

黄河源地区磁组构特征及其地质意义

韩建恩 余 佳 朱大岗 邵兆刚
孟宪刚 钱 程 贺承广 王 津 吕荣平

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

提要:黄河源区位于青藏高原东北部,区内主要为三叠系沉积地层,发育一系列由北向南的推覆构造带,间有早期近直立的韧性剪切带。笔者对黄河源地区巴颜喀拉山群沉积岩进行了磁组构分析,结果显示岩石磁化率各向异性度 P 值和磁化率百分率各向异性度 H 值均不大,反映该地区总体韧性变形较弱,较强韧性变形仅发育于局部地段;岩石磁组构具有磁面理发育、磁线理不发育、磁化率椭球呈压扁形椭球体的特点,反映在挤压应力作用下,岩石发生了压扁变形,主应力方位主要为 $NNE-SSW$ (近 SN) 向,其次为 $NE-SW$ 向。根据岩石磁组构分析认为黄河源地区存在两条韧性剪切带,韧性剪切带与现今湖泊水体的展布有一定的耦合关系;北部韧性剪切带沿现今黄河河谷分布,控制着扎陵湖、鄂陵湖和玛多“四姐妹湖”的展布;南部韧性剪切带沿岗纳格玛错—野牛沟一线展布,控制着岗纳格玛错和尕拉拉错等残余湖泊的分布。

关键词:磁组构;韧性剪切带;黄河源地区

中图分类号: P542+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2011)06-1493-11

磁组构作为地质构造学的研究方法最早由 Graham J W 于 1954 年提出^[1],之后,采用磁组构研究韧性剪切带和断裂问题在国内外得到普遍应用^[2-7]。岩石磁化率各向异性是磁组构的物理实质,指的是岩石中磁性矿物颗粒或晶格的定向排列以及它们的组合,表现的形式是磁化率量值椭球体的形状和方向。研究表明,岩石磁化率椭球体与应变椭球体不仅对应各轴方位吻合,而且它们的大小也具有一定的比例关系^[8-9],因此可用磁化率椭球体的形态和空间向来分析岩石所经历的构造历程、构造变形的性质及应力作用的方式和方向。岩石磁化率各向异性的测量较之岩石应变椭球的测量速度快,且数据处理和分析方法简便,适应于大面积范围进行有限应变分析,目前普遍利用磁组构方法代替岩组构方法来研究构造变形,特别是对于缺乏应变标志体和应变

椭球难以确定的变形研究尤其实用意义。本文运用磁组构测定方法,分析黄河源区变形岩石的磁组构特征,研究认为该区存在两条主要韧性剪切带,并且其与湖泊展布存在一定的空间耦合关系。

1 地质概况

黄河源区位于青藏高原东北部,构造上处于柴达木构造域与羌塘构造域的结合部位,即松潘—甘孜造山带西北部^[10-12]。地层分区属华南地层大区巴颜喀拉地层区玛多—马尔康地层分区曲麻莱小区,区内出露地层较为简单,仅有中二叠统、三叠系、新近系及第四系等。二叠系仅在玛多北呈断块状出露,岩性为灰岩,火山碎屑岩,变砂岩及粉砂质板岩。三叠系巴颜喀拉山群厚度达上万米,岩石组合以砂岩、板岩为主,分布较广,局部有少量薄层灰岩及砾岩,

收稿日期:2011-02-17;改回日期:2011-06-15

基金项目:地质力学研究所基本科研业务费项目“黄河源晚新生代河湖相地层序列及其环境意义”(DZLXJK200902)和中国地质调查局项目“青藏高原古大湖气候变化记录研究”(水[2010]矿评 03-06-01)与“晚新生代构造气候变动对黄河水系演化影响研究”(科[2007]03-04)共同资助。

作者简介:韩建恩,男,1980年生,博士,助研,从事区域地质、沉积相与古环境研究;E-mail:hanjianen@163.com。

偶有薄层灰岩夹层^[13]。新近纪地层呈长条状或短带状广布于研究区,主要分布于北巴颜喀拉山及“两湖”地区,为一套陆相碎屑岩建造,岩性为砂岩,粉砂岩,泥岩。第四系在研究区均有分布。早更新世地层,南起巴颜喀拉山脉北麓,北至布青山南缘均有分布,主要为一套较粗的砂砾石层。中、晚更新世地层,西起约古宗列曲、东到优云乡均有分布,主要分布在黄河河谷中,野外露头不多,但在钻孔中比较常见,而且厚度较大;该地层更多的是以高位湖相阶地的形式出现,包括有多级湖岸堆积阶地、基座阶地。全新世地层在黄河源区两湖堤岸附近、黄河河谷中常见,为一套细—粉砂层、泥质粉砂层、粉砂质粘土层、黑色植物层、黑色腐殖层^[14,15]。

研究区内的断裂构造极为发育,常密集成束分布(图1),断裂按走向可分为3组,即NW-NWW向、NNW向和NE-NEE向断裂。NW-NWW向断裂为区内主干构造,形成时间较早,规模较大、活动期长、走向延伸达数百千米或千余千米,与黄河源盆地的展布方向一致,是控制黄河源地区地貌形成和形态、第四纪沉积物形成和分布的重要断裂。区域主要的断裂自北向南有昆南断裂、布青山山前断裂、玛多断裂、巴颜河前断裂、麻多—野牛沟断裂和巴颜喀拉山山前断裂。昆南断裂和巴颜喀拉山山前断裂控制了黄河源盆地的总体展布,其他断裂控制了湖泊的分布和沉积物的分布^[13]。

2 取样和测试

采样剖面位于黄河源盆地东部,横穿研究区断裂,垂直地层走向近南北向采样(图1)。具体路线是沿214国道自巴颜喀拉山经玛多到花石峡,地层出露好的地方大致以2 km采集1个样品,采点编号为P4-1~P4-47,共47块手标本,最后加工成44块样品。对断裂带、韧性变形带的重点区域进行了加密采样,采样大致间距为5~10 m布置1个采点,采点编号为09Y1~10、09D1~5、09M1~10、09N1~5,共30块手标本,最后加工成30块样品。剖面岩性主要是巴颜喀拉山群细粒岩屑长石砂岩、含砾粗砂岩、长石英砂质板岩、千枚状板岩与板岩,马尔争组灰岩、砾质灰岩、变砂岩及板岩。

室内将野外采集的定向标本切制成高2 cm×2 cm×2 cm的正方体样品,经中国地质大学(北京)古地磁实验室测试,仪器型号为AGICO KLY-4S卡帕桥,实验条件:测量场为300 A/m,工作频率为875 Hz,环境温度为20℃,灵敏度为 3×10^{-8} SI,精度为0.1%。通过旋转样品,每块样品测出15个方向的值,运用最小二乘法,求出样品的3个主磁化率值 K_{max} 、 K_{int} 和 K_{min} (或 K_1 、 K_2 和 K_3),然后计算出样品的磁化率椭球体的特征值(磁化率各向异P值、磁线理L、磁面理F、磁椭球体扁率E和椭球体形状因子T以及主磁化率轴的空间坐标磁各向异性的各项参数),测试结果见表1。

