



论文

青藏高原羌北地块晚古生代古地磁研究的初步结果

程鑫^①, 吴汉宁^{①*}, 郭强^①, 侯宝宁^①, 夏玲燕^①, 王海军^①, 刁宗宝^①, 霍斐斐^①, 计文化^②, 李荣社^②, 陈守建^②, 赵振明^②, 刘晓吉^②^① 西北大学地质学系, 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;^② 西安地质矿产研究所, 西安 710054

* 联系人, E-mail: wuhn2506@nwu.edu.cn

收稿日期: 2010-03-24; 接受日期: 2010-11-17

中国地质调查局国土资源大调查综合研究项目(编号: 1212010610102)、国家自然科学基金项目(批准号: 41074045)和陕西省普通高等学校重点学科专项资金(批准号: 081802)资助

摘要 羌塘地区是解决特提斯的演化和冈瓦纳大陆与欧亚大陆界线问题的关键地区. 对青藏高原羌北地块晚古生代及早三叠世剖面(33.7°N, 86.7°E)15 个采点 163 块砂岩、灰岩和安山岩定向样品进行了系统的古地磁学实验研究. 结果表明: 样品中主要载磁矿物为赤铁矿和磁铁矿. 在逐步热退磁和热-交变混合退磁过程中, 大部分样品的剩磁具有明显的双分量特征, 低温分量方向在地理坐标系下接近于现代地磁场偶极子场(PEF)方向, 很可能是粘滞剩磁; 高温分量显著不同于 PEF 方向. 部分样品具有单分量特征, 并与双分量样品的高温分量方向一致. 高温特征剩磁分量可通过 95%置信度的倒转检验和 99%置信度的褶皱检验, 并且有岩脉检验, 应代表岩石形成时的原生剩磁. 羌北古地磁极位置: 晚石炭世(31.8°S, 45.7°E, ($dp=3.9$, $dm=2.1$)); 早、中二叠世(31.7°S, 46.8°E, ($dp=16.9$, $dm=9.2$)); 晚二叠世(34.4°S, 54.1°E, ($dp=12.5$, $dm=6.9$)); 早三叠世(16.9°S, 22.5°E($dp=9.2$, $dm=4.9$)).

关键词古地磁
特提斯构造演化
羌北地块
晚古生代
岩石磁学

青藏高原特提斯演化和冈瓦纳与欧亚大陆的界线是地学界几十年持续的研究热点. 印度河-雅鲁藏布江板块缝合带、班公湖-怒江板块缝合带、西金乌兰-金沙江缝合带在不同时期都曾经被认为是冈底斯与欧亚两大板块的界线或者是古特提斯洋演化的记录. 但最新研究结果表明龙木错-双湖板块缝合带很可能是冈瓦纳大陆的北界和古特提斯洋主域^[1]. 总之, 羌塘地区已成为青藏高原地学研究的热点地区之一^[2-8].

近几十年来, 中外学者在青藏高原及邻近地区

获得了较多的中、新生代古地磁数据^[9-17]. 但涉及前中生代系统的古地磁研究较少, 该区前中生代各个地块(各自及相互关系)的运动学特征未得到充分注重, 以至于青藏高原的地壳运动学研究滞后于动力学研究, 对该区大陆岩石圈构造演化过程的一些关键点还未达到共识^[18-21], 比如说冈瓦纳大陆和欧亚大陆的界线还存较大争议^[11,5,22,23].

为此, 我们分别对羌北地块、羌南地块和冈底斯地块晚古生代地层进行了系统的岩石磁学和古地磁

学实验研究, 以期研究青藏高原主要地块晚古生代不同历史阶段陆块位置变化及其运动学特征, 为厘定冈瓦纳大陆和欧亚大陆的界线提供古地磁证据. 本文报告羌北地块古地磁研究结果.

1 地质概况与采样

羌北地块位于青藏高原腹地, 夹于西金乌兰-金沙江缝合带和龙木错-双湖缝合带之间. 羌北晚古生代沉积出露较齐全, 主要分布于保护站到热觉茶卡地区(图 1). 根据岩石序列, 生物化石组合特征, 整个羌北地区晚古生代地层序列可依次划分为上石炭统瓦垄山组($C_{1-2}w$)、下二叠统长蛇湖组(P_{1c})、中二叠统雪源河组(P_{2x})、上二叠统热觉茶卡组(P_{3r})和下三叠统

康鲁组(T_{1k})等.

上石炭统瓦垄山组主要岩性为灰黑色灰岩、生物灰岩、珊瑚礁灰岩, 含大量珊瑚、笔石和腕足类化石; 中、下二叠统以灰岩、生物灰岩、砾屑灰岩、砂质灰岩、安山岩等为主, 富含珊瑚、笔石和腕足类、苔藓虫等化石; 上二叠统热觉茶卡组, 主要岩性为灰岩、砂质灰岩、砂岩、页岩等, 夹有炭质页岩和煤层(线); 下三叠统以灰岩、鲕粒灰岩、砂屑灰岩、钙质砂岩等为主. 该区石炭-三叠纪表现为稳定大陆边缘的浅海沉积, 生物繁盛、礁体发育, 基本为连续沉积^{[24]1)}. 岩石没有发生变质, 变形较弱. 侵入岩不发育, 仅见小型晚三叠世岩体. 羌北地区的褶皱变形作用主要发生于晚三叠-晚侏罗世^[25,26].

