

doi:10.3799/dqkx.2015.042

准噶尔西北部山地晚新生代以来隆升过程： 来自沉积学和磁组构的证据

艾可可^{1,2}, 季军良^{1,2*}

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 通过对准噶尔西北缘和什托洛盖盆地新近系白杨河剖面详细的沉积学和磁组构的研究, 探讨了准噶尔西北部山地约7 Ma以来的构造变化。白杨河剖面由下至上可划分为塔西河组、独山子组和西域组, 分别对应于浅湖相、扇三角洲相和砾质辫状河相。古流向和砾石成分分析表明, 剖面物源来自和什托洛盖盆地北侧山地。根据沉积学和磁化率与磁组构参数(P_j 、 T 、 L 和 F)的变化, 准噶尔西北部地区约7 Ma以来的构造—环境演变可划分为3个阶段: 阶段Ⅰ(6.80~3.50 Ma): 浅湖相, 磁化率和磁组构参数值为剖面最低, 且变化幅度很小, 代表了构造环境比较稳定, 地势高差较小或物源区较远; 阶段Ⅱ(3.50~2.58 Ma): 扇三角洲相, 沉积速率、磁化率和磁组构参数值显著增大, 表明准噶尔西北部山地强烈隆升; 阶段Ⅲ(<2.58 Ma): 砾质辫状河相, 磁化率和磁组构参数值进一步增大, 可能是构造隆升与气候变化共同作用的结果。3.50 Ma准噶尔西北部山地强烈的构造隆升与天山地区和青藏高原周缘约3.00~4.00 Ma的构造隆升具有准同时性, 是印度—欧亚板块陆内俯冲挤压远程效应表现。

关键词: 沉积相; 磁组构; 西准噶尔; 构造隆升; 晚新生代。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2015)03-0535-13

收稿日期: 2014-09-29

Tectonic Uplift of Mountains in Northwestern Junggar since Late Cenozoic: Evidences from Sedimentology and Magnetic Fabric in Heshituoluogai Basin

Ai Keke^{1,2}, Ji Junliang^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Through the results of detailed sedimentological and magnetic fabric study, on the Heshituoluogai basin, northwestern Junggar, we discussed the tectonic evolution since 7 Ma ago in the northwestern Junggar. The Baiyanghe section can be divided into Taxihe Formation, Dushanzi Formation and Xiyu Formation from bottom to up, corresponding to the lacustrine facies, fan delta facies and gravelly braided river facies. Paleocurrent and provenance analysis shows that the provenance of the section comes from the northern mountains nearby the basin. On the basis of the sedimentological and magnetic fabric results, we divided the tectonic-sedimentary evolution of northwestern Junggar into three stages since 7 Ma ago: I (6.80–3.50 Ma), lacustrine facies, lowest magnetic susceptibility and magnetic fabric parameters with small changes, indicating a stable tectonic environment, small topographic elevation difference or far provenance area; II (3.50–2.58 Ma), fan delta facies, significant increase of the sedimentation rate, magnetic fabric parameters and magnetic susceptibility all suggest that the northwestern Junggar mountains underwent intense tectonic uplift; III (<2.58 Ma), gravelly braided river facies, magnetic fabric

基金项目: 中国地质调查局项目“西准噶尔克拉玛依后山地区三维地质调查试点”(No. 1212011220245); 新疆1:25万铁厂沟镇幅(L45C002001)与克拉玛依市幅(L45C003001)区调修测项目(No. 1212011120502); 中央高校基本科研业务费专项(No. CUGL09306)。

作者简介: 艾可可(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事古地磁和沉积学研究。E-mail: 1045220081@qq.com

*** 通讯作者:** 季军良, E-mail: jijl@cug.edu.cn

引用格式: 艾可可, 季军良, 2015. 准噶尔西北部山地晚新生代以来隆升过程: 来自沉积学和磁组构的证据. 地球科学——中国地质大学学报, 40(3): 535–547.

parameters and magnetic susceptibility increases further, which caused by tectonic uplift and climate change together. The tectonic uplift of the northwestern Junggar mountains occurred at 3.50 Ma is almost synchronous with the uplift of the Tianshan Mountains and the Tibetan plateau occurred at 3.00–4.00 Ma, which is influenced by the far-field effects of the India-Asia intracontinental subduction extrusion.

Key words: sedimentary facies; magnetic fabric; western Junggar; tectonic uplift; Late Cenozoic.

晚新生代以来受印度—欧亚板块陆内俯冲挤压远程效应的影响,南起青藏高原北缘,北到蒙古、西伯利亚等广大中亚地区发生了强烈的构造变形,形成了延伸上千公里的狭长山脉(如天山、阿尔泰山)以及数量众多的山前褶皱、走滑断层和韧性剪切带(Monlar and Tapponnier, 1975; Tapponnier and Monlar, 1979; Dobretsov *et al.*, 1995, 1996; Buslov *et al.*, 1999, 2008; Yin, 2010; Smit *et al.*, 2012). 前人对印度—欧亚板块陆内俯冲挤压远程效应的研究主要集中在青藏高原北缘、东北缘和天山南北山麓地带. 通过对天山南、北地区磷灰石裂变径迹(Hendrix *et al.*, 1994; 郭召杰等, 2006)、磁性地层学(Sun *et al.*, 2004, 2007; Charreau *et al.*, 2005, 2006; Huang *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2011)、构造变形(邓起东等, 2000; Heermance *et al.*, 2007)等的研究,详细地揭示了天山地区早中新世的初始构造隆升和上新世以来加速隆升的过程. 青藏高原东北缘和北缘地区磷灰石裂变径迹(郑德文等, 2003; 张培震等, 2006; Zheng *et al.*, 2006)、磁性地层(Dupont-Nivet *et al.*, 2002; Fang *et al.*, 2003, 2005, 2007; Sun *et al.*, 2011)和构造—岩相古地理变化(张克信等, 2007; Zhang *et al.*, 2008, 2010)等方面的研究,同样揭示了青藏高原东北缘和北缘晚新生代以来隆升的过程. 通过这些研究对理解中亚地区晚新生代以来的构造演化及其与印度—欧亚板块陆内俯冲挤压的远程效应的关系有重要意义. 但是,天山以北地区晚新生代以来的构造演化却鲜为研究.

本文对准噶尔西北缘和什托洛盖盆地白杨河剖面进行了沉积学和磁组构研究,在已有的白杨河剖面磁极性年龄框架的基础上,探讨了准噶尔西北部山地晚新生代以来的构造演变,同时也为研究印度—欧亚板块陆内俯冲挤压的远程效应在该区的表现提供了沉积学和磁组构方面的证据.

1 地质背景

和什托洛盖盆地位于准噶尔西北缘,为西准噶

尔构造带中的一个山间小盆地,属于中亚—蒙古巨型构造带的一部分(肖序常等, 1991). 盆地受控于准噶尔西北缘断裂带,总体上呈北北东向延伸,盆地北依乌克拉嘎山、谢米斯台山、阿尔加提山,南接扎依尔、哈拉阿拉特山、德伦山,西抵扎依尔山与乌克拉嘎尔山的汇聚处,东以达尔布特断裂为界与准噶尔盆地相接(胡杨等, 2012)(图1).

和什托洛盖盆地主要堆积了中生代河湖相沉积物,晚新生代以来,受印度—欧亚板块陆内俯冲挤压的远程效应影响,盆地周缘山地发生了构造隆升,在盆地北部的逆断层下盘,沉积了较厚的新近纪及第四纪沉积物(马宝军等, 2009; 胡杨等, 2012). 这些沉积物系统地记录了准噶尔西北缘地区构造和环境演变信息. 白杨河剖面位于盆地北缘白杨河镇西南约20 km的白杨河下游左岸,剖面坐标的经纬度为 $84^{\circ}54'06''\text{E}$ 、 $46^{\circ}21'53''\text{N}$. 整个剖面厚度约为400 m,依据前人对准噶尔盆地南缘新生代地层组的划分特征(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993),该剖面地层由老至新可划分为塔西河组、独山子组和西域组. 塔西河组与下伏侏罗系头屯河组为平行不整合接触,西域组之上被第四系砂砾石覆盖. 整个地层为向盆地方向倾斜的单斜地层,倾角从底部的 55° 向上逐渐变为 32° . 塔西河组厚约130 m,岩性主要为砖红色块状泥岩、粉砂质泥岩夹灰色薄—厚层状细—粗砾岩,部分粉砂质泥岩中含直径约1~2 cm的钙质结核;独山子组厚约150 m,岩性下部为巨厚层状细—粗砾岩夹中薄层状粉砂质泥岩,中部为厚层状细—粗砾岩与棕色泥岩、粉砂质泥岩按1:2~1:3的比例互层,上部为厚—巨厚层状砾岩夹中—薄层状粉砂质泥岩;西域组出露厚度约100 m,岩性主要为灰色巨厚层状砾岩夹极少量薄层状、透镜状砂岩(图2).