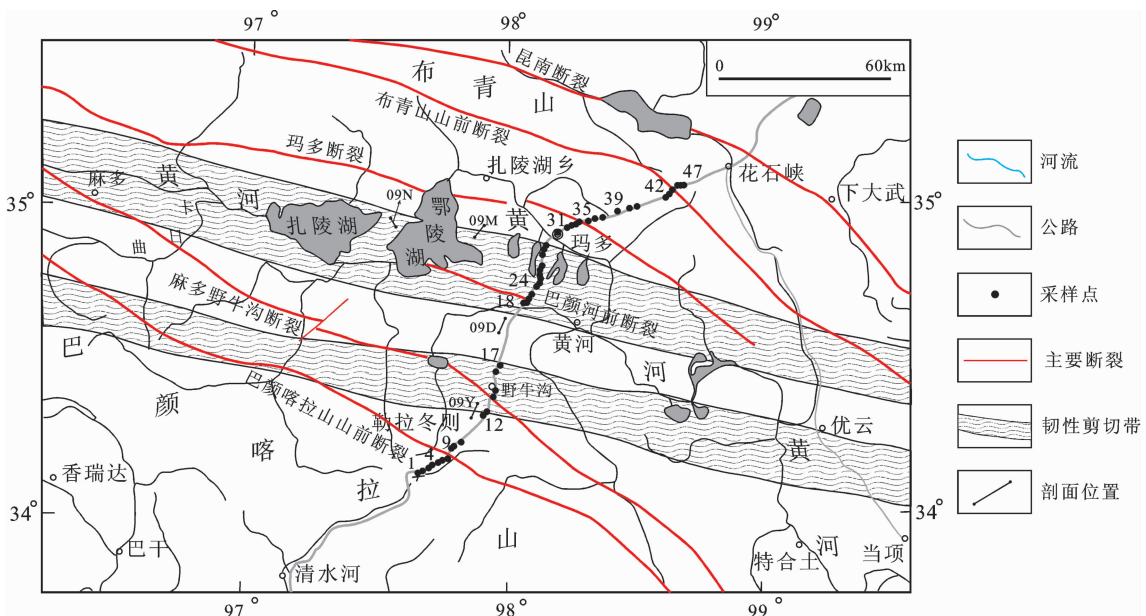


图1 黄河源区南北构造剖面采样位置图

Fig.1 Sampling locations along NS-trending structural section in the Yellow River source area

表 1 黄河源盆地岩石磁组构参数及参数计算结果(单位: 10^{-6}SI)
 Table 1 Measurements and calculations of rock magnetic fabric elements of the Yellow River source basin (unit: 10^{-6}SI)

序号	样品号	K_{\max}	K_{int}	K_{\min}	K_{mean}	K_{\max}		K_{int}		K_{\min}		L	F	P	T	E	H
						Dg	Ig	Dg	Ig	Dg	Ig						
1	P ₄ -1	184.60	183.30	180.50	182.80	261.0	13.5	167.1	15.7	29.7	69.1	1.007	1.016	1.023	0.378	1.008	2.19
2	P ₄ -2	147.00	145.50	140.30	144.30	311.8	31.7	217.0	7.7	114.9	57.1	1.01	1.038	1.048	0.56	1.026	4.86
3	P ₄ -3	172.40	170.40	165.20	169.30	214.0	31.3	65.9	54.3	313.5	15.3	1.011	1.032	1.043	0.464	1.020	4.14
4	P ₄ -4	155.20	154.30	150.10	153.20	193.1	52.8	333.1	30.2	75.1	19.7	1.006	1.028	1.034	0.66	1.022	3.27
5	P ₄ -5	242.30	237.50	233.20	237.70	52.1	60.2	151.4	5.2	244.3	29.2	1.02	1.019	1.039	-0.044	0.998	3.78
6	P ₄ -6	209.00	205.40	203.50	206.00	109.9	3.3	210.3	72.2	18.8	17.5	1.018	1.009	1.027	-0.303	0.992	2.43
7	P ₄ -7	172.70	171.60	164.60	169.70	270.7	64.7	58.4	21.8	153.3	12.3	1.006	1.042	1.049	0.745	1.036	4.71
8	P ₄ -8	146.20	146.10	145.10	145.80	13.5	43.4	121.6	18.2	228.2	41.0	1.001	1.006	1.007	0.752	1.006	0.68
9	P ₄ -9	159.80	158.90	149.70	156.20	52.3	14.0	303.8	51.8	152.2	34.6	1.005	1.061	1.067	0.835	1.055	6.41
10	P ₄ -10	262.50	257.50	252.10	257.40	323.3	14.6	115.8	73.7	231.4	7.2	1.019	1.022	1.041	0.055	1.002	4.28
11	P ₄ -11	118.80	118.30	117.80	118.30	128.3	9.9	31.0	35.9	231.4	52.3	1.004	1.004	1.008	-0.013	1.000	0.85
12	P ₄ -12	128.80	127.90	124.40	127.00	93.9	30.9	358.6	8.8	254.4	57.6	1.007	1.029	1.036	0.626	1.021	3.94
13	P ₄ -13	203.00	200.90	200.30	201.40	35.8	22.8	288.1	35.8	151.1	45.4	1.011	1.003	1.013	-0.577	0.993	1.49
14	P ₄ -14	294.90	290.60	282.10	289.20	291.5	42.0	145.6	42.6	38.3	17.9	1.015	1.03	1.045	0.345	1.015	4.5
15	P ₄ -15	309.90	298.50	287.50	298.60	17.9	77.8	126.8	4.0	217.6	11.5	1.038	1.038	1.078	0.001	1.000	7.36
16	P ₄ -16	225.60	220.90	196.90	214.50	20.0	51.6	134.0	17.9	236.0	32.7	1.021	1.122	1.146	0.692	1.099	13.49
17	P ₄ -18	223.90	221.20	209.20	218.10	256.4	14.6	161.3	19.1	21.5	65.6	1.012	1.057	1.07	0.639	1.045	6.88
18	P ₄ -19	193.20	189.60	187.10	190.00	322.0	0.4	52.9	68.4	231.9	21.6	1.019	1.014	1.033	-0.152	0.994	3.16
19	P ₄ -20	279.50	276.30	268.30	274.70	44.5	76.3	305.3	2.2	214.8	13.6	1.011	1.03	1.042	0.45	1.018	4.36
20	P ₄ -21	302.10	298.50	287.80	296.10	202.1	44.2	302.2	10.2	42.2	44.0	1.012	1.037	1.05	0.499	1.025	4.73
21	P ₄ -22	197.00	192.60	185.40	191.60	184.6	15.4	275.1	2.0	12.3	74.5	1.023	1.039	1.062	0.254	1.016	6.25
22	P ₄ -23	347.60	344.80	340.60	344.30	248.9	45.2	128.1	27.0	19.0	32.6	1.008	1.012	1.021	0.197	1.004	2.03
23	P ₄ -24	82.56	82.09	81.14	81.93	117.7	1.5	209.0	40.3	26.0	49.6	1.006	1.012	1.017	0.342	1.006	1.83
24	P ₄ -25	189.10	188.20	178.10	185.10	322.4	64.0	86.0	15.1	181.8	20.7	1.005	1.057	1.062	0.837	1.052	5.95
25	P ₄ -26	283.10	282.10	272.80	279.30	276.3	7.2	172.2	62.6	9.9	26.2	1.003	1.034	1.038	0.814	1.030	3.58
26	P ₄ -27	215.50	213.70	206.90	212.00	172.7	82.4	301.8	4.8	32.3	5.9	1.008	1.033	1.042	0.6	1.024	4.25
27	P ₄ -28	66.22	65.56	65.22	65.67	11.1	0.3	281.1	5.2	104.0	84.8	1.01	1.005	1.015	-0.321	0.995	1.52
28	P ₄ -29	101.60	99.75	97.79	99.73	247.5	54.1	111.5	27.6	9.8	21.2	1.019	1.02	1.039	0.026	1.001	4.21
29	P ₄ -30	166.80	165.20	163.20	165.10	155.9	36.9	266.1	24.7	21.5	42.9	1.01	1.012	1.022	0.124	1.003	2.42
30	P ₄ -31	203.10	196.60	189.40	196.40	172.4	51.4	295.6	23.7	39.4	28.6	1.033	1.038	1.072	0.072	1.005	7.14
31	P ₄ -32	222.30	221.80	217.20	220.50	327.0	36.2	107.5	46.5	220.9	20.7	1.002	1.021	1.024	0.799	1.019	2.26
32	P ₄ -33	77.58	77.06	76.83	77.16	224.9	76.4	323.4	2.0	53.9	13.4	1.007	1.003	1.01	-0.384	0.996	1.04
33	P ₄ -34	210.70	209.70	206.50	209.00	165.1	62.4	309.6	23.0	45.8	14.3	1.005	1.015	1.02	0.516	1.011	1.91
34	P ₄ -35	162.80	162.10	158.90	161.30	256.3	56.0	115.0	27.8	15.1	18.1	1.004	1.02	1.024	0.655	1.016	2.48
35	P ₄ -36	159.60	159.10	153.30	157.30	48.0	31.2	317.5	0.8	226.1	58.8	1.003	1.037	1.041	0.847	1.035	4.46
36	P ₄ -38	32.95	32.89	32.80	32.88	338.4	70.3	220.9	9.4	128.0	17.1	1.002	1.003	1.005	0.287	1.001	0.61
37	P ₄ -39	234.70	231.00	226.30	230.70	246.8	56.0	127.3	18.3	27.4	27.5	1.016	1.021	1.037	0.126	1.005	3.9
38	P ₄ -40	171.20	169.00	165.10	168.40	8.9	12.4	100.1	5.4	213.1	76.4	1.013	1.024	1.037	0.308	1.01	3.57
39	P ₄ -41	318.60	312.60	309.20	313.50	38.5	27.4	288.0	34.0	158.1	43.6	1.019	1.011	1.03	-0.269	0.992	3.18
40	P ₄ -42	154.40	150.80	149.40	151.50	107.7	17.8	243.0	65.7	12.4	16.0	1.023	1.01	1.034	-0.403	0.986	3.29
41	P ₄ -43	243.30	240.30	237.10	240.20	336.9	29.6	85.4	29.1	210.7	46.1	1.012	1.014	1.026	0.052	1.001	2.50
42	P ₄ -44	233.30	230.40	227.30	230.40	243.4	41.0	117.4	34.1	4.0	30.4	1.013	1.013	1.026	0.026	1.001	2.61
43	P ₄ -45	278.90	274.50	267.20	273.50	5.8	58.7	168.3	30.1	262.8	7.7	1.016	1.027	1.044	0.256	1.011	4.38
44	P ₄ -47	191.60	191.30	190.40	191.10	313.9	42.2	123.9	47.4	219.4	5.0	1.001	1.005	1.006	0.528	1.003	1.05
45	09D-1	251.00	247.00	240.00	246.00	52.9	33.5	154.0	16.3	265.7	51.8	1.017	1.031	1.048	0.281	1.01	4.47
46	09D-2	253.00	249.00	245.00	249.00	65.9	11.0	157.4	7.8	281.9	76.5	1.014	1.018	1.032	0.107	1	3.21
47	09D-3	227.00	225.00	221.00	224.00	14.1	66.6	158.5	19.4	253.0	12.6	1.009	1.016	1.025	0.27	1.009	2.68