样品的采集使用 Mode1Do26-T6 便携式钻机取

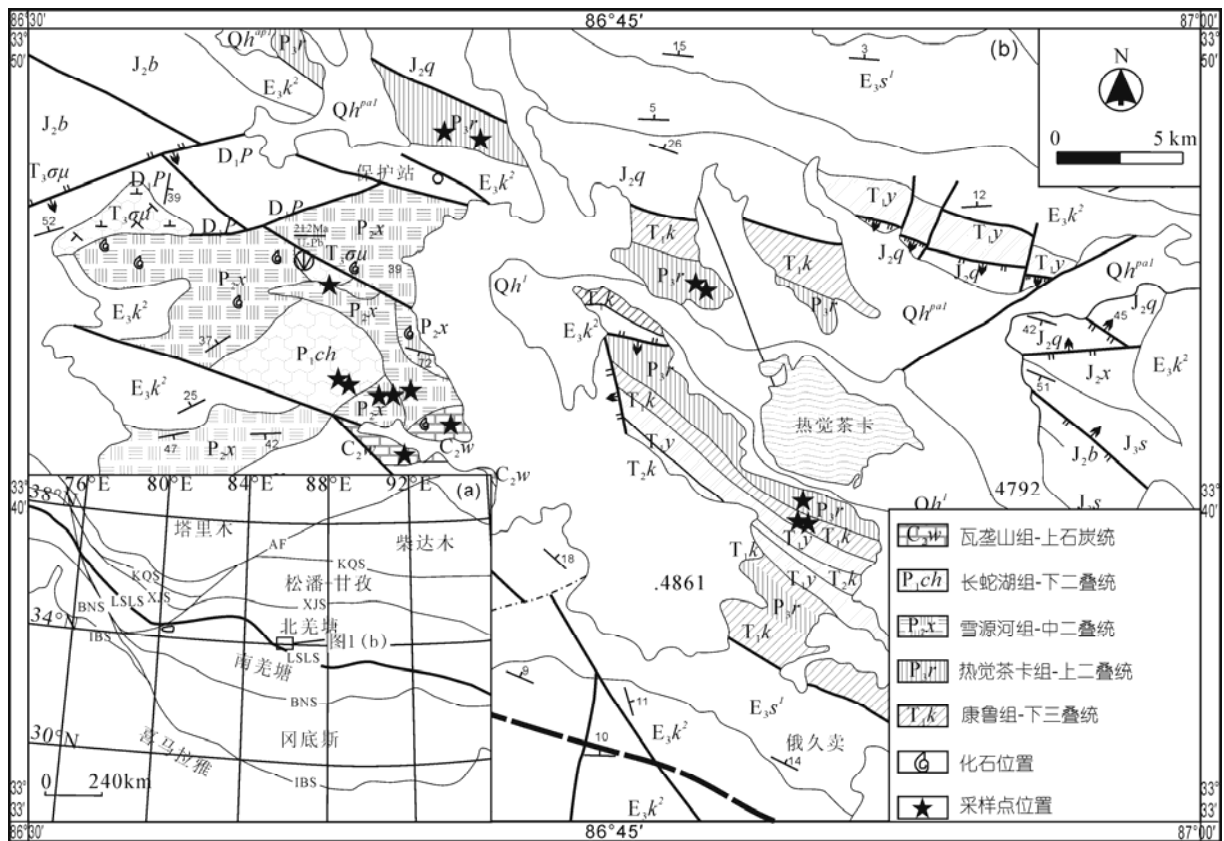


图 1 研究区大地构造简图(a)及采样区地质简图(b)

IBS, 印度河-雅鲁藏布江缝合带; BNS, 班公湖-怒江缝合带; LSLs, 龙木错-双湖-澜沧江缝合带; XJS, 西金乌兰-金沙江缝合带; KQS, 康西瓦-昆南-玛沁缝合带; AF, 阿尔金断裂. 据 1) 修改

1) 西藏 1:25 万玛依岗日幅(I45C003002)区域地质调查报告. 吉林: 吉林大学地质调查研究院, 2006

岩芯样品, 配合使用 Mode1OR-2 定向器和磁罗盘对钻孔岩芯进行定向. 于羌北晚古生代地层中选择合适剖面采集古地磁样品(见图 1), 布置 15 个采点, 获取独立定向岩心标本 139 块.

2 岩石磁学与剩磁实验研究

所有实验工作在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室进行^[27]. 为了确定标本中载磁矿物类型, 对部分样品进行了等温剩磁(IRM)和三轴等温剩磁的热退磁实验^[28]. 根据实验结果可将标本分为 3 种类型(图 2): (1) IRM 曲线(图 2(a))在较低的磁化场(小于 200 mT)下, 样品有一比较明显地迅速达到饱和的趋势, 而后随着外加磁场的增强, 其磁化强度至 2.7 T 时仍未见饱和趋势. 三轴热退磁实验(图 2(d))显示, 中等和硬磁成分的退磁曲线在 320℃ 左右有一衰减, 可能含有一些磁黄铁矿或磁赤铁矿, 该样品的软(小于 0.04 T)、中(0.04~0.4 T)和硬(0.4~2.7 T)磁成

分均表现出 670℃ 左右的解阻温度, 表明这类样品的主要携磁矿物为赤铁矿. (2) IRM 曲线(图 2(b))在 200 mT 外磁场作用下, IRM 强度迅速达到准饱和, 剩磁强度达到总磁化强度的 90% 以上, 说明这类样品中以较低矫顽力的铁磁性矿物为主要载磁矿物. 同一块样品的三轴等温剩磁的热退磁实验结果(图 2(e))表明, 软磁成分和中间磁成分占 99% 以上, 在 580℃ 左右衰减至零. 以上特征揭示这类样品的主要携磁矿物为较低矫顽力的磁铁矿. (3) 当外加磁场为 200 mT 时(图 2(c)), 样品的剩磁强度达到总磁化强度的 80%, 其后随着外加磁场的增强, 磁化强度缓慢增强, 至 2.7 T 时达到基本饱和, 说明样品中以较低矫顽力磁性矿物为主, 同时含有少量高矫顽力铁磁性矿物. 三轴热退磁实验(图 2(f))显示, 软磁成分和中等强度磁成分的强度衰减曲线直至 540℃ 基本保持单一变化, 判断其磁性矿物主要为磁铁矿. 硬磁成分的退磁曲线在 320℃ 左右有一衰减, 其后表现出 670℃ 左右的解阻温度, 说明该样品含有少量磁黄铁矿和一定量