2 沉积相及沉积环境分析

2.1 沉积岩相

根据Miall(1984, 1996)的沉积岩相划分方法,结合沉积物特征和沉积构造,笔者将白杨河剖面地

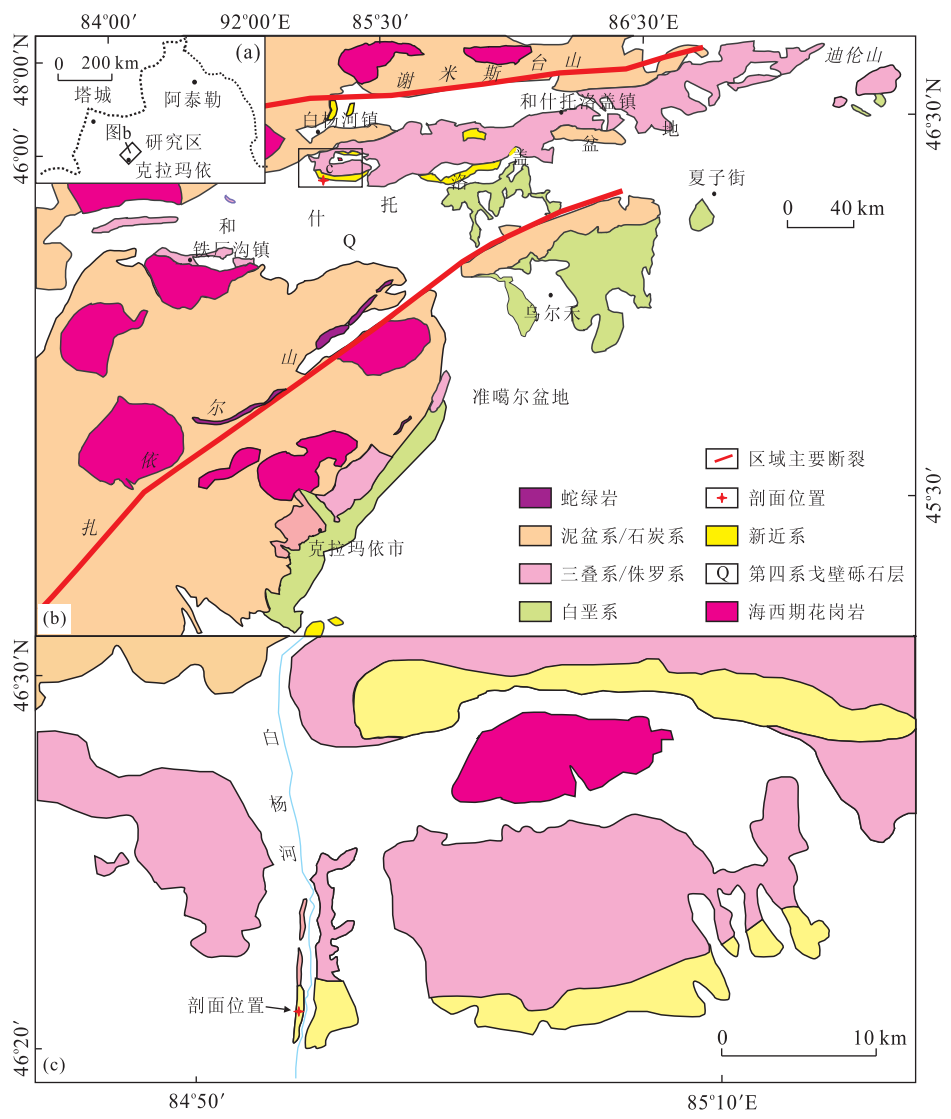


图 1 研究区地质简图及剖面位置

Fig. 1 Sketch geological map showing the western Junggar and the location of Baiyanghe section

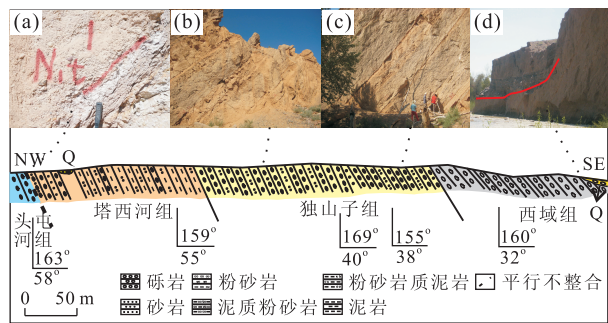


图 2 白杨河地层剖面

Fig. 2 Stratigraphy of the strata at Baiyanghe section

a. 塔西河组与头屯河组平行不整合接触; b. 独山子组下部砾岩夹砂岩、粉砂质泥岩; c. 独山子组中上部砾岩与粉砂岩、泥岩互层; d. 西域组与第四纪砂砾石角度不整合界线

层划分为 8 个沉积岩相(表 1), 包括砾岩相、砂岩

相、粉砂岩相和泥岩相。

2.1.1 砾岩单元 Gm 主要由分选差、颗粒支撑的砾石构成。砾石一般呈次棱角状一次圆状, 砾径多在 1~5 cm, 大者可达 10 cm。砾石含量为 40%~60%, 主要成分为石英岩、安山岩、硅质岩和凝灰岩等。单层 Gm 一般厚约 1 m, 常具叠瓦状构造。该相属扇三角洲或砾质辫状河相富碎屑流沉积。G1 主要由分选差、颗粒—杂基支撑的砾石组成。砾石呈次圆状, 一般砾径为 1~3 cm, 砾石成分主要为安山岩、硅质岩、凝灰岩等, 呈薄层状。该相属于河道充填沉积; Gc 主要由具块状构造的砾石组成, 砾石分选差, 次圆状。砾径多为 0.5~1.0 cm, 主要成分为花岗岩、安山岩、凝灰岩等, 属于碎屑流沉积相。

2.1.2 砂岩单元 Sh 主要由分选中一差的细—粗

表 1 白杨河剖面地层沉积岩相(微相)划分

Table 1 Lithofacies classification of the strata at Baiyanghe section

相符号	岩相	沉积构造	解释
Gm	砾石,分选差,次圆状,块状或大致呈层状,杂基充填	块状层理,叠瓦状构造	重力流沉积
Gl	分选差,薄层或透镜状,杂基—颗粒支撑,粗砂至细砾	粒序层理或无内部组构	河道充填
Gc	砾石,泥质填隙	块状构造	碎屑流沉积
Sh	细—粗砂,中—差分选,含砾	平行层理	高流态沉积
Sm	细—粗砂,中—差分选,含砾	块状层理	高流态沉积
St	细—粗砂,中—好分选	块状,小型板状、槽状交错层理	高含砂水流快速沉积
Fsc	粉砂,泥	块状	中—低流态沉积
Fm	粉砂,块状泥	块状,水平层理	河漫滩或湖泊沉积

注:据 Miall(1984, 1996)修改.

粒砂岩组成,含细砾岩,砾石棱角状一次棱角状,分选差,砾径为 0.3~0.8 cm. 单层 Sh 厚度一般为 0.5~1.0 m,底部发育冲刷构造,层内可见粗糙的平行层理,属于水道高流态沉积;Sm 岩性与 Sh 一致,但层厚度在 0.2~1.5 m 左右,属于高含砂水流快速堆积;St 主要由分选中—好的细—粗粒砂岩组成,层内发育小型板状交错层理,属于中—低流态沉积.

2.1.3 粉砂岩、泥岩单元 Fsc 主要由块状的粉砂岩、泥岩组成,单层厚度一般在 0.5~1.0 m 左右,属于河漫滩或湖泊沉积;Fm 主要由块状的粉砂、泥岩组成,发育水平层理,属于湖泊相沉积.

