

doi:10.3799/dqkx.2012.088

帕米尔东北缘新生代隆升活动： 来自奥依塔格剖面砾石统计的证据

廖林^{1,2}, 陈汉林^{1,2}, 程晓敢^{1,2}, 林秀斌^{1,2}, 赵学钦^{1,2}, 姚琪³, 周玉彬⁴, 白琰⁵

1. 浙江大学地球科学系, 浙江杭州 310027
2. 教育部含油气盆地构造研究中心, 浙江杭州 310027
3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029
4. 中石油西南油气田公司川西北气矿, 四川江油 621709
5. 延长油田股份有限公司, 陕西延安 717600

摘要: 砾岩相通常作为构造事件的标志, 对探讨造山带隆升过程有着重要的意义。选取位于帕米尔构造带东北缘的奥依塔格剖面开展砾石统计分析。新生代不同时期砾石的统计结果显示, 奥依塔格剖面砾石成分主要为火成岩和变质岩, 这与帕米尔造山带岩性相符。其中, 花岗岩砾石作为特征组分首次出现在上新统阿图什组底部。砾石主要为巨砾, 且以长短轴比值为1~2的近圆状为主; 砾石的磨圆度中等, 绝大部分为次磨圆一次棱角状; 分选中等—一差。结合砾石所处地层的沉积环境和热年代学记录, 认为帕米尔东北缘新生代可能存在3期构造隆升事件, 包括渐新一中新世克孜洛依组沉积早期、中新世中期(安居安组中—上段和帕卡布拉克组下段沉积时期)和上新世以来(阿图什组下段沉积以来)。

关键词: 帕米尔东北缘; 新生代; 隆升; 砾石统计; 奥依塔格; 沉积学; 构造。

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2012)04-0791-14

收稿日期: 2012-02-28

Cenozoic Uplift of the Northeastern Pamir: Evidence from the Gravel Counting Results of the Oyttag Section

LIAO Lin^{1,2}, CHEN Han-lin^{1,2}, CHENG Xiao-gan^{1,2}, LIN Xiu-bin^{1,2},
ZHAO Xue-qin^{1,2}, YAO Qi³, ZHOU Yu-bin⁴, BAI Yan⁵

1. Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
2. Structural Research Center of Oil and Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Hangzhou 310027, China
3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
4. Southwest Oil and Gas Field Company, CNPC, Jiangyou 621709, China
5. Yanchang Oil Field Co. Ltd., Yan'an 717600, China

Abstract: The study of gravel-facies, an important sedimentary indicator of tectonic event could facilitate the understanding of the evolution of the uplift in orogen. In this paper, the Cenozoic gravels in Oyttag section located in the piedmont of northeastern Pamir, has been chosen to conduct gravel counting. The results show that gravels in Cenozoic are mainly igneous and metamorphic, indicating that they came from Pamir area. As the first occurrence of new gravel types, the granite gravel emerges at the bottom of Atushi Formation of Pliocene. The gravels are mainly of giant-size, sub-rounded and sub-angular, moderated and middling to bad sorted, with a ratio of the length of maximum axis to the minimum axis ranging from 1 to 2. Combined with Cenozoic depositing environment and thermochronology records, following uplifting periods have been identified in northeastern Pamir as Late Oligocene to Early Miocene, Mid Miocene and since Early Pliocene.

Key words: northeastern Pamir; Cenozoic; uplift; gravel counting; Oyttag; sedimentology; tectonics.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40972138, 41072154).

作者简介: 廖林(1978—), 男, 工程师, 博士, 主要从事造山带与盆地构造分析、盆地动力学方面的研究. E-mail: geollin@zju.edu.cn

新生代以来,受印度板块与欧亚板块碰撞事件和持续汇聚作用的影响,中亚地区发生了强烈的陆内变形,地壳大规模缩短(Matte *et al.*, 1996; Wittinger *et al.*, 1996, 2004; Khan, 2003), 汇聚作用造成帕米尔向北仰冲至塔里木板块之上(张先康等, 2002; Negredo *et al.*, 2007), 使得昆仑山、天山和祁连山等古生代造山带复活(Molnar and Tapponnier, 1975, 1978), 同时也导致公格尔伸展断层的发育(Robinson *et al.*, 2004, 2007)和喀喇昆仑断裂大规模的右行走滑活动(Matte *et al.*, 1996; Murphy *et al.*, 2000; 周勇等, 2000; Lacassin *et al.*, 2004; 李海兵等, 2006). 与之毗邻的塔里木西南缘沉积了巨厚的新生代地层, 记录了帕米尔高原隆升的丰富信息.

前人对帕米尔东北缘新生代隆升活动的研究主要集中在构造变形(陈杰等, 1997; 肖安成等, 2000; 伍秀芳等, 2004; 陈汉林等, 2010)、磁性地层学(陈杰等, 2000, 2001)、热年代学(Arnaud, 1992; Arnaud *et al.*, 1993; Sobel and Dumitru, 1997; 王军, 1998; 王军等, 1999; 罗照华等, 2003; Lacassin *et al.*, 2004; 柯珊等, 2008)、地层岩性和沉积相(Sobel, 1995; Zheng *et al.*, 2000, 2006; 刘训, 2001; Jin *et al.*, 2003; 郑洪波等, 2009)等方面, 对反映构造事件的砾石沉积则研究较少. Burbank *et al.* (1988)认为可以将粗粒沉积物的出现作为构造活动的标志. Armstrong and Steven(1965)指出物源区来自冲断边界的砾岩相是构造事件的标志, 认为当冲断构造运动出现时, 前陆盆地中具有物源区的不同岩石类型的砂岩成分可以立即记录这种变化, 特别是由冲断带提供的沉积物中首次出现的特殊岩石组分代表造山带初始隆升(伊海生等, 2001). Heller *et al.* (1986, 1988)通过白垩纪 Green River 盆地砾岩对美国著名的 Sevier 造山带逆冲推覆事件进行了精确的厘定.

本文选取位于帕米尔构造带东北缘的奥依塔格剖面(图 1)开展砾石统计研究, 统计了新生界各地层单元中砾石的成分、砾径和磨圆程度等. 在此基础上, 对砾径分布进行了正态模拟, 得出了反映砾石搬运过程的相关统计量, 并结合地层沉积特征, 进一步讨论了砾石的沉积环境及其所代表的构造含义.

1 地质背景

帕米尔东北缘冲断带由一系列向南倾斜的推覆

构造组成(图 1), 以别列托开苏河—乌拉根一线为界, 可划分为以多排 E-W 向构造为特征的东西段和向北凸出呈弧形的东段(陈杰等, 1997; 沈军等, 2001; 廖林, 2010). 其中, 东段可进一步划分为西南部的西昆仑逆冲推覆体, 其表现为古生界—中生界沿高角度的逆冲断裂推覆到新近系和第四系之上; 东北部则由受乌泊尔断裂控制的深部隐伏冲断体系和浅部的第四纪背驮盆地构成(伍秀芳等, 2004; 陈汉林等, 2010). 本文所选取的奥依塔格剖面位于东段西南部的西昆仑逆冲推覆体前.

受盖孜河及其支流下切作用的影响, 下石炭统乌鲁阿特组至上新统阿图什组在奥依塔格剖面呈 NW-SE 向条带状均有出露, 向两侧延伸则被西域组砾岩角度不整合覆盖; 阿图什组沉积末期—西域组沉积前的构造运动导致地层倒转, 整体呈单斜; 多条次级断层将地层展布进一步复杂化(图 2).

本文选取位于克孜洛依组下段(Site1)、安居安组中段(Site2)、帕卡布拉克组下段(Site3)、阿图什组下段底部(Site4)、阿图什组下段下部(Site5)、阿图什组下段顶部(Site6)、乌苏群(Site7)和全新统冲洪积物(Site8) 8 个砾石统计点进行统计(图 3). 而齐姆根组、阿图什组上段和西域组的砾石层因为出露点的地理位置难以到达, 故未能对其进行统计.

2 地层岩性与沉积相

奥依塔格剖面前新生界主要出露了石炭系、侏罗系和白垩系. 其中, 石炭系下部为中基性灰绿色枕状玄武岩、杏仁状玄武岩、安山玄武岩及灰黑色蚀变辉长岩, 为大洋洋底火山喷发产物, 上部为灰褐色、黑色安山岩和肉红色角砾凝灰岩, 是岛弧火山喷溢—爆发活动的产物(Sobel, 1995; Sobel and Dumitru, 1997; Xiao *et al.*, 2001, 2002); 侏罗系下部为暗灰色粗—细砾岩、含砾粗砂岩, 灰绿色中—细砂岩、粉砂岩和黑色泥岩组合, 以含煤系为特征, 属冲积扇—辫状河三角洲—湖相沉积, 上部为褐紫色砾岩、岩屑砂岩与粉砂质泥岩组合, 属辫状河三角洲沉积; 白垩系下部为褐红色细砾岩、中—细砂岩和粉砂质泥岩组合, 属河流相沉积, 上部为灰白色灰岩、紫红色粉砂岩和粉砂质泥岩、灰绿色泥岩组合, 属海相—海陆过渡相沉积(廖林等, 2010).

