.9^\circ$, $I=24.0^\circ$, $\kappa=24$, $\alpha_{95}=2.3$;平均负极性方向为 $D=180.6^\circ$, $I=-28.6^\circ$, $\kappa=16.9$, $\alpha_{95}=5.7$;总的平均方向为 $D=349.6^\circ$, $I=32.2^\circ$, $\kappa=20.7$, $\alpha_{95}=2.2$ 。合稍剖面南段的古地磁极性柱中包含5个正极性带和4个负极性带,而北段为3个正极性带和3个负极性带(图6)。在两个ESR年龄的精确制约下,我们将实测极性柱与标准极性柱(GPTS)^[43]进行了对比(图6)。两个ESR年龄分别约为0.9 Ma和1.2 Ma,由此,实测地层的年龄对应为0.6~3.6 Ma。在此对比方案下,实测极性柱在大部分情况下可以与GPTS对比良好。因此,我们认为实测合稍地层的年龄为3.6~0.6 Ma。不过,由于部分上新统地层并未暴露于地表,所以上新统地层的底界年龄应老于3.6 Ma。因此,本文研究表明盐源盆地的初始形成时间应早于3.6 Ma。

6.2 盐源盆地地层中记录的构造旋转变形

盐源盆地出露了两套明显不同的地层:一套分布在盆地四周,其海拔较高,为古新统一始新统红色、或紫色砂岩和粉砂岩为主;另一套分布在盆地中央,其海拔相对较低,为上新统一中更新统(3.6~0.6 Ma)浅黄色、或灰绿色砾石层与褐色、或浅黄色

泥岩和大量褐煤层的互层沉积。表2为两套地层的古地磁平均方向,而表3为以欧亚大陆古新世—始新世和现代参考极计算出盐源盆地两套地层的古地磁期望值^[44]。从表2中可以看出,古新世—始新世地层(大河乡、刘家坪及红崖子)与上新世—中更新世地层(合稍)一致,均显示了低磁倾角值($4.7^\circ \sim 32.2^\circ$),远小于以欧亚大陆为参考极计算出的期望值($47.5^\circ \sim 49.6^\circ$)。这种现象在中亚地区已被广泛地关注,并认为可能与沉积压实后的倾角浅化有关^[45-47]。不过,大河乡、刘家坪及红崖子三个点的倾角浅化现象可能还与古地磁样品数量偏少有关系,特别是刘家坪。此外,大河乡、刘家坪及红崖子三个点的 α_{95} 值均较大,这也与统计的样品数量有限有关。而且由于样品数量偏少,本文未删除偏离平均方向较大的样品。

表2中古新世—始新世地层的平均磁偏角值为 26.2° ,而上新世—中更新世地层的平均磁偏角值为 349.6° 。两套地层的磁偏角显示了较大的差别(36.6°),这说明盐源盆地新老地层之间存在显著的构造旋转变形(图7)。本文以欧亚大陆古新世—始新世和现代两个时间段的古地磁极为参考值,分别计算了盐源盆地不同地点的古地磁期望值。进一步通过对比实测磁偏角值与期望的磁偏角值,可以得到不同地点的构造旋转变形信息。具体而言,大河乡、刘家坪及红崖子三个点均表现为明显的顺时针旋转,旋转幅度为 $10^\circ \sim 21.5^\circ$,平均幅度为 17.3° ;而合稍地层经历了逆时针旋转,旋转幅度为 14.4° (表3),平均旋转速率为 $4^\circ/\text{Ma}$ 。按照时间顺序,古新世—始新世地层先经历了明显的顺时针旋转,且旋转幅度大于 $10^\circ \sim 21.5^\circ$;而后与上新世—中更新世地层一起,经历了逆时针旋转(14.4°)。由于发生顺时针旋转变形最年轻的地层为始新世,所以顺时针旋转开始发生的时间应该晚于始新世,可能为渐新世—中新世某个时间段。而盐源盆地的古地磁研究表明逆时针旋转变形至少发生于3.6 Ma以来。