续表 1

序号	样品号	K_{max}	K_{int}	K_{min}	K_{mean}	K_{max}		K_{int}		K_{min}		L	F	P	T	E	H
						Dg	Ig	Dg	Ig	Dg	Ig						
48	09D-4	219.00	217.00	208.00	215.00	43.0	39.2	137.6	5.6	234.4	50.2	1.011	1.041	1.052	0.588	1.034	5.12
49	09D-5	152.00	150.00	146.00	149.00	20.3	36.1	138.9	33.2	257.7	36.4	1.013	1.026	1.039	0.338	1.014	4.03
50	09Y-1	118.00	117.00	116.00	117.00	244.9	72.6	142.6	3.8	51.4	17.0	1.009	1.009	1.018	0.041	1	1.71
51	09Y-2	139.00	137.00	136.00	137.00	111.0	50.5	328.3	33.3	225.4	18.8	1.013	1.011	1.024	-0.095	0.993	2.19
52	09Y-3	354.00	351.00	328.00	344.00	181.5	70.3	324.6	15.9	57.8	11.2	1.008	1.069	1.077	0.79	1.061	7.56
53	09Y-4	253.00	246.00	236.00	245.00	325.0	50.9	132.3	38.4	227.2	6.2	1.027	1.043	1.071	0.219	1.014	6.94
54	09Y-5	346.00	337.00	314.00	332.00	336.7	51.6	120.7	32.6	222.6	17.9	1.029	1.071	1.102	0.42	1.045	9.64
55	09Y-6	231.00	226.00	217.00	225.00	289.1	86.3	142.2	3.1	52.1	2.0	1.021	1.041	1.064	0.316	1.019	6.22
56	09Y-7	407.00	387.00	376.00	390.00	350.0	56.8	82.3	1.5	173.3	33.1	1.052	1.03	1.083	-0.268	0.979	7.95
57	09Y-8	187.00	183.00	182.00	184.00	110.7	23.4	257.1	62.5	14.7	13.6	1.019	1.006	1.025	-0.518	0.984	2.72
58	09Y-9	172.00	168.00	165.00	168.00	177.2	43.0	330.3	43.7	73.9	13.8	1.024	1.018	1.042	-0.139	0.995	4.17
59	09Y-10	254.00	251.00	232.00	245.00	155.8	55.9	339.5	34.1	248.3	1.7	1.012	1.079	1.092	0.731	1.069	8.98
60	09M-1	322.00	321.00	294.00	312.00	83.4	24.8	299.3	60.3	180.6	15.3	1.005	1.091	1.097	0.883	1.088	8.97
61	09M-2	334.00	333.00	313.00	327.00	211.7	64.0	310.6	4.3	42.7	25.6	1.004	1.064	1.068	0.875	1.061	6.42
62	09M-3	317.00	315.00	302.00	311.00	298.8	3.6	67.3	84.3	208.5	4.5	1.006	1.043	1.049	0.753	1.036	4.82
63	09M-4	219.00	218.00	214.00	217.00	162.8	71.7	320.8	17.0	52.8	6.5	1.007	1.017	1.024	0.423	1.014	2.30
64	09M-5	232.00	230.00	225.00	229.00	218.8	74.0	313.1	1.2	43.5	15.9	1.008	1.025	1.033	0.497	1.013	3.06
65	09M-6	401.00	398.00	392.00	397.00	315.2	56.7	150.8	32.3	56.2	7.1	1.006	1.017	1.023	0.499	1.008	2.27
66	09M-7	311.00	303.00	284.00	299.00	286.6	64.7	106.6	25.3	16.6	0.0	1.025	1.066	1.093	0.436	1.039	9.03
67	09M-8	314.00	310.00	281.00	302.00	52.5	49.4	296.5	20.6	192.2	33.2	1.014	1.103	1.119	0.748	1.089	10.93
68	09M-9	284.00	282.00	264.00	277.00	298.7	38.9	123.1	51.0	30.4	2.1	1.009	1.068	1.077	0.767	1.061	7.22
69	09M-10	208.00	207.00	205.00	207.00	160.8	75.9	292.7	9.5	24.4	10.3	1.008	1.01	1.018	0.102	1.005	1.45
70	09N-1	158.00	157.00	149.00	155.00	46.4	16.2	298.6	46.4	150.0	39.1	1.007	1.048	1.056	0.73	1.047	5.81
71	09N-2	172.00	170.00	160.00	167.00	279.6	73.1	66.2	14.2	158.5	8.9	1.013	1.057	1.071	0.628	1.050	7.19
72	09N-3	181.00	179.00	168.00	176.00	188.6	45.5	24.8	43.3	287.0	8.2	1.009	1.069	1.078	0.774	1.054	7.39
73	09N-4	197.00	195.00	180.00	191.00	351.1	88.2	211.1	1.4	121.1	1.2	1.011	1.084	1.096	0.767	1.072	8.90
74	09N-5	237.00	235.00	221.00	231.00	138.7	53.9	239.0	7.4	334.2	35.1	1.01	1.061	1.071	0.721	1.054	6.93