2.2 剖面沉积相分析

在上述沉积岩相分析的基础上,根据剖面沉积岩相的组合特征和沉积构造划分出了 3 种主沉积相类型:扇三角洲相、湖泊相、砾质辫状河相.

2.2.1 湖泊相 湖泊相分布在剖面中一下部,为滨浅湖亚相,主要由 Gm、Fm 和 Fsc 岩相组成,以厚层—巨厚层的块状棕红色泥岩、粉砂质泥岩夹少量的薄层状细砾岩为特征.粉砂岩、泥岩中发育有水平层理,砾石(Gm)为块状,分选、磨圆都很差.

2.2.2 扇三角洲相 扇三角洲相主要分布在剖面的底部和中部,可细分为扇三角洲前缘亚相和扇三角洲平原亚相.扇三角洲前缘亚相主要由 Sm、St 和 Fsc 岩相组成,以棕红色块状泥岩、棕红色块状含砾泥岩、粉砂岩组成以及泥岩、粉砂岩中钙结核发育为特征.泥岩、粉砂岩中可见平行层理发育.扇三角洲平原亚相主要由 Gm、Gl、Sm、Sh、Fsc 和少量的 St 组成,以厚层—巨厚层中—粗砾岩夹中—薄层中—细砂岩、粉砂岩为特征.砾石(Gm)具有叠瓦状构造,底部发育冲刷面构造,砂岩、粉砂岩中发育平行层理和板状交错层理.根据岩性和微相特征可将扇三角洲平原亚相划分为分支河道和漫滩两个微相.分支河

道以砾岩与含砾砂岩、粉砂岩组成的向上变细的旋回为特征,剖面中部有多个明显的分支河道砾石层.漫滩以薄层的棕红色、棕黄色粉砂岩、泥岩为特征,沉积物粒度细,砂岩、粉砂岩中发育平行层理和小型板状交错层理.

2.2.3 砾质辫状河相 砾质辫状河相分布于剖面顶部,主要由 Gm、Gc 和 Sh 岩相组成,以厚层状砾岩夹少量薄层状、透镜状粉细砂岩为特征.砾石(Gm)具叠瓦状和块状构造,分选差,为次棱角状—次圆状磨圆,砂岩以薄层状夹层或透镜体状产出.

2.3 古流向和物源分析

根据叠瓦状砾石最大扁平面和地层中交错层理前积纹层的产状计算出的古流向(图 3)可以看出整个剖面古流向为近 SSE 向.剖面中砾石的成分主要为安山岩、花岗岩、凝灰质砂岩和粉砂岩等,与盆地西北侧山脉的基岩和地层的岩性一致.以上证据表明白杨河剖面沉积物的物源主要来自和什托洛盖盆地西北缘的山脉.

3 晚新生代地层古地磁分析

3.1 样品采集与测试

本剖面所有的古地磁样品都是采取的手工样,并用罗盘对样品进行了野外定向.由于塔西河组中下部有一段厚约 30 m 的地层被第四纪砾石覆盖,未能取到古地磁样.除此之外,对白杨河剖面按约 1 m 的间距采样,同时兼顾岩性的不同采样间距略有变化.整个剖面一共采集古地磁样品 215 块.

所有的样品在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室古地磁样品处理室内加工成边长约为 2 cm 的立方体.每块古地磁样品在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室古地磁实验室采用 MFK1-FA 磁化率仪器进行了

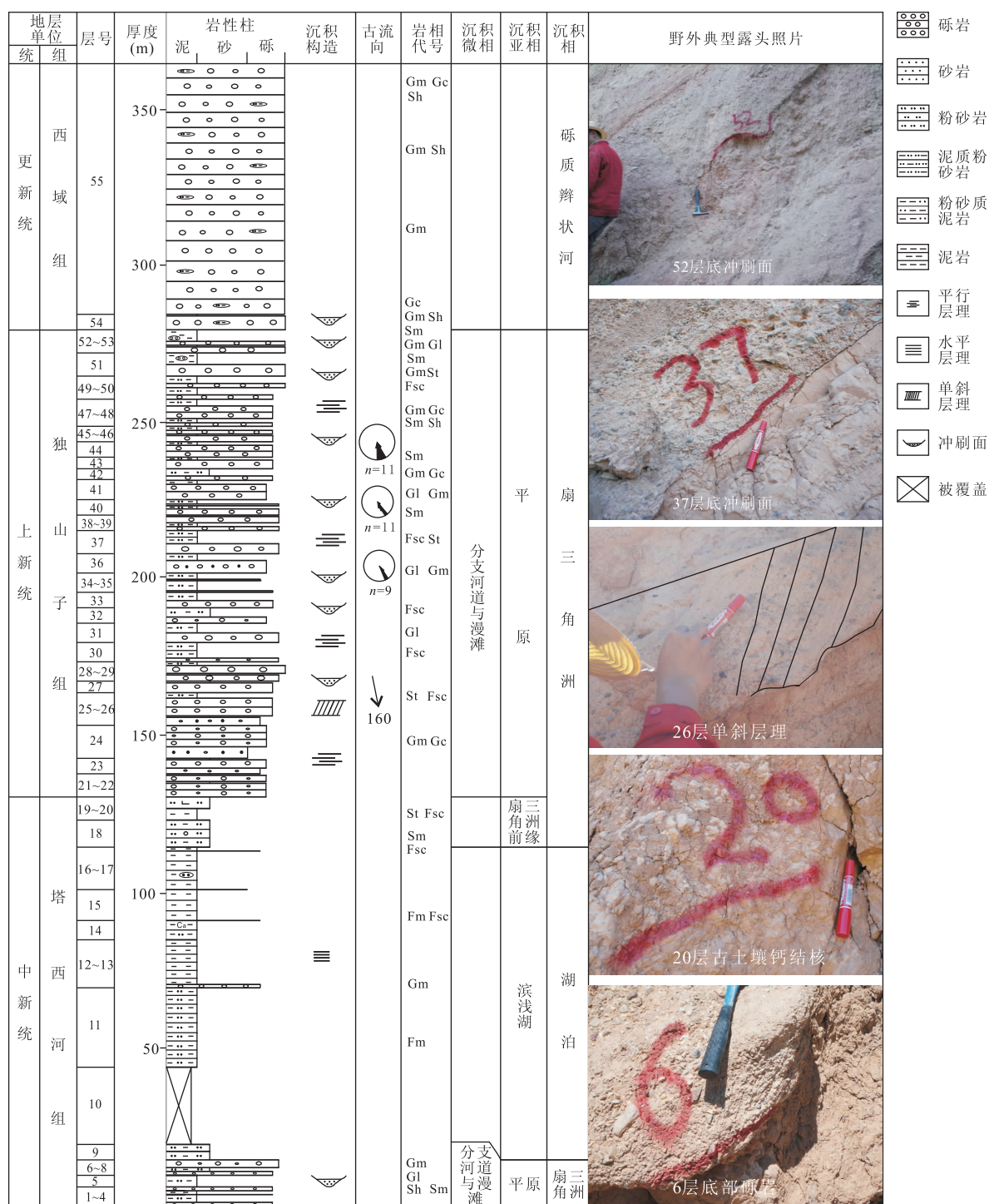


图 3 白杨河实测剖面岩性岩相柱状图

Fig. 3 Lithologic and lithofacies columnar section of the measured Baiyanghe section

岩相代号见表 1

磁化率及其各向异性的测试. 由于样品的尺寸对磁化率各向异性的测试影响比较大, 为了使测试结果更加准确, 笔者挑选了 117 块与标准样品尺寸相近的样品, 采用 MFK1-FA 磁化率仪进行了磁化率各项异性的测试.

所有样品在中国地质大学(北京)生物地质与环

境地质国家重点实验室古地磁学与环境磁学实验室进行了剩磁测量,获得了白杨河剖面的磁极性柱,并建立了该剖面的地质年龄框架,塔西组为 6.80~3.50 Ma,独山子组为 3.50~2.58 Ma,西域组为 2.58~0.58 Ma(详细古地磁年龄数据分析另文发表).