6.3 青藏高原东南缘构造旋转变形

图8是以欧亚大陆为参考极^[44]计算出的青藏高原东南缘构造旋转变形量随时间变化图。可以看出,从侏罗纪到40 Ma青藏高原东南缘的构造旋转变形量虽然个别数据差别较大,但整体落在 $10^\circ \sim 50^\circ$ 范围之内。盐源盆地古新世—始新世地层的古地磁结果

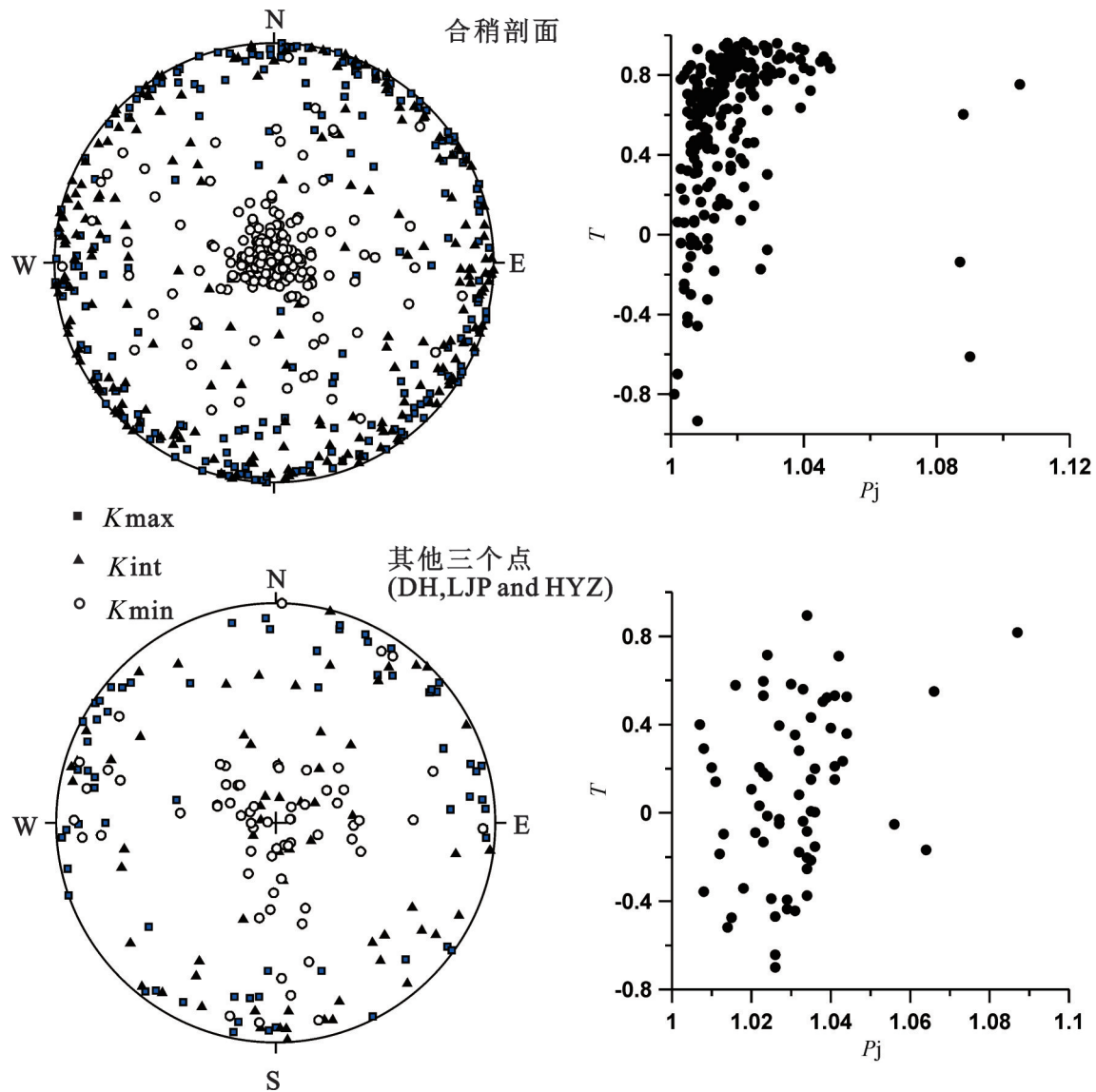


图5 经过倾斜校正后的磁化率各向异性数据

上图合稍剖面的磁化率椭球体等面积投影图(Kmax为最大轴;Kint为中间轴;Kmin为最小轴)及各向异性度(Pj)与形状参数(T)相关图;下图为其他三个点(大河乡、刘家坪以及红崖子)的磁化率椭球体等面积投影图及各向异性度(Pj)与形状参数(T)相关图