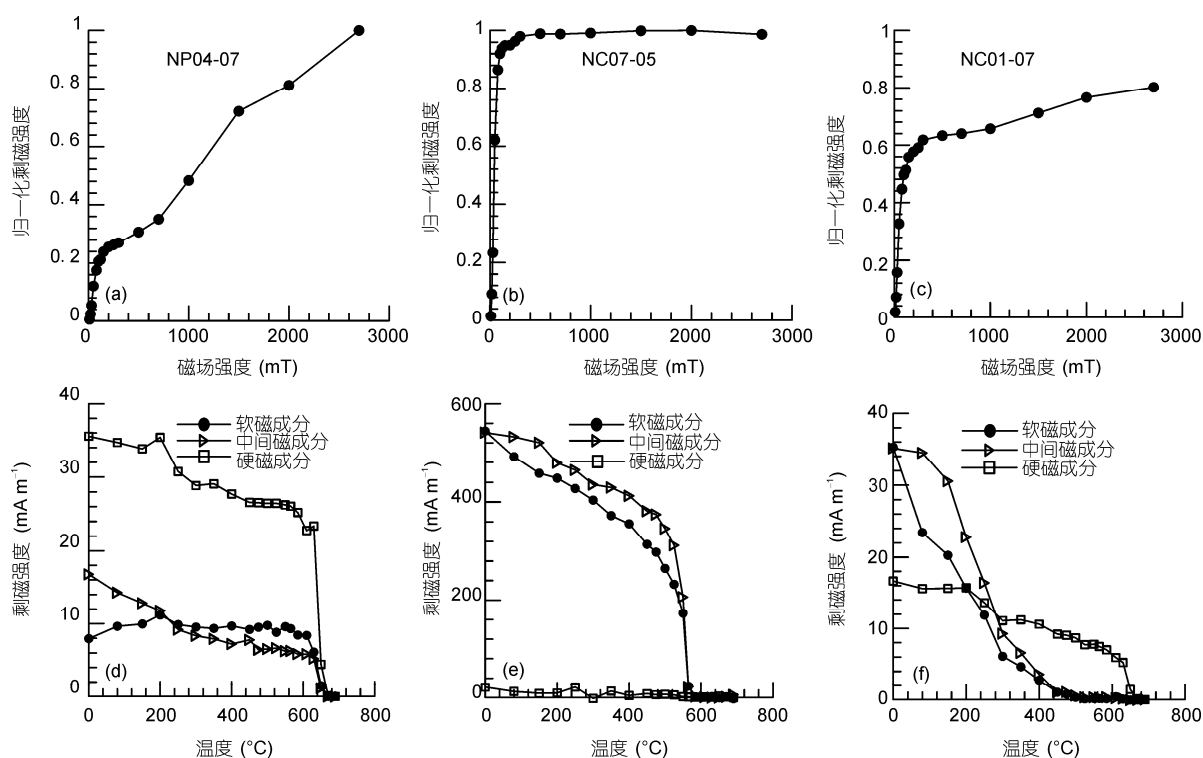


图 2 代表性样品等温剩磁获得曲线((a)~(c))及三轴等温剩磁热退磁曲线((d)~(f))

软磁成分(<0.04 T); 中间磁成分(0.04~0.4 T); 硬磁成分(0.4~2.7 T)

的赤铁矿. 上述实验表明, 羌北样品主要载磁矿物为赤铁矿或磁铁矿.

剩磁测量是在 2G-755R 型岩石超导磁力仪上完成的. 使用 MMTD 热退磁炉进行标本的加热和冷却. 绝大多数标本采用逐步热退磁法进行磁清洗, 对部分标本先进行逐步热退磁(至 300°C), 然后再进行逐步交变退磁处理. 图 3 给出了代表性标本的退磁曲线^[29]: (1) 大部分灰岩样品的剩磁具有明显的双分量特征(图 3(a)~(c)). 当退磁温度达到 300~350°C 时, 可除去在地理坐标系中与现代地磁场相近的低温分量; 高温分量可以在 400~565°C 温度段获得. (2) 中上二叠统的安山质玄武岩(图 3(d)~(f)). 样品天然剩磁强度很大, 一直到退磁温度升高至 680°C 左右, 样品的剩磁强度和方向才突然改变. 结合岩石磁学结果, 剩磁主要由赤铁矿携带. 值得注意的是, 同一采点

内剩磁存在正极性和反极性两种, 且正反极性分量在地层坐标系中呈对趾分布, 这是倒转检验的典型实例. (3) 单分量(图 3(g), (h)), 剩磁强度和方向在矢量图上表现为一条逼近原点的直线, 无低温分量和高温分量的区分. 天然剩磁强度随温度升高逐步衰减, 直至 580°C 左右解阻, 显示了磁铁矿的特征. (4) 部分样品两种剩磁分量交叠(图 3(i)), 用矢量分析法难以确定一个或两个分量, 采用带限制点的重磁化大圆弧交汇法^[30]处理. 我们注意到, 不管样品磁载体是以磁铁矿抑或赤铁矿为主, 大部分样品均显示了相近的高温特征剩磁方向.

