

·基础地质·

龙门山南段邛西断层转折褶皱磁组构及其有限应变

王 开^{1,2}, 贾 东^{1,2}, 罗 良^{3,4}, 张明正^{3,4}, 李一泉^{1,2}

WANG Kai^{1,2}, JIA Dong^{1,2}, LUO Liang^{3,4}, ZHANG Ming-zheng^{3,4}, LI Yi-quan^{1,2}

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093; 2. 南京大学能源科学研究所, 江苏 南京 210093;

3. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

4. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

2. Institute of Energy Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China;

3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

摘要: 龙门山南段位于四川盆地以西, 其新生代构造变形特征对于认识青藏高原东缘的变形机制具有一定的指示意义。磁组构是一种灵敏的应变指示计, 在变形微弱的沉积岩地区尤为适用。在龙门山南段邛西断层转折褶皱不同构造部位选取 48 个采样点开展磁组构研究, 分析断层转折褶皱的有限应变特征及区域构造变形机制。实验结果表明, 邛西地区上白垩统中主要载磁矿物为高矫顽力的赤铁矿, 背斜整体应变较弱, 且存在 3 种类型的磁组构, 以沉积磁组构和初始变形磁组构为主, 铅笔状磁组构少见, 主要存在于靠近褶皱中段的前翼部位, 说明断层转折褶皱前翼较后翼和核部应变强, 且中段地层应变较其他部位更为强烈。此外, 各采样点磁线理的优势方位为近南北向(N10°E), 表明邛西断层转折褶皱的形成与龙门山南段晚新生代近东西向的地壳水平缩短有关, 暗示龙门山南段的最大主压应力方向在晚新生代存在转变的可能。

关键词: 磁组构; 龙门山南段; 邛西断层转折褶皱; 新生代变形; 有限应变

中图分类号: P542^{+.2}; P551 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2014)05-0629-12

Wang K, Jia D, Luo L, Zhang M Z, Li Y Q. Magnetic fabric and finite strain analysis of the Qiongxian fault-bend fold in the southern Longmen mountain. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(5):629-640

Abstract: The characteristics of Cenozoic deformation in the southern Longmen Mountain fold-thrust belt, which is located to the west of Sichuan basin, is important in recognizing the deformation regime of the eastern margin of the Tibetan Plateau. Magnetic fabric is a sensitive strain indicator particularly useful in weak deformed sedimentary areas. In this paper, a magnetic fabric investigation was carried out into the Qiongxian fault-bend fold, which is located to the south of Longmen Mountain fold-thrust belt on the basis of 48 sampling sites scattered in different parts so as to analyze the finite strain of the bending fold and discuss the regional deformation regime. The results show that hematite is the main magnetic carrier mineral in the upper Cretaceous of Qiongxian area, and the fold suffered weak strain; in addition, there exist three types of magnetic fabrics in the study area, and most of the sampling sites show sedimentary and initial deformation magnetic fabrics, with pencil structure magnetic fabrics only existent on the forelimb of the middle part of the fold. These phenomena indicate that the strain on the forelimb is relatively higher, and the strain on the layer of the middle part is somewhat stronger than that of other parts of the fold-bend fold. In addition, the stereonet map of magnetic lineation

收稿日期: 2014-01-26; 修订日期: 2014-03-17

资助项目: 国家重大科技专项(编号: 2011ZX05003-002, 2011ZX05003-003, 2011ZX05009-001)和国家自然科学基金项目(批准号: 41102133, 41202145)

作者简介: 王开(1989-), 男, 在读硕士生, 构造地质学专业。E-mail: wangkai19890804@gmail.com

通讯作者: 贾东(1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事构造地质学方面研究。E-mail: djia@nju.edu.cn

shows that the orientation of the maximal susceptibility axial cluster is in nearly SN direction (N10°E), which indicates that the deformation of the bending fold of Qiongxian fault is related to the late Cenozoic EW-trending crustal shortening in the southern Longmen Mountain, and this may imply a change of the direction of the maximal stress in the southern Longmen Mountain in late Cenozoic.

Key words: magnetic fabric; the southern Longmen Mountain; the Qiongxian fault-bend fold; Cenozoic deformation; finite strain

褶皱冲断带中往往发育大量断层相关褶皱,随着冲断带的发育,褶皱的变形经历3个过程:刚体平动、褶皱作用和内应变^[1]。这3个组分之间的内在联系十分复杂,往往联合作用于变形过程。对于其中的前两种组分,应变指示计较为丰富,研究起来相对直观,然而对于内应变,特别是在弱变形区域,应变指示计很少,缺乏有效的研究手段。低场磁化率各向异性(AMS)为断层相关褶皱的内应变研究提供了有效、快捷的手段,尤其对于弱应变沉积岩地区的内应变分析十分有效^[2-8]。在应力作用下,岩石内磁性矿物产生定向排列、韧性变形或定向重结晶,从而产生磁化率各向异性,它体表现为一个三轴椭球体($K_1 \geq K_2 \geq K_3$), K_1 、 K_2 和 K_3 分别代表最大、中间和最小磁化率主轴^[9-11]。在大多数应变状态下,磁化率椭球的3个主轴与应变椭球体基本轴之间存在很好的相关性^[4-5,9-12],使得磁组构成为岩石应变分析的有效方法之一。

在龙门山褶皱冲断带的部分地区,采用磁组构研究断层相关褶皱的应变特征已经取得了显著的效果^[13-15],这些断层相关褶皱的走向均为北东—南西向,与龙门山造山带走向一致,且其磁组构研究获得的应力场也都具有北西向南东挤压的主压应力特征。然而在龙门山南段邛崃地区,发育与龙门山走向斜交的近南北向邛崃断层转折褶皱。邛崃断层转折褶皱位于四川盆地西南边缘的更新世冲积扇上,是青藏高原东缘新生代变形作用的产物,研究其应变特征和变形机制,对于认识龙门山南段新生代变形特征和青藏高原的隆升机制具有一定的指示意义。本文通过对邛崃断层转折褶皱进行磁组构分析,研究断层转折褶皱磁组构有限应变的分布特征,并据此对邛崃断层转折褶皱的变形机制进行分析,从而揭示龙门山南段新生代变形机制。

1 区域地质概况

龙门山褶皱冲断带位于四川盆地以西,北自广元,南抵宝兴、天全,全长约500km,宽30~50km,是中生代形成并在新生代重新活动的褶皱冲断带^[16-17]

(图1)。龙门山地区地质结构复杂,构造变形强烈,整体上由一系列北西向南东逆冲推覆于扬子克拉通之上的岩片和推覆体组成^[18]。中生代以来,龙门山地区至少经历了2次地壳缩短:晚三叠世挤压缩短和与新生代印藏碰撞有关的地壳缩短^[16]。贾东等^[19]认为,龙门山褶皱冲断带根据构造变形、地层发育等特征可划分为2个构造段,即北段和南段,分界线为安县地区。平衡剖面研究表明,南段主要表现为新生代的构造变形,整体缩短率达26.2%^[20]。龙门山南段从康滇古陆延伸到都江堰地区,大面积出露前震旦系基底杂岩,表现出基底卷入的叠瓦状冲断的特点,并且自西向东发育一系列北东向和南北向的逆冲断层和断层相关褶皱,邛崃背斜就是其中一个比较典型的例子。

邛崃背斜位于成都市邛崃县城以西,距离成都市约65km。详细的地质资料和野外地质调查表明,邛崃背斜为一典型断层转折褶皱^[21-24](图2、图3)。邛崃断层转折褶皱南北向延伸约12km,宽约10km,走向近南北向,与龙门山褶皱冲断带走向呈锐夹角,主要出露上白垩统灌口组和夹关组,以河流湖泊相沉积为主,主要岩性为砖红色、紫红色细—中砂岩和粉砂岩。