Fig. 5 left: Stereonet projections of the AMS principal axes of the Heshao section and the other three localities, including maximum (Kmax), intermediate (Kint) and minimum (Kmin) directions, in tilt-corrected coordinates; right: The Pj-T diagrams of the Heshao section and the other three localities

表1 合稍剖面两个砂岩样品的ESR测年数据
Table 1 The ESR data from two sandstones of the Heshao section

野外编号	岩性描述	深度 / m	U/($\mu\text{g/g}$)	Th/($\mu\text{g/g}$)	K ₂ O/ %	含水量/ %	古剂量/Gy	年剂量/(Gy/ka)	年龄/ ka
1	棕色松散砂	14.8	2.72	6.91	1.37	10	2242±336	2.38	942±141
2	棕色松散砂	24	1.85	11.0	1.05	6	2778±417	2.29	1213±182

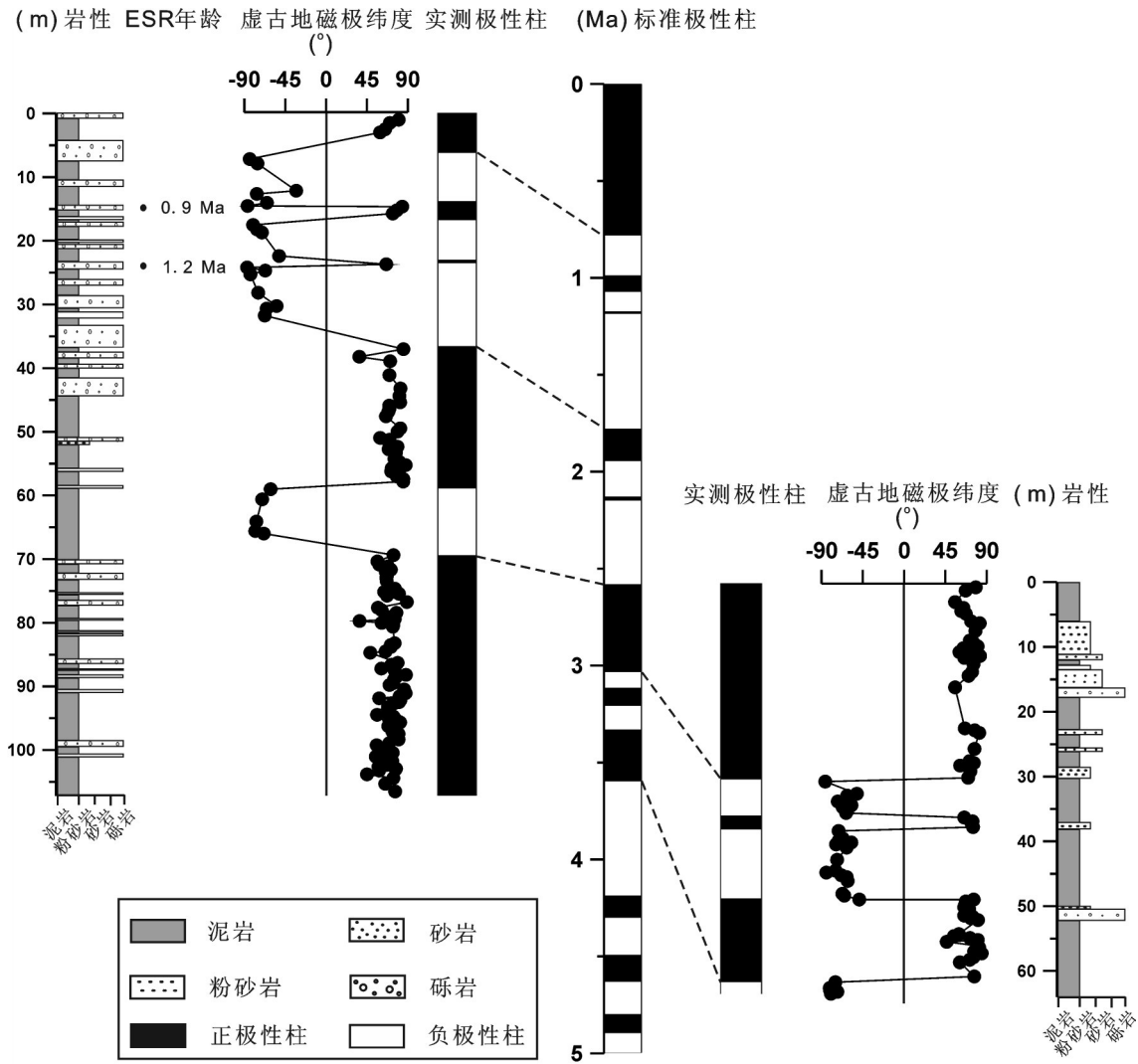


图6 合稍剖面南段(左)和北段(右)实测极性柱与标准极性柱^[43]对比
(南段从左到右依次为岩性柱、ESR年龄、虚古地磁极纬度以及实测极性柱)

Fig. 6 The correlation of the observed polarity zones of the Heshao section to the GPTS^[43]

The magnetostratigraphy of the south part of the Heshao section includes from left to right lithostratigraphy, ESR ages, virtual geomagnetic polarity (VGP) latitude and observed polarity column