3 剩磁分量统计分析及稳定性检验

根据 Kirschvink 主分量分析法^[31]求得每个样品的

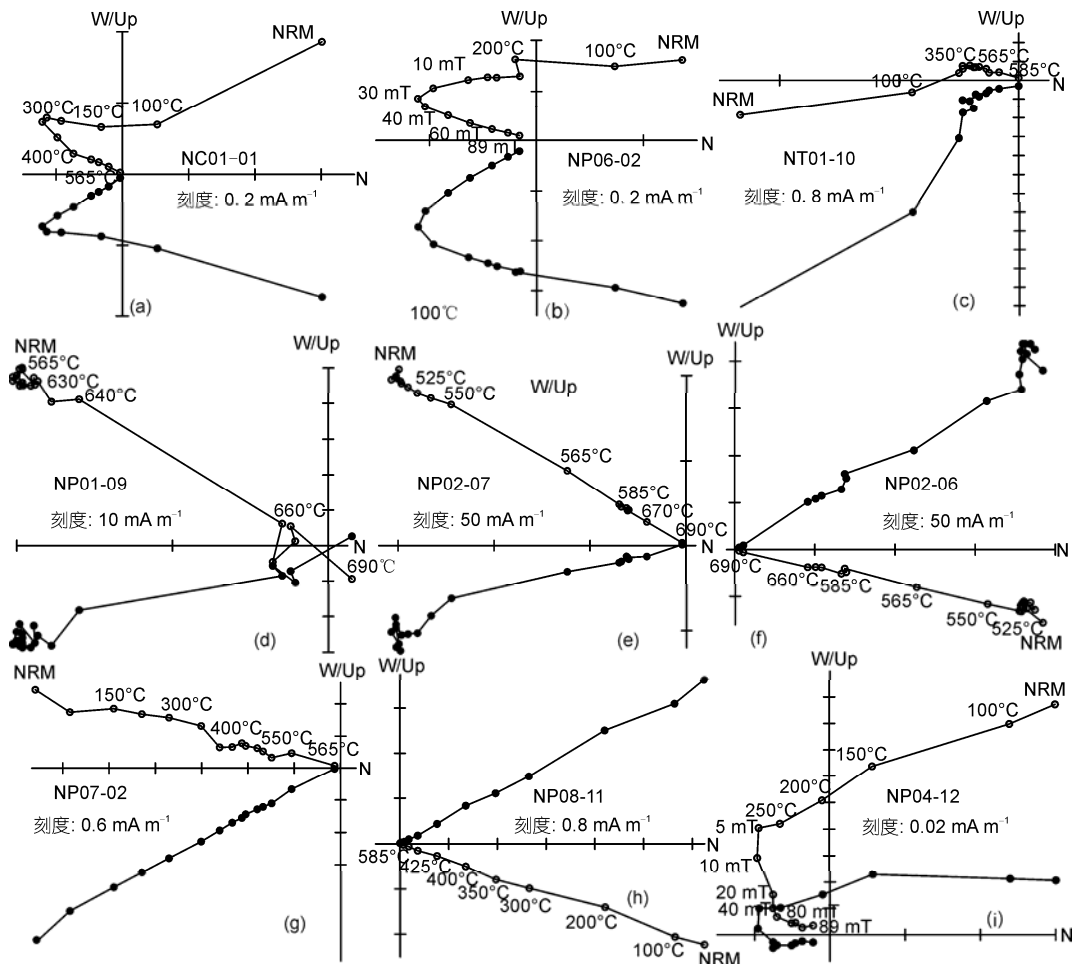


图 3 代表性样品的退磁矢量 Z_{ijd} 图
地层坐标系. 实心圆代表水平面投影; 空心圆代表垂直面投影

剩磁分量后, 对各剩磁分量进行标准 Fisher 统计^[32]. 对低温分量以“纪”为单位的统计结果, 在地理坐标系中与现今地磁场方向(PEF)比较; 对高温分量以采点为单位求得平均方向, 再以“世”为时间窗口分别进行统计分析, 同时进行褶皱检验(F-test 或 S-test)、倒转检验(R-test)或岩脉检验(BC-test). 计算过程中使用了 Enkin 编制的程序.

3.1 低温分量

大部分样品当加热温度达到 350℃, 均可分离出低温分量(表 1). 92 块双分量样品的低温分量平均方向: $D_g=354.9^\circ$, $I_g=54.8^\circ$, $K_g=18.2$, $\alpha_{95g}=3.5^\circ$ (地理坐标系), 接近于现代地磁场偶极子场方向(图 4), 可能是目前地磁场的粘滞剩磁.

表 1 羌北采区低温剩磁分量古地磁结果^{a)}

采样点	岩性	地层产状(°)	n/N	剩磁方向				K_g/K_s	$\alpha_{95g}/\alpha_{95s}$ (°)
		倾向/倾角		$D_g(^{\circ})$	$I_g(^{\circ})$	$D_s(^{\circ})$	$I_s(^{\circ})$		
NC01	生屑灰岩	7/40	10/11	358.2	50.5	1.3	10.8	220.2	3.3
NC02	细砂岩	7/48	6/8	10.5	49.4	9.3	1.5	26.4	13.3
石炭纪平均(样品水平)			(16)	2.8	50.3	4.3	7.4	56.3/47.8	5/5.4
NP01	安山岩	5/44	7/9	19.4	51.4	14	8.2	56.9	8.1
NP02	安山岩	5/44	5/10	39.9	58.9	23.2	18.7	13.8	21.3
NP03	砂屑灰岩	22/32	9/9	356.6	53	5.8	22.9	86.4	5.6
NP04	砂质灰岩	22/32	8/12	305.2	49.6	332	34.5	53.2	7.7
NP05	灰岩	225/50	9/9	357.8	50.1	281.8	55.9	47.9	7.5
NP06	细砂岩	23/42	7/9	309.5	59.9	347.9	33.2	24.5	12.4
NP07	砂屑灰岩	23/42	2/7	347.7	56.2	3.2	18.3	9.6	29.9
NP08	火山岩脉	31/85	0/13						
NP09	细砂岩	352/73	0/7						
NP10	粉砂岩	25/46	5/5	5.5	52	13	7.5	41.4	10.5
NP11	砂屑灰岩	196/62	6/8	7.3	61.9	203.2	55.6	28.8	12.7
二叠纪平均(样品水平)			(61)	351.3	57.5	352.1	37.1	15.1/4.4	4.8/9.9
NT01	碎屑岩	164/50	9/9	359.4	47.3	27.9	9.9	112.6	76.7
NT02	碎屑岩	164/50	6/6	358.4	52.5	18.8	15.9	130.5	74.1
三叠纪平均(样品水平)			15/15	359	49.4	120.5	75.8	24.6/24.6	7.9/7.9
总平均(样品水平)			(92)	354.9	54.8	359.2	42.4	18.2/3.7	3.5/8.9

a) N 为样品数, n 为参加统计分析的样品数; D_g , I_g (D_s , I_s) 为地理坐标下(地层坐标下)剩磁方向的偏角和倾角; K_g/K_s , $\alpha_{95g}/\alpha_{95s}$ 为平均方向的 Fisher 统计精度参数和在 95% 水平的置信圆锥半顶角