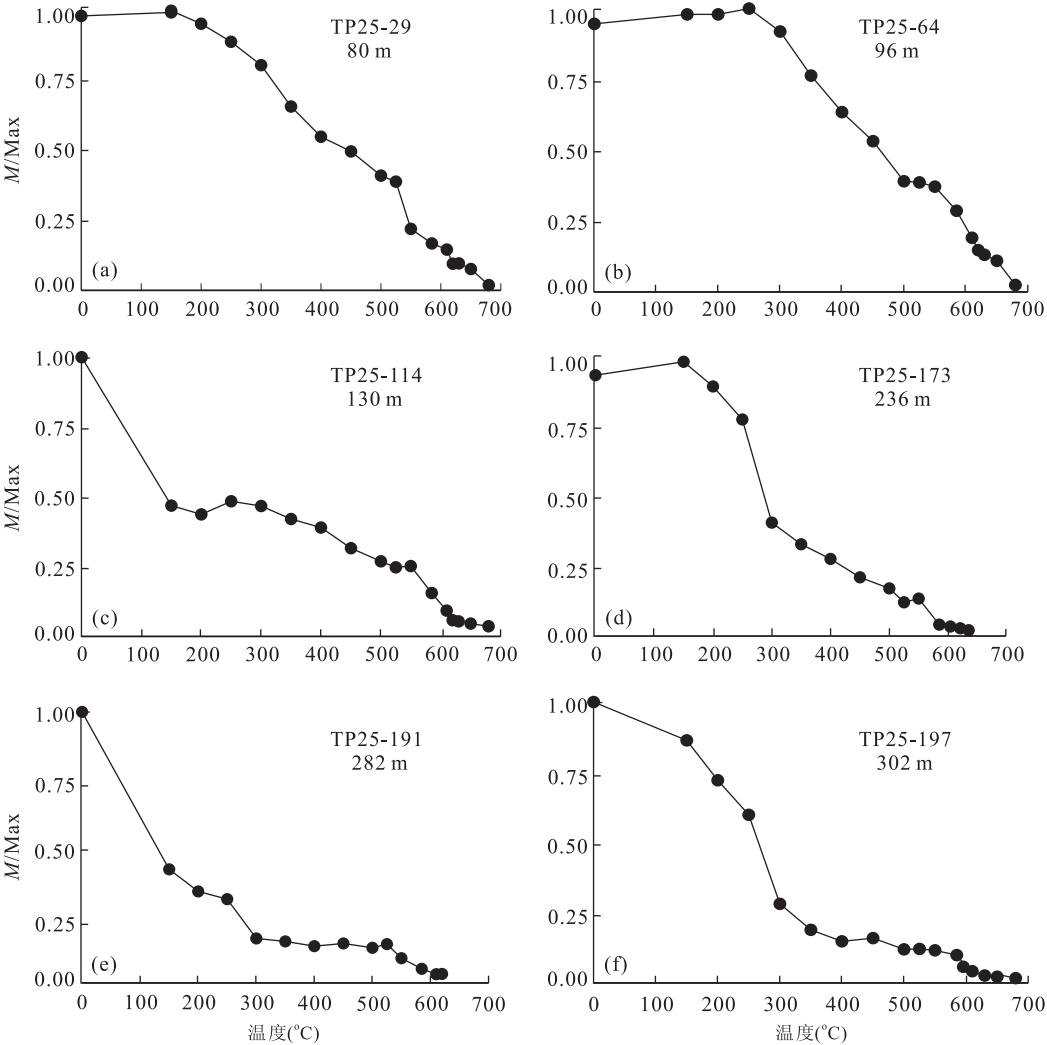


图 4 白杨河剖面代表性样品系统热退磁曲线

Fig. 4 Temperature dependence of magnetic susceptibility of representative specimens in the Baiyanghe section

3.2 测试结果

3.2.1 磁性矿物 大部分样品的系统热退磁曲线显示剩磁强度在 585 °C 时有明显下降,630~680 °C 时接近仪器背景值,表明白杨河剖面沉积物中的主要载磁矿物为磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿(图 4)。而且,从剖面自下而上系统热退磁曲线的变化可以看出,剖面中上部样品在 585 °C 时剩磁强度的降低程度明显大于剖面上部,且剖面中下部样品剩磁强度多在 585 °C 快速下降后就迅速归零,这说明沉积物中磁铁矿、磁赤铁矿的含量随地层变新而增多,而赤铁矿的含量逐渐减少。

3.2.2 磁化率和磁化率各向异性 白杨河剖面磁化率值随深度的变化显示出 3 个阶段,并呈现出逐步增大的趋势(图 5)。下段对应的是塔西河组,磁化率值较小,且比较稳定,磁化率数值在 $15.8 \times 10^{-5} \sim 48.6 \times 10^{-5}$ 之间,平均值为 36.7×10^{-5} (表

2);中段对应于独山子组,磁化率明显增大,有较大幅度的波动,磁化率数值在 $35.6 \times 10^{-5} \sim 176.2 \times 10^{-5}$ 之间,平均值为 73.0×10^{-5} (表 2);上段对应于西域组,磁化率数值在 $53.1 \times 10^{-5} \sim 107.8 \times 10^{-5}$ 之间,平均值为 79.2×10^{-5} (表 2),其平均值比中段略微增大。

白杨河剖面磁组构参数随深度的变化也显示出 3 个阶段(表 2)。下段对应于塔西河组,磁线理(L)变化范围为 1.001~1.014,平均值为 1.004;磁面理(F)的变化范围为 1.001~1.019,平均值为 1.006;磁化率各向异性度(P_j)和形状参数(T)的变化范围分别为 1.003~1.027 和 -0.701~0.704,平均值分别为 1.010 和 0.173。中段对应于独山子组,磁组构参数 L 、 F 、 P_j 和 T 较上一段显著增大,其变化范围分别为 1.001~1.027、1.002~1.064、1.005~1.081 和 -0.332~0.875,平均值分别为 1.008、