2 磁组构采样及样品测试

为探讨邛崃断层转折褶皱的应变特征和变形机制,笔者选取垂直于背斜走向的2条剖面进行对比。其中,AA'剖面位于背斜南北延伸方向的中段,BB'剖面位于背斜北段,并按500~800m不等的采样间距选取48个磁组构采样点(图1)。野外采样使用古地磁专用手提式钻机,并用岩心定向罗盘记录岩心圆柱体的自然地理方位。磁组构采样点均位于断层上盘,定向样品共计457件,其中每个采样点的样品数8~12个不等,所有岩芯样品均来自上白垩统(图1—图3)。

野外钻取定向岩心之后,在室内对其进行切割,切割后的岩心圆柱直径2.5cm、高2.2cm。样品测试工作在南京大学古地磁实验室完成,所有样品采用KLY3型卡帕桥在常温下进行低场(300A/m,

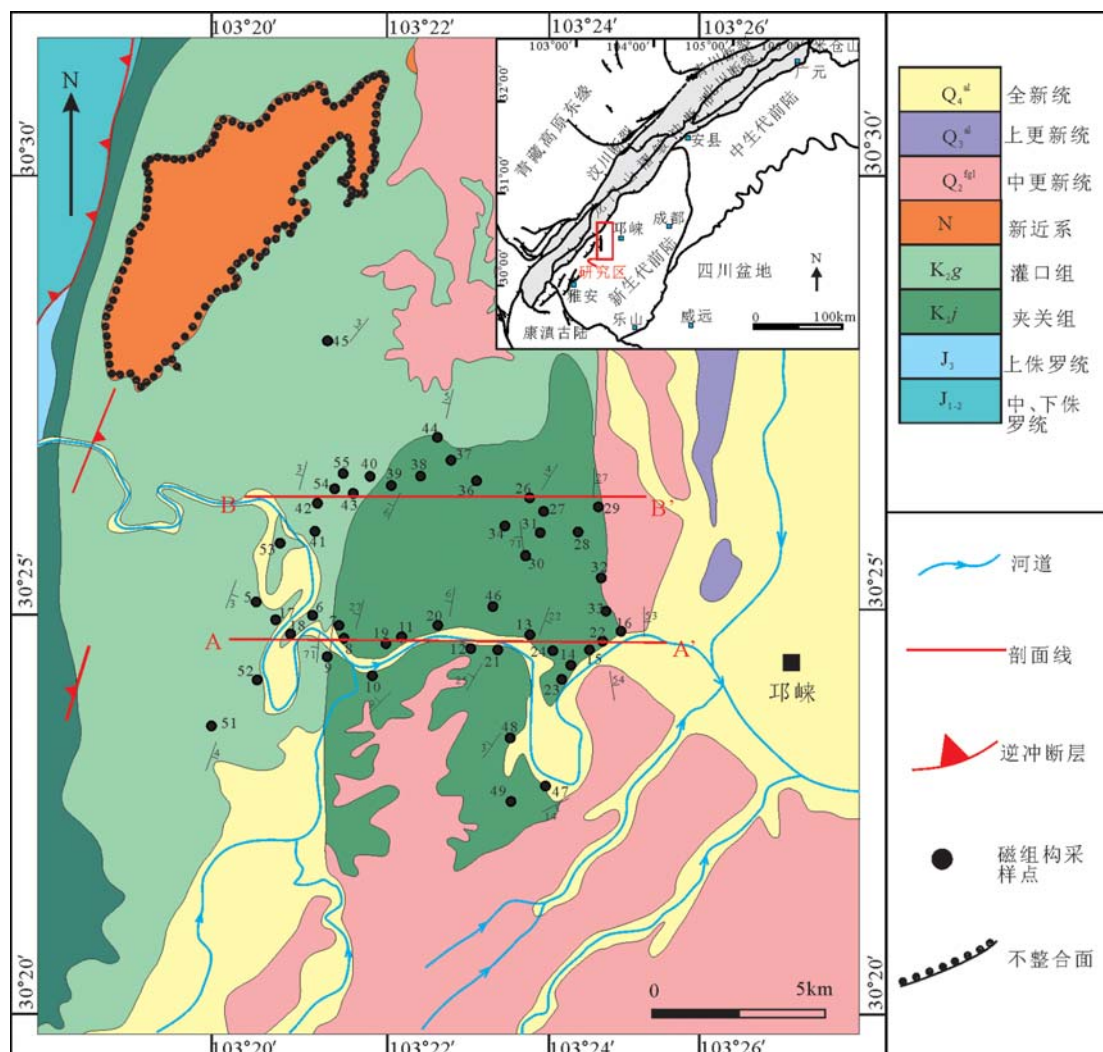


图1 研究区地质简图及采样点分布

Fig. 1 Schematic geological map of the study area, showing distribution of sampling sites

920Hz) AMS 测试, 测出样品磁化率椭球体的特征值(校正的磁化率各向异性度 P_j 、磁线理 L 、磁面理 F 、磁椭球扁率 E 和磁化率椭球形状因子 T , 以及最大、最小磁化率 K_1 和 K_3 的方位), 测试结果见表 1。

3 AMS 测试结果

样品测试后, 对所得的磁化率各向异性相关数据(表 1)进行综合分析, 主要从以下几个方面展开。

(1) 磁性矿物

导致岩石磁化率各向异性的 3 个因素: ①矿物的形状优选定向; ②矿物的晶格优选定向; ③岩石

内部铁磁性矿物颗粒的不均匀分布^[10,25]。不同的磁化率各向异性意味着不同的矿物组分对体积磁化率的贡献, 由磁铁矿引起的磁化率各向异性反映了颗粒形状优选定向, 由顺磁性矿物或赤铁矿引起的磁化率各向异性与矿物的晶格优选定向有关^[26]。因此, 有必要了解影响磁化率各向异性的矿物类型。从体积磁化率角度看, 绝大多数样品的磁化率值较弱, 为 65.7~241 μ SI(表 1), 认为影响 AMS 的主要磁性矿物类型为顺磁性矿物^[4,27]。