注:样品由中国地质大学(北京)古地磁实验室李海燕测试。 K_{max} 、 K_{int} 、 K_{min} 分别是磁化率椭球体最大、中间和最小轴磁化率大小,单位为 10^{-6}SI ; K_{mean} 为前三者的算术平均值; P (磁化率各向异性度) = K_{max}/K_{min} ; F (磁面理) = K_{int}/K_{min} ; L (磁线理) = K_{max}/K_{min} ; E (磁化率椭球体的扁率) = $K_{int}^2/(K_{max} \times K_{min})$; T (磁化率椭球体形状因子) = $(2\ln K_{int} - \ln K_{max} - \ln K_{min})/(\ln K_{max} - \ln K_{min})$; H (百分率各向异性度) = $(K_{max} - K_{min})/K_{mean} \times 100\%$ 。

3 磁组构特征分析

磁组构测量取得的基本参数主要有: K_{max} (最大磁化率)、 K_{int} (中间磁化率)和 K_{min} (最小磁化率)、 K_{mean} (平均磁化率)、 P (磁化率各向异性度)、 E (磁化率椭球扁率)、 T (磁化率椭球体形状因子)、 F (磁面理)、 L (磁线理)等,研究表明,这些参数能够定量反映构造带应力应变特征^[5,6,16-19]。

3.1 磁各向异性度 P

实验认为 $P \geq 1.05$ 即反映所测岩石发生了韧性变形,而 $P \geq 1.10$ 反映岩石已经发生强韧性变形, $P = 1.05 \sim 1.09$ 为弱韧性变形^[21]。根据 Nagate 法^[20]计算出的磁化率各向异性度 P 值(表 1),将各取样点岩石样品的 P 值绘制成柱状图(图 2)显示:总体 P 值较

小,74 个样品中 $P \geq 1.10$ 的有 3 个、 $1.10 > P \geq 1.05$ 的有 27 个、 $1.05 > P \geq 1.00$ 的有 34 个,其中 P 值最大值为 1.146(样品 P_4-16),表明黄河源地区巴颜喀拉山群岩石总体构造变形较弱,在两湖地区的岩石经历了强烈的韧性变形。

3.2 百分率各向异性度 H

岩石百分率各向异性度 H ($H = (K_{max} - K_{min})/K_{mean} \times 100\%$) 是研究岩石塑性变形强弱的参数。一般认为, H 值大于 5% 时表明岩石开始产生塑性变形^[20]。计算结果表明,研究区内岩石 H 值以小于 5% 居多,74 个样品中有 45 个样品小于 5%,29 个样品大于 5%,其中点 P_4-16 最高,达 13.49%,这说明黄河源区内巴颜喀拉山群岩石变形以脆性变形为主,局部经受过韧性变形。野外观察野牛沟附近断裂构造特别

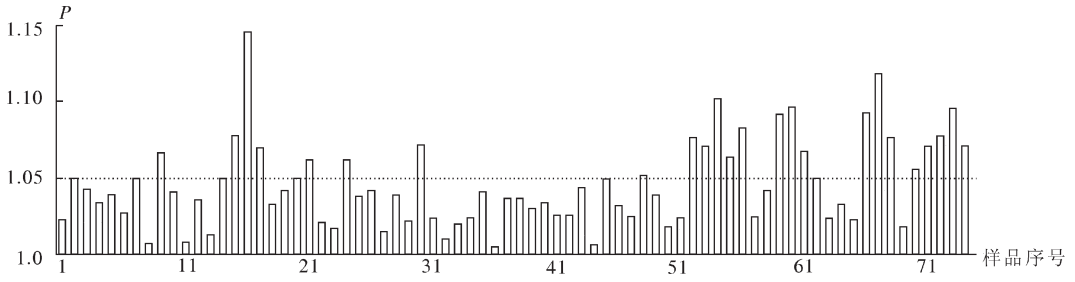


图 2 磁化率各向异性度 P 柱状图 (样品序号见表 1)
Fig.2 P frequency of magnetic susceptibility anisotropy

发育,这与事实极其吻合。

3.3 磁组构 F-L 图解

岩石应变类型分为压扁应变、平面应变和收缩应变。压扁应变时应变椭球有一个轴缩短、二个轴拉长;收缩应变时,应变椭球有二个轴缩短、一个轴拉长;平面应变时,应变椭球有一个轴缩短、一个轴拉长,第三个轴长度不变。在应变椭球富林图解上表现为 $E>1$ 、 $E<1$ 和 $E=1$ 。应用磁组构测量获得的磁线理和磁面理数据做 F-L 图,可以判断某点的岩石应变类型,其原理是当岩石发生压扁应变时,磁面理相对发育,当发生收缩应变时,磁线理相对发育,而发生平面应变时,磁面理和磁线理近于同等发育^[16,21]。由黄河源区南北剖面各点 F-L 图(图 3)可见:黄河源韧性剪切带 30 个韧性变形点 F-L 图(Flinn 图解)投影图上,有 28 个点落在压扁应变区内,1 个点落在平面应变区内,1 个点落在收缩应变区内,说明带内岩石总体发生了压扁(烙饼型)变形,反映了巴颜

喀拉山地区地壳岩石曾发生挤压、缩短作用。

3.4 磁组构 P-T 图解

磁组构中磁椭球形状参数(T)可以区分磁化率数值椭球的形状。由黄河源地区磁化率各向异性度和磁椭球形状参数(T)的 P - T 图(图 4)可看出,发生韧性变形的 30 个点中,全部样点的 T 值基本上均落在 P 轴以上区域(1 点落在 P 轴上,1 点落在 P 轴以下区域),说明研究区岩石在磁组构上具有磁面理发育,磁线理不发育,磁化率椭球体为压扁形椭球体的特点,反映岩石形变均属压扁形椭球。

3.5 磁化率轴的方位特征

最小磁化率轴代表最大应变压缩轴,与构造面理垂直,一般认为代表最大压应力方向^[18,22,23]。将测试的各样品最小磁化率产状投影到吴氏网上(图 5),可以看出不同样品的最小磁化率轴投影点各不相同,但总体上有明显的优势方位,即投影点多位于第一和第三象限内。由表 1 可知,74 个样品中有 58 个

