文章编号: 1006-6616 (2008) 01-0045-12

柴达木盆地西部新生界磁组构特征 及其构造意义

李 丽¹, 蒋荣宝¹, 祁万修², 吴益平², 杨 屹², 李学智²,
陈正乐¹, 陈宣华¹, 王小凤¹, 任小娟¹
(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 新疆地质调查院第一地质调查所, 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 柴达木盆地西部狮子沟 一带新生代沉积岩磁组构分析结果显示,岩石磁组 构具有磁面理发育、磁线理不发育、磁化率量值椭球呈压扁状的特点;磁化率各向 异性度 P 值不大,反映总体构造变形相对较弱。岩石磁组构反映的应力状态总体 为以 NE 向挤压为主,与轴向 NW 的背斜构造发育相一致。该区岩石磁组构大多具 有原始沉积磁组构特征,磁面理产状大体上反映沉积岩层的层理,同时也记录了受 NE 向挤压作用的痕迹。根据岩石磁组构与地层层理之间的关系分析,柴西地区两 翼不对称的狮子沟背斜具有断展褶皱性质,其形成与下部的花土沟逆冲断层向南西 方向的仰冲有关。

关键词: 柴达木盆地西部; 新生界; 磁组构; 构造变形 中图分类号: P138°4 **文献标识码:** A

0 引言

柴达木盆地位于青藏高原北部,具有三角形状,总面积约 1.2×10⁵ km²,是世界屋脊青 藏高原内部最大的山间盆地(图 1)。柴达木盆地的北西边界是左行走滑的阿尔金断裂^[1-7], 东北边界为祁连山一南山逆冲断层带^[8],南界为东昆仑山及其西部的祁漫塔格逆冲断层 带^[9,10]。由于其面积之大,海拔之高,新生代沉积物又如此之厚,在柴达木盆地周边广泛发 育新生代构造变形,也发育现代活动断裂,这些褶皱和断裂不仅控制现代地貌,而且与油气 储层构造关系密切,因此,柴达木盆地新生代的构造变形及其机制一直是众多地质学者非常 关注的。

柴西地区是柴达木盆地主要产油区,油气资源丰富、资源探明程度低,具有良好的勘探 潜力和勘探前景,是青海油田实现战略突破和储量接替的重点地区。在新生代印度板块与亚

作者简介: 李丽 (1982-), 女, 在读硕士, 主要从事构造地质学研究。E-mail: lili805 @mails gucas ac cn. ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

收稿日期: 2007-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB411305)和国家油气专项柴达木盆地油气资源战略调查及评价项目(XQ-2004-01)

洲板块碰撞过程中,柴西地区主要表现为上地壳缩短变形^{11]},新生代地层褶皱明显,其褶 皱轴都近于垂直阿尔金断裂排列。同时,由于新生代左行走滑的阿尔金断裂以及花土沟断裂 等的共同作用,柴西地区发育大量的微地震^[12,13]。

本文作者通过野外对柴西狮子沟地区新生代地层褶皱剖面构造解析,结合室内磁组构分 析,认为柴西地区两翼不对称的狮子沟背斜具有断展褶皱性质,其形成与下部的花土沟逆冲 断层向南西方向的仰冲有关。

1 区域构造背景

柴达木盆地是在中生代伸展盆地群基础上形成的新生代走滑一挤压盆地,具有叠合盆地的性质^[11, 14, 15]。柴西地区位于柴达木盆地西部坳陷区的茫崖坳陷(图 1),具有多期成盆和改造作用特征,主要发育古近系与新近系巨厚沉积,第四纪柴西地区基本隆升,沉积较薄。区内自下而上沉积:路乐河组($E_{1+2}l$)为一套洪泛一河流相红色粗碎屑岩系;下干柴沟组($E_{3}xg$)根据岩石组合可分为上、下两段,下段($E_{3}xg$);除狮子沟地区以外,其余广大地区基本上为一套洪泛一河流相红色粗碎屑岩系,岩性以棕红色砂砾岩、泥岩为主;上段($E_{3}xg^{2}$);基本上为一套湖泊相细粒碎屑岩系,岩性化西部坳陷区以灰色、深灰色泥岩、钙质泥岩和碳酸岩为主;上干柴沟组($N_{1}g$)在柴西南区岩性自下而上变粗变红,在柴西北区自下而上变灰变细,北缘和东部则都是黄绿、灰绿色、灰色的砂质岩和棕红色泥质岩的不等厚互层^{16]};下油砂山组($N_{2}^{2}y$)间下油砂山组,并且岩性更粗,在盆地边缘一般以灰色厚层状砾岩为主,上油砂山组($N_{2}^{2}y$)同下油砂山组,并且岩性更粗,在盆地边缘一般以灰色厚层状砾岩为主,夹浅绿黄色砂岩及浅棕红色泥质岩。至盆地中心岩性变细,并含有少量膏盐,狮子沟组(N_{2}^{3})地层与上油砂山组基本上没什么区别,只是膏盐层增多;第四系七个泉组($Q_{1+2}q$)是新生界各时期沉积中分布范围最广的一套,岩性以浅棕灰、浅灰、灰色泥岩、砂质泥岩为主,夹同色粉砂岩和泥质粉砂岩,以及一定量的炭质泥岩^[16~18]。