(17.3°)与区域研究结果大体一致。相比较而言,对青藏高原东南缘中新世—第四纪地层的研究相对较少。有限的研究表明,虽然个别研究(泰国西部)仍然表明了顺时针旋转变形,但大多数中新世—第四纪地层经历了少量的逆时针构造旋转,或者几乎没有旋转(图8)。本文对盐源盆地上新世—中更新世地层的研究结果(-14.4°)也表明了逆时针旋转变形。综合结果似乎表明青藏高原东南缘中新世—第四纪地层经历了复杂的构造旋转变形历史。

因此,结合区域已有研究,本文研究表明青藏

高原东南缘侏罗纪—始新世地层可能整体发生了顺时针构造旋转变形(10°~50°)。由于发生变形的最年轻地层为始新世,所以顺时针旋转变形发生的时间应晚于始新世,可能为始新世—中新世某个时间段^[22]。不过,对区域中新世—第四纪地层的调查得出了多种不同的结果,包括逆时针旋转、顺时针旋转以及没有旋转。本文研究结果表明盐源盆地记录的逆时针旋转变形发生于至少3.6 Ma以来,旋转幅度为14.4°,平均旋转速率为4°/Ma。

青藏高原东南缘侏罗纪—始新世地层经历的

表2 盐源盆地两套地层的古地磁平均方向

Table 2 Average paleomagnetic directions from two sets of the Cenozoic strata of the Yanyuan basin

地点	时代	采样数量	N/R	D_g	I_g	D_s	I_s	κ	α_{95}
合稍	N ₂ -Q ₂	342	183/42	349.6	32.2	349.6	32.2	20.7	2.2
大河乡	P-E	25	0/15	219.2	0.9	210.4	-23	8	16.4
刘家坪	P-E	25	14/0	23.8	12.2	18.9	4.7	9.5	13.6
红崖子	P-E	16	13/5	47.9	19.8	29.8	32	16.1	8.9
后三者	P-E	66	27/20	37.8	12.1	26.2	21.2	9	7.6

注: N/R 为具有正极性和负极性样品的个数; D_g , I_g 和 D_s , I_s 分别表示构造校正前、后的磁偏角和磁倾角方向; κ 和 α_{95} 分别为构造校正后的 Fisher 统计精度参数以及 95% 置信区间; N₂-Q₂: 上新世—中更新世; P-E: 古新世—始新世。

表3 以欧亚大陆古新世—始新世和现代参考极^[44]计算出的盐源盆地不同地点的古地磁期望值

Table 3 Expected paleomagnetic values of the Yanyuan basin calculated from the apparent polar wander path (APWP) of Eurasia as a reference pole^[44]