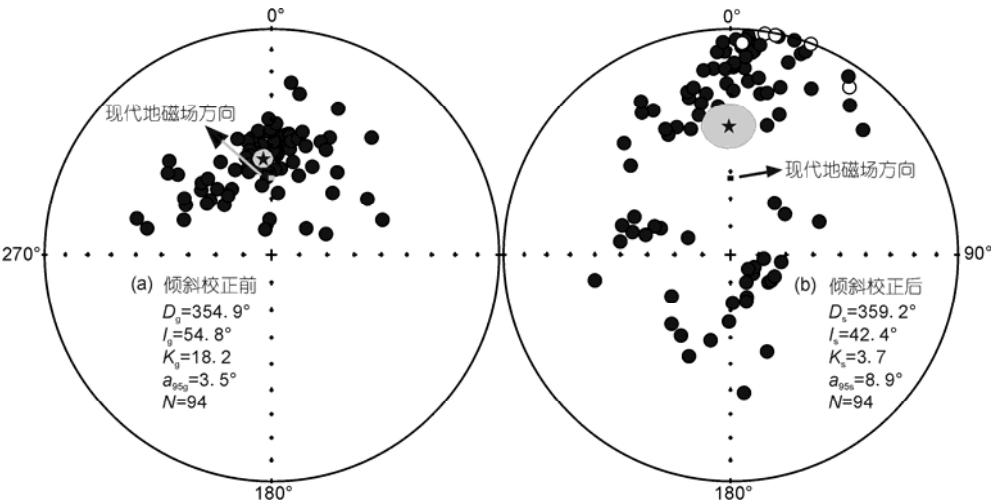


图 4 羌北样品低温分量赤平投影图
空心圆和实心圆分别代表上和下半球投影; 五角星代表总平均方向

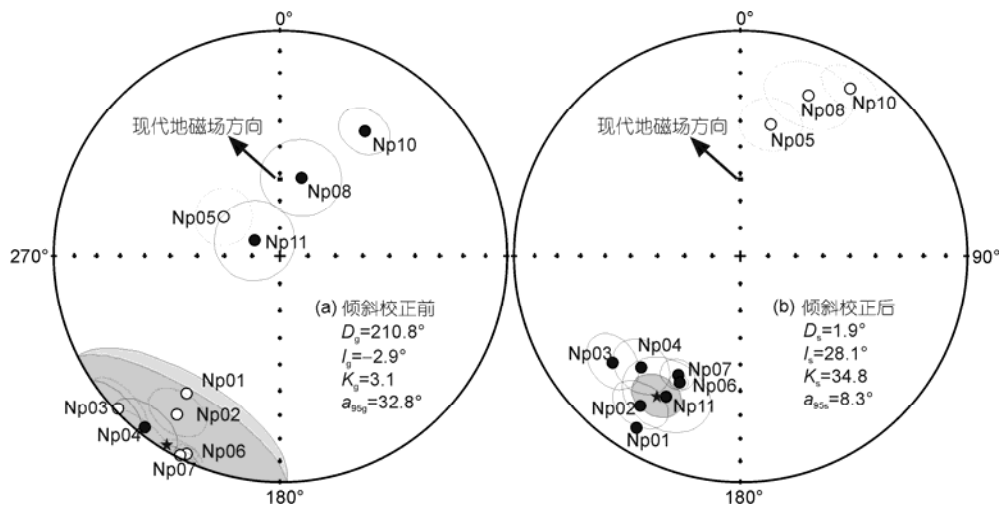


图 5 羌北二叠纪采点高温分量赤平投影图

3.2 高温分量

从晚石炭世 2 个采点 18 块样品中分离出高温分量, 平均方向(样品水品): $D_s=215.1^\circ$, $I_s=26.5^\circ$, $K_s=103.0$, $\alpha_{95s}=3.6^\circ$. 早、中二叠世(地层划分时未分)5 个采点 46 块样品中分离出高温分量, 平均方向: $D_s=214.3^\circ$, $I_s=27.4^\circ$, $K_s=25.4$, $\alpha_{95s}=15.5^\circ$. 晚二叠世 5 个采点 30 块样品中分离出高温分量, 平均方向: $D_s=207.5^\circ$, $I_s=28.8^\circ$, $K_s=45.9$, $\alpha_{95s}=11.4^\circ$. 早三叠世 2 个采点 15 块样品中分离出高温分量, 平均方向(样品水品): $D_s=241.2^\circ$, $I_s=20.6^\circ$, $K_s=20$, $\alpha_{95s}=8.8^\circ$. 二叠纪共有 10 个采点参与统计, 其中 7 个采点高温分量为指向南的正倾角(早、中二叠世 4 个, 晚二叠世 3 个): $D_s=214.2^\circ$, $I_s=29.3^\circ$, $K_s=42.4$, $\alpha_{95s}=9.4^\circ$, 3 个采点高温分量为向北的负倾角: $D_s=23.4^\circ$, $I_s=-25.2^\circ$, $K_s=24$, $\alpha_{95s}=25.8^\circ$. 两类高温分量在地层坐标系中呈对趾分布, 并且在 95% 置信水平上通过了倒转检验^[33](偏角与倾角分离处理及其评判标准: $\gamma=4.160957$, $\alpha_{95} \gamma_c=18.17747$, C 分量)(图 5). 将负倾角样品转换为正倾角, 用标准 Fisher 方法统计, 平均方向地理坐标系下为: $D_g=210.8^\circ$, $I_g=-2.9^\circ$, $K_g=3.1$, $\alpha_{95g}=32.8^\circ$; 产状校正后为: $D_s=210.9^\circ$, $I_s=28.1^\circ$, $K_s=34.8$, $\alpha_{95s}=8.3^\circ$. 显然岩层展平后的精度参数统计意义上有显著提高, 在 99% 置信水平为正褶皱检验^[34] ($K_s/K_g=11.23 > F(18,18)=3.13$). 如果将早、中二叠世和晚二叠世分开统计, 也分别能在 99% 置信水平通过褶皱检验. 同褶皱检验^[35]表明, 当岩层展平至 110% 时精度参数 K 达到最大(图 6), 表明高温剩磁分量应形成于褶皱运动前. 区域地