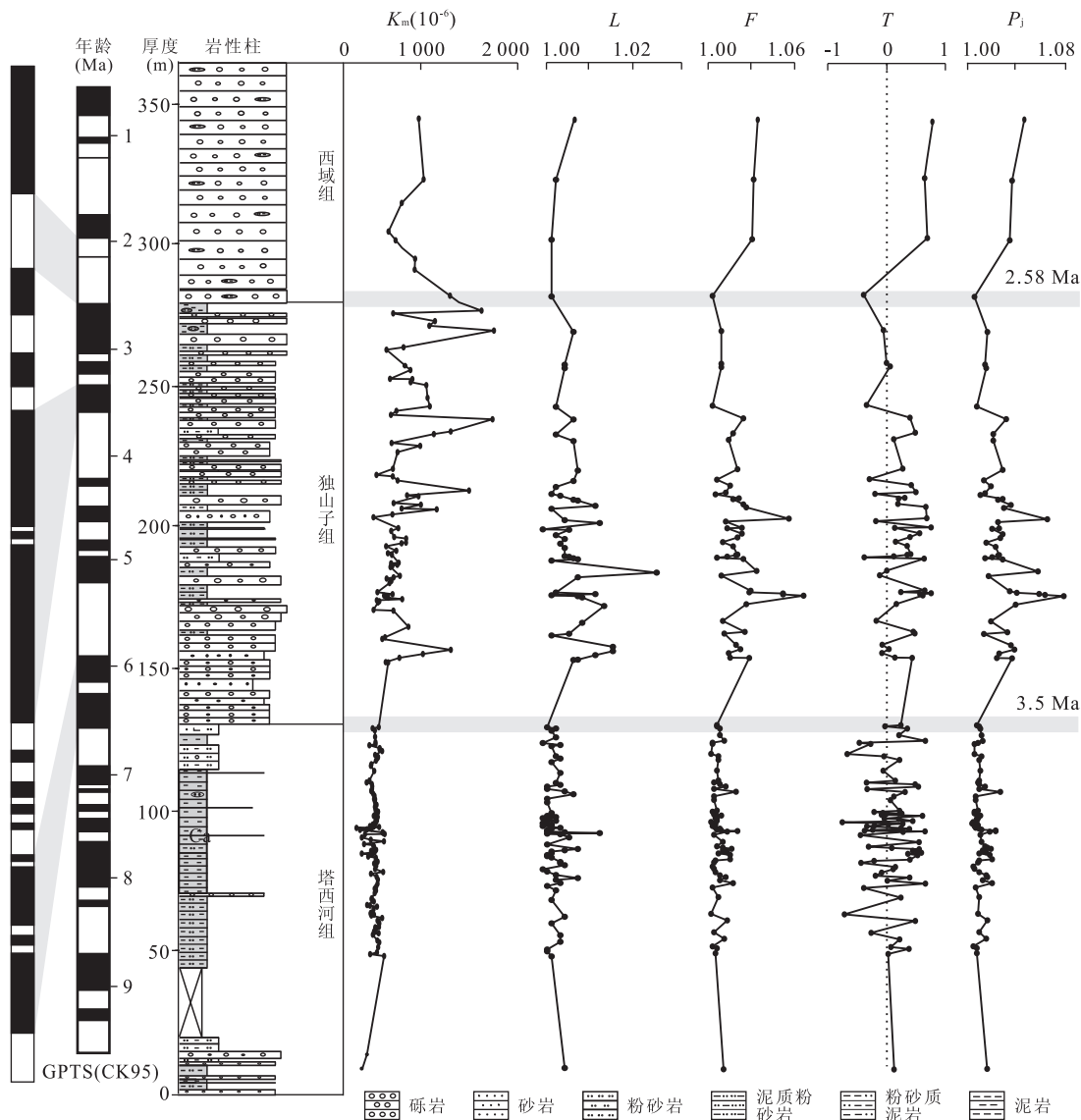


图 5 白杨河剖面地层磁化率各向异性参数变化趋势
Fig. 5 Changes of magnetic fabric parameters in Baiyanghe section

表 2 白杨河剖面磁组构参数

Table 2 Magnetic fabric parameters of sedimentary rocks from Baiyanghe section

地层	磁组构参数(括号内为平均值)				
	$K_m(10^{-5})$	L	F	P_j	T
塔西河组	15.8~48.6(36.7)	1.001~1.014(1.004)	1.001~1.019(1.006)	1.003~1.027(1.010)	-0.701~0.704(0.173)
独山子组	35.6~176.2(73.0)	1.001~1.027(1.008)	1.002~1.064(1.020)	1.005~1.081(1.029)	-0.332~0.875(0.341)
西域组	53.1~107.8(79.2)	1.003~1.008(1.005)	1.002~1.030(1.017)	1.005~1.037(1.023)	-0.322~0.808(0.318)

1.020、1.029 和 0.341。上段对应于西域组,其变化趋势与上一阶段相似,磁组构参数 L 、 F 、 P_j 和 T 的变化范围为 1.003~1.008、1.002~1.030、1.005~1.037 和 -0.322~0.808,平均值较上一段略微减少,分别为 1.005、1.017、1.023 和 0.318。

3.3 测试结果分析

3.3.1 磁化率 前人研究表明磁铁矿的磁性比赤

铁矿大 3 个数量级,并大大高于其他常见的磁性矿物,因此磁铁矿的含量对磁化率值的贡献占主导地位(Dunlop and Ozdemiro, 1997),而系统热退磁结果揭示白杨河剖面沉积物主要的磁性矿物为磁铁矿、磁赤铁矿和赤铁矿,且向上磁铁矿的含量逐渐增多,这与白杨河剖面的磁化值向上变大的趋势是相吻合的(图 5)。

研究表明磁铁矿的含量主要受到 2 个因素的影响:气候变化和构造活动。气候变化对磁铁矿的含量影响表现为:在温暖湿润时期,化学风化作用较强,磁铁矿易被氧化转变为磁赤铁矿、赤铁矿等低磁性的磁性矿物,导致沉积物的磁化率值较低;而在气候寒冷干燥时期,化学风化作用较弱,磁铁矿不易转变为其他的磁性矿物,从而磁铁矿的含量相对较高,磁化率值较大(Thompson and Oldfield, 1986; Thouveny *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 2012)。构造活动对磁铁矿的含量影响表现为:在构造隆升时期,由于山脉的隆升作用,大量的含磁铁矿等磁性矿物的基岩被快速剥蚀出露地表,同时由于较大的地形高差,剥蚀出露地表的沉积物被快速的带到沉积区,磁铁矿未被或只有部分被氧化,从而形成了较高磁化率值的沉积物;而在构造稳定时期,沉积物从山体剥露、搬运和沉积的过程历时较长,磁铁矿经历了较充分的风化作用后,大部分被氧化为赤铁矿,从而形成了低磁化率值的沉积物(Sun *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2012)。

白杨河剖面下部塔西组(6.80~3.50 Ma)磁化率值低(图 5),主要为一套含钙质结核的砖红色块状湖相的泥岩、粉砂岩沉积。塔西河组内大量发育的钙质结核和砖红色的沉积物都表明该时期准噶尔西北部山地处于温暖湿润的强氧化环境,同时系统热退磁曲线也指出该时期的磁性矿物为赤铁矿占优,这表明该时期较低的磁化率值主要是由于磁铁矿在湿热的气候下氧化为赤铁矿所致。

3.50 Ma 开始白杨河剖面的磁化率值发生了显著的增大,同时剖面上开始堆积了厚层的砾石层,沉积相发生了突变,沉积速率剧增。孢粉学的研究指出准噶尔盆地在 8.00~2.58 Ma 之间气候变化比较稳定,属于温暖湿润的草原环境(Sun *et al.*, 2007),这说明 3.50 Ma 磁化率值显著增大主要与物源区构造隆升相关。古流向数据表明该剖面沉积物来自于其南部山地(图 3)。因此,白杨河剖面约 3.50 Ma 磁化率值的突然增大主要与剖面北侧准噶尔西北部山地的构造隆升相关。

2.58 Ma 后,剖面堆积了厚层的西域组砾岩,磁化率的平均值比上一阶段稍大(表 2),热退磁曲线揭示的剖面磁性矿物主要为磁铁矿。前人研究认为,中国西部地区沉积的西域组砾岩是第四纪冰期—间冰期气候频繁剧烈波动和构造运动共同作用的产物(Sun *et al.*, 2004, 2005; 孙继敏和朱日祥, 2006; Charreau *et al.*, 2009)。因此,该白杨河剖面

2.58 Ma 以来较高的磁化率值可能是气候变化和构造运动共同作用的结果。

3.3.2 磁组构 岩石磁组构是岩石磁化率各向异性的一种表示,磁组构的磁化率椭球体 3 个轴:最大轴($K_{\max}$)、中间轴(K_{int})和最小轴($K_{\min}$)及由 3 个轴的比值关系衍生出的磁线理(L)、磁面理(F)、磁化率椭球体扁率(E)、磁化率各向异性度(P_j)、形状参数(T)等磁化率各向异性参数在揭示沉积物沉积环境、沉积过程及构造应力变化中得到了广泛的应用(Jelinek, 1981; Collinson, 1986; 余钦范和郑敏, 1992; Tarling and Hrouda, 1993; 许峰宇和王力波, 1994; Huang *et al.*, 2006)。

磁化率各向异性度(P_j)和形状参数(T)及 P_j - T 图解(图 5)可以反映沉积物沉积时所受到的应力变化和沉积物搬运体系的改变(如水动力条件、搬运距离等)(Hrouda *et al.*, 1982; Gilder *et al.*, 2001; Tarling and Hrouda, 1993; Charreau *et al.*, 2005, 2006; Huang *et al.*, 2006; Soto *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2012)。 P_j 和 T 值及其随深度变化的趋势见图 5 和表 2。形状参数 $1.0 > T > 0.7$ 表示磁化率椭球体为扁圆状; $0.7 > T > 0.3$ 表示椭球状; $0.3 > T > -0.1$ 表示球状; $T < -0.1$ 表示扁长状(Jelinek, 1981; Hrouda *et al.*, 1982; Soto *et al.*, 2009)。前人研究表明 T 值可以反映沉积物沉积和搬运水动力条件的信息,当沉积物经过了较长距离的搬运,以致沉积物颗粒被大部分磨蚀为近圆形时, T 值接近 0;而当沉积盆地周缘的山体隆升,山脉前缘逐渐地靠近盆地,沉积物搬运到最终沉积区的距离减小,因此沉积物颗粒的磨蚀作用减小,从而使大部分颗粒为扁圆状, T 值表现为大于零(Gilder *et al.*, 2001; Charreau *et al.*, 2005, 2006)。白杨河剖面下部塔西河组的平均 $T=0.173$,为球状,表明塔西组沉积时构造环境比较稳,沉积物搬运的距离长,物源区较远。剖面中部从独山子组沉积开始(约 3.50 Ma) T 值发生了显著的变化, T 值明显增大(图 6),表明 3.50 Ma 开始,准噶尔西北部山地发生了强烈隆升,地势高差增大,沉积物搬运的距离减小。剖面上部西域组 T 值的变化与独山子组相似(图 5,图 6),表明准噶尔西北部山地持续隆升,沉积物的搬运距离依旧较小。