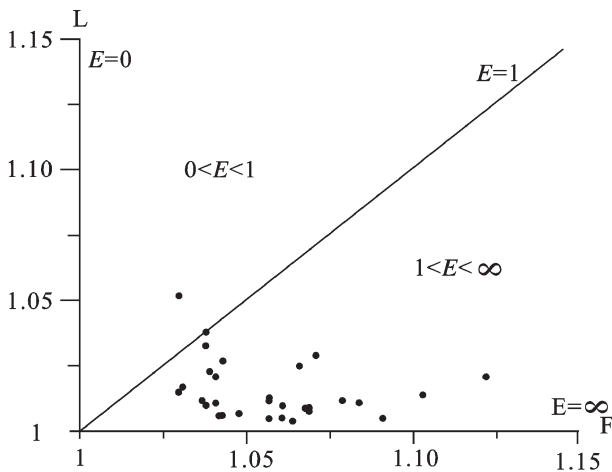


图 3 黄河源区韧性剪切带 30 个应变点的 Flinn 图解
Fig.3 Flinn diagram of 30 sampling points along the ductile shear zone in the Yellow River source area

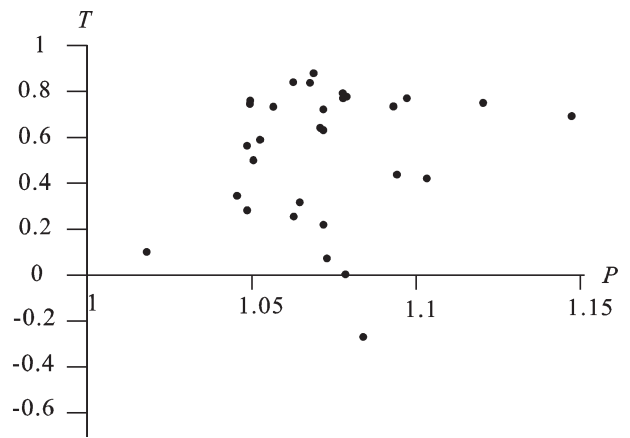


图 4 采样点磁各向异性度与椭球体形状因子图
Fig.4 Diagram of anisotropy and ellipsoid shape factor at the sampling site

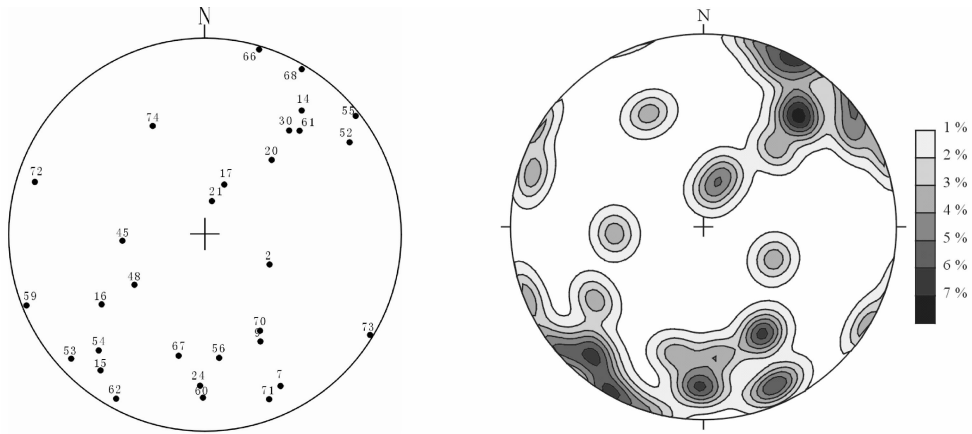


图5 最小磁化率轴产状赤平投影图及极密图(下半球投影,样品号同表1)

Fig.5 Projection diagram of minimum magnetic susceptibility

样品磁化率椭球体的扁率(E)大于1,11个小于1。当 $E > 1$ 时,磁化率椭球的几何形态为压扁椭球,这表明黄河源区主要受压应力作用。黄河源区巴颜喀拉山群岩石最小磁化率主轴方位主要集中在 $0 \sim 30^\circ$,其次为 $215 \sim 240^\circ$,代表该地区受到的主压应力主要为 $NNE-SSW$ (近 SN)向,其次为 $NE-SW$ 向,这与区域断裂的走向主要为 $NWW-SEE$ 向近似垂直。发生韧性变形点磁组构最小磁化率轴产状极密图(图5)中极密区域位于大圆圆周附近,这说明挤压压力的方向基本上是水平的,水平挤压力使地层沿垂直该力方面发生褶皱变形。

4 韧性剪切带与湖泊的关系

韧性剪切带两侧岩石可发生明显的剪切位移,但剪切带中岩石没有明显的破裂面,在地壳深处又称为韧性断层。岩石磁组构中的磁各向异性度 P 值直接反映韧性变形的参数,将黄河源区岩石磁组构各向异性曲线图和实测地质剖面图结合起来可以看出,该剖面自北向南韧性变形有由弱 \rightarrow 强 \rightarrow 弱 \rightarrow 强 \rightarrow 弱的趋势(图6)。剖面南部韧性变形明显, $P_4-14 \sim P_4-18$ 地段发生韧性变形,边界清楚。在剖面南部发生韧性变形的野牛沟附近测制了1条短剖面,

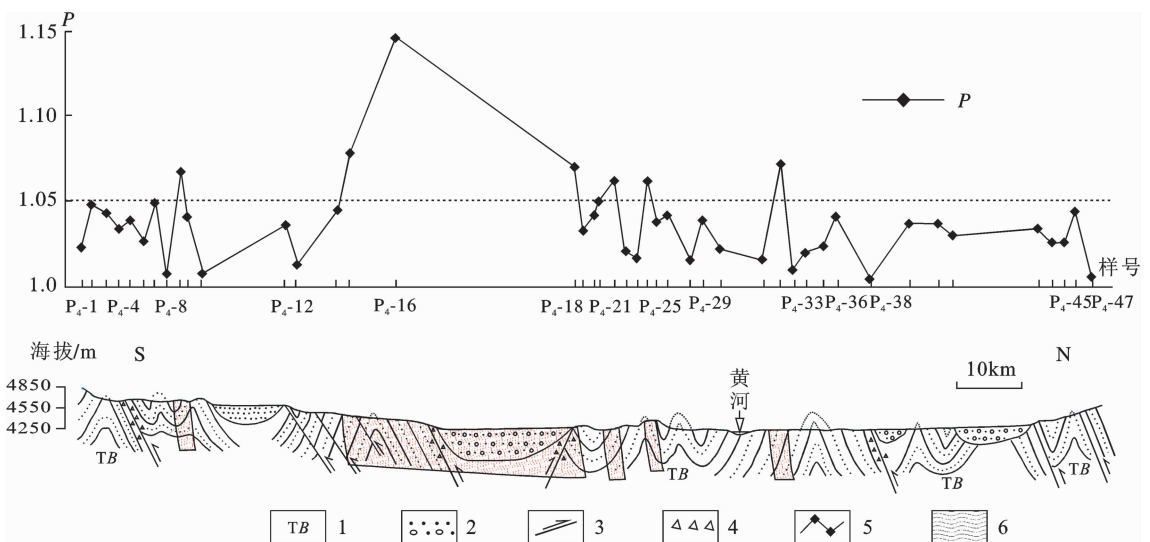


图6 黄河源巴颜喀拉山口至花石峡韧性剪切带磁组构测量剖面图

1—巴颜喀拉山群;2—新近系—第四系;3—断层;4—断层带;5—磁各向异性曲线;6—韧性剪切带

Fig.6 Magnetic fabric measurement section of the shear zone from Bayankalashan mouth to Huashixia in the Yellow River source area