柴西地区主要表现为轴向北西的褶皱构造特征(图 2),也发育少量与油气成藏关系密切的近 SN 向扭动构造^{19]}。其中,狮子沟、干柴沟、咸水泉等三个背斜构造形态十分清楚, 走向北西,其褶皱轴都近于垂直阿尔金断裂排列。出露的地层以干柴沟背斜最老,其核部为 E_{3g}^2 ,翼部相继出露 $N_{1.8g}$ 、 $N_{2.xy}^1$ 、 $N_{2.8y}^2$ 、 $N_{2.8}^3$ 地层,咸水泉构造出露的最老地层为 $N_{2.xy}^1$,狮 子沟构造出露的地层相对较新,为 $N_{2.8y}^2$ 至 $N_{2.8}^3$ 。

2 岩石磁组构分析原理

岩石变形组构分析是指对岩石中的标志体,通过几何方法或者运用岩石中矿物物性,用 一定的测试技术确定岩石的变形程度、变形方式和变形机制^{(3),21]}。岩石磁组构分析是指利用 岩石磁化率各向异性来研究岩石的组构特征。磁组构结晶学特点是岩石中磁性矿物的颗粒或 晶格的定向以及它们的组合,物理实质是磁化率各向异性,表现形式为磁化率椭球的形状和 方向。岩石应变椭球与磁化率椭球之间的 3 个主轴相互平行,具有共轴关系,它们的长度之 比存在幂指数的关系,即(K_i / K_i)=(L_i / L_i)"($i, j = 1, 2, 3, i \neq j$),式中 $K_i 、 K_i$ 为相 互垂真的主磁化率值、 $L_i 、 L_i$ 为相互垂直的主应变轴长度, α 为幂指数。因此,磁化率椭球



图1 柴达木盆地及周缘造山带区域断裂系统

Fig 1 Regional fault system of the Qaidam basin and its peripheral orogenic belts NQLF-北祁连山山前断裂带; NQLSF-北祁连山南缘断裂带; CQISF-中祁连山南缘断裂带; NZF-北宗务隆山断裂带; NQF-柴 北缘断裂带; IXSF-绿梁山-锡铁山 南缘断裂带; NQMF-祁漫塔格北缘断裂带; SQF 柴达木南缘断裂带; NKF-昆北断裂带; CKF-昆中断裂带; KLF-昆仑断裂带; ATF 阿尔金断裂带; WF-温泉断裂带(鄂拉山断裂带); 方框内为研究区

可以用来代替应变椭球,用其形态和空间定向来分析构造变形的性质和应力作用的方式和方 向^[3~22] 。从成因或形成机制上,岩石中磁性矿物颗粒或品格的定向排列与岩石的成因或经 历的构造变形密切相关,在岩石沉积、结晶或热变质、韧性变形过程中,都导致磁性矿物的 定向排列或重新定向排列。

磁组构作为地质研究手段最早由 Graham (1954)提出来,但真正得到普遍应用是 1970 年代后期开始的,主要应用于构造地质及环境地质等研究领域^[23]。磁化率各向异性作为应 变标志曾应用于盆地粘土岩研究和探讨磁化率各向异性及其与应变的关系^[25,34]。近年来,磁 组构方法得到更广泛的应用,将磁组构方法应用于岩体侵位机制的分析和矿田构造分 析^[25~28]。沉积岩和矿物的磁学参数的变化特征可以作为沉积环境研究的代用指标,用以揭 示古环境演化、古气候变化^[29]。岩石磁组构方法对于变形微弱、没有明显变形标志的地质 体,进行变形或构造应力分析提供可能^[30~35]。磁组构方法也被用来分析和检验断层相关褶 皱的变形机制^[36]。

本文首次在柴西狮子沟一带利用新生代沉积岩磁组构特征进行应变分析,以探讨其构造 变形的运动学特征及变形机制。

3 样品采集和测试

为系统研究柴西狮子沟一带新生代沉积岩变形特征,探讨狮子沟、干柴沟和咸水泉等背 斜构造形成的变形机制,我们选取 10 条大致垂直背斜轴向的剖面进行全面的构造观察,并 沿剖面采集定向岩石标本 100 个,针对其中的 70 组 230 个样品进行磁组构要素测定,岩石 标本均为狮子沟组,上、下油砂山组以及上、下干柴沟组的砂岩、泥质砂岩(图 2)。