磁面理(F)反映沉积颗粒呈面状分布的程度,磁线理(L)反映沉积颗粒呈线状排列的程度,二者的大小都与沉积时水动力强度或坡降状况密切相关,沉积时水动力强、坡降比大,则 F 、 L 值大;反之

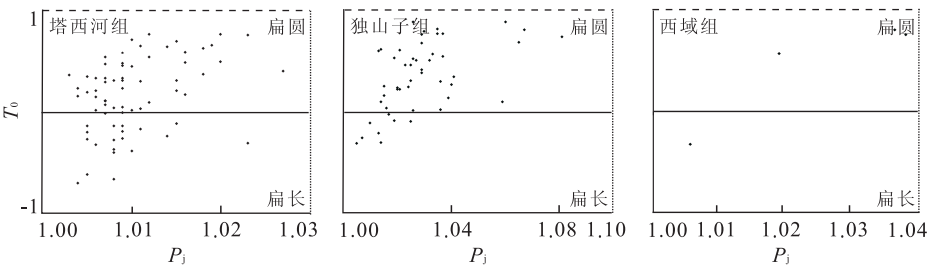


图 6 白杨河地层 $T-P_j$ 关系
Fig. 6 Correlation of $T-P_j$ magnetic fabric parameters from Baiyanghe section

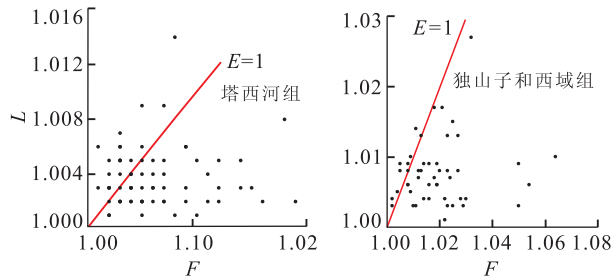


图 7 白杨河剖面地层 $L-F$ 关系
Fig. 7 Correlation of $L-F$ magnetic fabric parameters from Baiyanghe section

则 F 、 L 值小(余钦范和郑敏, 1992; 许峰宇和王力波, 1994). 白杨河剖面中, L 和 F 值总体呈向上变大的趋势(图 5), 剖面下部塔西河组沉积时, L 和 F 值小, 表明水动力较弱, 主要为细颗粒的泥岩、粉砂岩沉积; 剖面中部独山子组沉积时 L 和 F 值显著变大, 表明随着准噶尔西北部山地的隆升, 地形高差增大, 水动力变强, 并且变化频繁, 主要为粗碎屑的沉积物. 这与磁化率、沉积相指示的环境信息是相似的. 剖面上部西域组沉积时 L 、 F 值仍成增大的趋势, 地势高差进一步增大, 水动力强, 主要为砾石堆积. 同时, L 、 F 值的 $L-F$ 图解(图 7)表明白杨河地层主要发育磁面理($E > 1$, 磁线理发育; $E < 1$, 磁面理发育), 并且随着地层变新, 磁面理更加的发育.

4 讨论和结论

4.1 7 Ma 以来准噶尔西北部山地的构造—环境演化

根据上述白杨河剖面沉积学和沉积物磁组构的分析结果, 笔者将准噶尔西北部山地近 7 Ma 以来构造—环境演化划分为 3 个阶段.

I 阶段(6.80~3.50 Ma): 砖红色、局部钙质结核发育的泥岩、粉砂岩的湖泊相沉积和较低的磁化率值, 表明该时期准噶尔西北缘地区处于温暖湿润

的环境. 准噶尔盆地南缘的孢粉学的研究也指出这一时期为温暖湿润的草原环境(Sun *et al.*, 2007). 同时, 较低的 L 、 F 值表明此时期沉积物沉积时的水动力较弱, 盆地和南侧山地之间的高差较小.

II 阶段(3.50~2.58 Ma): 这一阶段厚层砾岩频繁出现, 沉积相由滨浅湖相转变为扇三角洲相, 磁化率和磁组构参数 P_j 、 T 、 L 和 F 值显著变大, 并具有一定的波动, 表明 3.50 Ma 左右准噶尔西北部山地发生了构造隆升, 盆地与周围山地的高差显著增大, 沉积物沉积时的水动力增大, 沉积物以近源搬运、堆积为主. 3.50 Ma 左右的构造隆升在青藏高原西北缘和天山两侧的山前地带具有普遍性. 塔西河剖面沉积相和沉积速率的研究表明, 北天山在约 3.00~4.00 Ma 发生了强烈的构造隆升(吕红华等, 2008; Li *et al.*, 2011). 青藏高原主夷平面形成的上限年龄为 3.60 Ma 左右, 表明青藏高原发生了强烈、快速的隆升, 命名为“青藏运动 A 幕”(李吉均和方小敏, 1998; 李吉均等, 2001). 临夏盆地积石组砾岩开始形成的年龄为 3.60 Ma, 说明青藏高原东北缘在 3.60 Ma 发生了强烈的构造隆升(方小敏等, 1997). 张克信等(2007)、Zhang *et al.* (2008, 2010) 以青藏高原不同阶段构造—岩相古地理演化和沉积对隆升的响应分析为基础, 结合磷灰石裂变径迹热年代学的研究结果(钟大赉和丁林, 1996; Clark *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011), 认为上新世以来是高原的强烈隆升期. Fang *et al.* (2003, 2005, 2007) 在高原东北缘贵德盆地、茶卡盆地、柴达木盆地磁性地层学的研究也指出, 高原东北缘约 3.60~2.60 Ma 的构造隆升. 虽然 Zhang *et al.* (2001) 认为 2.00~4.00 Ma 之间准同时性的磨拉石堆积与气候变化密切相关, 但是气候方面的研究表明, 晚中新世—上新世期间的气候要比第四纪气候炎热得多, 而且气候波动的幅度较小(Ding *et al.*, 1999; Zachos *et al.*, 2001). 准噶尔盆地南缘孢粉分析也表明

8.00~2.58 Ma 属于温暖湿润的草原环境(Sun *et al.*, 2007). 因此,白杨河剖面记录的 3.50 Ma 开始的沉积学和磁化率各向异性的显著变化应是准噶尔西北部山地隆升的沉积响应,这与天山地区和青藏高原约 3.00~4.00 Ma 的强烈构造隆升是准同时性的.

Ⅲ阶段(<2.58 Ma):2.58 Ma 以来为砾质辫状河堆积的巨厚层西域组砾岩,磁化率和磁组构参数值的变化趋势与上一阶段相似,略有增大.2.58 Ma 以来全球进入了两极发育永久性冰盖的冰期—间冰期阶段(Zachos *et al.*, 2001),天山及以北地区在早更新世也有冰川发育(张鸿义等,1985).冰期—间冰期气候的剧烈、频繁波动有利于沉积物的快速堆积(Zhang *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2004). Sun *et al.* (2004)以及孙继敏和朱日祥(2006)认为天山北麓 2.58 Ma 开始产生的西域砾岩是构造与气候共同作用的结果.因此,白杨河剖面 2.58 Ma 以来西域组砾岩应是准噶尔西北部山地构造隆升和全球气候变化的共同产物.

4.2 结论

通过对准噶尔西北部和什托洛盖盆地北缘白杨河剖面约 7.00 Ma 以来沉积学和磁化率各向异性的研究,主要取得了如下认识:

(1)白杨河剖面自下而上可划分为塔西河组、独山子组和西域组.剖面共识别出 8 种沉积岩相和 3 种沉积相:浅湖相、扇三角洲相和砾质辫状河相.扇三角洲相进一步划分出扇三角前缘和扇三角洲平原.古流向和砾石成分分析表明,白杨河剖面的物源主要来自于盆地北缘的准噶尔西北部山地.