磁组构各向异性度(P 值)基本大于 1.05,说明该处发生了韧性变形(图 7)。剖面北部岩石发生韧性变形,但边界不清,为了确定黄河源区北部韧性剪切带的边界,对剖面北部进行加密采样。在玛多县城西约 10 km 与鄂陵湖和扎陵湖分水岭的地方测制了 2 条短剖面(图 8~9),玛多县城西剖面中岩石磁组构各向异性度(P 值)基本大于 1.05,但在断层附近小于 1.05;在鄂陵湖和扎陵湖分水岭剖面中岩石磁组构各向异性度均大于 1.05,说明这两处依然位于韧性变形区域,考虑到该带北部即为玛多断裂,所以将该地区的韧性剪切带的北部边界划在牛头碑—玛多县城—黄河河谷一带。在大野马岭南测制的剖面中发现,该处磁组构各向异性度(P 值)基本小于 1.05,说明该处岩石未发生韧性变形,所以北部韧性剪切带

南部边界应在该点以北。根据黄河源区韧性变形岩石的剖面分布,结合区域构造特征,在黄河源区可识别出 2 条主要韧性剪切带,均沿北西西向展布。南部韧性剪切带强应变中心在 $P_4-14\sim P_4-18$ 地段,即野牛沟—岗纳格玛错一带。北部韧性剪切带强应变中心在 $P_4-25\sim P_4-31$ 地段,即沿麻多—现今黄河河谷一带分布,该韧性剪切带北部边界应沿玛多县城—牛头碑一线分布,南部边界沿大野马岭—黄河乡一线展布。

黄河源区在更新世时期为一古大湖,在牛头碑附近有拔湖 200 余米的高位湖相沉积,现在该地区也是湖泊众多,玛多县素有“千湖之县”之称,源区有扎陵湖、鄂陵湖、岗纳格玛错、冬草阿龙错、隆热错、阿涌贡玛错、阿涌哇玛错、阿涌尕玛错、尕拉拉错、哈

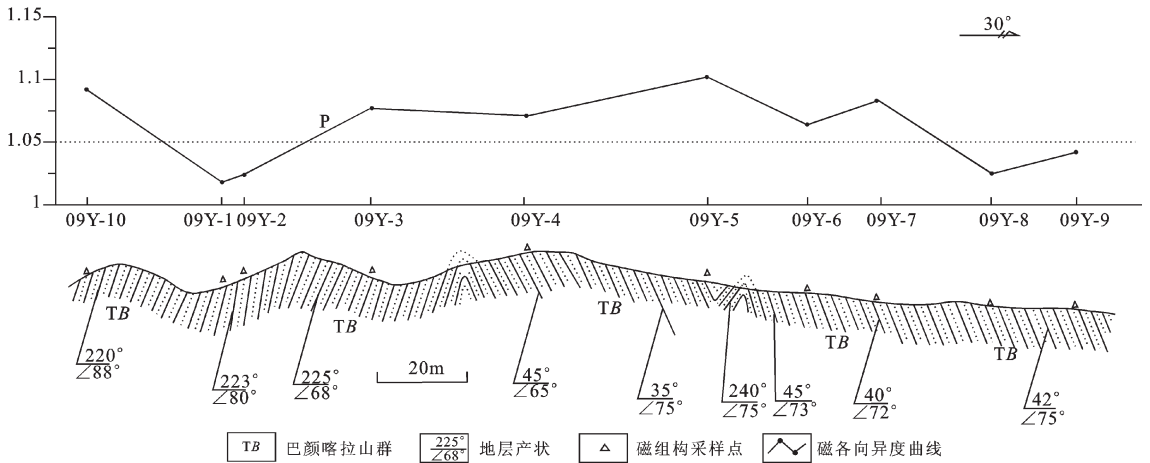


图 7 野牛沟南韧性剪切带磁组构测量剖面图

Fig.7 Magnetic fabric measurement section in south Yenuiugou shear zone

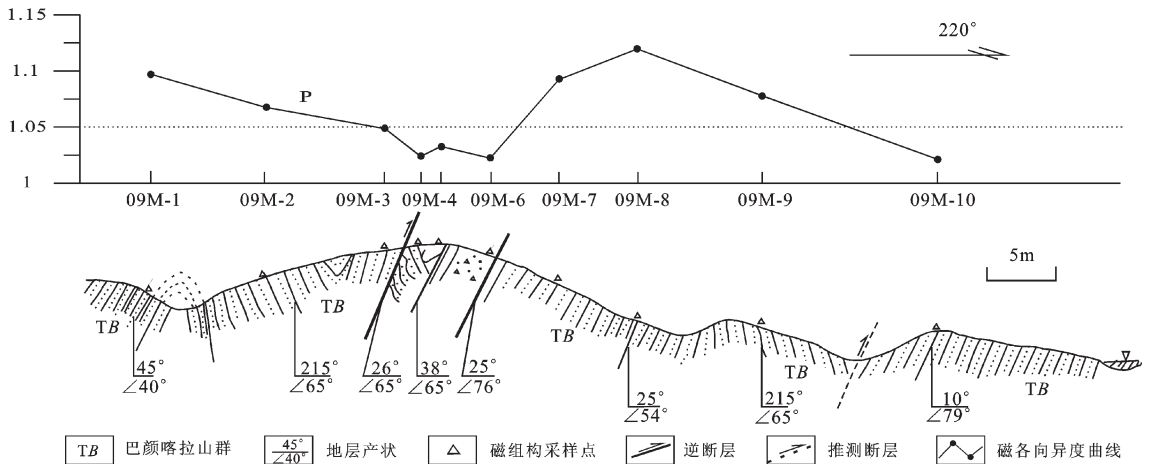


图 8 黄河源玛多县城西韧性剪切带磁组构测量剖面图

Fig.8 Magnetic fabric measurement section in west Maduo County, the Yellow River source area

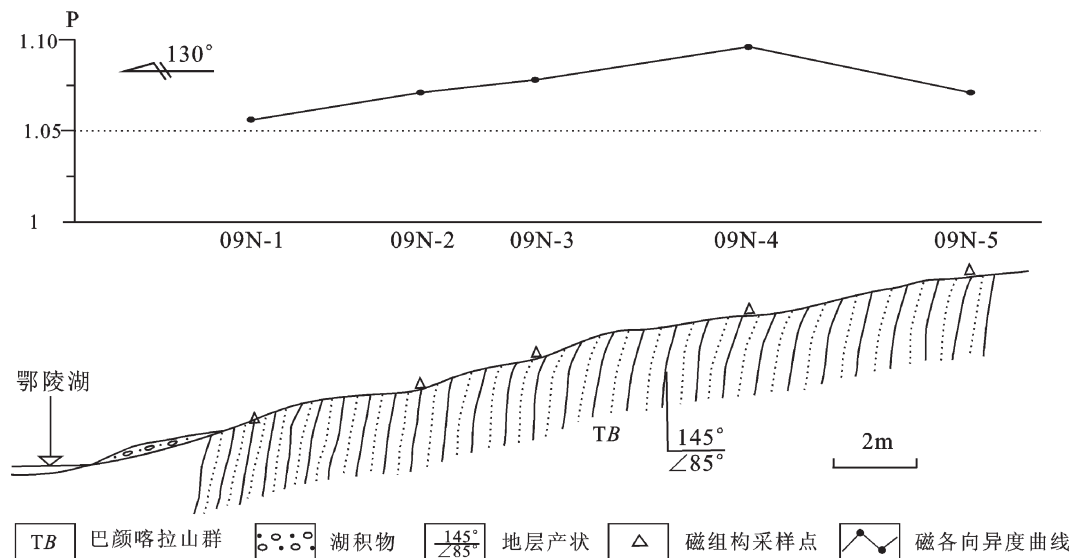


图 9 扎陵湖北岸韧性剪切带磁组构测量剖面

Fig.9 Magnetic fabric measurement section on the northern bank of Eling Lake shear zone