野外采集定向标本之后,在室内钻取定向岩心。测试工作由中国地质科学院地质力学所 古地磁实验室完成,测出样品磁化率椭球体的特征值(磁化率各向异性度 *P* 值、磁线理 *L*、 磁面理 *F*、磁椭球扁率 *E* 和磁椭球形状因素 *T* 和磁化率张量 3 个主磁化率 K_1 、 K_2 和 K_3 方 向的偏角 D_1 、 D_2 、 D_3 ,以及倾角 I_1 、 I_2 、 I_3),测试结果在表 1(仅显示 70 个样品的数据) 中列出。室内计算出磁面理产状,以利于和野外观测层理产状进行对比。



图2 柴西地区构造地质略图

Fig. 2 Simplified structural map of the western Qaidam basin

4 测试结果分析及反映的构造变形特征

4.1 磁各向异性度大小

沉积岩的磁各向异性度 *P* 值可反映沉积物中磁性矿物颗粒取向或定向排列程度,受控 于沉积动力学强弱和沉积环境的稳定性,也可以反映构造变形强度。沉积岩 *P* 值在三大类 岩石中最小,一般小于 1. 1^[31]。研究区新生代沉积岩磁化率各向异性度 *P* 值不大,一般在 1. 004.941.215 之间,或化范围也不太,1 这表明备样品磁备向异性较弱,ii说明该区构造变形相

表1 柴西狮子沟一带新生代岩石磁组构测试结果表

Table 1 Magnetic fabrics of Cenozoic sedimentary rocks in the vicinity of Shizigou western Qaidam basin

样品	磁线理	磁面理	磁各向	形状因	最大码	磁化率	率 中间磁化率		最小磁化率		磁面理	测量层	磁面理与
编号	L	F	异性 P	素 T	偏角	倾角	偏角	倾角	偏角	倾角	产状	理产状	层理夹角
4	1. 006	1 012	1 018	0 307	127	1	218	32	35	58	$215^\circ \angle 32^\circ$	$200^{\circ} \angle 10^{\circ}$	22°
5	1. 007	1 023	1 03	0 542	96	2	186	7	346	83	166°∠7°	285°∠7°	12 06 °
7	1. 003	1 03	1 033	0 822	105	53	354	14	255	33	75°∠57°	220°∠8°	63 66°
8	1. 009	1 021	1 03	0 386	148	19	55	7	306	69	$126^\circ \angle 21^\circ$	115°∠21°	3 94°
9	1. 012	1 031	1 043	0 426	140	9	230	1	323	81	143°∠9°	125°∠8°	2 83°
10	1. 004	1 049	1 054	0 83	334	15	65	6	178	74	$358^\circ \angle 16^\circ$	40° ∠6°	12 20°
11	1. 005	1 025	1 03	0 638	82	4	352	6	203	83	23° ∠7°	85° ∠15°	13 21°
13	1.008	1 072	1 081	0 789	128	9	38	5	278	80	98°∠10°	70°∠16°	8 54 °
15	1. 013	1 06	1 073	0 645	303	21	191	45	51	38	231° ⁄52°	235°∠54°	3 77 °
16	1. 007	1 025	1 032	0 531	302	8	206	36	43	53	223° ∠37°	230°∠36°	4 28°
17	1. 01	1 035	1 045	0 57	308	9	191	71	41	17	221° ⁄73°	225°∠75°	2 <i>7</i> 7°
18	1. 004	1 007	1 011	0 331	136	5	38	60	229	30	49° ∠60°	220°∠72°	48 78 [°]
19	1.01	1 053	1 063	0 685	305	9	213	15	64	73	244° ∠17°	$145^{\circ} \angle 4^{\circ}$	18 05°
20	1. 007	1 017	1 024	0 407	322	2	52	5	211	84	31° ∠6°	130°∠8°	10 71°
21	1. 014	1 028	1 043	0 326	107	25	208	22	335	56	155° ∠34°	75° ∠14°	34 12°
22	1. 012	1.041	1 053	0 552	139	5	48	8	258	81	78° ∠9°	$50^\circ \angle 18^\circ$	10 88°
23	1.011	1 137	1 15	0 845	121	11	30	8	262	77	82°∠13°	55°∠15°	6 76°
27	1. 006	1 045	1 051	0 761	204	8	294	2	36	81	216°∠9°	55°∠10°	18 74°
29	1. 011	1 015	1 027	0 154	60	40	175	27	289	38	109° ∠52°	$35^\circ \angle 28^\circ$	49. 79°
30	1.016	1 007	1 023	- 0 37	305	13	41	26	191	61	371° ∠29°	10° \angle 14°	15 00°
32	1.013	1 009	1 022	0 16	149	2	241	34	56	56	236° ∠34°	35°∠5°	38 10°
33	1. 024	1 032	1 056	0 148	136	1	226	7	41	83	221°∠7°	270°∠3°	5 52°
34	1.01	1 045	1 056	0 622	146	8	238	12	24	75	204° ∠15°	270°∠0°	15°
35	1.016	1 007	1 022	0 41	230	1	139	37	322	53	142° ∠37°	220°∠52°	53 82°
37	1. 015	1 073	1 09	0 651	127	2	225	75	36	15	216° ⁄75°	210°∠70°	7. 60°
38	1.009	1 094	1 103	0 825	302	16	64	62	206	22	26°∠68°	$200^\circ \angle 80^\circ$	32 54°
39	1. 055	1 023	1 079	0 41	97	8	2	34	198	55	18° ∠35°	$60^{\circ} \angle 10^{\circ}$	28 27°
40	1. 006	1 01	1 016	0 253	133	6	42	7	265	81	85° ∠9°	$40^{\circ} \angle 10^{\circ}$	7. 30°
41	1. 006	1 045	1 05	0 77	168	15	76	8	319	73	139° ∠17°	70° \angle 18°	19.63°
42	1. 002	1 025	1 027	0 873	111	46	351	26	243	33	63°∠73°	55° ∠ 75°	7.94°
44	1. 003	1 01	1 013	0 545	64	14	154	3	257	75	77°∠15°	80° ∠25°	10 05°
45	1. 005	1 038	1 043	0 754	173	8	82	9	306	78	126° ∠12°	110°∠16°	5 53°
46	1. 005	1 054	1 06	0 813	143	8	53	6	283	80	103° ∠10°	75° \angle 14 $^\circ$	6 95°
47	1. 001	1 008	1 009	0 849	144	9	235	6	359	79	179° ∠11°	100°∠16°	17.52°
48	1. 007	1 045	1 052	0 742	341	1	251	9	74	81	254°∠9°	205° ∠8°	7. 09°