质研究表明, 羌北地区的褶皱变形作用主要发生于晚三叠-晚侏罗世, 石炭纪至三叠纪沉积连续, 构造活动较稳定^[25,26]. 在羌北上二叠统热觉察卡组岩脉中设置了一个采点(NP08), 采集 13 块定向岩芯标本, 用以检验老地层岩石剩磁记录与岩脉侵入(热事件)的关系. 结果表明, 采自岩脉不同位置的标本, 剩磁方向差异明显(图 7), 表明老地层岩石的特征剩磁信号, 记录了岩脉侵入之前的地磁场方向. 采点“NP09”全部为单分量样品, 剩磁方向地理坐标系下: $D_g=322.9^\circ$, $I_g=48.2^\circ$, $K_g=90.8$, $\alpha_{95g}=6.4^\circ$; 产状校正后为: $D_s=331.8^\circ$, $I_s=-19.8^\circ$, $K_s=90.8$, $\alpha_{95s}=6.4^\circ$. 与其他采点平均方向不一致, 原因有待研究, 其方向未参与最终统计. 晚石炭世和早三叠世地层产状变化不大, 无法

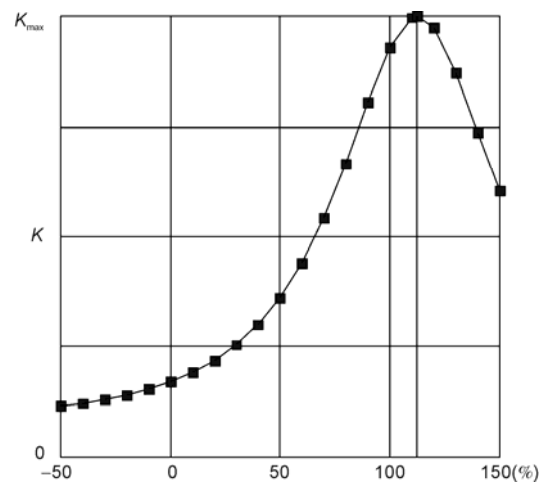


图 6 羌北二叠纪高温分量方向同褶皱检验示意图

进行严格的褶皱检验, 但岩层展平后的精度参数在统计意义上也有提高, 其平均方向与二叠纪平均方

向有相同趋势(表 2), 故在逻辑上仍被认为是原生剩磁方向.

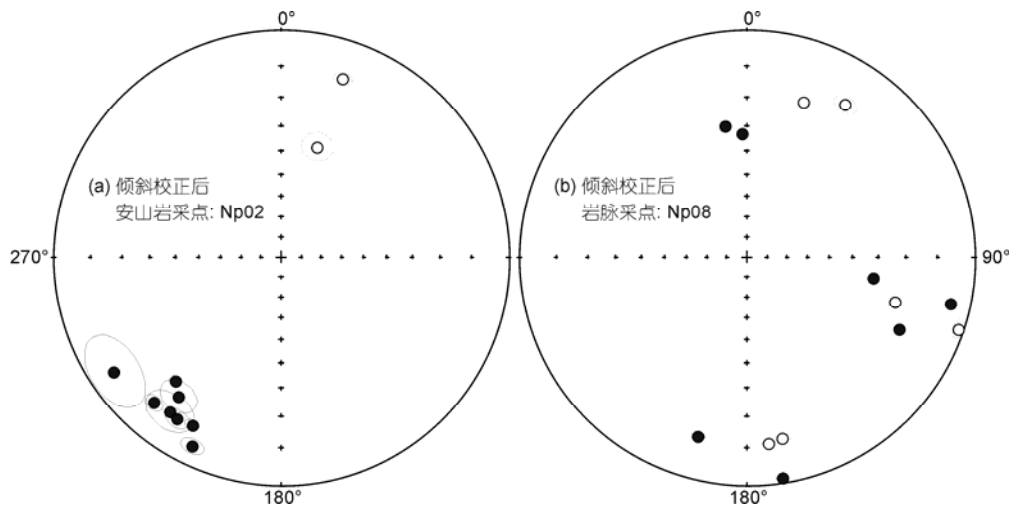


图 7 羌北高温分量方向岩脉检验示意图

表 2 羌北采区高温剩磁分量古地磁结果^{a)}

采样点	地层产状(°)	$n_1, n_2/N$	剩磁方向				K_g/K_s	$\alpha_{95g}/\alpha_{95s}(^\circ)$	视磁极位置	
	倾向/倾角		$D_g(^\circ)$	$I_g(^\circ)$	$D_s(^\circ)$	$I_s(^\circ)$			Φp	λp
NC01	7/40	8, 3/11	212	-10.4	214.5	25.7	195.4	3.3	-32.5	46
NC02	7/48	3, 4/8	216.8	-16.5	218.8	25.4	38.4	12.9	-30.2	41.9
平均(样品水平)		(18)	212.9	-11.4	215.1	26.5	83.3/103	4.0/3.6	-31.8	45.7
晚石炭世	古地磁极位置: $\Phi p=-31.8^\circ, \lambda p=45.7^\circ, dp=2.1, dm=3.9, \Phi_h=14.0^\circ N$									
NP01	5/44	9, 0/9	214.1	-27.4	211.2	12	803.4	1.8	-40.5	44.1
NP02	5/44	10, 0/10	213.1	-17.8	213.8	21.3	29	9.1	-34.9	44.9
NP03	22/32	5, 3/9	226.8	-1.7	230.1	27.2	37.3	9.5	-22.3	33.3
NP04	22/32	3, 8/12	218.2	3.7	221.6	34.2	24.4	9.9	-24.2	43.1
NP05	225/50	7, 1/9	305	-65.1	12.6	-39.8	29.8	10.4	32.4	252.9
平均(采点水平)		(5)	211.9	2.6	214.3	27.4	3.4/25.4	48.9/15.5	-31.7	46.8
早中二叠世	古地磁极位置: $\Phi p=-31.7^\circ, \lambda p=46.8^\circ, dp=9.2, dm=16.9, \Phi_h=14.5^\circ N$									
NP06	23/42	9, 0/9	205.3	-4.1	205.9	37.9	270.7	3.1	-29.7	58.7
NP07	23/42	6, 1/7	206.6	-1.7	207.7	40.2	110.2	5.8	-27.6	57.8
NP08	31/85	3, 0/13	15.4	60.5	22.7	-23.2	80.6	13.8	39.4	237.5
NP09*	352/73	7, 0/7	322.9	48.2	331.8	-19.8	90.8	6.4	38.6	303.2
NP10	25/46	3, 1/5	34	33.6	32.6	-11.9	125.2	8.7	39.7	222.6
NP11	196/62	3, 4/8	301.2	79.3	208	30.3	20.7	14.5	-33.3	54.1
平均(采点水平)		(5)	209.6	-9.3	207.5	28.8	2.4/45.9	63.5/11.4	-34.4	54.1
晚二叠世	地磁极位置: $\Phi p=-34.4^\circ, \lambda p=54.1^\circ, dp=6.9, dm=12.5, \Phi_h=15.4^\circ N$									
负极性		(7)	215.8	1.5	214.2	29.3	5/42.4	30/9.4	-30.8	47.6
二叠纪	正极性	(3)	10.1	19.9	23.4	-25.2	1.4/24	180/25.8	38	237.3
平均(采点水平)		(10)	210.8	-2.9	210.9	28.1	3.1/34.8	32.8/8.3	-33.1	50.4
二叠纪	古地磁极位置: $\Phi p=-33.1^\circ, \lambda p=50.4^\circ, dp=5.0, dm=9.1, \Phi_h=14.9^\circ N$									
NT01	164/50	9, 0/9	271.8	30.5	239.1	31.8	95.6	5.3	-14.1	29
NT02	164/50	6, 0/6	250	9.8	244	3.3	29.2	12.6	-20.4	13.3
平均(样品水平)		(15)	262.5	22.7	241.2	20.6	19.9/20	8.8/8.8	-16.9	22.5
早三叠世	古地磁极位置: $\Phi p=-16.9^\circ, \lambda p=22.5^\circ, dp=4.9, dm=9.2, \Phi_h=10.6^\circ N$									