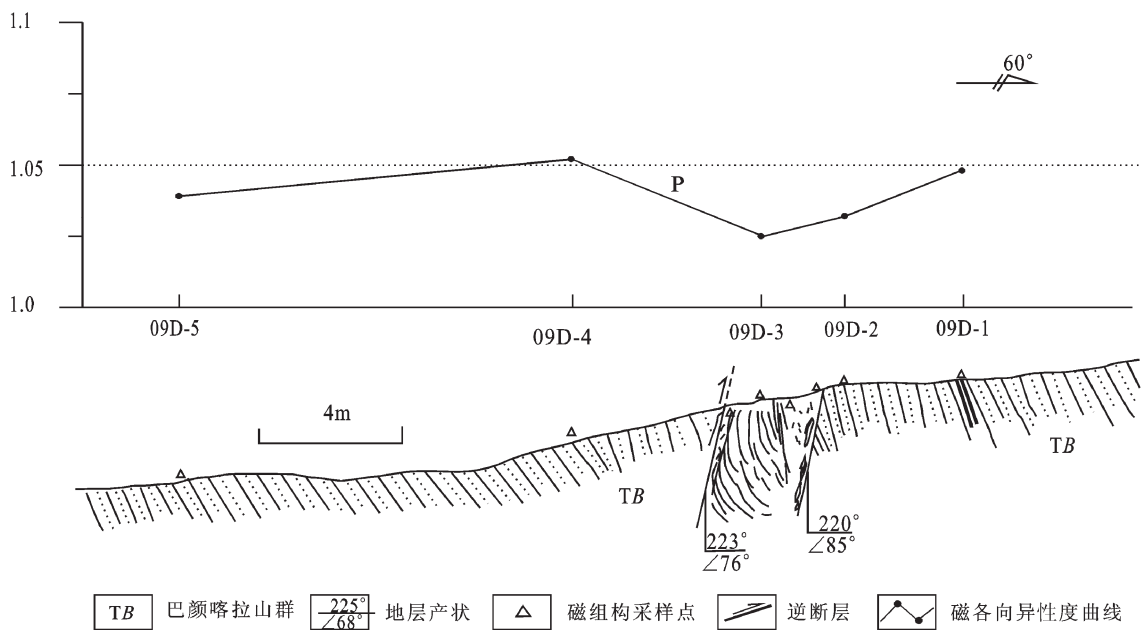


图 10 大野马岭韧性剪切带磁组构测量剖面

Fig.10 Magnetic fabric measurement section in Dayemaling shear zone

江盐池以及其他许多不知名的湖泊。将现今这些湖泊与黄河源区韧性剪切带结合起来研究发现，这些第四纪时期的残余湖泊的分布与韧性剪切带的展布有一定的耦合关系，在韧性剪切带通过的地方现存残余湖泊分布众多。本文厘定出黄河源区存在 2 条较大的韧性剪切带，它们基本平行，沿 NW 向展

布。北部韧性剪切带沿麻多乡—扎陵湖—黄河乡一线展布，基本为黄河主河道流经区域，带内有扎陵湖、鄂陵湖、隆热错、阿涌贡玛错、阿涌哇玛错、阿涌尕玛错、哈江盐池、冬草阿龙错等湖泊；南部韧性剪切带沿野牛沟—岗纳格玛错一线展布，带内有岗纳格玛错和尕拉拉错等众多残余湖泊。青藏高原湖盆

的发育、展布主要受构造控制,黄河源古大湖北部边界受昆南断裂控制,南部边界受巴颜喀拉山山前断裂控制。在相同的应力条件下,岩石强度相对较弱的区带易发生韧性剪切变形,而韧性剪切带为基底构造软弱带受后期构造作用、风化作用易破碎变形,形成低洼地形,黄河源区现今残余湖泊就分布在这些低洼地带之中。基于以上分析,认为黄河源区韧性剪切带的分布与湖泊的展布有一定的耦合关系,盆地基底韧性断裂带对湖盆发育有一定的制约作用(图 1)。

5 结 论

(1)黄河源地区岩石磁化率各向异性度 P 值不大,一般为 1.005~1.146,变化范围不大,岩石磁各异性较弱,反映黄河源地区巴颜喀拉山群岩石总体构造变形较弱,岩石变形以脆性变形为主,局部经受过韧性变形。

(2)磁组构 F-L 及 T-P 图解分析表明,黄河源地区发生韧性变形的岩石具有磁面理发育,磁线理不发育,磁化率椭球体为压扁形椭球体的特点,反映在挤压应力作用下,带内岩石总体发生了压扁(烙饼型)变形。

(3)黄河源区主应力方位要为 NNE-SSW(近 SN)向,其次为 NE-SW 向,最大主压应力方位有由近 SN 向向 NE-SW 向转化的趋势。

(4)黄河源地区存在有 2 条韧性剪切带,北部韧性剪切带沿现今黄河河谷分布,控制着扎陵湖、鄂陵湖和玛多“四姐妹湖”的展布;南部韧性剪切带沿岗纳格玛错—野牛沟一线展布,控制着岗纳格玛错和尕拉拉错等残余湖泊的分布,反映新生代湖盆的形成分布受到中生代基底韧性断裂破碎带的制约。

致谢:野外工作和论文撰写过程中得到地质力学研究所马天林研究员、孙立蓓研究员的指导和帮助;样品测试得到中国地质大学(北京)古地磁实验室李海燕的帮助;审稿专家提出的修改意见使本文水平得以提高,在此一并表示感谢!

参考文献(References):

[1] Graham J W. Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks [C]// Stcinhart J S, Sinitz T J (ed.). The Earth beneath the continents. Geophys, Monogr. Am. Geophys. Union, 10, 627-648.

[2] Borradaile G J, Puumala M. Magnetic fabric as a kinematic indicator of faults: a test case[J].Ann.Tectonica,1989, 3:3-11.

[3] 崔军文,唐哲民,邓晋福,等.阿尔金断裂系[M].北京:地质出版社,1999.

Cui Junwen, Tang Zheming, Deng Jinfu, et al. Altun Fault System [M].Beijing:Geological Publishing House, 1999 (in Chinese with English abstract).

[4] 周勇,许荣华,阎月华,等.喀喇昆仑断裂带磁组构特征及其构造意义[J].岩石学报,2000,16(1):134-144.

Zhou Yong, Xu Ronghua, Yan Yuehua, et al. Characteristics of magnetic fabrics of the Karakoram fault belt and its tectonic significance [J].Acta Petrologica Sinica, 2000, 16 (1):134-144(in Chinese with English abstract).