剖面新生界自下而上出露了古新统阿尔塔什组、古新一始新统齐姆根组、始新统卡拉塔尔组和乌拉根组、始新一渐新统巴什布拉克组、渐新一中新统

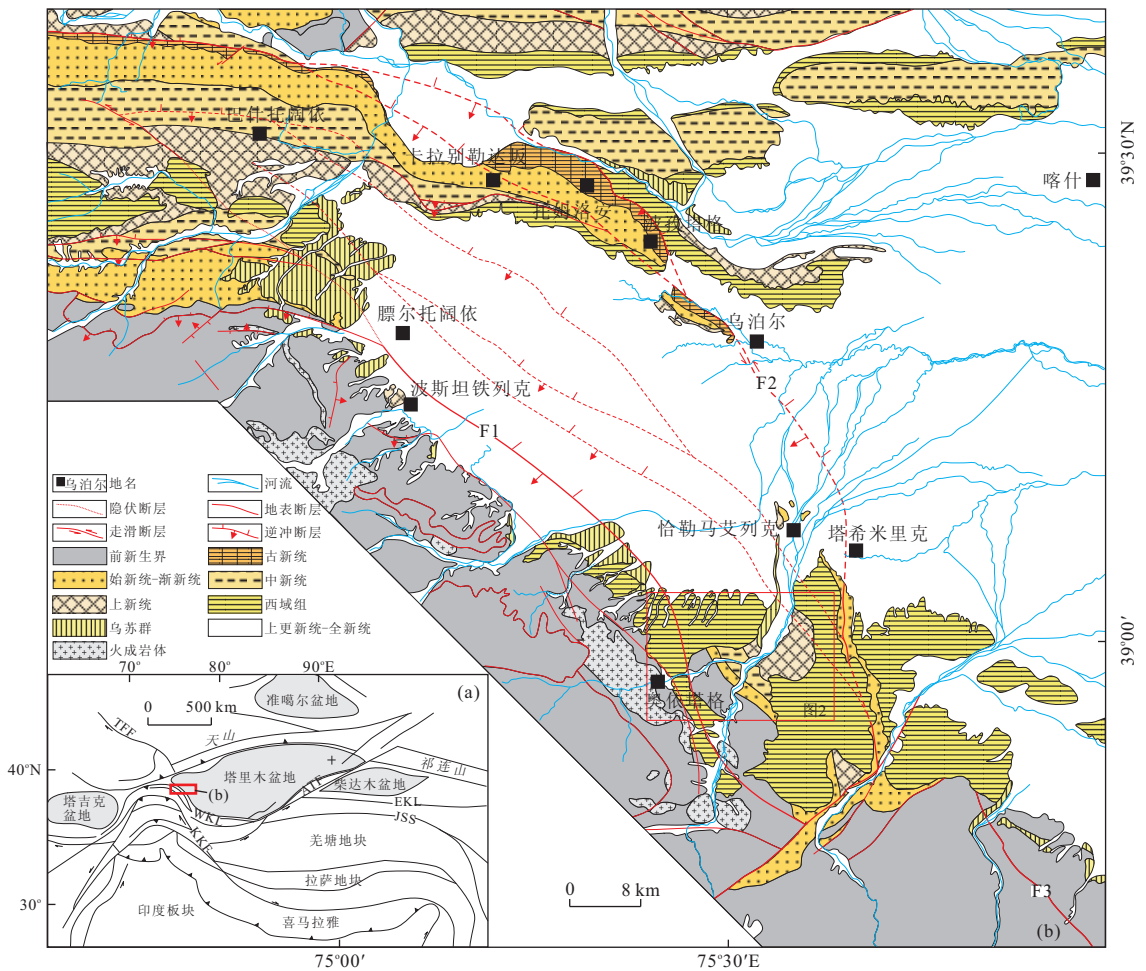


图 1 帕米尔东北缘地质简图(据 Sobel and Dumitru, 1997; Yin *et al.*, 2002; 廖林, 2010 修改)

Fig. 1 Simplified geological map in NE Pamir

F1. 帕米尔东北缘主冲断裂; F2. 乌泊尔断裂; F3. 库姆塔格断裂; JJS. 金沙缝合线; ATF. 阿尔金断裂; EKL. 东昆仑断裂; KKE. 喀喇昆仑断裂; WKL. 西昆仑北缘断裂; TTF. 塔拉斯费尔干纳断裂

克孜洛依组、中新统安居安组和帕卡布拉克组、上新统阿图什组以及更新统西域组和乌苏群、全新统冲洪积物(图 3)。其中,克孜洛依组平行不整合于下伏巴什布拉克组,西域组不整合于下伏各时期地层,乌苏群不整合于西域组,其余各组之间为整合接触(廖林, 2010)。

奥依塔格剖面新生界岩性组合具有明显的两分性特征:古新统阿尔塔什组至始新统乌拉根组属海相沉积;始新-渐新统巴什布拉克组为海-陆过渡相沉积;自渐新一中新统克孜洛依组开始为陆相沉积。在此,就渐新一中新统开始的陆相沉积地层做重点描述。

渐新一中新统克孜洛依组底部为灰褐色厚层状中砾岩夹砂岩透镜体,属冲积扇扇根亚相沉积;下部为灰绿色中-厚层状中砾岩与灰褐色中-厚层状含砾粗砂岩、中-细砂岩不等厚互层构成多个向上变

细的次级韵律,斜层理发育,属冲积扇扇中亚相沉积, Sobel(1995)根据砾石长轴排列方向测得古水流向为 NE 向;上部为灰褐色厚层状含钙质中-细砂岩、膏质中-粗砂岩与泥质粉砂岩、粉砂质泥岩不等厚互层组成多个向上变细的次级韵律,楔状交错层理、斜层理和平行层理发育,层面见虫迹、虫孔,属冲积扇扇缘亚相沉积。

中新统安居安组下部为褐红色块状细粒岩屑砂岩与粉砂岩、粉砂质泥岩不等厚互层,夹膏质中-粗粒砂岩、灰绿色细砾岩,斜层理、平行层理发育,属浅湖亚相沉积;中部为灰绿色厚层块状砾岩与褐红色中-厚层状中-细粒砂岩互层,夹钙质粉砂岩,属滨湖亚相沉积;上部为褐红色泥质细砂岩、粉砂质泥岩,属浅湖亚相沉积。

中新统帕卡布拉克组下部为褐灰色含砾粗砂岩、中-粗砂岩与褐红色薄层状粉砂岩、粉砂质泥岩

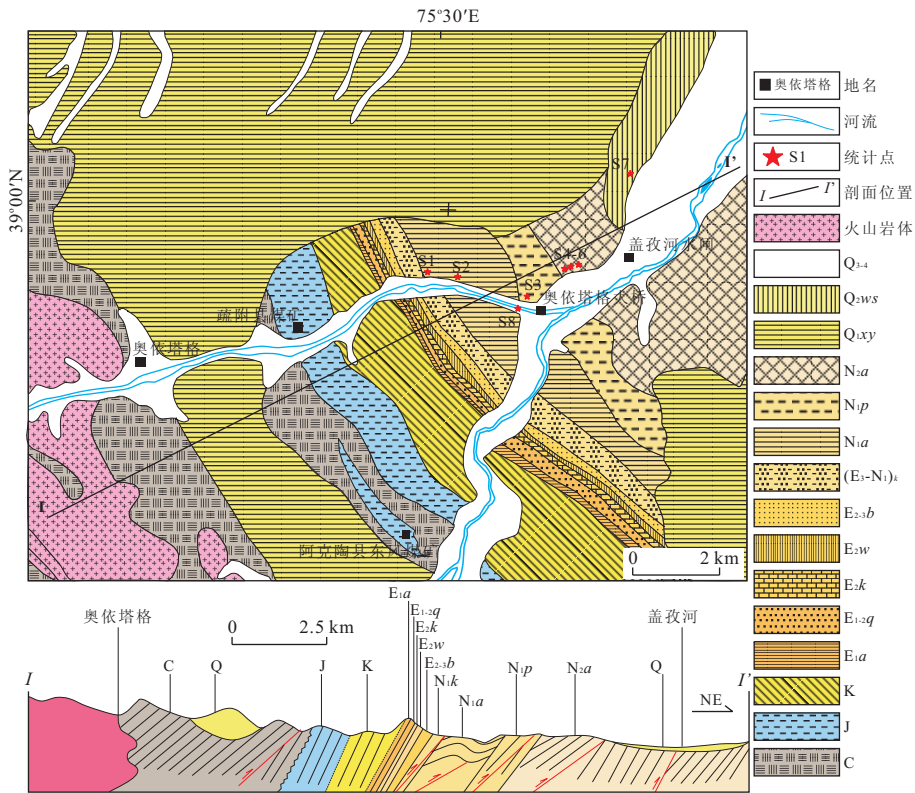


图 2 奥依塔格地区地质简图(据新疆大学,新疆地矿局塔里木盆地西南坳陷喀什凹陷南部石油地质综合研究总结报告,2001)