a) N 为磁清洗样品数, n_1 为主分量分析样品数, n_2 为重磁化弧法样品数; $D_g, I_g(D_s, I_s)$ 为地理坐标下(地层坐标下)剩磁方向的偏角和倾角; $K_g/K_s, \alpha_{95g}/\alpha_{95s}$ 为平均方向的 Fisher 统计精度参数和在 95% 水平的置信圆锥半顶角; 带“*”采点未参与最终统计. 参考点: $33.7^\circ N, 86.7^\circ E$

4 结论

如前所述, 羌塘地区已成为解决特提斯的构造演化和冈瓦纳大陆与欧亚大陆界线问题的关键地区^[2,22,23,36,37]. 在羌塘地区获得可靠的古地磁数据, 将会为解决这些问题提供关键证据. 由于本文二叠纪特征剩磁方向 70%为负极性($D_s=214.2$, $I_s=29.3$, $K_s=42.4$, $\alpha_{95s}=9.4^\circ$), 30%为正极性($D_s=23.4$, $I_s=-25.2$, $K_s=24$, $\alpha_{95s}=25.8^\circ$), 与相应时期地磁场处于齐亚曼(Kiaman)负极性的观点一致^[38,39], 并且能够顺利通过倒转检验、褶皱检验和岩脉检验, 应该是相应时代的原生剩磁方向^[40,41]. 石炭纪、三叠纪的样品数量较少, 其结果与二叠纪结果“类比”, 也应该是相应时代的原生剩磁方向, 在表 2 中一并列出作为参考. 将本文结果以采样地(33.7°N, 86.7°E)为参考点, 计算羌北地块晚古生代极位置: 晚石炭世($\Phi_p=-31.8^\circ$, $\lambda_p=45.7^\circ$, $dp=2.1$, $dm=3.9$); 早、中二叠世($\Phi_p=-31.7^\circ$, $\lambda_p=46.8^\circ$, $dp=9.2$, $dm=16.9$); 晚二叠世($\Phi_p=-34.4^\circ$, $\lambda_p=54.1^\circ$, $dp=6.9$, $dm=12.5$); 早三叠世($\Phi_p=-16.9^\circ$, $\lambda_p=22.5^\circ$, $dp=4.9$, $dm=9.2$)(图 8). 相应的古纬度: 晚石炭世 $\Phi_h=14.0^\circ\text{N}$; 早、中二叠世 $\Phi_h=14.5^\circ\text{N}$; 晚二叠世 $\Phi_h=15.4^\circ\text{N}$; 早三叠世 $\Phi_h=10.6^\circ\text{N}$ (表 2). 可以看出羌北地块晚古生代主要位于 14°N 左右(限于篇幅, 与羌南块

体及冈底斯块体的关系将专文详述). 本文获得的羌北二叠纪古地磁极位置为研究羌北地块晚古生代大地构造演化提供一“锚点”, 同时也将为研究青藏高原特提斯演化, 为厘定冈瓦纳大陆与欧亚大陆的界线提供关键的古地磁证据.

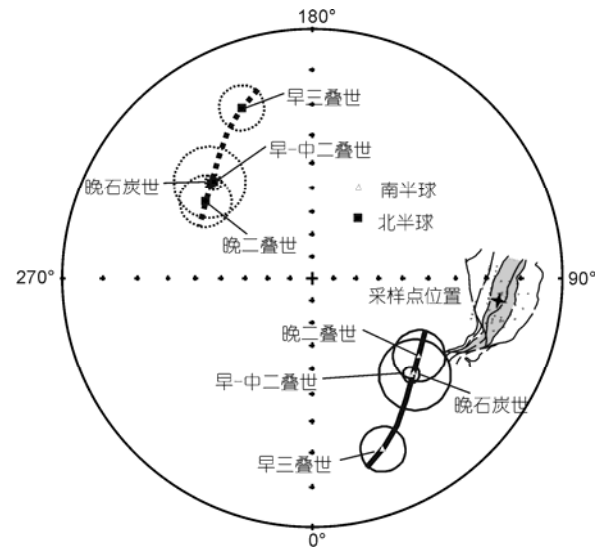


图 8 青藏高原羌塘地块晚古生代古地磁极位置
虚线表示的极移曲线为文中所得极位置的对趾点绘成

致谢 本研究的实验工作得到中国科学院地质与地球物理研究所朱日祥院士、黄宝春研究员, 以及尹济云、秦华峰、刘成英、乔庆庆、陈军山、李振宇、孙丽莎等同志的指导和帮助, 审稿人对本文作了认真审阅并提出了许多宝贵意见和修改建议, 在此深表谢意.