<u>?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.</u>

续表1

样品	磁线理 L	磁面理 <i>F</i>	磁各向 异性 P	形状因 素 T	最大磁化率		中间磁化率		最小磁化率		磁面理	测量层	磁面理与
编号					偏角	倾角	偏角	倾角	偏角	倾角	产状	理产状	层理夹角
49	1.005	1 092	1 097	0. 9	92	2	182	21	357	69	177° ∠21°	190° ∠20°	4. 65°
50	1. 013	1 042	1 055	0. 529	124	27	250	49	18	28	198° ∠62°	$190^\circ \angle 42^\circ$	20. 94°
52	1.008	1 012	1 02	0. 203	321	24	167	63	56	10	236° ∠80°	$218^\circ \angle 60^\circ$	26. 11°
54	1.009	1 017	1 027	0. 303	306	22	195	42	55	40	235° ∠50°	215°∠52°	15. 64 °
55	1.018	1 002	1 02	- 0. 82	131	9	248	71	38	17	218° ⁄73°	$340^\circ \angle 11^\circ$	79. 03°
58	1.01	1 127	1 138	0. 851	308	2	217	12	45	78	225° ∠12°	215°∠16°	4. 66 °
59	1. 009	1 079	1 089	0. 787	307	23	211	14	92	62	272° ∠28°	270° ∠21°	7. 05°
60	1.008	1 069	1 077	0. 795	141	0	231	14	51	76	231° ∠14°	210 [°] ∠16 [°]	5. 75°
61	1. 005	1 063	1 069	0. 835	298	7	206	20	45	69	225° ∠21°	215°∠24°	4. 85°
62	1.009	1 073	1 083	0. 774	315	1	224	24	47	66	227°∠24°	$210^{\circ} \angle 24^{\circ}$	6.89°
63	1.009	1 011	1 021	0. 105	125	30	220	10	326	58	146° ∠32°	$70^\circ \angle 16^\circ$	31. 73°
64	1. 002	1 045	1 047	0. 906	277	6	7	0	100	84	280° ∠6°	$25^{\circ} \angle 12^{\circ}$	14. 72°
68	1. 002	1 003	1 005	0. 347	322	10	229	17	81	70	261° ∠20°	240° ∠23°	8. 21°
69	1. 002	1 004	1 006	0. 272	135	6	227	19	27	70	207° ∠20°	$195^\circ \angle 20^\circ$	4. 10°
72	1. 002	1 003	1 004	0. 217	274	72	127	15	35	10	215° ∠80°	210°∠55°	25. 41°
74	1. 011	1 037	1 049	0. 526	2	3	93	2	213	87	33° ∠3°		61. 48°
75	1.009	1 08	1 09	0. 784	187	8	97	0	5	82	185° ∠8°	80° ∠9°	13. 48°
76	1. 005	1 1 32	1 138	0. 92	239	10	148	3	42	79	222° ∠11°	120° ∠8°	14. 86°
80	1. 005	1 031	1 036	0. 743	129	4	220	7	12	82	192° ∠8°	55°∠4°	11. 26°
81	1. 005	1 023	1 028	0. 637	300	2	210	13	37	77	217° ∠13°	50°∠3°	15. 94 °
83	1. 007	1 017	1 023	0. 435	290	7	20	1	115	83	295° ∠7°	$40^{\circ} \angle 4^{\circ}$	8. 91°
84	1. 011	1 058	1 07	0. 668	131	4	221	3	346	86	166° ∠4°	$40^\circ \angle 6^\circ$	8. 95°
85	1.008	1 047	1 055	0. 69	105	5	196	10	349	78	169° ∠12°	$70^{\circ} \angle 6^{\circ}$	14. 21°
86	1.009	1 043	1 053	0. 638	134	8	44	3	292	81	112°∠9°	$83^\circ \angle 12^\circ$	5. 98°
87	1. 013	1 062	1 077	0. 644	223	58	16	29	113	12	293° ∠78°	$100^\circ \angle 10^\circ$	87. 75°
88	1.015	1 056	1 072	0. 562	302	16	210	7	99	72	279° ∠18°	$230^\circ \angle 12^\circ$	13. 49°
90	1. 013	1 091	1 105	0. 737	112	2	203	39	20	51	200° ∠39°	$200^\circ \angle 41^\circ$	2.00°
91	1. 003	1 058	1 061	0. 887	191	54	305	17	45	31	225° ∠59°	$200^\circ \angle 42^\circ$	25. 50°
93	1.011	1.011	1 023	- 0. 02	125	14	232	48	24	38	204° ∠52°	215° ∠56°	9. 75°
94	1.014	1 023	1 036	0. 242	126	1	217	59	36	31	216° ∠59°	$210^\circ \angle 62^\circ$	6. 02°
96	1. 003	1 025	1 028	0. 78	304	29	193	32	66	44	246° ∠46°	$230^\circ \angle 61^\circ$	37. 66°
97	1. 01	1 019	1 029	0. 339	352	19	259	8	147	69	327° ∠21°	$240^{\circ} \angle 21^{\circ}$	28. 56°
98	1. 002	1 021	1 023	0.82	332	6	242	2	131	84	31 1° ∠6°	360°∠17°	13. 80°
99	1. 002	1 015	1 018	0. 762	142	1	232	7	42	83	222° ⁄7	$20^{\circ} \angle 8^{\circ}$	14. 72°
100	1. 006	1 011	1 017	0. 304	98	3	5	41	192	49	12° ∠41°	$50^\circ \angle 12^\circ$	32. 25°