Fig. 2 Simplified geological map in Oyttag area

不等厚互层构成多个向上变细的次级韵律,斜层理发育,属扇三角洲平原亚相沉积;上部为灰绿色砾岩、含砾粗砂岩、中一粗粒砂岩、钙泥质粉砂岩和粉砂质泥岩不等厚互层组成多个向上变细的次级韵律,槽状交错层理、斜层理和平行层理发育,层面见波痕、虫迹和虫孔,砾岩多发育底冲刷,属扇三角洲前缘亚相沉积。

上新统阿图什组下段为灰绿色、灰褐色砾岩、中一厚层状含砾粗砂岩、中一粗粒砂岩、粉砂岩不等厚互层构成多个向上变细的次级韵律,间夹薄层状褐红色泥岩,斜层理、平行层理发育,属扇三角洲平原亚相沉积;上段为浅灰色巨块状含粗砾、中砾岩夹含砾砂岩透镜体,属冲积扇扇根亚相沉积(Sobel, 1995;廖林,2010)。

3 砾石统计结果与分析

3.1 统计方法

根据剖面中各地层单元出露的情况,野外顺层面选取范围为 1 m×1 m(图 3),对每块砾石的成分组成、磨圆度、圆度、长轴和短轴长度进行了统计。采

用前人(林秀斌等,2009)所介绍的方法和过程,利用卷尺测量(精度单位为 cm)。

根据 Mclane(1995)粒径分类标准,将砾石划分为巨砾(粒径>25.6 cm)、中砾(6.4 cm<粒径≤25.6 cm)、小砾(≤6.4 cm);根据圆度参数 X(长轴与短轴比值),将砾石分成 1≤X<2、2≤X<3 和 X≥3 共 3 类;而磨圆度则划分为磨圆、次磨圆、次棱角和棱角 4 个级别;砾石成分分为火成岩、燧石、变质岩、砂岩、白云岩、灰岩、石膏和泥岩 8 类。

3.2 统计结果

8 个点的统计结果见表 1 和图 4。

统计结果表明,剖面砾石成分以火成岩和变质岩为主,砂岩和燧石其次。花岗岩砾石作为特征组分第一次出现在 Site4(上新统阿图什组下段底部),并随剖面向上,含量也由 1%增至 23%,至 Site8 中才降为 5.9%;而白云岩砾石仅出现在 Site4;变质岩砾石含量分别在 Site1 和 Site4 出现高值后呈现为逐步下降的趋势;砂岩砾石含量则以 Site4 为转折点呈现为“V”字型的变化趋势(图 4a)。砾石的磨圆度中等,主要为次磨圆、次棱角,含有少量棱角状砾石。Site3 为砾石磨圆度变化趋势的拐点:次棱角状砾石含量以 Site3 为最低值,呈现为高一低一高的

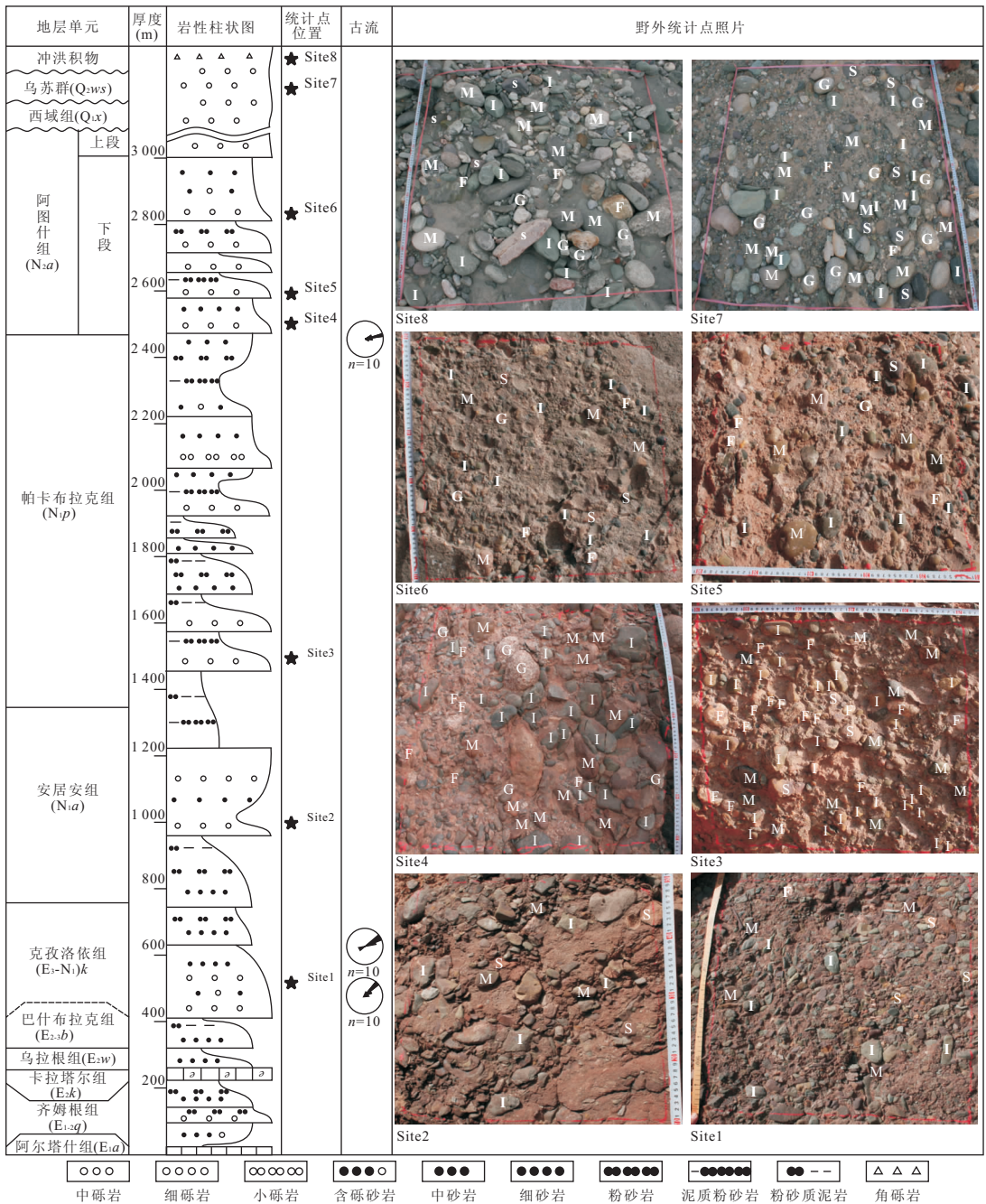


图 3 奥依塔格剖面综合柱状图及统计点野外照片(古流据 Sobel,1995)

Fig. 3 Stratigraphical column and photos of 8 sites in Oytag section

Site8. 现今河滩(38°58′52.8″N,75°31′16.5″E)杂乱堆积,未成岩,以巨砾和中砾为主,多呈近圆状—长条状,多呈次棱角状磨圆,分选中等;
 Site7. Q₂wq(39°01′06.3″N,75°33′33.4″E)杂乱堆积,未成岩,以巨砾和中砾为主,多呈近圆状—长条状,次棱角—次圆状磨圆,分选差;
 Site6. N₂a¹(38°59′20.1″N,75°32′11.4″E)以巨砾为主,多呈近圆状,次为长条状,次棱角—次圆状磨圆,分选中等,颗粒支撑,砂质填隙;
 Site5. N₂a¹(38°59′20.5″N,75°32′03.4″E)以巨砾为主,多呈近圆状,次为长条状,次圆—次棱角状磨圆,分选差,颗粒支撑,砂质填隙;
 Site4. N₂a¹(38°59′17.8″N,75°31′53.7″E)以巨砾为主,多呈次圆状,次为长条状,次棱角—次圆状磨圆,分选中等,颗粒支撑,砂质填隙;
 Site3. N₁p(38°59′05.2″N,75°30′50.7″E)以巨砾为主,多呈近圆状,次圆状磨圆,分选差,颗粒支撑,砂泥质填隙;
 Site2. N₁a(38°59′13.2″N,75°30′02.3″E)以巨砾为主,多呈近圆状,次为长条状,次棱角—棱角状磨圆,分选中等,颗粒支撑,砂泥质填隙;
 Site1. (E₃-N₁)_k(38°59′13.3″N,75°29′30.9″E)以巨砾为主,多呈近圆状,次棱角—棱角状磨圆,分选中等,颗粒支撑,砂泥质填隙