为确定样品中主要载磁矿物(铁磁性矿物)的类型, 根据岩性选取代表性样品进行三轴等温退

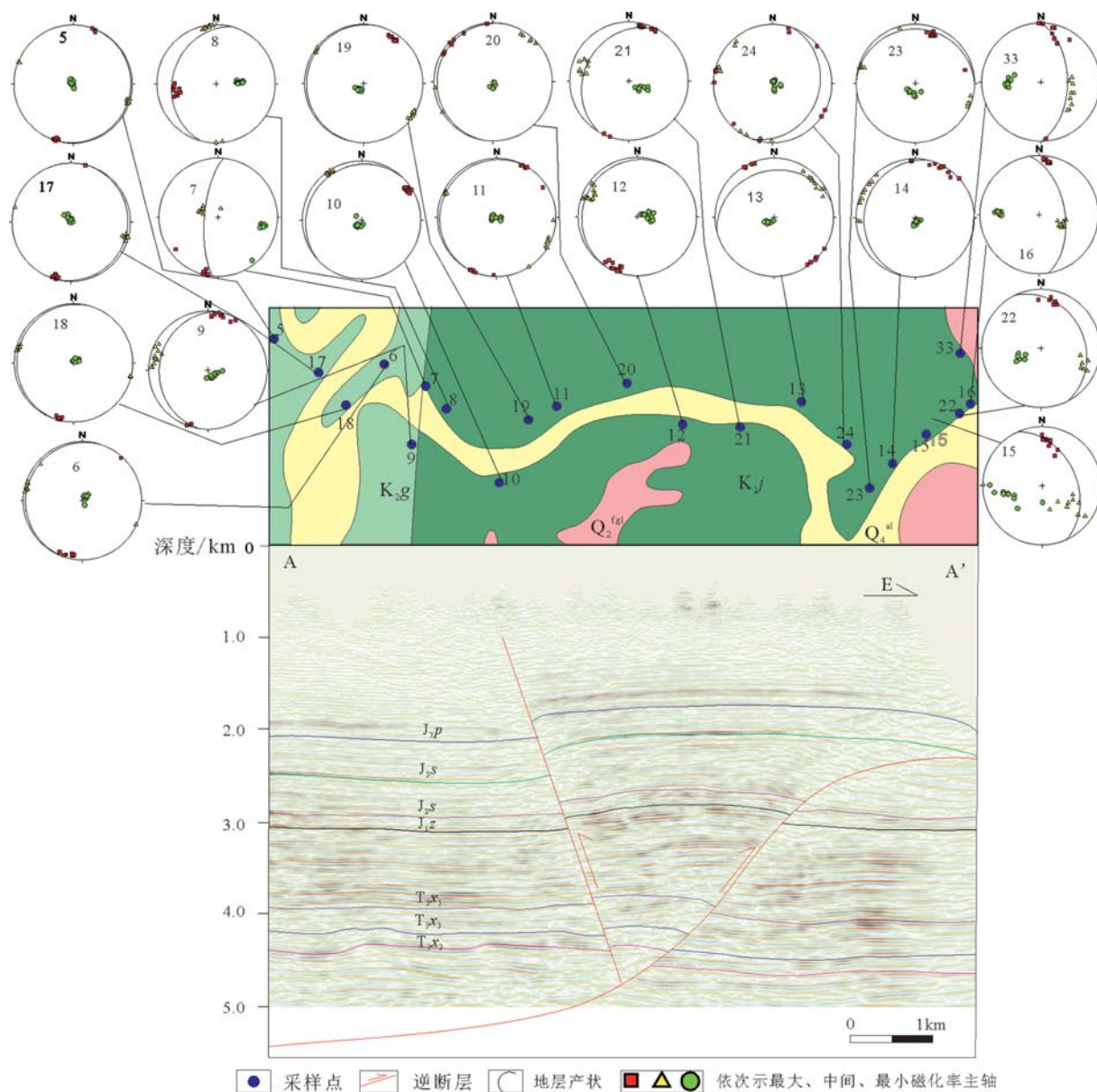


图2 AA'剖面构造简图及其对应的深部地震剖面 and 采样点磁组构赤平投影

Fig. 2 Schematic geological map of AA' section and its corresponding seismic reflection profile with the mean magnetic ellipsoidal principal axes orientations on lower-hemisphere equal-area stereographic projections of sampling sites

T_{3x2}—上三叠统须家河组二段; T_{3x3}—上三叠统须家河组三段; T_{3x3}—上三叠统须家河组五段; J_{1z}—下侏罗统自流井组; J_{2s}—中侏罗统沙溪庙组; J_{2s}—上侏罗统遂宁组; J_{1p}—上侏罗统蓬莱镇组。剖面位置见图1

磁及等温剩磁测试,如图4所示。三轴等温热退磁是通过在样品3个互相垂直的方向上分别施加2.2T、0.4T和0.15T瞬间直流磁场以获得等温剩磁,再分步加温退磁。图4中,0.4~2.2T、0.15~0.4T及小

于0.15T分别代表硬磁组分、中间组分和软磁组分的热退磁走向。等温剩磁测试通过保持恒温、不断加大外场强度,分析样品所获得的剩磁随外场强度的变化,以鉴别岩石内载磁矿物的种类。图4-a、c

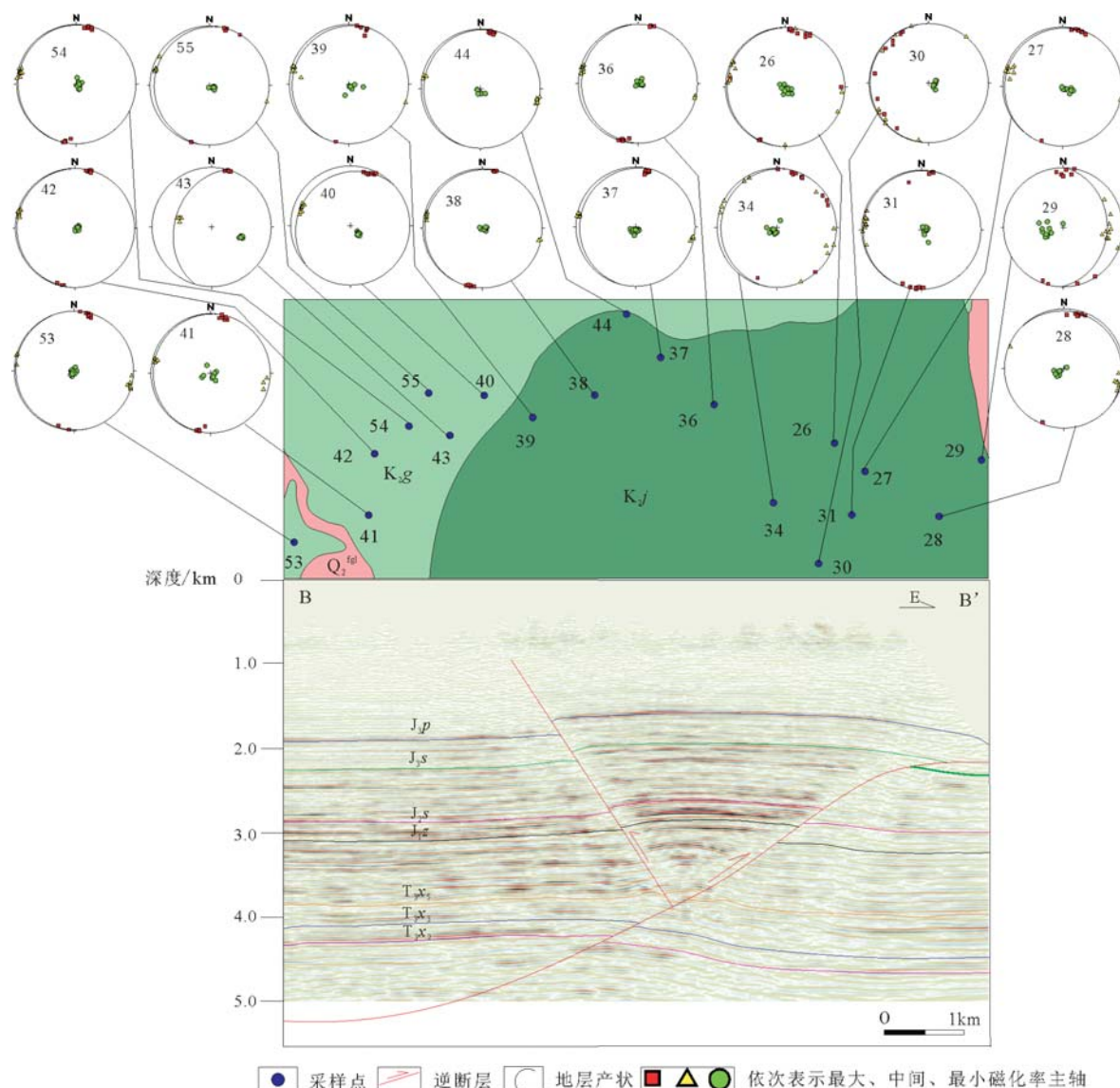


图3 BB'剖面构造简图及其对应的深部地震剖面 and 采样点
磁组构赤平投影(图例见图2,剖面位置见图1)

Fig. 3 Schematic geological map of BB' section and its corresponding seismic reflection profile with the mean magnetic ellipsoidal principal axes orientations on lower-hemisphere equal-area stereographic projections of sampling sites

分别为上白垩统灌口组代表性样品的三轴等温热退磁曲线和等温剩磁获得曲线。图4-a中,高场磁组分和中间磁组分在580℃左右存在解阻,加热至670℃左右磁化强度完全消失,说明载磁矿物以赤铁矿为主,并含一定量的磁铁矿。另外,高场磁组分在120℃左右出现急剧下降,是针铁矿在100~120℃解阻的表现。等温剩磁获得曲线(图4-c)中,

剩磁强度随着外场强度的增加而不断增大,直至外场强度为2400mT时,剩磁强度仍存在上升趋势,说明高矫顽力的赤铁矿占主导地位。综合分析认为,灌口组紫红色粉砂岩中载磁矿物有赤铁矿和磁铁矿,且以赤铁矿为主,并含有一定量的针铁矿。图4-b、d分别为上白垩统夹关组中代表样品的三轴等温热退磁和等温剩磁获得曲线。图4-b中,中间磁