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

50

对较弱。根据磁组构和野外观测点的对应关系分析,P 值偏大的点大都落在野外观察到具明 显断层面及擦痕的构造变形较强的位置附近,可见磁各向异性度 P 值与构造变形具有一定 相关性。

4.2 F-L 图解及其意义

岩石磁组构 F(磁面理)-L(磁线理)参数图解(图 3),以磁面理(F)为横坐标,磁 线理(L)为纵坐标,曲线可以形象地表示出磁化率量值椭球的形态分布,反映磁线理与磁 面理的发育情况^[31]。从柴西地区磁组构 FL 图解(图 3)可以看出,在狮子沟、干柴沟和咸 水泉背斜构造带中,仅有少量样品处在 E < 1的范围内,大多数点都投在 E = 1 直线以下 (E > 1)区间内,表明磁化率椭球是以压扁状为主,反映了该区域构造变形类型主要为压缩 应变,以压扁作用为主。根据 F-L 图解推测三个背斜构造带的压缩变形量基本一致。





4.3 T-P 图解及其意义

磁椭球形状因数(*T*)可以区分磁化率数值椭球的形状。由柴西地区磁化率各向异性 *P-T* 图解(图4)分析,测试的70组230件样品中,有25件位于*P*轴下方*T*<0区域,其余 绝大部分都位于*P*轴上方*T*>0区域,反映本区新生代沉积岩磁组构具有较强的压扁效应, 磁面理发育,磁化率量值椭球体以压扁为主。由表1、图2可知,各测试样品中,*T*值为负 的点(H35、H32、H30、H55、H39和H93)均在狮子沟和干柴沟背斜翼部,并大致处在同 一剖面线上,推断这些点所连接而成的剖面拉伸变形较强。



图4 磁化率各向异性 P-T 图解



4.4 磁化率轴的方位特征及其与构造变形关系

4.4.1 最小磁化率产状投影与最大主压应力方位

通过 Stereo 32, Unregistered Version 软件,将各样品最大磁化率轴、最小磁化率轴和野外?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

观测层理产状,投影到施密特网(图 5),可以看出,最大磁化率主轴投影点集中分布在二、 四象限,主要为北西或南东倾伏,倾角较缓。尤其是最小磁化率轴与层理极点投影图(图 5 (b)与图 5 (c))非常相似。从表 1 来看,本次测试的 72 组样品中,有 51 组 (70.8%)样 品的磁面理与地层层理夹角小于 20°,进一步反映出本区新生代沉积岩层的磁组构主要为保 留下来的沉积成因的沉积组构。由表 1 和图 2 对照分析可知,地层倾角较大的点与磁各向异 性度 *P* 值较高的点及磁线理为负值的点基本吻合,可能存在局部应力集中作用。最小磁化 率主轴投影点大都围绕圆心分布,近于垂直。不过,狮子沟和干柴沟存在偏离原始沉积物正 常的垂直状态,具有明显优势方位的点,分布于一、三象限。结合图 5 (a)、图 5 (b)分 析,研究区新生代沉积岩具有原始沉积组构特征,同时记录后期构造作用的痕迹。由于最小 磁化率轴代表最大应变压缩轴,即代表最大压应力方向,因此狮子沟、干柴沟背斜变形的最 大主压应力为 NE —SW 向,这与研究区内 3 个背斜轴向呈 NW 向延伸的特点相吻合。咸水泉 背斜的最小磁化率轴投影相对集中并垂直层面,最大磁化率轴投影虽有一定优选方向,但也 具有环带分布的特点,所以咸水泉背斜的变形比狮子沟和干柴沟背斜相对较弱。这与柴西地 区总体为 NW 轴向的褶皱构造相一致。