变化趋势;而次圆状砾石含量则相应呈现为低—高一低的变化(图 4b)。同时,统计结果还表明巨砾

砾石在各统计点占主体,中砾砾石在 Site7 和 Site8 含量才有所增高(图 4c)。近圆状砾石(1≤X<2)含

表 1 奥依塔格剖面不同层位砾石统计结果
Table 1 Gravel counting results of 8 sites in Oyttag section

统计点	Site1		Site2		Site3		Site4		Site5		Site6		Site7		Site8	
	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)	F	F(%)
岩性																
火成岩	213	51.1	121	75.2	133	44.3	148	48.7	167	67.6	134	49.1	72	26.7	53	20.7
燧石	10	2.4	2	1.2	136	45.3	59	19.4	46	18.3	80	29.3	18	6.7	52	20.3
变质岩	102	24.4	21	13.0	27	9.0	97	31.9	36	14.3	33	12.1	84	31.1	133	51.9
砂岩	92	22.1	17	10.6	2	0.7	0	0.0	2	0.8	26	9.5	96	35.5	12	4.7
白云岩	0	0.0	0	0.0	2	0.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
灰岩	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	3	1.2
石膏	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.4
泥岩	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.4
小计	417	100	161	100	300	100	304	100	251	100	273	100	270	100	256	100
磨圆度																
磨圆状	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	0.4	0	0.0	0	0.0	0	0.0
次磨圆状	18	4.3	26	16.1	222	74.0	176	57.9	122	48.6	93	34.0	98	36.3	38	14.8
次棱角状	304	72.9	93	57.8	59	19.7	115	37.8	112	44.6	173	63.4	156	57.8	193	75.4
棱角状	95	22.8	42	26.1	19	6.3	13	4.3	16	6.4	7	2.6	16	5.9	25	9.8
小计	417	100	161	100	300	100	304	100	251	100	273	100	270	100	256	100
圆度 X(砾石长短轴直径比)																
$1 \leq X < 2$	334	80.1	136	84.5	277	92.3	250	82.2	231	92.0	219	80.2	258	95.6	231	90.2
$2 \leq X < 3$	59	14.1	25	15.5	23	7.7	48	15.8	18	7.2	50	18.3	10	3.7	23	9.0
$3 \leq X$	24	5.8	0	0.0	0	0.0	6	2.0	2	0.8	4	1.5	2	0.7	2	7.8
小计	417	100	161	100	300	100	304	100	251	100	273	100	270	100	256	100
粒径(块)																
小砾	415	99.5	158	98.1	291	97.0	294	96.7	246	98.0	271	99.3	150	55.6	134	52.3
中砾	2	0.5	3	1.9	9	3.0	10	3.3	5	2.0	2	0.7	120	44.4	120	46.9
巨砾	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2	0.8
小计	417	100	161	100	300	100	304	100	251	100	273	100	270	100	256	100

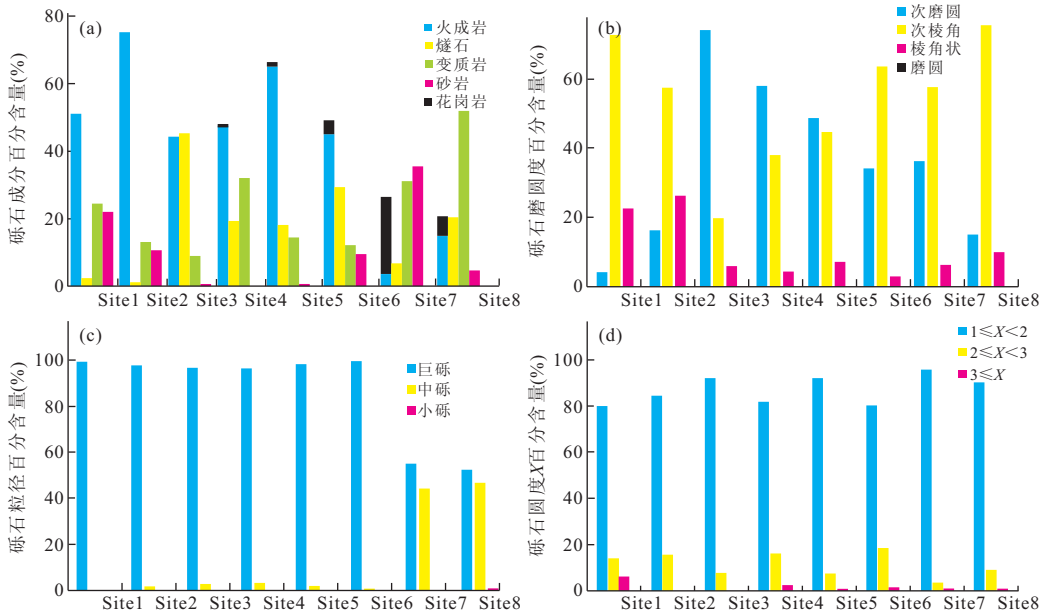


图 4 砾石统计结果

Fig. 4 Column of gravel counting data in Oyttag section

a. 砾石成分统计结果; b. 砾石磨圆统计结果; c. 砾石粒径统计结果; d. 砾石圆度统计结果

表 2 奥依塔格剖面砾石长轴长度 Φ 值分布统计量

Table 2 Distribution of length counting data (Φ) in Oytage section

	Site1	Site2	Site3	Site4	Site5	Site6	Site7	Site8
均值	-4.18	-4.52	-4.15	-4.32	-4.26	-4.18	-5.82	-6.00
标准方差	0.90	0.93	1.00	1.15	1.03	0.90	1.11	0.97
偏斜度	-0.24	0.56	0.81	0.79	0.19	-0.24	-0.37	0.24
峰度	1.11	0.78	0.60	1.06	0.60	0.52	0.70	0.75