表1 邛西断层转折褶皱磁组各项参数及磁化率主轴平均方向

Table 1 Site mean magnetic fabric parameters and orientation data in bending fold of Qiongxifault

编号	北纬	东经	地层 产状/°	Km	N	均值 L	均值 F	均值 Pj	均值 T	K _{1g} (D/I)	K _{3g} (D/I)	磁组构 类型
5	30°25'19.83"	103°20'36.21"	110∠3	209	10	1.029	1.046	1.077	0.233	198.7/1.1	315.7/87.6	2
6	30°25'3.22"	103°21'19.33"	290∠5	222	9	1.032	1.067	1.103	0.342	197.1/5.5	43.5/83.9	2
7	30°25'00.31"	103°21'28.72"	275∠71	204	7	1.028	1.044	1.073	0.216	192.5/4.3	100.6/24.8	2
8	30°24'59.44"	103°21'33.09"	285∠27	88.6	11	1.011	1.056	1.072	0.677	261.2/32.1	86.5/57.7	2
9	30°24'53.82"	103°21'24.22"	278∠19	161	11	1.018	1.088	1.115	0.654	13.8/5	131.7/79.5	2
10	30°24'40.09"	103°22'04.98"	315∠9	134	10	1.016	1.079	1.104	0.656	55.3/7.7	209/81.4	2
11	30°24'52.36"	103°22'26.54"	300∠5	119	11	1.023	1.089	1.121	0.573	25.1/0.5	276.7/88.5	弱 2
12	30°25'01.34"	103°23'08.84"	300∠8	170	11	1.024	1.076	1.107	0.507	203.3/6.9	89.6/73.3	2
13	30°24'55.49"	103°23'54.35"	345∠22	65.7	10	1.005	1.034	1.043	0.75	142.2/0	232.3/79.2	2
14	30°24'35.92"	103°24'31.40"	283∠15	133	10	1.007	1.053	1.065	0.775	24/4.4	165/84.3	弱 2
15	30°24'50.38"	103°24'53.87"	66∠41	135	10	1.019	1.032	1.053	0.241	8.9/27.4	256.1/36.7	3
16	30°24'53.69"	103°25'01.91"	66∠41	138	8	1.014	1.133	1.164	0.805	11.1/12	269.4/43.6	弱 2
17	30°25'11.81"	103°20'48.71"	108∠5	222	10	1.031	1.042	1.074	0.145	196.1/4.1	329.5/84.1	2
18	30°25'2.61"	103°21'19.19"	285∠5	234	10	1.032	1.052	1.086	0.237	193.9/3.7	40.7/85.8	2
19	30°24'49.31"	103°22'21.43"	280∠4	820	11	1.027	1.109	1.147	0.593	33.4/10.2	220.6/79.7	2
20	30°24'59.13"	103°22'48.68"	280∠6	117	7	1.009	1.143	1.173	0.879	316.9/4.3	180/84.2	弱 2
21	30°24'59.25"	103°23'30.21"	300∠25	147	9	1.019	1.123	1.157	0.715	17.3/4	118.3/69.7	2
22	30°24'52.91"	103°24'59.83"	81∠54	142	9	1.015	1.037	1.054	0.41	9/10.1	272.2/33.6	2
23	30°24'38.85"	103°24'34.48"	2∠9	179	8	1.021	1.049	1.074	0.39	18.7/13.3	195.3/76.7	2
24	30°24'43.99"	103°24'09.92"	110∠22	91	10	1.002	1.071	1.083	0.954	254.1/3.1	113/86	1
26	30°26'30.30"	103°24'00.55"	341∠8	130	10	1.009	1.032	1.044	0.541	17.6/3.8	150.1/84.4	2
27	30°26'19.18"	103°24'08.30"	302∠4	126	9	1.015	1.027	1.043	0.278	17.1/2.2	123.6/82.4	2
28	30°26'10.86"	103°24'36.81"	40∠5	157	8	1.016	1.114	1.144	0.746	13.6/2.1	253.5/85.8	2
29	30°26'28.50"	103°24'54.03"	92∠27	71.9	10	1.009	1.013	1.022	0.218	4.4/6.5	148.3/81.9	弱 2
30	30°25'55.06"	103°23'58.30"	263∠71	92.6	9	1.001	1.068	1.079	0.96	306.3/6	98/83.2	1
31	30°26'14.05"	103°24'07.01"	293∠3	158	11	1.017	1.054	1.075	0.525	185.5/0	95/86.8	2
32	30°25'40.19"	103°24'54.00"	291∠10	139	12	1.01	1.052	1.068	0.675	18.6/22.7	222.7/85.3	2
33	30°25'05.45"	103°25'02.08"	64∠27	94.7	6	1.009	1.039	1.052	0.623	15.6/1.5	257.7/86.7	2
34	30°26'09.65"	103°23'40.53"	280∠7	122	11	1.007	1.045	1.057	0.735	22.7/6	258.5/79.4	1
36	30°26'42.86"	103°23'15.79"	267∠7	143	9	1.018	1.046	1.067	0.439	14.4/0.5	277/86.1	2
37	30°26'55.79"	103°22'57.41"	284∠7	180	11	1.018	1.053	1.075	0.491	11.2/5.8	239.3/81.4	2
38	30°26'44.99"	103°22'33.24"	295∠4	190	8	1.021	1.051	1.074	0.416	192.1/1.4	336.5/88.3	2
39	30°26'39.51"	103°22'14.92"	295∠6	205	7	1.018	1.044	1.065	0.416	13.7/2.5	201.6/87.5	2
40	30°26'40.39"	103°21'54.32"	317∠14	219	8	1.016	1.039	1.057	0.407	19.9/0.6	128.2/88	2
41	30°26'09.18"	103°21'18.26"	279∠4	241	10	1.029	1.038	1.069	0.13	12.5/1.9	251.6/86.3	2
42	30°26'25.81"	103°21'20.98"	274∠3	210	10	1.017	1.036	1.055	0.369	14.8/0.2	135.4/89.5	2
43	30°26'36.43"	103°21'46.44"	286∠38	195	5	1.023	1.054	1.081	0.401	15.1/2.1	125.9/84.2	2
44	30°27'09.35"	103°22'50.27"	283∠5	170	8	1.026	1.055	1.084	0.364	11.2/4.8	237.8/83	2
45	30°28'12.97"	103°21'22.05"	308∠3	228	11	1.027	1.045	1.073	0.245	187.7/0	97.3/89.5	强 2
46	30°25'21.41"	103°23'30.18"	282∠6	127	11	1.017	1.085	1.111	0.663	6.2/1.2	266.3/82.9	2
47	30°23'22.72"	103°24'12.67"	153∠14	83.7	10	1.007	1.019	1.027	0.439	270.9/22	154.7/47.5	2
48	30°23'56.62"	103°23'46.38"	305∠3	146	9	1.008	1.018	1.027	0.398	39.3/1.5	134.9/74.8	强 2
49	30°23'12.91"	103°23'44.93"	303∠4	91.7	10	1.01	1.118	1.144	0.834	243.8/6.5	52.3/83.4	弱 2
51	30°23'58.85"	103°20'01.66"	110∠4	222	10	1.036	1.043	1.082	0.085	198.2/1.7	332.287.6	2
52	30°24'43.00"	103°20'45.49"	275∠2	228	11	1.036	1.104	1.149	0.472	20.7/0.2	288.6/85.7	弱 2
53	30°25'57.43"	103°20'51.15"	265∠3	203	11	1.017	1.039	1.059	0.379	13.6/2.9	243.1/85.5	2
54	30°26'35.87"	103°21'29.93"	285∠3	218	11	1.023	1.044	1.069	0.303	11.8/0.2	116.9/89.2	2
55	30°26'42.84"	103°21'40.75"	280∠8	219	8	1.029	1.047	1.078	0.243	16.3/2.3	242.9/86.6	2