图 5 (a) 最大磁化率轴产状投影图 (下半球投影,图中等值线间隔为 10) Fig 5 (a) Projection diagram of the maximum magnetic susceptibility (lower hemisphere; the contour interval is 10)



图 5 (b) 最小磁化率轴产状投影图 (下半球投影,图中等值线间隔为 10) Fig 5 (b) Projection diagram of the minimum magnetic susceptibility (lower hemisphere; the contour interval is 10)

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.



图 5 (c) 野外观测层理产状投影图 (下半球投影,图中等值线间隔为 10) Fig 5 (c) Projection diagram of beddings (lower hemisphere; the contour interval is 10)

野外观测层理投影图与最小磁化率轴产状投影图对比发现,磁面理与层理之间存在一定的角度,说明研究区在受到 NE 向挤压的构造变形过程中形成一定的磁各向异性,但仍保留大部分沉积磁组构,并未达到完全改变原始沉积组构状态的强度,这与磁各向异性度 *P* 值不大所反映的构造变形较弱的特征相一致。

4.4.2 磁面理与层理倾角对比及变形机制分析

本文采集并测试的 70 组磁组构样品中,磁面理与层理夹角大于 20°的有 19 组,其中 13 组样品(占 71%)表现为磁面理仍为 NW —SE 走向(与层理走向一致),但磁面理倾角陡于 层理倾角(如图 6,其中箭头示意磁面理倾角),在褶皱中类似于轴面劈理,可以代表褶皱 变形过程中形成的磁组构。另有 6 组样品的磁面理走向以 NNE 走向为主,与层理走向呈大 角度相交。

沉积岩磁面理与地层层理之间的夹角变化,可以用来分析沉积地层的构造变形。根据前 人对断层相关褶皱与磁组构关系的研究¹³⁹,沉积岩中保留的磁组构,包括沉积磁组构、初 始变形磁组构、铅笔状磁组构、弱劈理磁组构、强劈理磁组构、拉伸线理磁组构,它们依次 代表沉积岩变形组构由弱至强的发育次序。在柴西地区,由狮子沟背斜和干柴沟背斜构成的 剖面(图 6)上,岩石磁面理与地层层理之间的关系反映了背斜构造的形态及其与之相关的 逆冲断层的作用方式。该剖面上,大部分样品的磁面理与层理大致平行(夹角小于 20°),反 映了沉积磁组构和初始变形磁组构特征。对于夹角大于 20°且磁面理陡于地层的 13 组磁组构 样品,其 K_3 (代表最大压缩轴)以 NE 走向中低角为主,反映了这些组构的形成为 NE 向近 水平(中低角度)的主压应力作用的结果。此 13 组样品的分布上,狮子沟背斜多于干柴沟 背斜和咸水泉背斜,尤以接近花土沟断裂的狮子沟背斜 SW 翼为最多,原生沉积磁组构已基 本被破坏,代之的为变形过程中新形成的变形组构。磁面理与地层层理呈高角度斜交(图 6),具有与劈理磁组构(由弱至强)相似的特征,反映了背斜陡(前)翼特征。图 6 主要分 析磁面理与地层层理夹角关系,所以未进行 K_1 、 K_2 方向投影以及标定 P 值大小。

断层相关褶皱与磁组构关系研究¹³⁹ 说明,断弯褶皱中岩石磁组构基本上都是弱应变的 初始变形组构,背斜前翼比后翼应变略强,断层下盘没有显示出有限应变;断展褶皱三角剪 切带是有限应变最为集中地区。据此分析,柴西地区不对称的狮子沟背斜具有断展褶皱的性 质,其陡,(前)翼是有限应变最为集中地区,反映了下部的花土沟断层向南西方向仰冲的运



图 6 柴西地区地质剖面(给出磁面理与层理倾角的对比) Fig 6 Geological cross section of the western Qaidam basin.

showing the comparison of magnetic foliations and bedding dips

(图中箭头示意磁面理倾角;箭头末端的数字为样品位置号。剖面位置见图2)

5 结论

54

通过以上分析,得到以下几点初步结论:

(1)柴西地区新生代沉积岩磁化率各向异性度 P 值不大,一般在 1.002~1.176 之间, 变化范围不大,岩石磁各向异性较弱,反映总体构造变形相对较弱。磁各向异性度 P 值与 构造变形之间具有一定的相关性。