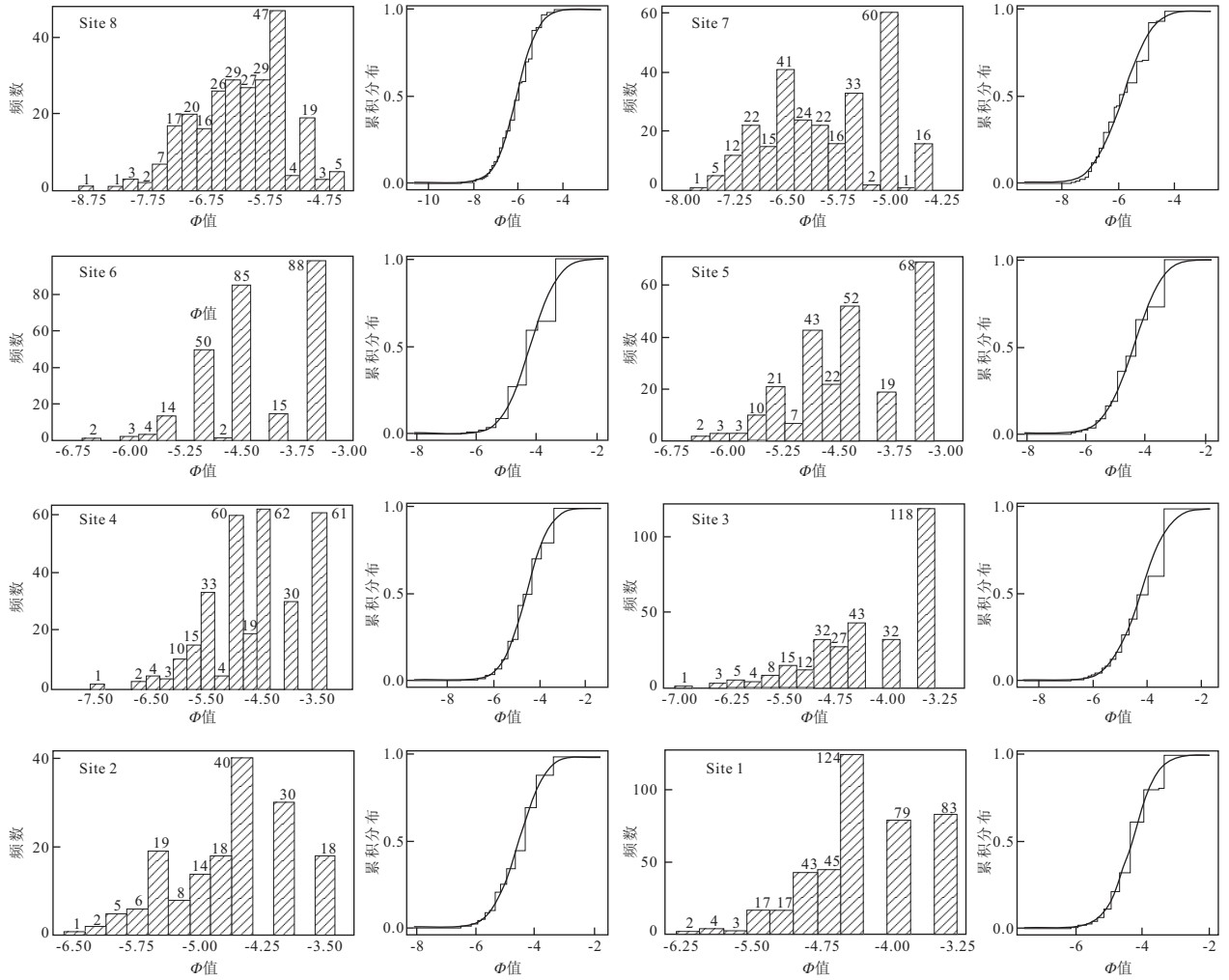


图 5 奥依塔格剖面 Φ 值转换后粒度分布方格图及累积概率分布及拟合曲线

Fig. 5 Histogram, cumulative frequency polygon and related fitting curve of Φ transformed grain size data in Oytage section

量较为稳定,长条状砾石($2 \leq X < 3$)则呈现高、低值的波段变化,极长条状砾石($X \geq 3$)随剖面向上含量逐步降低(图 4d).

沉积物的结构是一个广泛而复杂的问题,采用一些统计学方法揭示沉积物的搬运和沉积过程显得十分必要(林秀斌等,2009). 本文以 8 个点测量数据为基础,采用前人(林秀斌等,2009)建议的粒径数据 Φ 值概率分布统计方法进行了分析. 结果表明(表 2 和图 5),各统计点均值处于-6.00~-4.15 之间,标准

方差处于 0.90~1.15 之间,偏斜度处于-0.37~0.81 之间,峰度处于 0.52~1.11 之间. 根据 Folk and Ward(1957)划分的粒径 Φ 值概率密度分布曲线特征和砾石的分选程度标准,可以推导出: Site1 的砾石分选中等,分布曲线呈尖峰状,偏向粗粒; Site2 的砾石分选中等,分布曲线呈尖峰状,强烈偏向细粒; Site3 的砾石分选差,分布曲线呈非常宽峰状,强烈偏向粗粒; Site4 的砾石分选差,分布曲线呈强烈偏向细粒、中等峰度状; Site5 的砾石分选差,分布曲线呈偏向细

粒、非常宽峰状; Site6 的砾石分选中等, 分布曲线呈偏向粗粒、非常宽峰状; Site7 的砾石分选差, 分布曲线呈非常强烈偏向粗粒、宽峰状; Site8 的砾石分选中等, 分布曲线呈偏向细粒、宽峰状。

3.3 统计结果分析

奥依塔格剖面不同地层单元砾石的统计结果显示, 渐新一中新统克孜洛依组下段 (Site1) 砾石以火成岩为主, 变质岩和砂岩其次, 含少量燧石; 次棱角状砾石含量较高, 棱角状其次, 次磨圆状少量; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选中等, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈尖峰状, 偏向粗粒。

中新统安居安组中段 (Site2) 砾石以火成岩为主, 变质岩和砂岩次之, 燧石少量; 次棱角状砾石含量较高, 棱角状和次磨圆状其次; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状未见; 砾石分选中等, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈尖峰状, 强烈偏向细粒。

中新统帕卡布拉克组下段 (Site3) 砾石以火成岩和燧石为主, 变质岩其次, 砂岩少量; 次磨圆状砾石含量较高, 次棱角状和棱角状其次; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状未见; 砾石分选差, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈非常宽峰状, 强烈偏向粗粒。

上新统阿图什组下段底部 (Site4) 砾石以火成岩和变质岩为主, 燧石其次, 少量花岗岩砾石作为特征组分首次出现; 次圆状和次棱角状砾石含量较高, 棱角状其次; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选差, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈中等峰度状, 强烈偏向细粒。

上新统阿图什组下段下部 (Site5) 砾石以火成岩为主, 燧石和变质岩其次, 花岗岩和砂岩少量; 次圆状和次棱角状砾石含量较高, 棱角状其次; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选差, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈非常宽峰状, 偏向细粒。

上新统阿图什组下段顶部 (Site6) 砾石以火成岩和燧石为主, 变质岩和砂岩其次, 花岗岩少量; 次棱角状砾石含量较高, 次圆状其次; 巨砾砾石为主, 中砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选中等, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈非常宽峰状, 偏向粗粒。

中更新统乌苏群 (Site7) 砾石以变质岩、砂岩和

花岗岩为主, 火成岩和燧石其次; 次棱角状和次圆状砾石含量较高, 棱角状其次; 巨砾和中砾砾石为主; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选差, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈非常宽峰状, 强烈偏向粗粒。

全新统冲洪积物 (Site8) 砾石以变质岩为主, 火成岩和燧石其次, 花岗岩和砂岩少量, 另见灰岩、石膏和泥岩; 次棱角状砾石含量较高, 次圆状和棱角状其次; 巨砾和中砾砾石为主, 小砾少量; 近圆状砾石含量较高, 长条状次之, 极长条状少量; 砾石分选中等, 粒径 Φ 值概率密度分布曲线呈宽峰状, 偏向细粒。

4 砾石成因分析

目前, 学者们就山前砾石的成因机制尚未取得统一认识: 陈杰等 (2000, 2007) 提出其与造山带隆升运动有关; Zhang *et al.* (2001) 则认为与气候震荡所导致的剥蚀作用加强有关。

奥依塔格剖面砾石统计结果表明, 自下而上各层位砾石成分与帕米尔造山带内部出露的母岩相似。同时, 各点砾石成熟度中等, 反映其经历过水流搬运作用: Site1 偏粗粒的砾石结构属于扇三角洲扇中辫状水道沉积的特征; Site2 分选中等、偏细粒的砾石结构反映了水动力良好的湖岸砾石滩沉积特征; Site3 分选差、强烈偏向粗粒的结构属于扇三角洲前缘河道沉积; Site4—Site 6 表现为粗—细—粗的变换趋势, 宽峰、非常宽峰的结构反映经过较强的水动力短距离搬运后快速堆积的特征, 反映扇三角洲平原辫状水道的沉积环境; Site7—Site8 砾石杂乱堆积、未成岩和中砾占有较大比例的特征反映了第四纪以来的快速近源堆积。同时, 前人对奥依塔格剖面地层岩性、沉积相和化石分析后认为新生代没有出现强烈的气候震荡 (廖林, 2010), 本文也支持上述观点。因此, 笔者推测是帕米尔造山带新生代隆升剥蚀作用才导致砾石堆积在奥依塔格剖面。上新统阿图什组下段底部 (Site4) 花岗岩砾石的首次出现以及变质岩砾石含量突然变化可能代表了中新世末期—上新世早期突然增强的造山带隆升活动。

5 讨论

奥依塔格剖面新生代砾石主要发育在 4 个时

期:古新一始新世齐姆根组沉积时期、渐新一中新世克孜洛依组沉积早期、中新世中期(安居安组中一上段和帕卡布拉克组下段沉积时期)和上新世以来(阿图什组下段沉积以来). 大地构造位置、新生界 NE 向为主的古流向成果(Sobel, 1995)以及本文的砾石成分结果均表明,奥依塔格剖面中自下而上各层位砾石均来自帕米尔造山带,可以反映帕米尔造山带新生代的隆升剥蚀活动.

区域上,齐姆根组主要为一套灰绿色泥晶灰岩、含生屑泥质粉砂岩和膏质泥岩,富含双壳类、介形类和藻类化石,属潮坪沉积(廖林, 2010). 而在奥依塔格剖面及邻近的玛尔坎苏剖面则粗碎屑物较为发育,奥依塔格剖面该组砾石含量约占地层岩石组合的 25%~40%,且多以棱角一次棱角状产出,分选中一差,大的砾石多集中于层系界面呈条带状或透镜状产出. 对于该组砾石的成因及其所代表的含义,由于未作统计难以作出判断.