[5] 陈柏林,张招崇,闫升好,等.阿尔泰山南缘东段变形岩石磁组构分析[J].地学前缘,2007,14(3):138-148.

Chen Bailin, Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, et al. Analyses of the rock magnetic fabric in eastern part of southern Altay margin area, Xinjiang [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (3):138-148 (in Chinese with English abstract).

[6] 李建忠,潘忠习,冯心涛,等.聂拉木地区高喜马拉雅岩石磁组构及其构造含义[J].地球物理学报,2006,49(2):496-503.

Li Jianzhong, Pan Zhongxi, Feng Xintao, et al. Magnetic fabrics and tectonic implications of the Higher Himalayan rocks in Nyalam, southern Tibet [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49 (2): 496-503 (in Chinese with English abstract).

[7] 梁天文,张国伟,鲁如魁,等.西秦岭北缘武山-鸳鸯镇构造带磁组构特征[J].地学前缘,2008,15(4):298-306.

Liang Wentian, Zhang Guowei, Lu Rukui, et al. Magnetic fabric study of Wushan-Yuanyangzhen tectonic zone in the northern margin of West Qinling,China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (4):298-306 (in Chinese with English abstract).

[8] Borradaile G J, Henry B. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy[J]. Earth Science Review, 1997, 42: 49-93.

[9] Hrouda F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics[J]. Geophys., 1982, Surveys 5:37-82.

[10] 马宗晋,等.青藏高原岩石圈现今变动与动力学[M].北京:地震出版社,2001.

Ma Zongjin, et al. Contemporary Deformation and Dynamics of Lithosphere in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing:Seismological Press,2001 (in Chinese with English abstract).

[11] 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 [J]. 中国地质, 2006, 33(2):221-238.

Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics:A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau[J].Geology in China, 2006, 33(2):221-238(in Chinese with English abstract).

[12] 薛典军,姜枚,吴良士,等.青藏高原区域重磁异常的东西向分区及其构造地质特征[J].中国地质,2006,33(4):912-919.

Xue Dianjun, Jiang Mei, Wu Liangshi, et al. East-west division of

- regional gravity and magnetic anomalies on the Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic features [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (4):912-919(in Chinese with English abstract).
- [13] 青海省地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1991.
Qinghai Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing:Geological Publishing House,1991 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 青海扎陵湖和鄂陵湖盆地第四纪河湖相地层研究[J]. *中国地质*, 2009, 36(6):1218-1232.
Zhu Dagang, Meng Xiangang, Shao Zhaogang, et al. A study of the Quaternary lacustrine strata in Zhaling Lake and Eling Lake basin of Qinghai Province [J]. *Geology in China*, 2009, 36(6):1218-1232.
- [15] 朱大岗, 邵兆刚, 孟宪刚, 等. 青海巴颜喀拉山北麓古高位湖相沉积的分布与特征[J]. *地质通报*, 2009, 28(5):549-555.
Zhu Dagang, Shao Zhaogang, Meng Xiangang, et al. The distribution and characteristics of lacustrine sedimentation from ancient high level lake at the north foot of Mt.Bayankala, Qinghai, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28 (5):549-555(in Chinese with English abstract).
- [16] 余钦范, 郑敏. 岩石磁组构分析及其地学中的应用[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Yu Qinfan, Zheng Min. Application of Magnetic Fabric Analysis to Geosciences [M]. Beijing:Seismological Press, 1992 (in Chinese with English abstract).
- [17] 潘永信, 朱日祥. 磁组构研究现状[J]. *地球物理学进展*, 1998, 13 (1):52-59.
Pan Yongxin, Zhu Rixiang. The recent progress in magnetic fabrics [J]. *Progress in Geophysics*, 1998, 13(1):52-59(in Chinese with English abstract).
- [18] 陈柏林, 李中坚, 谢艳霞. 北京怀柔崎峰茶-琉璃庙地区岩石磁组构特征及其构造意义[J]. *地球学报*, 1997, 18(20):134-141.
Chen Bailin, Li Zhongjian, Xie Yanxia. Characteristics of the rock magnetic fabrics and its tectonic significance in the Qifengcha-Liulimiao area, Huairou County, Beijing [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(20):134-141(in Chinese with English abstract).
- [19] Tarling D H, Rouda H. The Magnetic Anisotropy of Rocks[M]. London:Chapman and Hall, 1993.
- [20] Nagata T. Rock Magnetism[M]. Maruzen Co, Tokyo, 1961.
- [21] 马天林, 王连庆, 孙立倩, 等. 磁组构分析在韧性变形带研究中的应用[J]. *地球学报*, 2003, 24(5):449-452.
Ma Tianlin, Wang Lianqing, Sun Liqian, et al. Application of magnetic fabric analysis to the ductile deformation belt in the Tuwu copper deposit, east Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(5):449-452(in Chinese with English abstract).
- [22] 张拴宏, 周显强. 磁化率各向异性地学应用综述 [J]. *地质论评*, 1999, 45(6):613-620.
Zhang Shuanhong, Zhou Xianqiang. A review of applications of anisotropy of susceptibility to earth science [J]. *Geological Review*, 1999, 45(6):613-620(in Chinese).
- [23] 杨朝斌, 朱大岗, 孟宪刚, 等. 西藏阿里雅鲁藏布江缝合带韧性剪切带的磁组构特征[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4):168-173.
Yang Chaobin, Zhu Dagang, Meng Xiangang, et al. The magnetic fabric characteristics of ductile shear zones in Yarlung Zangbo Jiang suture belt, Ali, Tibet [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (4):168-173 (in Chinese with English abstract).

Magnetic fabric of rock in the source area of the Yellow River and its geological significance

HAN Jian-en, YU Jia, ZHU Da-gang, SHAO Zhao-gang, MENG Xian-gang,
QIAN Cheng, HE Cheng-guang, WANG Jin, LV Rong-ping

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The source area of the Yellow River located in northeast Tibetan Plateau is composed mainly of Triassic sedimentary strata. From north to south, a series of nappe structures and some early nearly-vertical ductile shear zones are developed. This paper presents the magnetic fabric of Bayankala Group sedimentary rocks in the Yellow River source area. It is shown that the rock magnetic susceptibility anisotropy (P value) and the percentage of anisotropy of magnetic susceptibility (H value) are not large either, suggesting overall weak ductile deformation in the area and strong ductile deformation in some parts. The magnetic fabric of rock is characterized by development of magnetic foliation, underdevelopment of magnetic lineation and flattened magnetic susceptibility ellipsoid, implying that rock endured flattening deformation in the compressive stress. The major principal stress is in NNE-SSW (near SN) direction, followed by NE-SW direction. Based on an analysis of rock magnetic fabric, the authors found that there are two ductile shear zones in the source area of the Yellow River. The ductile shear zones and the current distribution of lakes have certain coupling relationship. The northern ductile shear zone along the present Yellow River valley dominates the distribution of Zhalinghu, Elinghu and "Four Sister Lakes" in Maduo. The southern ductile shear zone along Gangnagema Co-Yeniugou belt controls the distribution of remnant lakes.

Key words: magnetic fabric; ductile shear zone; source area of the Yellow River

About the first author: HAN Jian-en, male, born in 1980, doctor, mainly engages in the study of regional geology, sedimentary facies and paleoenvironment; E-mail: hanjianen@163.com.