(2) 磁组构 F-L 及 T-P 图解分析表明,狮子沟、干柴沟和咸水泉背斜构造带新生代沉积 岩具有磁面理发育、磁线理不发育、磁化率量值椭球呈压扁状的特点。

(3)狮子沟、干柴沟和咸水泉背斜构造带的形成与最大主压应力为NE—SW 向的构造应 力场有关。磁面理数值大体上反映地层的层理,大部分具有原始沉积磁组构特征,同时记录 受NE 向挤压作用的痕迹。

(4)在NE向挤压构造变形过程中形成的狮子沟和干柴沟背斜构造,具有断展褶皱性 质,可以反映其下部花土沟断裂向南西方向仰冲的逆冲断层作用方式。

致谢 野外工作和论文撰写、修改过程中,陈柏林研究员提供了大量指导和具体帮助, 特此衷心感谢!同时感谢地质力学研究所古地磁实验室的王喜生博士和其他所有老师对本项 工作的支持。

参考文献

- [1] Meyer B. Tapponnier P. Bourjot L. Metivier F. Gaudemer Y. Peltzer G. Shunmin G. Zhitai C. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau [J]. Geophysical Journal of International, 1998, 135, 1~47.
- [2] Yin A, Rumelhart PE, Butler R, Cowgill E, Harrison TM, Foster DA, Ingersoll RV, Zhang Q, Zhou XQ, Wang XF, Hanson A, Raza A. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation [J]. Geological Society of America Bulletin, 2002, 114 (10): 1257~1295.
- [3] Cowgill E. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: Revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh fault, NW China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 254: 239~255.
- [4] Cowgill E, Yin A, Arrowsmith JR, Wang XF, Zhang SH. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault northwest Tibet 1: Smoothing by vertical-axis rotation and the effect of topographic stresses on bend-flanking faults [J]. Geological Society of America ?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

Bulletin, 2004, 116 (11~12): 1423~1442.

- [5] Cowgill E, Anowsmith JR, Yin A, Wang XF, Chen ZL. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault, northwest Tibet 2: Active deformation and the importance of transpression and strain hardening within the Altyn Tagh system [J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116 (11~12): 1443~1464.
- [6] Cowgill E, Yin A, Hamison TM, Wang X. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronobgy: Role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108 (B7), 2346 doi: 10. 1029/2002 JB002080.
- [7] Covgill E, Yin A, Wang X, Zhang Q. Is the North Altyn fault part of a strike-slip duplex along the Altyn Tagh fault system ?[J]. Geobgy. 2000 28: 255~258.
- [8] Burchfiel BC, Deng Q, Molnar P, Royden LH, Wang Y, Zhang P, Zhang W. Intracrustal detachment within zones of continental deformation [J]. Geology, 1989, 17: 448~452.
- [9] Tapponnier P, Meyer B, Avouac JP, Pelzer G, Gaudemer Y, Shunmin G, Hongfa X, Kelun Y, Zhitai C, Shuahua C, Huagang D. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1990, 97: 382 ~ 403.
- [10] Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Malavieille J, Roger F, Leloup A, Amaud N, Wu C. Neogene extension and volcanism in the Kunlun fault zone northern Tibet: New constraints on the age of the Kunlun fault [J]. Tectonics, 2003, 22, 1052, doi: 10. 1029/2002TC001428.
- [11] 尹安,党玉琪,陈宣华,汪立群,蒋武明,蒋荣宝,王小凤,周苏平,刘明德,马立协.柴达木盆地新生代演化 及其构造重建——基于地震剖面的解释[J].地质力学学报,2007,13 (3):193~211.
- [12] 马寅生,史大年,安美建,王小凤,霍光辉,李国歧,尹成明,张西娟,施炜,杜建军.苏门答腊地震对柴达木 地方震的触发作用[J].地质力学学报,2005,11(2):110~116.
- [13] 冯梅 安美建,王小凤,马寅生,蒋荣宝,李丽.青海狮子沟油田天然微地震活动及其地质意义[J].地质力学学报,2007,13 (2):172~178.
- [14] 汤良杰,金之钧,戴俊生,张明利,张兵山.柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统[J].地球科学,2002 27
 (6): 676~682.
- [15] 陈宣华, An Yin, George E. Gehrels, Eric S. Cowgill, Marty Grove, T. Mark Harrison, 王小凤, 杨农, 刘健. 青藏高 原北缘阿尔金东段中生代南北向伸展作用[J]. 地质力学学报, 2004, 10 (3): 193~212.
- [16] 蒋宏忱,于炳松,柴达木盆地西部红狮凹陷第三系下干柴沟组沉积相分析[J],沉积学报,2003,21 (3):391~
 397.
- [17] 郭峰 陈世悦,袁文芳,等.柴达木盆地西部干柴沟组沉积相及储层分布 [J].新疆地质 2006,24 (1):45~
 52.
- [18] 柳祖汉,吴根耀,杨孟达,等.柴达木盆地西部新生代沉积特征及其对阿尔金断裂走滑活动的响应[J].地质科 学,2004,41(2):344~354.
- [19] 操成杰,王小凤. 柴达木盆地近 SN 向构造形成机制与油气成 藏意义 [J]. 地质力学学报,2005,11 (1);74~
 80.
- [20] 阎桂林. 岩石磁化率各向异性在地学中的应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社(武汉), 19%.
- [21] 吴汉宁. 岩石的磁性组构及其在岩石变形分析中的应用 [J]. 岩石学报, 1988 4 (1): 94~98.
- [22] 余饮范,郑敏. 岩石磁组构分析及其在地学中的应用 [M]. 北京: 地质出版社,1992.
- [23] Kligfield R Lowrie W, Dakiel IWD. Magnetic susceptibility anisotropy as a strain indication in the subburg Basin Ontario [J]. Tectonophysics. 1977, 40: 287 ~ 305.
- [24] Benn K, Home R J, Kontak D J. Syn-A cadian emplacement model for the South Mountain batholith, Meguma Ternane, Nova Scotia: Magnetic fabric and structural analyses [J]. GSA Bulletin, 1997, 109 (10): 1279~1293.
- [25] 张达 李东旭. 铜陵凤凰山岩体侵位构造变形特征 [J]. 地球学报, 1999, 20 (3): 239~245.
- [26] 陈柏林,李中坚,谢艳霞.北京怀柔崎峰茶一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 (2): 134~141.
- [27] 陈柏林.运用磁组构方法研究构造变形与成矿作用的时序关系 [J].高校地质学报,1999,5(3):269~274.
- [28], 陈宣华, 马天林, 孙立倩, 周建海, 张新利, 萨瓦亚尔顿金矿床磁组构特征及与金矿化关系 [J]. 地质力学学 21994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House, All rights reserved. http://www.