时代	λ (°N)	Φ (°E)	α_{95} (°)	地点	D_{exp} (°)	I_{exp} (°)	α_{95} (°)	$R \pm \Delta R$
0 Ma	86.3	172	2.6	合稍	4.0	47.5	2.5	-14.4 ± 2.7
P-E (30~60 Ma)	81.7	169.3	2.6	大河乡	8.9	49.6	2.4	21.5 ± 13.3
				刘家坪	8.9	49.4	2.4	10 ± 11.0
				红崖子	8.9	49.4	2.4	20.9 ± 6.4

注: Φ (°E) 和 λ (°N) 分别为古地磁极经纬度; D_{exp} 和 I_{exp} 分别为磁偏角和磁倾角期望值; $R \pm \Delta R$ 为计算出的旋转变量及误差。

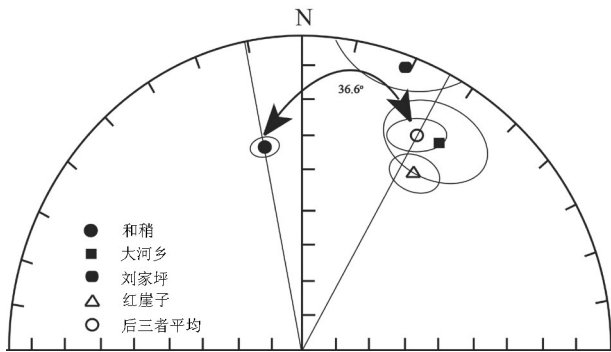


图7 古地磁磁偏角揭示的盐源盆地古新统一始新统(大河乡、刘家坪、红崖子)与上新统一中更新统(合稍)间的构造旋转

Fig.7 Paleomagnetic declination difference between the Paleocene-Eocene and Pliocene-Quaternary deposits of the Yanyuan basin

整体顺时针构造旋转运动可能与早期红河—哀牢山断裂带的左旋走滑活动有关^[16-18]。而且,顺时针旋转变形的时间(始新世—中新世)也与红河—哀牢山剪切带早期左行走滑的时间相当。此外,受红河—哀牢山大型断裂带的控制,区域地层可能会经历或多或少的挤压构造变形。盐源盆地磁组数

据显示古新世—始新世地层经历了弱挤压构造应力作用,但上新世—中更新世地层基本没有。有研究表明,红河—哀牢山断裂带从上新世开始低速的右旋走滑^[25,29],且其不再是一条主要的大陆转换断层^[19,30-31]。因此,至少自上新世以来,盐源盆地在构造上不再受红河—哀牢山断裂带控制。新近纪盐源盆地的形成是川滇块体向南东挤出过程中发育的构造逸出盆地,挤出作用使该区由原来的逆冲挤压状态转变为引张状态下的构造逃逸系统^[48]。因此,据猜测,盐源盆地上新统一中更新统经历的逆时针旋转变形(-14.4°)可能与盐源盆地周围的走滑断裂带的活动有关,包括理塘左行走滑断裂带、九龙右行走滑断裂带等(图1)。不过,需要进一步的研究来详细制约这些走滑断裂带是如何控制盆地旋转变形过程。