参考文献

- 1 李才. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年. 地质论评, 2008, 54: 105-119
- 2 李才, 翟刚毅, 王立全, 等. 认识青藏高原的重要窗口——羌塘地区近年来研究进展评述(代序). 地质通报, 2009, 28: 1169-1177
- 3 任纪舜, 肖黎薇. 1:25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱. 地质通报, 2004, 23: 1-11
- 4 刘池洋, 杨兴科, 任战利, 等. 藏北羌塘盆地查桑地区构造格局与演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(增刊): 14-19
- 5 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考. 地质通报, 2004, 23: 12-19
- 6 李荣社, 杨永成, 孟永. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(北区). 地质通报, 2004, 23: 421-426
- 7 王立全, 朱弟成, 潘桂棠. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(南区). 地质通报, 2004, 23: 413-420
- 8 王立全, 潘桂棠, 李才, 等. 藏北羌塘中部果干加年山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄-兼论原-古特提斯洋的演化. 地质通报, 2008, 27: 2045-2056
- 9 吴汉宁, 刘池阳, 张小会, 等. 用古地磁资料探讨柴达木地块构造演化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1997, 27: 9-14
- 10 方大钧, 王朋岩, 沈忠悦, 等. 塔里木地块新生代古地磁结果及显生宙视极移曲线. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28(增刊): 90-96
- 11 黄宝春, 王永成, 朱日祥. 吐鲁番山间盆地早白垩世岩石的磁组构和古地磁新结果. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 362-372
- 12 董学斌, 杨惠心, 李鹏武. 格尔木-额济纳旗地学断面地体构造的古地磁学研究. 地球物理学报, 1995, 38(增刊 II): 71-85
- 13 李永安, 李强, 张惠, 等. 塔里木及其周边古地磁研究与盆地形成演化. 新疆地质, 1995, 13: 293-376

- 14 李朋武, 高锐, 崔军文, 等. 西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析. 地球学报, 2005, 26: 387–404
- 15 孙丽莎, 黄宝春, 陈军山. 青藏高原诸块体的显生宙运动学与特提斯洋的演化. 见: 金翔龙, 秦蕴珊, 朱日祥, 主编. 中国地质地球物理学研究进展——庆贺刘光鼎院士八十华诞. 北京: 海洋出版社, 2008. 54–65
- 16 李朋武, 高锐, 管烨, 等. 古特提斯洋的闭合时代的古地磁分析: 松潘复理石杂岩形成的构造背景. 地球学报, 2009, 30: 39–50
- 17 尹济云, 孙知明, 杨振宇, 等. 滇西兰坪盆地白垩纪-早第三纪古地磁结果及其地质意义. 地球物理学报, 1999, 42: 648–659
- 18 常承法. 特提斯及青藏碰撞造山带的演化特点. 见: 徐贵志, 常承法, 主编. 大陆岩石圈构造与资源. 北京: 海洋出版社, 1992. 1–8
- 19 邓万明. 青藏古特提斯蛇绿岩带与“冈瓦纳古陆北界”. 见: 张旗, 主编. 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京: 地质出版社, 1996. 172–176
- 20 袁学诚, 李廷栋, 肖序常, 等. 青藏高原岩石圈三维结构及高原隆升的液压机模型. 中国地质, 2006, 33: 711–729
- 21 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. 中国地质, 2006, 33: 221–238
- 22 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界. 地学前缘, 2006, 13: 136–147
- 23 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分. 地质通报, 2002, 21: 701–707
- 24 Zhang Y C, Yuan D X, Zhai Q G. The Carboniferous and Permian sequences in north and south of the Longmucuo-Shuanghu suture zone in Tibet. Acta Geosci Sin, 2009, 30(Suppl 1): 94–96
- 25 李亚林, 王成善, 黄继钧. 羌塘盆地褶皱变形特征、定型时间及其与油气的关系. 石油天然气地质, 2008, 29: 283–290
- 26 雷振宇, 李永铁, 刘忠, 等. 藏北羌塘盆地构造变形及其动力学背景. 地质评论, 2001, 47: 415–419
- 27 朱日祥, 黄宝春, 潘永信, 等. 岩石磁学与古地磁实验室简介. 地球物理学进展, 2003, 18: 177–181
- 28 Lowrie W. Identification of ferromagnetic minerals in a rock coercivity and unblocking temperature properties. Geophys Res Lett, 1990, 17: 159–162
- 29 Zijdeveld J D A. A demagnetization of rocks: Analysis of results. In: Collinson D W, Creer K M, Runcorn S K, eds. Methods on Paleomagnetic. New York: Elsevier, 1967. 245–286
- 30 Halls H C. The use of converging remagnetization circles in paleomagnetism. Phys Earth Planet Inter, 1978, 16: 1–11
- 31 Kirschvink J K. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. Geophys J R Astron Soc, 1980, 62: 699–718
- 32 Fisher R A. Dispersion on a sphere. Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci, 1953, 217: 295–305
- 33 McFadden P L, McElhinny M W. Classification of the reversal test in paleomagnetism. Geophys J Int, 1990, 103: 725–729
- 34 McElhinny M W. Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. Geophys J R Astron Soc, 1964, 8: 338–340
- 35 Watson G S, Enkin R J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. Geophys Res Lett, 1993, 20: 2135–2137
- 36 李才, 翟庆国, 程立人, 等. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考. 地质通报, 2005, 24: 295–301
- 37 和钟铎, 李才, 杨德明, 等. 西藏羌塘盆地的构造沉积特征及演化. 长春科技大学学报, 2000, 30: 347–352
- 38 周姚秀, 鲁连仲, 张秉铭. 四川二叠纪峨眉山玄武岩的古地磁研究. 地质评论, 1986, 32: 465–469
- 39 McElhinny M W. Palaeomagnetism and Plate Tectonics. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. 1–358
- 40 Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data. Tectonophysics, 1990, 184: 1–9
- 41 程国良. 古地磁数据可靠性的试用判据. 地球物理学报. 1993, 36: 121–123