(2)磁化率和磁组构参数值分别在 3.50 Ma 和 2.58 Ma 显著增大,对应于沉积相由湖相转变为扇三角洲相和由扇三角洲相转变为砾质辫状河相,其中 3.50 Ma 准噶尔西北部山地发生重要的构造隆升,这与青藏高原西北缘及天山南北麓记录的构造隆升事件发生的时间相同,2.58 Ma 则是构造隆升与气候变化共同作用的结果.

致谢:感谢审稿专家对本文的修改提出建设性意见;曹凯副教授及研究生易逸、金立涛参加了剖面的野外工作,在此谨表谢意;同时感谢朱宗敏老师和李海燕老师在实验过程中给予的帮助.

References

Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1993. Regional Geology of Xin-

jiang. Geological Publishing House, Beijing, 400—425 (in Chinese).

Buslov, M. M., Kokh, D. A., De Grave, J., 2008. Mesozoic-Cenozoic Tectonics and Geodynamics of Altai, Tien Shan, and Northern Kazakhstan, from Apatite Fission-Track Data. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)*, 49(9): 648—654 (862—870). doi: 10.1016/j. rgg. 2008. 01. 006

Buslov, M. M., Zykina, V. A., Novikov, L. S., et al., 1999. Cenozoic History of the Chuya Depression (Gorny Altai): Structure and Geodynamics. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)*, 40(12): 1720—1736 (1687—1701).

Charreau, J., Chen, Y., Gilder, S., et al., 2005. Magnetostratigraphy and Rock Magnetism of the Neogene Kuitunhe Section (Northwest China): Implication for Late Cenozoic Uplift of the Tianshan Mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 230(2005): 177—192. doi: 10.1016/j. epsl. 2004. 11. 002

Charreau, J., Gilder, S., Chen, Y., et al., 2006. Magnetostratigraphy of the Yaha Section, Tarim Basin (China): 11 Ma Acceleration in Erosion and Uplift of the Tianshan Mountains. *Geology*, 34(3): 181—184. doi: 10.1130/G22106.1

Charreau, J., Gumiaux, C., Avouac, J. P., et al., 2009. The Neogene Xiyu Formation, a Diachronous Prograding Gravel Wedge at Front of the Tianshan: Climatic and Tectonic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 287(3—4): 298—310. doi: 10.1016/j. epsl. 2009. 07. 035

Clark, M. K., Farley, K. A., Zheng, D., et al., 2010. Early Cenozoic Faulting of the Northern Tibetan Plateau Margin from Apatite (U-Th)/He Ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1): 78—88. doi: 10.1016/j. epsl. 2010. 04. 051

Collinson, D. W., 1986. Methods in Rock Magnetism. Allen and Unwin (Publishers) Ltd., London.

Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 2000. Active Tectonics of the Tianshan Mountains. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

Ding, Z. L., Xiong, S. F., Sun, J. M., et al., 1999. Paleomagnetism and Paleogeography of the ~7.0 Ma Eolian Loess-Red Clay Sequence at Lingtai, Loess Plateau, North-Central China and the Implications for Paleomonsoon Evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152(1): 49—66. doi: 10.1016/S0031—0182(99)00034—6

Dobretsov, N. L., Berzin, N. A., Buslov, M. M., et al., 1995.

- General Aspects of the Evolution of the Altai Region and the Interrelationships between Its Basement Pattern and the Neotectonic Structural Development, *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)*, 36(10): 5—19.
- Dobretsov, N. L., Buslov, M. M., Delvaux, D., et al., 1996. Meso- and Cenozoic Tectonics of the Central Asian Mountain Belt: Effect of Lithospheric Plate Interaction and Mantle Plume. *Intern. Geol. Rev.*, 38(5): 430—466. doi: 10.1080/00206819709465345
- Dunlop, D. J., Ozdemiro, O., 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dupont-Nivet, G., Butler, R. F., Yin, A., et al., 2002. Paleomagnetism Indicates no Neogene Rotation of the Qaidam Basin in Northern Tibet during Indo-Asian Collision. *Geology*, 30(3): 263—266. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0263:PINNRO>2.0.CO;2
- Fang, X. M., Li, J. J., Zhu, J. J., et al., 1997. Measured the Absolute Age and Divided the Cenozoic Strata of Linxia Basin in Gansu Province. *Chinese Science Bulletin*, 42(14): 1457—1471 (in Chinese).
- Fang, X. M., Garzzone, C., van der Voo, R., et al., 2003. Flexural Subsidence by 29 Ma on the NE Edge of Tibet from the Magnetostratigraphy of Linxia Basin, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 210(3—4): 545—560. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00142-0
- Fang, X. M., Yan, M. D., van der Voo, R., et al., 2005. Late Cenozoic Deformation and Uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from High-Resolution Magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China. *GSA Bulletin*, 117(9—10): 1208—1225. doi: 10.1130/B25727.1
- Fang, X. M., Zhang, W. L., Meng, Q. Q., et al., 2007. High-Resolution Magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala Section in the Eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and Its Implication on Tectonic Uplift of the NE Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1—2): 293—306. doi: 10.1016/j.epsl.2007.03.042
- Gilder, S., Chen, Y., Sen, S., 2001. Oligo-Miocene Magnetostratigraphy and Rock Magnetism of the Xishuigou section, Subei (Gansu Province, Western China) and Implications for Shallow Inclinations in Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 106(B12): 30505—30521. doi: 10.1029/2001JB000325
- Guo, Z. J., Zhang, Z. C., Wu, C. D., et al., 2006. The Mesozoic and Cenozoic Exhumation History of Tianshan and Comparative Studies to the Junggar and Altai Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Heermance, R. V., Chen, J., Burbank, D. W., et al., 2007. Chronology and Tectonic Controls of Late Tertiary Deposition in the Southwestern Tian Shan Foreland, NW China. *Basin Research*, 19(4): 599—632. doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00339.x
- Hendrix, M. S., Dumitru, T. A., Graham, S. A., 1994. Late Oligocene-Early Miocene Unroofing in the Chinese Tian Shan: An Early Effect of the India-Asia Collision. *Geology*, 22(6): 487—490. doi: 10.1130/0091-7613(1994)022<0487:LOEMUI>2.3.CO;2
- Hrouda, F., 1982. Magnetic Anisotropy of Rocks and Its Application to Geology and Geophysics. *Geophys. Surv.*, 5(1): 37—82. doi: 10.1007/BF01450244
- Huang, B. C., Piper, J. D. A., Peng, S. T., et al., 2006. Magnetostratigraphic Study of the Kuche Depression, Tarim Basin, and Cenozoic Uplift of the Tian Shan Range, Western China. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3—4): 346—364. doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.020
- Hu, Y., Xia, B., Guo, F., et al., 2012. Tectonic Evolution and Its Influence on Hydrocarbon Accumulation of Heshituologai Basin in Northwest Xinjiang. *Geology and Resources*, 21(4): 380—385 (in Chinese with English abstract).
- Jelinek, V., 1981. Characterization of the Magnetic Fabrics of Rocks. *Tectonophysics*, 79(3—4): 63—67. doi: 10.1016/0040-1951(81)90110-4
- Li, C. X., Dupont-Nivet, G., Guo, Z. J., 2011. Magnetostratigraphy of the Northern Tian Shan Foreland, Taxihe Section, China. *Basin Research*, 23(1): 101—117. doi: 10.1111/j.1365-2117.2010.00475.x
- Li, J. J., Fang, X. M., 1998. Research on the Uplift of the Qinghai-Xizang Plateau and Environment Changes. *Chinese Science Bulletin*, 43(15): 1569—1574 (in Chinese).
- Li, J. J., Fang, X. M., Pan, B. T., et al., 2001. Late Cenozoic Intensive Uplift of Qinghai-Xizang Plateau and Its Impacts on Environments in Surrounding Area. *Quaternary Sciences*, 21(5): 381—391 (in Chinese with English abstract).
- Lü, H. H., Li, Y. L., Liu, Y. M., et al., 2008. Sedimentary Environment Evolution since 8 Ma BP in the Taxihe Area, Xinjiang, Northwest China and Its Tectonic Significance. *Quaternary Sciences*, 28(2): 243—252 (in Chinese with English abstract).
- Ma, B. J., Zeng, W. G., Yu, F. S., et al., 2009. Tectonic