注: Km 为平均磁化率($\times 10^{-6}$ SI); 磁线理 $L = K_1/K_2$; 磁面理 $F = K_2/K_3$; 形态参数 $T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3)/(\eta_1 - \eta_3)$; 各向异性度: $P_j = \exp\{\sqrt{2 \times ((\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2)}\}$, 其中 $\eta_1 = \ln K_1$, $\eta_2 = \ln K_2$, $\eta_3 = \ln K_3$, $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$; $K_{1g}(D/I)$: 地层校正前 K_1 的平均方向; $K_{3g}(D/I)$: 地层校正前 K_3 的平均方向; 磁组构类型: 1—沉积磁组构; 2—初始变形磁组构; 3—铅笔状磁组构

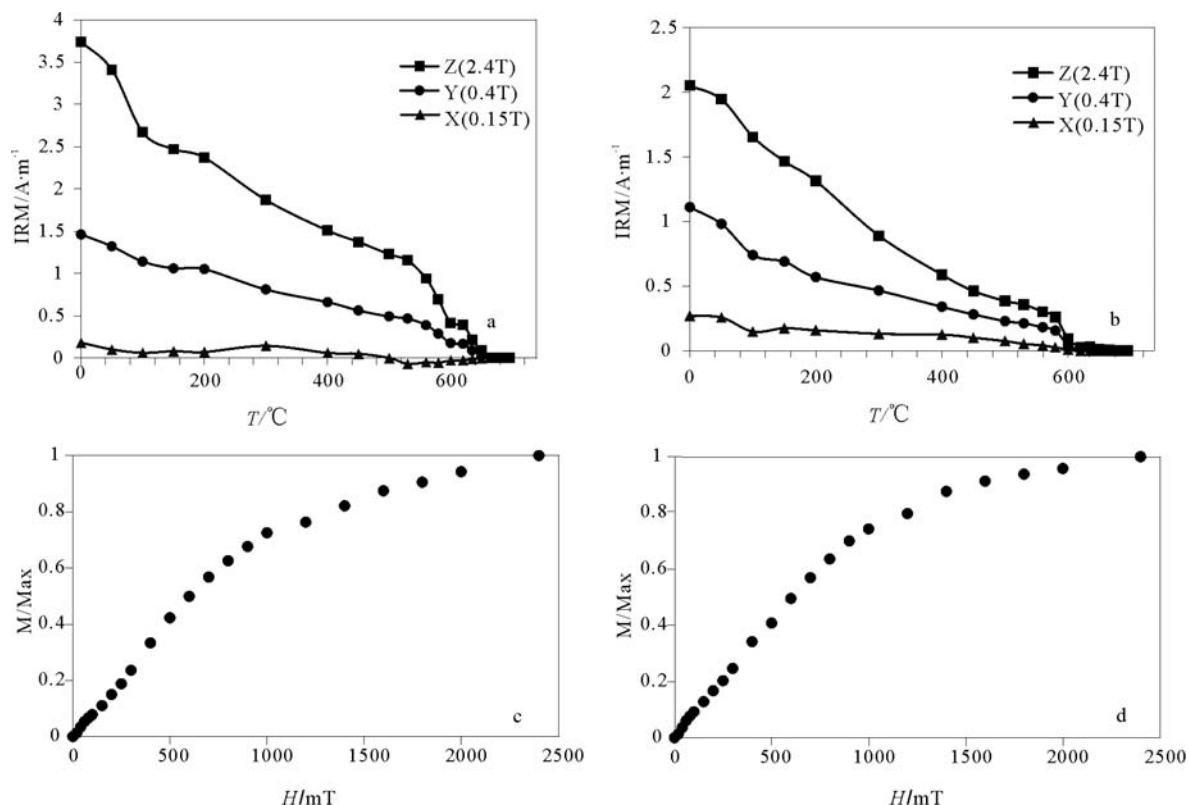


图4 代表性样品的三轴热退磁曲线(a,b)和等温剩磁获得曲线(c,d)

Fig. 4 Representative example of demagnetization curves of three orthogonal isothermal remanent magnetization (a, b) and isothermal remanent magnetization acquisition curves (c, d)

组分和软磁组分在 620 $^{\circ}\text{C}$ 左右出现完全解阻,表明其主要载磁矿物为赤铁矿。图4-d所示夹关组代表样品等温剩磁强度随外场强度增大而增大,当外场增加到 2000mT 时等温剩磁上升幅度明显减小,且有饱和的趋势。结合图4-b综合分析,夹关组砖红色细砂岩载磁矿物以赤铁矿为主,含有一定量的钛赤铁矿。综上所述,邛西断层转折褶皱上白垩统主要的载磁矿物为赤铁矿。

(2) Flinn 和 P_j - T 图解及其意义

以磁面理(F)为横坐标,磁线理(L)为纵坐标,绘制出的 Flinn 图解可以形象地反映磁化率量值椭球的形态分布及磁线理、磁面理的发育情况^[28]。图5-a为研究区采样点的 Flinn 图解,图中所有采样点均落在 $E>1$ 区域内或接近 $E=1$,反映了磁面理较磁线理发育且磁化率椭球均为扁圆形,说明断层转折褶皱整体应变较弱。

磁化率椭球的形状同样可以用各向异性度 P_j 与形态参数 T 的关系图解来表示。沉积岩磁各向异性度 P_j 值可反映沉积物中磁性矿物颗粒的定向排列程度,亦可反映构造变形强度。研究区新生代的沉积岩 P_j 均值为 1.083,这是典型弱应变岩石的表现^[25,27],说明该区地层整体应变较弱。磁化率椭球形状因数 (T)用于区分磁化率数值椭球的形状。对邛西断层转折褶皱上 48 个采样点,以校正的各向异性度 P_j 为横坐标, T 为纵坐标,作出 P_j - T 图解(图5-b)。图5-b显示,测试的 48 个点均位于 P_j 轴上方 $T>0$ 区域,反映了压扁状磁化率椭球的特征。

(3) 邛西断层转折褶皱磁组构与有限应变特征

未变形或弱变形的沉积岩中,以沉积压实作用过程形成的沉积磁组构为主导,伴随造山带发育过程中产生的 2 种不同类型的应变。褶皱作用之前的平行层缩短和褶皱过程中形成的弯滑及平

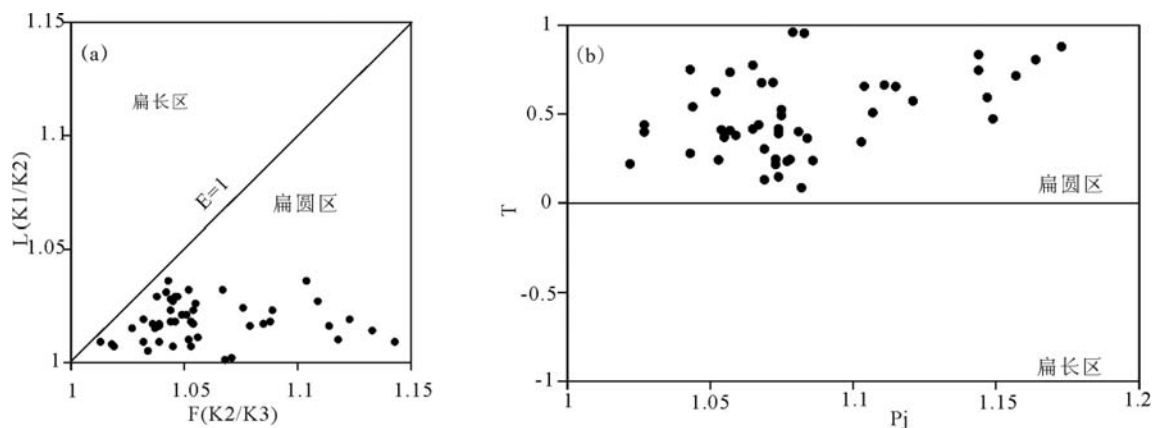


图5 磁组构 Flinn 图解(a)和磁化率椭球形态参数(T)与各向异性度(Pj)关系(b)图解

Fig. 5 Flinn-type diagram (foliation versus lineation) (a) and Pj-T diagram (b)