渐新一中新世克孜洛依组沉积时期,海水最终退出塔里木盆地西南缘,新生界由海相沉积转入了陆相沉积(廖林, 2010). 克孜洛依组主要发育一套灰褐色厚层块状中砾岩夹褐红色中粒岩屑砂岩、粗砂岩透镜体的冲积扇沉积,且不整合于下伏的巴什布拉克组之上. Site1 统计结果显示砾石成分主要为火成岩、变质岩,巨砾状砾石占砾石总量的 99.5%,偏粗粒的结构表明其属近源堆积. 结合其所处地层沉积环境,推测此时帕米尔东北缘可能存在一次构造隆升活动,导致盆地差异显著加强,山前粗碎屑物发育. 邻近地区的热年代学记录表明,帕米尔北缘断裂带约在 20 Ma 开始活动(Arnaud, 1992; Sobel and Dumitru, 1997),布伦口地区在 20~18 Ma 也存在岩浆活动(Arnaud, 1992),~23 Ma 塔什库尔干附近的苦子干岩体开始侵位(罗照华等, 2003; 柯珊等, 2008),~22~18 Ma 红其拉甫出现快速冷却剥蚀事件(曹凯等, 2009), 25~23 Ma 喀喇昆仑断裂开始由 SE 向 NW 扩展,使得帕米尔东北缘发生大规模右旋走滑(Lacassin *et al.*, 2004; 李海兵等, 2006), 库斯拉甫断裂也受其影响约在 20 Ma 开始活动(曹凯等, 2009). 这些证据说明此时帕米尔东北缘的构造隆升活动不只是局限于本文所讨论的奥依塔格剖面,还在区域上存在. 在帕米尔造山带周缘,阿尔金山北段磷灰石裂变径迹记录了~20 Ma 的隆升剥蚀事件(Sobel and Dumitru, 1997; Cowgill *et al.*, 2000; Yin *et al.*, 2002; 陈正乐等, 2006a); ~24 Ma 西天山察汗乌苏山开始隆升(陈正乐等, 2006b), 北

23.8 Ma 和~25 Ma 天山依连哈比尔尕山和博格达山隆升剥蚀(沈传波等, 2008), 库车盆地北缘和准葛尔盆地南缘也记录了此次活动(杜治利和王清晨, 2007). 这一系列隆升剥蚀事件可能反映了印度-欧亚大陆碰撞效应和印度板块持续向北的挤压作用.

中新世中期,滨浅湖相泥质粉砂岩、粉砂质泥岩成为安居安组和帕卡布拉克组下段的主要岩性组合(廖林, 2010),但发育在安居安组中部的灰绿色厚层状砾岩(Site2)和帕卡布拉克组下段的褐灰色块状砾岩(Site3)统计结果显示,其砾石成分主要为火成岩,多以近圆状巨砾产出. 结合所处地层为滨浅湖一扇三角洲平原沉积,推测此时帕米尔东北缘可能存在间歇性活动,导致细碎屑沉积物和粗碎屑沉积物交替出现. 塔什库尔干~13.7 Ma 的径迹记录也反映这一时期帕米尔造山带可能存在抬升剥蚀(Robinson *et al.*, 2007).

至中新世帕卡布拉克组沉积晚期一上新世阿图什组下段沉积时期,奥依塔格剖面地层出现了多套砾岩层,岩性组合也呈现为褐灰色块状砾岩与暗褐色含砾粗砂岩、中细粒砂岩及褐红色薄层粉砂岩、粉砂质泥岩不等厚互层组成多个向上变细的韵律,属于代表近源沉积的扇三角洲相(廖林, 2010). Site4 统计结果表明,变质岩砾石含量较前期明显增高;具有特征组标志的花岗岩砾石首次出现,且随剖面向上含量逐步增加;次圆状砾石含量减小,而次棱角状砾石逐步增加;砾石分选和分布曲线趋势也呈现由前期分选差、偏向细粒向分选中等、偏向粗粒发展. 处于棋北构造带的棋北 3 井中不稳定矿物含量也较前期加大,矿物呈现为棱角一次棱角状不规则的粗大颗粒(廖林, 2010; 雷刚林等, 2011). 这些沉积记录表明此时帕米尔造山带可能开始了较前期隆升规模更大的一次快速隆升剥蚀活动. ~4.8 Ma 邻近的公格尔山发生了快速冷却作用(Arnaud *et al.*, 1993; Ronbinson *et al.*, 2004, 2007), ~5 Ma 塔什库尔干地区开始隆升剥蚀(王军, 1998), 甜水海地体西部也存在脉动式隆升(王军, 1998), ~6.2 Ma 沿西昆仑北缘断裂月堂能代里雅地区发生快速冷却事件(黎敦朋等, 2007a, 2007b), 策勒南乌鲁克萨依河地区有 5.1~5.9 Ma 的剥蚀冷却记录(Wang *et al.*, 2003), 采自普鲁陡坡带主逆冲断层下盘的径迹记录反映次级推覆断裂~4.8 Ma 开始活动(万景林和王二七, 2002). 上述证据表明中新世末期一上新世早期是帕米尔造山带和塔里木叠合前陆盆地发育的重要时期,一方面随着天山、昆仑山向盆地方向

的强烈逆掩和山系急剧隆升,山前急剧沉降,前陆拗陷得到空前发展;另一方面,随着前陆地区构造负载和沉积负载的增加,前渊拗陷向前迁移和前缘隆起位置不变(廖林,2010)。

至阿图什组上段沉积以来,奥依塔格剖面发育了近源堆积的磨拉石建造,砾石成分中花岗岩含量增大,灰岩、石膏和泥岩等不稳定成分增加,中砾大小的砾石占据半数比例,分选差,强烈偏向粗粒、宽峰状,反映帕米尔造山带西段自阿图什组上段沉积以来剧烈抬升,大量的剥蚀物快速地近源堆积。帕米尔东北缘也集中出现了 3~2 Ma 的热年代学记录(Arnaud *et al.*, 1993; 王军, 1998; Ronbinson *et al.*, 2004, 2007),表明帕米尔造山带发生了快速隆升。同时,高原东构造带也在 3 Ma 开始隆升(丁林等, 1995),表明此时青藏高原的隆升生长已经全面展开。

6 结论

(1) 8 个点砾石统计结果表明,砾石成分主要为火成岩和变质岩,花岗岩砾石自 Site4 出现后,随剖面向上含量增加,变质岩砾石含量则由底部逐步降低后,在 Site4 再次增加;砾石的磨圆度中等,绝大部分为次磨圆、次棱角,磨圆状的砾石极少见;砾石主要呈巨砾状产出;长短轴长度比 1~2 的近圆状砾石含量较为稳定,而长短轴长度比 2~3 的长条状砾石则随剖面向上呈现出高一低波段变化,长短轴长度比大于 3 的极长条状砾石则随剖面向上含量逐渐减小;粒径数据 Φ 值概率分布均值范围 -6.00 ~ -4.15,标准方差范围 0.90 ~ 1.15,偏斜度范围 -0.37 ~ 0.81,峰度范围 0.52 ~ 1.11。

(2) 奥依塔格剖面各地层单元中的砾石由帕米尔东北缘构造活动所导致,尤其是花岗岩砾石和变质岩砾石含量在上新统阿图什组下段 Site4 的变化反映了造山带隆升剥蚀活动。

(3) 结合砾石所处地层的沉积环境和热年代学记录,对奥依塔格剖面新生代不同时期发育的砾石统计分析认为,帕米尔东北缘新生代可能存在 3 期构造隆升事件:渐新一中新世克孜洛依组沉积早期、中新世中期(安居安组中—上段和帕卡布拉克组下段沉积时期)和上新世以来(阿图什组下段沉积以来)。

致谢:感谢匿名评审专家对本文所提出的极富建设性意见。在野外工作中,本文得到了中石油塔里

木油田分公司王清华经理、杨海军院长、雷刚林和罗俊成主任的帮助。同时,在研究过程中得到了浙江大学肖安成教授、南京大学郑洪波教授的指导和帮助。澳大利亚西澳大学 Geoffery 博士共同参与野外工作,在此一并表示感谢。