7 结论

本文对盐源盆地两套地层(古新统一始新统与上新统一中更新统)进行了系统的古地磁分析。在两个 ESR 年龄的精确制约下,详细的磁性地层研究

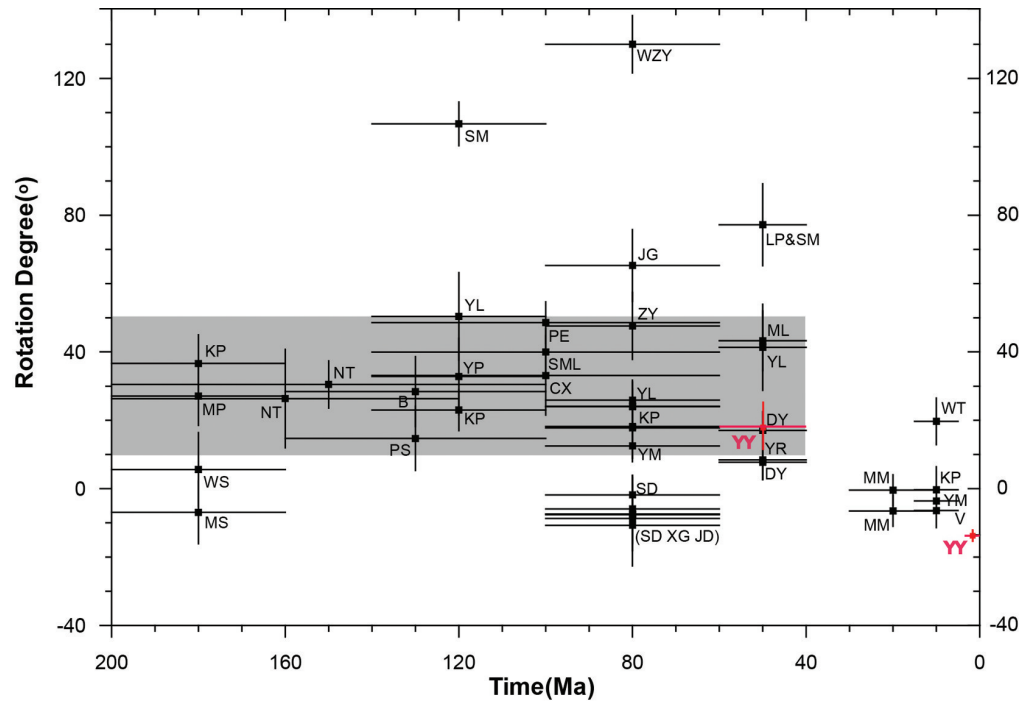


图8 以欧亚大陆为参考极^[44]计算出的青藏高原东南缘构造旋转变形量随时间变化图

(改编自李仕虎等^[22],图中红色部分为本文研究结果。垂直线和水平线分别代表在95%置信区间内构造旋转变形的误差和采样地层的时间范围)字母代表地名的缩写,地名包括B: Borikhanxay; CX—楚雄; DY—大姚; HL—会理; JD—景东; JG—景谷; KP—呵叻高原; L&S—兰坪及思茅; ML—勐腊; MM—Mae Moh; MP—Muang Phin; MS—Mae Sot; NT—泰国北部; PE—普洱; PS—Phong Saly; SD—Song Da; SM—思茅; SML—勐腊南部; V—越南; WT—泰国西部; WS—巍山; WZY—镇沅西; XC—西昌; XG—下关; YA—雅安; YL—云龙; YM—元谋; YP—永平; YR—永仁; YY—盐源; ZY—镇沅

Fig. 8 The rotational degree of the southeastern margin of the Tibet as a function of age modified from Li et al^[22]. The red parts represent this study. The vertical and horizontal lines indicate respectively 95% confidence intervals in rotation and uncertainty in age or age span

表明合稍上新世—中更新世地层的时代为 $>3.6\sim 0.6$ Ma。磁偏角数据揭示了上新世—中更新世地层经历了逆时针旋转变形(14.4°),而古新世—始新世经历了明显的顺时针旋转($10^\circ\sim 21.5^\circ$)。古新世—始新世地层的结果与青藏高原东南缘已有的构造旋转结果基本一致。鉴于青藏高原东南缘发生大规模顺时针旋转变形的最年轻地层为始新世地层,因此顺时针旋转变形可能发生在始新世—中新世某个时间段。盐源盆地记录到的逆时针旋转发生于至少3.6 Ma以来,平均旋转速率为 $4^\circ/\text{Ma}$ 。由于磁组构数据表明上新世—中更新世地层并未受到挤压变形作用,因此其逆时针旋转变形可能受周围走滑断裂带的控制。

致谢:感谢中国科学院地球环境研究所强小科研究员和中国地震局地质研究所李建平高工分别在古地磁和ESR实验中给予的帮助,以及匿名审稿专家和责任编辑李亚萍老师提出的宝贵修改意见!