showing the shape of the AMS ellipsoids of the AMS samples

行层的简单剪切^[29],磁组构演变从磁面理平行于层面的沉积磁组构,经过磁线理平行层面走向的中间磁组构,到磁面理垂直层面和缩短方向的构造磁组构^[30]。依据前人总结的沉积岩磁组构类型^[14],分析邛西断层转折褶皱磁组构的实际情况,共发现3种类型的磁组构(图6):①沉积磁组构:是沉积和压实作用的结果,具体表现为磁面理平行于层面,K1和K2杂乱分散在层面上,K3垂直层面;②初始变形磁组构:磁面理平行于层面,K3垂直层面,组成磁面理的K1、K2分布于层面,K1集中于地层走向方向,K2集中于地层倾向方向;③铅笔状磁组构:在赤平投影图上,磁化率主轴K1集中在地层走向方向,K3散布在岩层缩短方向,显示了最大挤压应力的方向,它显示了较强的应变状态。邛西断层转折褶皱中少数几个采样点表现为沉积磁组构和铅笔状磁组构,其他均表现为初始变形磁组构(所有采样点的磁组构类型见表1)。

在单一应力作用下的弱变形挤压地区,地层倾斜主要是由逆冲和褶皱作用导致的。在相对简单的构造中,比如冲断前锋和具有水平枢纽的褶皱,地层走向近于垂直挤压应力。同时挤压应力又与磁线理垂直,因而磁线理和地层走向是平行的^[31]。本文48个采样点中非沉积磁组构的采样点,8、13、23、28四点磁组构存在异常:磁线理与地层走向斜交。其中,8号采样点位于沿背斜后翼突破的反冲断层附近(图2),分析其磁组构异常为反冲断层引起的局部应变特征;13和23号采样点位于背斜核

部,地层走向近于东西向,与背斜主体走向明显偏离且倾角较大,表明此处发育局部构造,而28号采样点位于剖面BB'前翼(图3),其地层走向为130°,与背斜近南北走向出现较大偏离,同样存在局部地质现象,以上三点磁组构出现的异常特征均为背斜局部构造的影响所致。但其余44个采样点均表现为磁线理与地层走向平行,因此认为邛西断层转折褶皱为单一应力作用下形成的褶皱。另外,对于本文中大多数样品来说,磁化率各向异性能够很好地显示出来,说明该区运用AMS研究方法是十分有效的。

观察2条剖面(图2、图3)可以看出,断层转折褶皱的不同构造部位磁组构特征所反映的有限应变状态存在差异。剖面AA'位于背斜中段(图2,剖面位置见图1),其磁组构特征随构造部位的不同有所变化。断层转折褶皱后翼地层中,采样点11、20 K3集中于层面的法向上,K1、K2在层面上出现分离,但没有相对集中,为弱的初始变形磁组构,从属于沉积组构向初始变形组构过渡的阶段,反映了较弱的有限应变状态。后翼地层中其他采样点5、9、7、8、10、17、18、19均表现为初始变形磁组构,3个磁化率主轴分离明显,K1集中于褶皱走向,磁面理平行层面。采样点12、13、14、21、23、24位于背斜核部,其中24号采样点表现为典型的沉积磁组构,14号采样点为弱的初始变形磁组构,其他4点均为初始变形磁组构,说明背斜核部地层不存在明显的有限应变。前翼地层中的采样点22、16、33均为初始变形磁组构,而采样点15的磁组构特征是K1集中

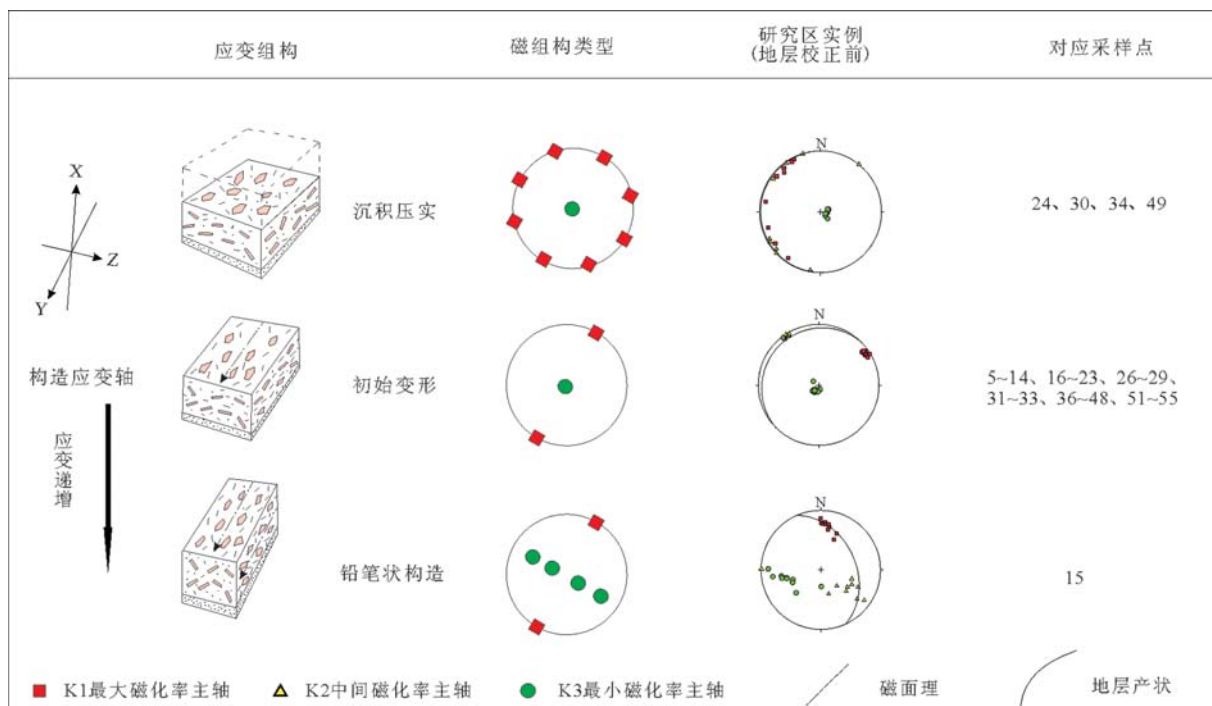


图6 研究区3种磁组构类型及其代表的应变状态

Fig. 6 Three types of magnetic fabrics in the study area and their corresponding strain conditions

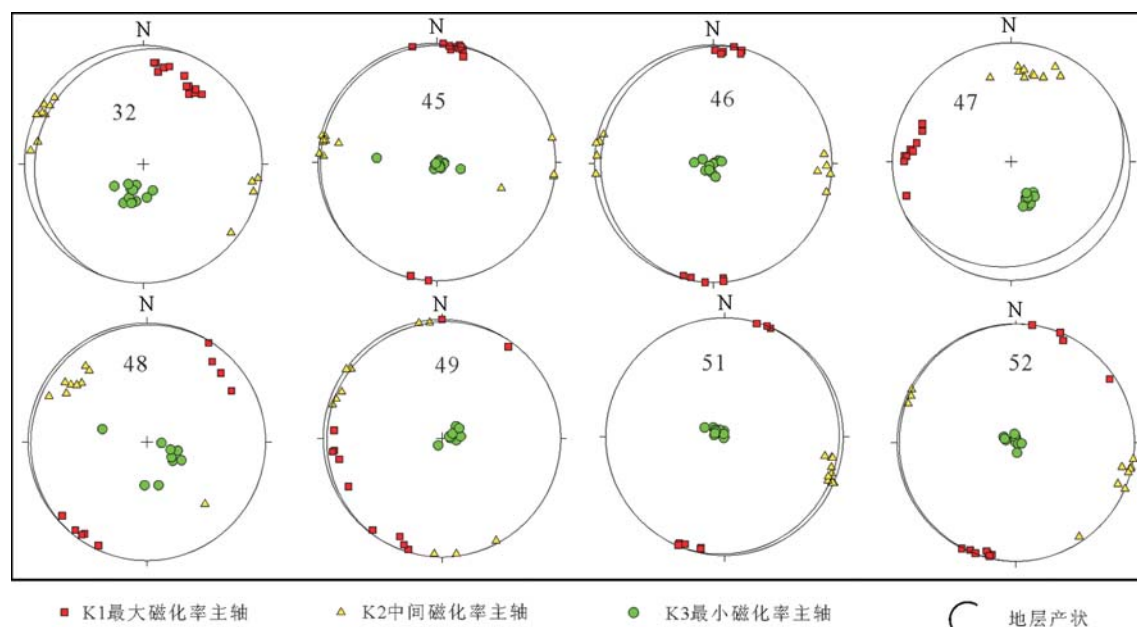


图7 分布于剖面外的采样点磁组构赤平投影

Fig. 7 The mean magnetic ellipsoidal principal axes orientations on lower-hemisphere equal-area stereographic projections of the sampling sites outside of the sections