报, 2001, 7 (3): 208~216.

- [29] 张普纲, 樊行昭, 霍俊杰, 磁性参数的环境指示意义 [J]. 太原理工大学学报, 2003, 34 (3); 301~304.
- [30] Lee TQ, Kissel C, Laj C, et al. Magnetic fabric analysis of the Plio-Pleistocene sedimentary formations of the Coastal Range of Taiwan [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 98: 23~32.
- [31] Sagnotti L, Winkler A, Montone P, et al. Magnetic fabric anisotropy of Plio-Pleistocene sediments from the Adriatic margin of the Northern Apennines (Italy); implications for the time-space evolution of the stress field [J]. Tectonophysics, 1999, 311: 139~ 153.
- [32] Pitambar G, Azumi H, Raj RK, et al. Magnetic minerals and magnetic properties of the Siwalik Group sediments of the Karnali River section in Nepal [J]. Earth, Planets and Space 2000 52 (5): 337~345.
- [33] 陈正乐,王小凤,马寅生,武红岭,殷秀兰,陈宣华.辽河盆地新生代岩石磁组构特征及其地质意义 [J].地球 学报,1999,20 (1):75~80.
- [34] 王永,李德贵,王军,王彦斌.西昆仑山前晚新生代沉积岩磁组构及构造意义 [J].新疆地质,2003,21 (1): 74~77.
- [35] REES A I. The magnetic fabric of a sedimentary rock deposited on a slope [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1971, 41 (1): 307 ~ 327.
- [36] 贾东,陈竹新,罗良,胡潜伟,贾秋鹏,李一泉.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):188~195.

MAGNETIC FABRICS OF CENOZOIC SEDIMENTARY ROCKS IN THE WESTERN QAIDAM BASIN AND THEIR STRUCTURAL SIGNIFICANCE

LI Li¹, JIANG Rong-bao¹, QI Wan-xiu², WU Yi-ping², YANG Yi², LI Xue-zhi²,

CHEN Zheng-le¹, CHEN Xuan-hua¹, WANG Xiao-feng¹, REN Xiao-juan¹

(1 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. No. 1 Geological Survey Office. Xinjiang Institute of Geological Survey, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Magnetic fabric analysis of Cenozoic sedimentary rocks in the vicinity of Shizigou, westem Qaidam basin, shows that the magnetic fabrics are characterized by well-developed magnetic foliation, undeveloped magnetic lineation and a flattened magnetic susceptibility ellipsoid, and the P value symbolizing the degree of magnetic susceptibility anisotropy is low, suggesting that ductile deformation is relatively weak. The stress state reflected by the rock magnetic fabric is mainly manifested by NE compression, which is consistent with the arrangement of the anticlines with axes running NW. The magnetic fabrics in the area mostly have the features of primary sedimentary fabrics, with the magnetic foliations largely reflecting the bedding of sedimentary rocks and also recording the signs of NE compression. According to the relation between the magnetic fabrics of rocks and bedding of strata, the Shizigou anticline with two asymmetric limbs in the western Qaidam basin has the nature of a fault-propagation fold and its formation was due to the southwestward obduction of the Huatugou fault underneath.

Key words: western Qaidam Basin; Cenozoic; magnetic fabric; structural deformation