参考文献(References):

- [1] Tapponnier P, Xu Z, Roger E, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1671–1677.
- [2] Houseman G, England P. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian–Asian continental collision[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 12,233–12,249.
- [3] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, 1975, 189: 419–426.
- [4] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 2000, 28: 703–706.
- [5] Royden L H, Burchfiel B C, King R E et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276: 788–790.
- [6] Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature geoscience*, 2010, 3: 358–362
- [7] Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L Z, et al. Miocene to

- present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow[J]. *GSA Bulletin*, 2006, 118: 672–688.
- [8] Otofujii Y, Inoue Y, Funahara S, et al. Palaeomagnetic study of eastern Tibet—deformation of the Three Rivers region[J]. *Geophysical Journal of International*, 1990, 103: 85–94.
- [9] Otofujii Y, Liu Y, Yokoyama M, et al. Tectonic deformation of the southwestern part of the Yangtze craton inferred from paleomagnetism[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 47–60.
- [10] Huang K, Opdyke N D. Paleomagnetism of Cretaceous to lower Tertiary rocks from Southwestern Sichuan: a revisit[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 112: 29–40.
- [11] Huang K, Opdyke N D. 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117: 507–524.
- [12] Chen H, Dobson J, Heller F, et al. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the Simao region since the Cretaceous: a consequence of India–Asia collision[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 134: 203–217.
- [13] Sato K, Liu Y, Zhu Z, et al. Paleomagnetic study of middle Cretaceous rocks from Yunlong, western Yunnan, China: evidence of southward displacement of Indochina[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 165: 1–15.
- [14] Sato K, Liu Y, Zhu Z, et al. Tertiary paleomagnetic data from northwestern Yunnan, China: further evidence for large clockwise rotation of the Indochina block and its tectonic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185: 185–198.
- [15] Sato K, Liu Y Y, Wang Y B. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China: Evidence of internal deformation of the Indochina block[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, 258: 1–15, doi:10.1016/j.epsl.2007.02.043.
- [16] Yang Z, Besse J, Paleomagnetic study of Permian and Mesozoic sedimentary rocks from Northern Thailand supports the extrusion model for Indochina[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117: 525–552.
- [17] Yang Z Y, Besse J, Suteetorn V, et al. Lower–Middle Jurassic paleomagnetic data from the Mae Sot area (Thailand): Paleogeographic evolution and deformation history of Southeastern Asia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 136: 325–341.
- [18] Yang Z, Yin J, Sun Z, et al. Discrepant Cretaceous paleomagnetic poles between Eastern China and Indochina: a consequence of the extrusion of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 2001, 334: 101–113.
- [19] Shen Z K, Lu J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: B11409. doi:10.1029/2004JB003421.
- [20] Benammi M, Urrutia–Fucugauchi J, Alva–Valdivia L M, et al. Magnetostratigraphy of the middle Miocene continental sedimentary sequences of the Mae Moh Basin in northern Thailand: Evidence for counterclockwise block rotation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 204: 373–383, doi: 10.1016/S0012–821X(02)01002–6.
- [21] Zhu R X, Potts R Y, Pan X, et al. Paleomagnetism of the Yuanmou Basin near the southeastern margin of the Tibetan Plateau and its constraints on late Neogene sedimentation and tectonic rotation[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, 272: 97–104, doi: 10.1016/j.epsl.2008.04.016.
- [22] 李仕虎, 黄宝春, 朱日祥. 青藏高原东南缘构造旋转的古地磁学证据[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 76–94.
Li Shihu, Huang Baochun, Zhu Rixiang. Paleomagnetic constraints on the tectonic rotation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(1): 76–94 (in Chinese with English abstract).
- [23] Tapponnier P, Peltzer G, LeDain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10: 611–616.
- [24] Leloup P H, Harrison T M, Ryerson F, et al. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike–slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98 (B4): 6715–6743, doi:10.1029/92JB02791.
- [25] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251: 73–84, doi:10.1016/0040–1951(95)00070–4.
- [26] Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, et al. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan–Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in *The Tectonic Evolution of Asia*[C]// Yin A. and Harrison M. T. (eds.). Cambridge Univ. Press, New York, 1996: 208–226.
- [27] Wang E, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right–lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan syntaxis[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1997, 39: 191–219.
- [28] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan–Red River shear zone, SE Asia[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B4): 6683–6732, doi:10.1029/2000JB900322.
- [29] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan–Red