References

- Armstrong, F. C., Steven, S. O., 1965. Tectonic development of Idaho-Wyoming thrust belt. *AAPG Bulletin*, 49(10): 1847—1866. doi:10.1306/A663386E-16C0-11D7-8645000102C1865D
- Arnaud, N. O., 1992. Rapport de la thermochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur feldspath potassique a la connaissance de la tectonique cenozoique d'Asie; etude des mecanismes d'accommodation de la collision continentale Contribution of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on potassic feldspar to the knowledge of Cenozoic tectonics in Asia; study of the accommodation mechanisms involved in continental collision (Dissertation). Universite Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, Clermont-Ferrand, France.
- Arnaud, N. O., Brunel, M., Cantagrel, J. M., et al., 1993. High cooling and denudation rates at Kongur Shan, eastern Pamir (Xinjiang, China) revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alkali feldspar thermochronology. *Tectonics*, 12(6): 1335—1346. doi:10.1029/93TC00767
- Burbank, D. W., Beck, R. A., Reynolds, R. G. H., et al., 1988. Thrusting and gravel progradation in foreland basins: a test of post-thrusting gravel dispersal. *Geology*, 16(12): 1143—1146. doi: 10.1130/0091-7613(1988)016<1143:TAGPIF>2.3.CO;2
- Cao, K., Wang, G. C., Liu, C., et al., 2009. Thermochronological evidence of the Cenozoic differential uplift processes of the West Kunlun and its adjacent area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(6): 895—906 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Qu, G. S., Hu, J., et al., 1997. Arcuate thrust tectonics and its contemporary seismicity in the eastern section of the external zone of the Pamir. *Seismology and Geology*, 19(4): 301—312 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Yin, J. H., Qu, G. S., et al., 2000. Timing, lower boundary, genesis, and deformation of Xiyu Formation around the western margins of the Tarim basin. *Seismology and Geology*, 22(Suppl. 1): 104—116 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Lu, Y. C., Ding, G. Y., 2001. Records of Late Cenozoic mountain building in western Tarim basin; mo-

- lasses, growth strata and growth unconformity. *Quaternary Sciences*, 21(6): 528—539 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Heermance, R. V., Burbank, D. W., et al., 2007. Magnetostratigraphy and its implications of the Xiyu conglomerate in the southwestern Chinese Tianshan foreland. *Quaternary Sciences*, 27(4): 576—587 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. L., Zhang, F. F., Cheng, X. G., et al., 2010. The deformation features and in the northeastern basin-range coupling structure Pamir tectonic belt. *Chinese Journal of Geology*, 45(1): 102—112 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Gong, H. L., Li, L., et al., 2006a. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh Mountains. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 91—102 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. L., Wan, J. L., Liu, J., et al., 2006b. Multi-Stage uplift and exhumation of the West Tianshan Mountain: evidence from the apatite fission-track dating. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(2): 97—106 (in Chinese with English abstract).
- Cowgill, E., Yin, A., Wang, X. F., et al., 2000. Is the north Altyn fault part of a strike-slip duplex along the Altyn Tagh fault system? *Geology*, 28(3): 255—258. doi: 10.1130/0091-7613(2000)
- Ding, L., Zhong, D. L., Pan, Y. S., et al., 1995. Fission track dating evidence on fast uplifting since Pliocene of the eastern Himalayan syntaxis. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1497—1500 (in Chinese with English abstract).
- Du, Z. L., Wang, Q. C., 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Tianshan region: insight from apatite fission track. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1081—1101 (in Chinese with English abstract).
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27(1): 3—26.
- Heller, P. L., Bowdler, S. S., Chambers, H. P., et al., 1986. Time of initial thrusting in the Sevier orogenic belt, Idaho-Wyoming and Utah. *Geology*, 14(5): 388—391. doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<388:TOITIT>2.0.CO;2
- Heller, P. L., Angevine, C. L., Winslow, N. S., 1988. Two-phase stratigraphic model of foreland-basin sequences. *Geology*, 16(6): 501—504. doi: 10.1130/0091-7613(1988)016<0501:TSPSMO>2.3.CO;2
- Jin, X. C., Wang, J., Chen, B. W., et al., 2003. Cenozoic depositional sequences in the piedmont of the West Kunlun and their paleogeographic and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(7): 755—765.
- Ke, S., Luo, Z. H., Mo, X. X., et al., 2008. The geochronology of Taxkorgan alkalic complex, Pamir syntax. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 315—324 (in Chinese with English abstract).
- Khan, P. K., 2003. Stress state, seismicity and subduction geometries of the descending lithosphere below the Hindukush and Pamir. *Gondwana Research*, 6(4): 867—877.
- Lacassin, R., Valli, F., Arnaud, N., et al., 2004. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakorum fault, Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 255—269.
- Lei, G. L., Liao, L., Shi, J., et al., 2011. Sedimentary records of uplifting in West Kunlun during Late Miocene-Early Pliocene: evidence from the heavy mineral assemblages of Well Qibei-3 in the southwestern Tarim. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1334—1342 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Valli, F., Xu, Z. Q., et al., 2006. Deformation and tectonic evolution of the Karakorum fault, western Tibet. *Geology in China*, 33(2): 239—255 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. P., Zhao, Y., Hu, J. M., et al., 2007a. Fission track thermochronologic constraints on plateau surface and geomorphic relief formation in the northwestern margin of the Tibetan plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 900—910 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. P., Zhao, Y., Hu, J. M., et al., 2007b. Zircon TIMS U-Pb dating of the Qitaidaban granite in the West Kunlun Mountains and its thermal evolution history. *Geology in China*, 34(6): 1013—1021 (in Chinese with English abstract).
- Liao, L., 2010. Cenozoic tectonic events and their sedimentary records in the West Kunlun (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Liao, L., Cheng, X. G., Wang, B. Q., et al., 2010. Reconstruction of Mesozoic sedimentary paleoenvironment in the southwestern Tarim basin, Northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1195—1207 (in Chinese with English abstract).
- Lin, X. B., Chen, H. L., Wyrwoll, K. H., et al., 2009. Uplift of the northeastern Tibetan plateau: evidences from the Xiaohonggou section in Tongxin, Ningxia. *Acta Geologica Sinica*, 83(4): 454—467 (in Chinese with English abstract).

- Liu, X., 2001. Sedimentary-tectonic evolutionary history of the Tianshan to West Kunlun area in West China: the sedimentary-tectonic evolution of the terranes in the corridor of the Xinjiang geotranssect and its adjacent areas. *Journal of Palaeogeography*, 3(3): 21—31 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. H., Mo, X. X., Ke, S., 2003. Ages of Taxkorgan alkaline intrusive complex and their geological implications. *Xinjiang Geology*, 21(1): 46—50 (in Chinese with English abstract).
- Matte, P., Tapponnier, P., Arnaud, N., et al., 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3—4): 311—330. doi:10.1016/0012-821X(96)00086-6
- McLane, M., 1995. Sedimentology. Oxford University Press, New York, 12—46.
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419—426. doi:10.1126/science.189.4201.419
- Molnar, P., Tapponnier, P., 1978. Active tectonics of Tibet. *Journal of Geophysical Research*, 83(B11): 5361—5375. doi:10.1029/JB083iB11p05361
- Murphy, M. A., Yin, A., Kapp, P., et al., 2000. Southward propagation of the Karakoram fault system, Southwest Tibet: timing and magnitude of slip. *Geology*, 28(5): 451—454. doi:10.1130/0091-7613(2000)28<451:SPOTKF>2.0.CO;2
- Negredo, A. M., Replumaz, A., Villaseñor, A., et al., 2007. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir-Hindu Kush region. *Earth and Planetary Science Letters*, 259(1—2): 212—225. doi:10.1016/j.epsl.2007.04.043
- Robinson, A. C., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2004. Tectonic evolution of the northeastern Pamir: constraints from the northern portion of the Cenozoic Kongur Shan extensional system, western China. *GSA Bulletin*, 116(7—8): 953—973. doi:10.1130/B25375.1
- Robinson, A. C., Yin, A., Manning, C. E., et al., 2007. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen. *GSA Bulletin*, 119(7—8): 882—896. doi:10.1130/B25981.1
- Sobel, E., 1995. Basin analysis and apatite fission-track thermochronology of the Jurassic-Paleogene southwest Tarim basin, northwest China (Dissertation). Stanford University, California.
- Sobel, E. R., Dumitru, T. A., 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3): 5043—5063. doi:10.1029/96JB03267
- Shen, C. B., Mei, L. F., Zhang, S. W., et al., 2008. Fission-track dating evidence on space-time difference of Mesozoic-Cenozoic uplift of the Yilianhabierga Mountain and Bogeda Mountain. *J. Mineral Petrol.*, 28(2): 63—70 (in Chinese with English abstract).
- Shen, J., Wang, Y. P., Zhao, R. B., et al., 2001. Propagation of Cenozoic arcuate structures in northeast Pamir and northwest Tarim basin. *Seismology and Geology*, 23(3): 381—389 (in Chinese with English abstract).
- Wan, J. L., Wang, E. Q., 2002. FT evidence of West Kunlun uplift in Pulu. *Nuclear Techniques*, 25(7): 565—567 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., 1998. Uplift of the Karibasheng and Kuzigan granite in the West Kunlun Mountains—evidence from apatite fission track analysis. *Geology Review*, 44(4): 435—442 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Jin, X. C., Ren, L. D., et al., 1999. Apatite fission track study of Cenozoic deposits of the Keliyang section, West Kunlun. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(Suppl.): 159—164 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Wan, J. L., Liu, J. Q., 2003. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: constraints on timing of uplift of northern margin of the Tibetan plateau. *Journal of Geophysical Research*, 108(2401): 1—13. doi:10.1029/2002JB001877
- Wittlinger, G., Masson, F., Poupinet, G., et al., 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 139(1—2): 263—279.
- Wittlinger, G., Vergne, J., Tapponnier, P., et al., 2004. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 221(1—4): 117—130. doi:10.1016/S0012-821X(03)00723-4
- Wu, X. F., Liu, S., Wang, X., et al., 2004. Analysis on structural sections in the Cenozoic Pamir-western Kunlun foreland fold-and-thrust belt. *Chinese Journal of Geology*, 39(2): 260—271 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, A. C., Yang, S. F., Chen, H. L., et al., 2000. Structural characteristics of thrust system in the front of the West Kunlun Mountains. *Earth Science Frontiers*, 7(Suppl. 2): 128—136 (in Chinese with English abstract).