于地层走向, K3 散布于岩层缩短方向, 为典型的铅笔状磁组构, 显示了前翼应变较强的特点。

剖面 BB' 位于背斜北段(图 3, 剖面位置见图 1), 其磁组构特征是: 后翼地层中, 采样点 40、43 倾角相对较大, 但与其他几个采样点 38、39、42、53、54、55 所表现的磁组构特征一致, 均为初始变形磁组构, 说明后翼地层应变不强。采样点 30、34 位于断层转折褶皱核部地层中, 表现为典型的沉积磁组构, 核部地层中另外 5 个采样点 26、31、36、37、44 均为初始变形磁组构, 同样显示了较弱的应变。背斜前翼地层中, 采样点 28 表现为初始变形组构向铅笔状组构过渡的状态, 显示了较强的应变状态, 另外 27 和 29 号采样点为初始变形磁组构。对比 2 条剖面所反映的有限应变特征可以发现, 不论是位于中段的剖面 AA' 还是靠近背斜北段的 BB' 剖面, 磁组构反映的断层转折褶皱前翼地层的应变均较核部和后翼强, 与前人有关断层相关褶皱的磁组构与有限应变研究结论一致^[13-15]。然而, 从深部地震剖面和地层产状可以发现(图 2、图 3), 剖面 BB' 相对于剖面 AA' 地层较平缓, 两翼起伏不大, 且在 BB' 剖面的 19 个采样点中未发现应变较强的铅笔状磁组构, 表明位于断层转折褶皱中段的剖面 AA' 上岩石的应变状态较其他部位更为强烈。为了更好地约束断层转折褶皱的整体应变特征, 在 2 条剖面外选取了 8 个采样点进行磁组构分析(分布位置见图 1)。它们的磁化率各向异性特征显著(图 7)。K3 垂直于层面, K1、K2 则不同程度地分别集中在地层走向和倾向方向上, 同样说明断层转折褶皱的这些部位受到了平行层面微弱的挤压应力作用, 与 2 条剖面上磁组构反映的有限应变相当, 均反映了邛西背斜弱应变的状态。

(4) 邛西断层转折褶皱构造变形机制分析

邛西断层系统上覆生长地层及浅层地震剖面研究表明, 断层转折褶皱作用开始于晚上新世—早更新世^[24], 因此邛西断层转折褶皱上白垩统磁组构反映的是晚新生代变形。新生代以来, 青藏高原东缘在印藏碰撞的持续挤压下, 通过基底滑脱作用将造山带的地壳缩短作用向东传播, 在龙门山南段通过断层转折和断层传播褶皱作用形成一系列基底卷入褶皱和北东向的逆冲断层^[32-34]。根据川西南地形图和邛西地区地震剖面发现, 位于龙门山南段的邛西断层转折褶皱走向为近南北向^[21-24], 与龙门山褶皱冲断带主体走向北东—南西向呈斜交关系。

在龙门山南段大量发育北东—南西向构造的区域, 近南北向的邛西断层转折褶皱, 其构造变形机制分析如下。

龙门山褶皱冲断带及其邻区形成于扬子克拉通西缘, 是中生代和新生代变形的产物^[35]。晚三叠世, 龙门山褶皱冲断带及其前陆地区在南东方向的逆冲作用下形成了一系列北东方向延伸的逆冲断层^[32]。在造山作用的第一阶段, 最大水平挤压应力(σ_1)的方向为北西—南东向。晚新生代期间, 随着印藏碰撞的持续挤压, 龙门山及其邻区再次活动, 然而关于这一阶段龙门山地区的最大挤压应力方向一直以来存在争议。Avouac 等^[36]和 Zhang 等^[37]认为, 龙门山地区晚新生代最大主压应力方向仍然为北西—南东向。然而, 龙门山晚新生代变形卷入了大量的右旋走滑^[38], 与 Xu 等^[39]及 Liu 等^[40]对汶川地震同震破裂的研究结果一致, 暗示龙门山地区在晚新生代期间存在应力场的转变。来自磁组构的证据为有关龙门山区域应力场的研究提供了一个很好的探索机会。

研究表明^[4-5, 9-11, 25], 磁化率椭球能够很好地指示有限应变椭球的方向, 其主轴之间存在很好的对应关系。K1(最大磁化率主轴)代表构造应变的拉伸

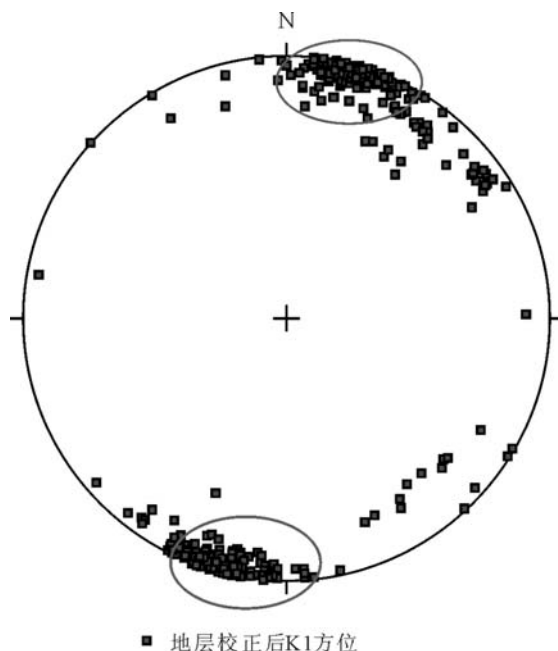


图 8 地层校正后 K1(除沉积磁组构的采样点)赤平投影
Fig. 8 Stereographic projection of K1 after bedding correction (except for the sites showing sedimentary magnetic fabrics)

方向,与应变椭圆长轴 λ_1 方位一致,代表磁线理的方位,因此磁线理往往能够指示构造走向的方位^[2]。沉积磁组构不显示构造应变,而研究区出现的另外2种磁组构类型(初始变形磁组构和铅笔状磁组构)都有一个共同的特征:K1垂直于主压应力方向。除去沉积磁组构的采样点,将其他采样点地层校正后的K1方位投影到赤平投影图(图8)上,可以发现其优势方向是近南北向(NE10°)。邛西断层转折褶皱受到单一应力作用,而最大应力方向垂直于K1,说明在晚新生代期间邛西地区最大主压应力方向表现为近东西向,与震源机制解和钻孔、断层滑移资料显示的龙门山南段现今应力场的最大主压应力方向85~105°E^[41-42]一致。因此,邛西断层转折褶皱的形成与龙门山南段晚新生代地壳近东西向的水平挤压缩短有关,暗示龙门山南段在晚新生代时期最大挤压应力方向从北西—南东向转变为近东西方向。

4 结 论

(1)岩石磁学和磁组构结果表明,龙门山南段邛西地区上白垩统所含载磁矿物主要为高矫顽力的赤铁矿。区内主要发育初始变形磁组构和沉积磁组构,含少量铅笔状磁组构,背斜整体应变较弱,且磁组构反映的是晚新生代变形。