- River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 1990, 343: 431–437, doi: 10.1038/343431a0.
- [30] King R W, Shen F, Burchfiel B. C., et al. Geodetic measurement of crustal motion in southwest China[J]. *Geology*, 1997, 25: 179–182.
- [31] Chen Z, Burchfiel, B. C. Liu Y, et al. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India–Eurasia intercontinental deformation[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105: 16,215–16,227.
- [32] Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe–Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China[J]. *Special Paper of Geological Society of America*, 1998, 327: 1–108.
- [33] Wang S F, Jiang G G, Xu T D, et al. The Jinhe–Qinghe fault—An inactive branch of the Xianshuihe–Xiaojiang fault zone, Eastern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2012, 544–545: 93–102.
- [34] 四川省地质调查局. 四川省地质图(盐源幅)[M]. 北京: 地质出版社, 1971.
Sichuan Bureau of Geological Survey. The geological map of Sichuan Province(Yanyuan sheet) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1971(in Chinese).
- [35] Zijderveld J D A. A.C. demagnetization of rocks: analysis of results[M]. *Methods in Paleomagnetism*, 1967: 254–286.
- [36] Kirschvink J. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, 62: 699–718.
- [37] Fisher R. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*[J]. *Mathematical and Physical Sciences*, 1953, 217: 295–305.
- [38] Enkin R J. *Paleomagnetism data analysis: version 4.2*. Geol. Surv. Can., Sidney, BC, 2004.
- [39] Tarling D H, Hrouda F. *Magnetic Anisotropy of Rocks*[J]. Chapman and Hall, London, 1993: 573.
- [40] 王萍, 李建平, 王建存, 等. 四川昔格达组地层的石英Ti心ESR测年及与磁性地层剖面的对比[J]. *核技术*. 2011, 34(2): 111–115.
- Wang Ping, Li Jianping, Wang Jiancun, et al. Quartz Ti-center in ESR dating of Xigeda formation in Sichuan and contrast with magnetic stratigraphic profiles[J]. *Nuclear Techniques*, 2011, 34 (2): 111–115(in Chinese with English abstract).
- [41] Huang B C, Wang Y C, Zhu R X. New paleomagnetic and magnetic fabric results for Early Cretaceous rocks from the Turpan intramontane basin, east Tianshan, northwest China[J]. *Sci China Ser. D Earth Sci*, 2004, 47: 540–550.
- [42] Parés J, van der Pluijm B A, Dinarès–Turell J. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, northern Spain) [J]. *Tectonophysics*, 1999, 307: 1–14.
- [43] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. *Episodes*, 2004, 27: 83–100.
- [44] Besse J, Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr[J]. *J Geophys Res–Sol Earth*, 2002, 107.
- [45] Chen Y, Gilder S, Halim N, et al. New paleomagnetic constraints on central Asian kinematics: Displacement along the Altyn Tagh fault and rotation of the Qaidam Basin[J]. *Tectonics*, 2002, 21.
- [46] Tan X, Kodama K, Chen H, et al. Paleomagnetism and magnetic anisotropy of Cretaceous red beds from the Tarim basin, northwest China: evidence for a rock magnetic cause of anomalously shallow paleomagnetic inclinations from central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (B2): 2107. doi:10.1029/2001JB001608.
- [47] Yan M D, VanderVoo R, Fang X M, et al. Paleomagnetic evidence for a mid–miocene clockwise rotation of about 25 degrees of the Guide Basin area in NE Tibet[J]. *Earth Planet Sc Lett*, 2006, 241: 234–247.
- [48] 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 青藏高原东南缘晚第三纪盐源构造逸出盆地的沉积特征与构造控制[J]. *矿物岩石*. 2001, 21: 34–43.
Li Yong, Hou Zhongjian, Si Guangying, et al. Sedimentary characteristics and tectonic controls in Neogene Yanyuan tectonic escape Basin in Southeastern Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Journal of Mineral and Petrol*. 2001: 21: 34–43.