- Xiao, W. J., Windley, B. F., Fang, A. M., et al., 2001. Palaeozoic-Early Mesozoic accretionary tectonics of the western Kunlun range, NW China. *Gondwana Research*, 4(4): 826-827.
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Chen, H. L., et al., 2002. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China; implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan plateau. *Geology*, 30(4): 295-298. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0295:CTSAAI>2.0.CO;2
- Yi, H. S., Wang, C. S., Li, Y. L., et al., 2001. Sedimentary response to tectonic events; reconstructed spatio-temporal scale of the Indo-Asian continental collision and Qinghai-Xizang plateau uplift. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(2): 1-15 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Rumelhart, P. E., Butler, R., et al., 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *GSA Bulletin*, 114(10): 1257-1295. doi: 10.1130/0016-7606(2002)114<1257:THOTAT>2.0.CO;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): 861-897.
- Zhang, X. K., Zhao, J. R., Zhang, C. K., et al., 2002. Crustal structure at the northeast side of the Pamirs. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(5): 665-671 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. B., Powell, C. M., An, Z. S., et al., 2000. Pliocene uplift of the northern Tibetan plateau. *Geology*, 28(8): 715-718. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<715:PUOTNT>2.0.CO;2
- Zheng, H. B., Huang, X. T., Butcher, K., 2006. Lithostratigraphy, petrography and facies analysis of the Late Cenozoic sediments in the foreland basin of the West Kunlun. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 214(1): 61-78. doi: 10.1016/j.palaeo.2006.06.015
- Zheng, H. B., Jia, J. T., Wang, K., 2009. Cenozoic sedimentation in the southern Tarim basin: implications for the uplift of northern Tibet and evolution of the Taklimakan desert. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 154-161 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Xu, R. H., Yan, Y. H., et al., 2000. Characteristics of magnetic fabrics of the Karakoram fault belt and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 134-144 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹凯, 王国灿, 刘超, 等, 2009. 西昆仑及邻区新生代差异升降的热年代学证据. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(6): 895-906.
- 陈杰, 曲国胜, 胡军, 等, 1997. 帕米尔北缘弧形推覆构造带东段的基本特征与现代地震活动. *地震地质*, 19(4): 301-312.
- 陈杰, 尹金辉, 曲国胜, 等, 2000. 塔里木盆地西缘西域组的底界、时代、成因与变形过程的初步研究. *地震地质*, 22(增刊1): 104-116.
- 陈杰, 卢演涛, 丁国瑜, 2001. 塔里木西缘晚新生代造山过程的记录——磨拉石建造及生长地层和生长不整合. *第四纪研究*, 21(6): 528-539.
- 陈杰, Heermance, R. V., Burbank, D. W., 等, 2007. 中国西南天山西域砾岩的磁性地层年代与地质意义. *第四纪研究*, 27(4): 576-587.
- 陈汉林, 张芬芬, 程晓敢, 等, 2010. 帕米尔东北缘地区构造变形特征与盆地结构. *地质科学*, 45(1): 102-112.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 等, 2006a. 阿尔金山脉新生代隆升一剥露过程. *地学前缘*, 13(4): 91-102.
- 陈正乐, 万景林, 刘健, 等, 2006b. 西天山山脉多期次隆升一剥露的裂变径迹证据. *地球学报*, 27(2): 97-106
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等, 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497-1500.
- 杜治利, 王清晨, 2007. 中新世天山地区隆升历史的裂变径迹证据. *地质学报*, 81(8): 1081-1101.
- 柯珊, 罗照华, 莫宣学, 等, 2008. 帕米尔构造结塔什库尔干碱性杂岩同位素年代学研究. *岩石学报*, 24(2): 315-324.
- 雷刚林, 廖林, 师俊, 等, 2011. 西昆仑中新世晚期一上新世早期隆升活动的沉积记录: 来自塔西南棋北3井沉积物重矿物的证据. *地质学报*, 85(8): 1334-1342.
- 李海兵, Valli, F., 许志琴, 等, 2006. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化. *中国地质*, 33(2): 239-255.
- 黎敦明, 赵越, 胡健民, 等, 2007a. 青藏高原西北缘高原面与陡坡地貌形成过程的裂变径迹热年代学约束. *岩石学报*, 23(5): 900-910.
- 黎敦明, 赵越, 胡健民, 等, 2007b. 西昆仑山奇台达坂花岗岩锆石 TIMSU-Pb 测年及热演化历史分析. *中国地质*, 34(6): 1013-1021.
- 廖林, 2010. 西昆仑新生代构造事件及其沉积响应(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 廖林, 程晓敢, 王步清, 等, 2010. 塔里木盆地西南缘中生代沉积古环境恢复. *地质学报*, 84(8): 1195-1207.
- 林秀斌, 陈汉林, Wyrwoll, K. H., 等, 2009. 青藏高原东北部隆升: 来自宁夏同心小洪沟剖面的证据. *地质学报*, 83(4): 454-467.

- 刘训, 2001. 天山—西昆仑地区沉积—构造演化史——新疆地学断面走廊域及邻区不同地体的沉积—构造演化. 古地理学报, 3(3): 21—31.
- 罗照华, 莫宣学, 柯珊, 2003. 塔什库尔干碱性杂岩体形成时代及其地质意义. 新疆地质, 21(1): 46—50.
- 沈传波, 梅廉夫, 张士万, 等, 2008. 依连哈比尔尕山和博格达山新生代隆升的时空分异: 裂变径迹热年代学的证据. 矿物岩石, 28(2): 63—70.
- 沈军, 汪一鹏, 赵瑞斌, 等, 2001. 帕米尔东北缘及塔里木盆地西北部弧形构造的扩展特征. 地震地质, 23(3): 381—389.
- 万景林, 王二七, 2002. 西昆仑北部山前普鲁地区山体抬升的裂变径迹研究. 核技术, 25(7): 565—567.
- 王军, 1998. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升——来自磷灰石裂变径迹分析的证据. 地质论评, 44(4): 435—442.
- 王军, 金小赤, 任留东, 等, 1999. 西昆仑北坡克里阳剖面新生代沉积的磷灰石裂变径迹研究. 地球学报, 20(增刊): 159—164.
- 伍秀芳, 刘胜, 汪新, 等, 2004. 帕米尔—西昆仑北麓新生代前陆褶皱冲断带构造剖面分析. 地质科学, 39(2): 260—271.
- 肖安成, 杨树锋, 陈汉林, 等, 2000. 西昆仑山前冲断系的结构特征. 地学前缘, 7(增刊 2): 128—136.
- 伊海生, 王成善, 李亚林, 等, 2001. 构造事件的沉积响应——建立青藏高原大陆碰撞、隆升过程时空坐标的设想和方法. 沉积与特提斯地质, 21(2): 1—15.
- 张先康, 赵金仁, 张成科, 等, 2002. 帕米尔东北侧地壳结构研究. 地球物理学报, 45(5): 665—671.
- 郑洪波, 贾军涛, 王可, 2009. 塔里木盆地南缘新生代沉积: 对青藏高原北缘隆升和塔克拉玛干沙漠演化的指示. 地学前缘, 16(6): 154—161.
- 周勇, 许荣华, 阎月华, 等, 2000. 喀喇昆仑断裂带磁组构特征及其构造意义. 岩石学报, 16(1): 134—144.