- Evolution and Hydrocarbon Potential in Heshituoluogai Basin in Northern Margin of Xinjiang. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(1): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Miall, A. D., 1984. Principles of Sedimentary Basin Analysis. Springer, New York, 688.
- Miall, A. D., 1996. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. Springer-Verlag, Berlin, 99—130.
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision. *Science*, 220: 419—426.
- Smit, J. H. W., Cloetingh, S. A. P. L., Burrov, E., et al., 2012. Interference of Lithospheric Flooding in Western Central Asia by Simultaneous Indian and Arabian Plate Indentation. *Tectonophysics*, 602(14): 176—193. doi: 10.1016/j.tecto.2012.10.032
- Soto, R., Larrasona, J. C., Arlegui, L. E., et al., 2009. Reliability of Magnetic Fabric of Weakly Deformed Mudrocks as a Palaeostress Indicator in Compressive Settings. *Journal of Structural Geology*, 31(5): 512—522. doi: 10.1016/j.jsg.2009.03.006
- Sun, D. H., Zhang, Y. B., Han, F., et al., 2011. Magnetostratigraphy and Paleoenvironmental Records for a Late Cenozoic Sedimentary Sequence from Lanzhou, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Global and Planetary Change*, 76(3): 106—116.
- Sun, J. M., Xu, Q. H., Huang, B. C., 2007. Late Cenozoic Magnetochronology and Paleoenvironmental Changes in the Northern Foreland Basin of the Tianshan Mountains. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978—2012), 112(B4). doi: 10.1029/2006JB004653
- Sun, J. M., Zhu, R. X., 2006. Cenozoic Deposits in the Northern Tianshan Mountains and Its Implications for Neotectonics and Environmental Changes. *Quaternary Sciences*, 26(1): 14—19 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. M., Zhu, R. X., An, Z. S., 2005. Tectonic Uplift in the Northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma Ago Inferred from Molasse Deposits along the Altyn Tagh Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3—4): 641—653. doi: 10.1016/j.epsl.2005.04.034
- Sun, J. M., Zhu, R. X., Bowler, J., 2004. Timing of the Tianshan Mountains Uplift Constrained by Magnetostratigraphic Analysis of Molasse Deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 239—253. doi: 10.1016/S0012-821X(04)00008-1
- Tang, Z. H., Huang, B. C., Dong, X. X., et al., 2012. Anisotropy of Magnetic Susceptibility of the Jingou River section: Implications for the Late Cenozoic Uplift of the Tian Shan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13: Q03022.
- Tapponnier, P., Molnar, P., 1979. Active Faulting and Cenozoic Tectonic of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions. *J. Geophys. Res.*, 84(B7): 3425—3459. doi: 10.1029/JB084iB07p03425
- Tarling, D. H., Hrouda, F., 1993. The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman and Hall, London, 217.
- Thompson, R., Oldfield, F., 1986. Environmental Magnetism. Allen and Unwin Press, London.
- Thouveny, N., de Beaulieu, J. L., Bonifay, E., 1994. Climate Variations in Europe over the Past 140 kyr Deduced from Rock Magnetism. *Nature*, 371: 503—506. doi: 10.1038/371503a0
- Wang, G. C., Cao, K., Zhang, K. X., et al., 2011. Spatio-Temporal Framework of Tectonic Uplift Stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic. *Science China Earth Sciences*, 54(1): 29—44. doi: 10.1007/s11430-010-4110-0
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Li, J. Y., et al., 1991. Tectonic Evolution of the Southern Margin of the Central Asian Complex Megasuture Belt. Beijing Science and Technology Press, Beijing, 151—155 (in Chinese).
- Xu, F. Y., Wang, L. B., 1994. Measurement of Anisotropy of Magnetic Susceptibility on Xiashu Loess and Its Implication to Sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(2): 94—100 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., 2010. Cenozoic Tectonic Evolution of Asia: A Preliminary Synthesis. *Tectonophysics*, 488(1—4): 293—325. doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.002
- Yu, Q. F., Zheng, M., 1992. Analysis of Magnetic Fabric in Rocks and Its Applications for Geosciences. Geological Publishing House, Beijing, 5—25 (in Chinese).
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292(5517): 686—693. doi: 10.1126/science.1059412
- Zhang, H. Y., 1985. The Quaternary Glaciations in the Tianshan Mountains. In: Xinjiang University, Bureau of Xinjiang Geology, Xinjiang Division of Chinese Academy of Sciences, et al., eds., Proceeding of the Quaternary Research in the Arid Xinjiang. People's Press of Xinjiang, Urumqi, 55—68 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Cao, K., et al., 2008. Cenozoic Sedimentary Records and Geochronological Constraints of Differential Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 51(11): 1658—1672. doi: 10.

- 1007/s11430-008-0132-2
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Chen, F. L., et al., 2007. Coupling between the Uplift of Qinghai-Tibet Plateau and Distribution of Basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 583–597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Ji, J. L., et al., 2010. Paleogene-Neogene Stratigraphic Realm and Sedimentary Sequence of the Qinghai-Tibet Plateau and Their Response to Uplift of the Plateau. *Science in China (Series D)*, 53(9): 1271–1294. doi:10.1007/s11430-010-4048-2
- Zhang, P. Z., Molnar, P., Downs, W. R., 2001. Increased Sedimentation Rates and Grain Sizes 2–4 Myr Ago due to the Influence of Climate Change on Erosion Rates. *Nature*, 410(6831): 891–897. doi:10.1038/35073504
- Zhang, P. Z., Zheng, D. W., Yin, G. M., et al., 2006. Discussion on Late Cenozoic Growth and Rise of Northeastern Margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Appel, E., Fang, X., et al., 2012. Paleoclimatic Implications of Magnetic Susceptibility in Late Pliocene-Quaternary Sediments from Deep Drilling Core SG-1 in the Western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 117(B6). doi:10.1029/2011JB008949
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2006. Rapid Exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan Thrust Fault from Apatite Fission-Track Thermochronology: Implications for Growth of the Northeastern Tibetan Plateau Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1): 198–208. doi:10.1016/j.epsl.2006.05.023
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wang, J. L., et al., 2003. Late Cenozoic Deformation Subsequence in Northeastern Margin of Tibet: Detrital AFT Records from Linxia Basin. *Science in China (Series D)*, 33(Suppl. 1): 190–198 (in Chinese).
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Rising Process of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and Its Mechanism. *Science in China (Series D)*, 26(4): 289–295 (in Chinese).
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. 天山活动构造. 北京: 地震出版社.
- 方小敏, 李吉均, 朱俊杰, 等, 1997. 甘肃临夏盆地新生代地层绝对年代测定与划分. *科学通报*, 42(14): 1457–1471.
- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 等, 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. *地质学报*, 80(1): 1–15.
- 胡杨, 夏斌, 郭峰, 等, 2012. 新疆和什托洛盖盆地构造演化特征及其对油气藏的影响. *地质与资源*, 21(4): 380–385.
- 李吉均, 方小敏, 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究. *科学通报*, 43(15): 1569–1574.
- 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等, 2001. 新生带晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. *第四纪研究*, 21(5): 381–391.
- 吕红华, 李有利, 刘运明, 等, 2008. 新疆塔西河地区 8 Ma 以来沉积环境演化及其构造意义. *第四纪研究*, 28(2): 243–252.
- 马宝军, 曾文光, 于福生, 等, 2009. 新疆北缘和什托洛盖盆地构造与含油气远景. *新疆石油地质*, 30(1): 13–16.
- 孙继敏, 朱日祥, 2006. 天山北麓新生代沉积及其新构造与古环境指示意义. *第四纪研究*, 26(1): 14–19.
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦铁, 等, 1991. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化. 北京: 北京科学技术出版社, 1–150.
- 许峰宇, 王力波, 1994. 磁化率各项异性在沉积学中的应用. *沉积学报*, 12(2): 94–100.
- 余钦范, 郑敏, 1992. 岩石磁组构分析及其在地学中的应用. 北京: 地质出版社, 5–25.
- 张鸿义, 1985. 北天山第四纪古冰川作用的研究. 见: 新疆大学, 新疆地质矿产局, 中国科学院新疆分院等编, 干旱区第四纪研究论文纪. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 55–68.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等, 2007. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(5): 583–597.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. *第四纪研究*, 26(1): 5–13.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等, 2003. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录. *中国科学(D辑)*, 33(增刊 1): 190–198.
- 钟大赉, 丁林, 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*, 26(4): 289–295.

附中文参考文献

新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 400–425.