(2)垂直于邛西断层转折褶皱走向的2条剖面中采样点磁组构反应断层转折褶皱应变特征随构造部位的变化趋势一致,均为前翼应变相对后翼强。不同的是,在中段的剖面AA'中,位于前翼的15号采样点出现铅笔状磁组构,反映出较强的应变特征;而靠近褶皱北段的剖面BB'和其他部位均未发现铅笔状磁组构,说明该断层转折褶皱中段的应变较其他部位强。

(3)除去所有沉积磁组构的采样点,分析校正后最大磁化率主轴方位的赤平投影图,得出其受到的最大主压应力为近东西向,说明邛西断层转折褶皱的形成与龙门山南段晚新生代近东西向的地壳水平缩短有关。结合邛西地区所在龙门山南段的应力场相关研究成果,认为龙门山南段的最大主压应力方向在晚新生代存在着从北西—南东向到近东西向的转变。

致谢:成文过程中南京大学李永祥教授给予了悉心指导,野外采样和样品测试过程中得到南

京大学古地磁实验室胡旭芝实验员和研究生温斌、王世朋、曲长伟和景先庆的热心帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology, Volume 1 Strain Analysis[M]. Academic Press, London, 1983: 307.
- [2] Hrouda F. Models of magnetic anisotropy variations in sedimentary thrust sheets[J]. Tectonophysics, 1991, 185: 203–210.
- [3] Hrouda F. Theoretical models of magnetic anisotropy to strain relationship revisited[J]. Physics of Earth and Planetary Interiors, 1993, 77: 237–249.
- [4] Tarling D H, Hrouda F. The Magnetic Anisotropy of Rocks[M]. Chapman and Hall, London, 1993: 217.
- [5] Borradaile G J, Henry B. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy[J]. Earth-Sci. Rev., 1997, 42: 49–93.
- [6] Aubourg C, Frizon de Lamotte D, Poisson A, et al. Magnetic fabrics and oblique ramp-related folding. A case study from the Western Taurus (Turkey)[J]. J. Struct. Geol., 1997, 19: 1111–1120.
- [7] Aubourg C, Rochette P, Stéphan J F, et al. The magnetic fabric of weakly deformed late Jurassic shales from the Southern Subalpine Chains (French Alps): Evidence for SW-directed transport direction [J]. Tectonophysics, 1999, 307: 15–32.
- [8] Borradaile G J, Jackson M. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS): magnetic petrofabrics of deformed rocks[J]. Geol. Soc. Lond., 2004, 238: 299–360.
- [9] Borradaile G J. Correlation of strain with anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) [J]. Pure and Applied Geophysics, 1991, 135: 15–29.
- [10] Borradaile G J. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain[J]. Tectonophysics, 1988, 156: 1–20.
- [11] Borradaile G J. Anisotropy of magnetic susceptibility: rock composition versus strain[J]. Tectonophysics, 1987, 138: 327–329.
- [12] 卢华复, 董火根, 邓锡秧, 等. 前龙门山前陆盆地推覆构造的类型和成因[J]. 南京大学学报(地球科学), 1989, 25(4): 18–24.
- [13] 胡潜伟, 贾东, 陈竹新, 等. 龙门山飞仙关断层传播褶皱磁组构特征及构造意义[J]. 高校地质学报, 2005, 11: 649–655.
- [14] 贾东, 陈竹新, 罗良, 等. 断层相关褶皱的磁组构与有限应变: 川西岷江冲断构造的实例分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2): 31–38.
- [15] 李一泉, 贾东, 罗良, 等. 川西盐井沟断层相关褶皱的三维构造建模与磁组构分析[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 74–84.
- [16] Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China[J]. Int. Geol. Rev., 1995, 37: 661–735.
- [17] Kirby E, Whipple K, Harkins N. Topography reveals seismic hazard [J]. Nature Geoscience, 2008, 1: 485–487.
- [18] 于苏俊. 龙门山北段推覆构造的几何特征及应变分析[J]. 矿物岩

- 石, 2000, 20(4): 67–74.
- [19] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003, 9(3): 462–469.
- [20] 陈竹新, 贾东, 张恒, 等. 龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析[J]. 地质学报, 2005, 79: 38–45.
- [21] Jia Q P, Jia D, Luo L, et al. Three-dimensional Evolutionary Models of the Qiongxian Structures, Southwestern Sichuan Basin: Evidence from Seismic Interpretation and Geomorphology[J]. Acta geologica sinica, 2009, 83(2): 372–385.
- [22] 贾东, 李一泉, 王毛毛, 等. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 732–740.
- [23] Wang M M, Jia D, Lin Aiming, et al. Late Holocene activity and historical earthquakes of the Qiongxian thrust fault system in the southern Longmen Shan fold-and-thrust belt, eastern Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2013, 584: 102–113.
- [24] Wang M M, Jia D, John H Shaw, et al. Active fault-related folding beneath an alluvial terrace in the southern Longmen Shan range front, Sichuan basin, China: Implications for seismic hazard[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(4): 2369–2385.
- [25] Hrouda F. Magnetic anisotropy of rock and its application in geology and geophysics[J]. Geophysical Surveys, 1982, 5(2): 37–82.
- [26] Parés J P, van der Pluijm B A, Dinarès-Turell J. Evolution of magnetic fabric during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, Northern Spain)[J]. Tectonophysics, 1999, 307: 1–14.
- [27] Sagnotti L, Speranza F, Winkler A, et al. Magnetic fabric of clay sediments from the external northern Apennines (Italy)[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1998, 105: 73–93.
- [28] Jelinek V. Characterization of magnetic fabric of rocks[J]. Tectonophysics, 1981, 79: 63–67.
- [29] Saint-Bezar B, Hebert R L, Aubourg C, et al. Magnetic fabric and petrographic investigation of hematite-bearing sandstones within ramp-related folds: examples from the South Atlas Front[J]. Journal of Structural Geology, 2002, 24: 1507–1520.
- [30] Averbuch O, Frizon de Lamotte D, Kissel C. Magnetic fabric as a structural indicator of the deformation path within a fold thrust structure: a test case from the Corbieres (NE Pyrenees, France)[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14: 461–474.
- [31] 罗良, 漆家福, 贾东, 等. 龙门山南段山前全-乐山剖面磁组构研究及其对新生代构造变形的指示意义[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 558–566.
- [32] Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China[J]. Int. Geol. Rev., 1995, 37: 661–735.
- [33] Chen S, Wilson C J L. Emplacement of the Longmen Shan Thrust-Nappe Belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. J. Struct. Geol., 1996, 18: 413–430.
- [34] Jia D, Wei G Q, Chen Z X, et al. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to western Sichuan Basin in central China: new insights from hydrocarbon exploration[J]. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 2006, 90: 1425–789.
- [35] 陈智梁, 陈世瑜. 扬子地块西缘地质构造演化[M]. 四川: 重庆出版社, 1987: 1–172.
- [36] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematical model of active deformation in central Asia[J]. Geophys. Res. Lett., 1993, 20: 895–898.
- [37] Zhang P, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System data[J]. Geology, 2004, 32: 809–812.
- [38] Li Z G, Jia D, Chen W, et al. Late Cenozoic east-west crustal shortening in the southern Longmen Shan range front, eastern Tibet: Implications for regional stress field changes[J]. Tectonophysics, 2014 doi: 10.1016/j.tecto.2014.03.033.
- [39] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake[J]. China. Geology, 2009, 37(6): 515–518.
- [40] Liu Z, Zhang Z, Wen L, et al. Co-seismic ruptures of the 12 May 2008, Ms 8.0 Wenchuan earthquake, Sichuan: East-West crustal shortening on oblique, parallel thrusts along the eastern edge of Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 286: 355–370.
- [41] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 2004, 47: 654–662.
- [42] 杜义, 谢富仁, 张效亮, 等. 汶川 Ms8.0 级地震断层滑动机制研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 464–473.