

甘肃金塔南山河流阶地褶皱变形分析

温振玲, 胡小飞, 潘保田, 卢耀洋, 曹喜林, 张建

兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州, 730000

内容提要: 金塔南山的抬升变形主要受到青藏高原向北推挤的影响,其构造活动的几何学和运动学特征包含了高原北缘扩展的重要信息。金塔南山山顶普遍覆盖一层砾石,砾石层胶结弱,砾石磨圆度、分选性均较好,岩性组成以砂岩、石英砂岩和硅质砂岩为主。砾石层顶面连续,区域上与黑河第二级阶地(T_2)对应。根据其组成和展布特征,笔者认为金塔南山地貌面与黑河第二级阶地为同一时期的产物。笔者对展布于金塔南山上及其周边的阶地高程进行了差分GPS测量,并对基岩地层产状进行了测量,结果显示阶地面发生了明显的褶皱变形。通过阶地面变形特征和下伏岩层产状分析,得到金塔南山褶皱主要以翼旋转的方式活动,形成了前翼陡倾而后翼宽缓且核部平坦的几何特征。依据 T_2 阶地面的变形特征,初步建立了金塔南山下伏铲式逆冲断裂相关褶皱的几何学模型。根据几何学关系计算得到断裂上升盘自黑河第二级阶地形成以来产生了约200 m的垂直抬升量和143~190 m的水平缩短量,中更新世以来断裂的平均滑动速率为 1.18 ± 0.16 mm/a。由于深部断裂的逆冲作用,金塔南山主要以背斜方式发生抬升变形,断裂可延伸到地表16 km以下。通过对比分析金塔南山地区的构造,笔者认为褶皱的形成阿拉善地块与柴达木—祁连块体相互挤压下金塔南山北缘断裂活动的结果。金塔南山在中更新世开始的抬升反映了青藏高原东北部扩展的最新过程。

关键词: 金塔南山; 河流阶地变形; 铲式逆冲断裂相关褶皱; 几何学模型

印度板块与欧亚板块在始新世初期碰撞之后,随着印度板块持续向欧亚板块方向俯冲导致地壳增厚形成青藏高原,高原的不断隆升与生长持续改变着欧亚大陆的构造与地貌格局(Harrison et al., 1992; Molnar et al., 1993; Tapponnier et al., 2001; Molnar, 2005),同时也影响着高原及其周边的气候、环境与层状地貌的演化(An Zhisheng et al., 2001; 李吉均, 2013; 潘保田等, 2004; 潘保田等, 1995; 施雅风等, 1999)。因此对青藏高原形成与扩展过程及机制的研究一直是地学界的研究热点之一(Burbank et al., 2003; Capitanio et al., 2010; Li Jijun et al., 2014; Molnar et al., 2007; Royden et al., 2008; Wang Chengshan et al., 2014; Yin An et al., 2002, 2008)。金塔南山位于青藏高原东北缘外围(吴功建, 1998; 张进等, 2007),受到高原向北东挤压扩展的影响,是新构造活动较强烈的地区之一(Zhang Peizhen et al., 2007; Zheng Wenjun et al., 2013b, 2013c; 何文贵等, 2012)。同时,金塔南山及其周边的活动断裂和沉积盆地也为青藏高原

向北东扩展的研究提供了良好的素材(Hetzel et al., 2004; 何文贵等, 2012; 王金荣等, 2002)。另外,金塔南山位于祁连构造带与阿拉善地块连接部位(王金荣等, 2002),也是研究祁连构造带与阿拉善块体相互作用过程、动力及活动构造的最佳地区之一(Hetzel, 2013)。地震剖面显示金塔南山下伏断裂为祁连山与阿拉善地块的边界,逆冲断裂深度可达30 km,可能延伸到了下地壳(Gao Rui et al., 2001)。Zheng Wenjun等(2013c)和Hetzel等(2004; 2013)的研究认为金塔南山的抬升要晚于其南部的榆木山和祁连山,其抬升变形是高原不断向北东扩展挤压所致。目前对该区域的动力学机制研究还较缺乏,而其构造几何特征和活动速率是其中重要的研究基础。

河流阶地可以作为下伏构造作用在地表产生的一个近乎等时的地貌应变标志,能够灵敏地记录流域内的构造活动,是研究活动构造较好的载体(Erkens et al., 2009; Giano and Giannandrea, 2014; Li Tao et al., 2013; Litchfield et al., 2010; Pan

注:本文为国家自然科学基金重大研究计划——重点支持项目(编号91125008);国家自然科学基金项目(编号41471009)的成果。

收稿日期:2014-12-24;改回日期:2015-06-19。责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2015.05.006

作者简介:温振玲,女,1989年生。博士研究生。主要从事新构造、河流阶地变形研究。Email: wenzhl12@lzu.edu.cn。

Baotian et al., 2013; Scharer et al., 2006; Thompson et al., 2002; Viveen et al., 2012; Wilson et al., 2009)。本研究,笔者通过对金塔南山及周边河流阶地变形的系统研究,对金塔南山构造变形的几何学特征及变形速率进行分析,为深入理解阿拉善地块与柴达木—祁连块体的挤压作用提供重要的地貌证据。

1 研究区概况

青藏高原东北部主要分布系列走滑和逆冲断裂。研究区附近主要发育的大型断裂带有海原断裂带、祁连山北缘断裂带和阿尔金断裂带等(图1)。海原断裂带和阿尔金断裂带均主要表现为左旋走滑的特征,而祁连山北缘断裂带主要表现为挤压逆冲的特征(陈柏林和刘建生, 2009; 葛肖虹等, 1998; 李海兵等, 2006; 冉勇康和邓起东, 1998; 郑文俊等, 2009)。其中阿尔金断裂带左旋走滑过程中形成的一系列逆冲断裂和正断裂制约着青藏高原北部的生长和隆升(李海兵等, 2006),其向东延伸与金塔南山一带断裂相连,在宽滩山西端向东转换为逆冲断裂为主(陈文彬和徐锡伟, 2006; 崔军文等, 2002; 邱爱美和李百祥, 2011; 张进等, 2007)。

金塔南山位于甘肃金塔县以南酒泉市以北,北西西—南东东走向,呈东高西低、南缓北陡形态。流经该区域的较大型河流有黑河和北大河,其中黑河为金塔南山的东部边界,北大河将金塔南山分为东西两段。金塔南山的最高海拔为1480 m,最低海拔为1300 m,平均海拔为1390 m;与南侧河西走廊和北侧金塔盆地的平均高差分别是50 m和150 m;研究区年平均降水量为83.8 mm(张百祖, 2009)。

金塔南山及周边出露的地层主要有白垩系砂岩和第四系冲洪积层(图2)。从大地构造上来看,金塔南山及周边地区位于北祁连早古生代造山带与阿拉善地块的交界处,是一个褶皱—逆冲山体(Hetzel, 2013; Seong et al., 2011; 董治平等, 2007)。区域内发育两条主要断裂,一条为金塔南山北缘断裂(何文贵等, 2012),另一条为合黎山南缘断裂(Zheng Wenjun et al., 2013c)(图2)。其中金塔南山北缘断裂位于金塔南山北缘,属北祁连造山带的北边缘地带,是青藏高原向北扩展的北边界断裂(Gao Rui et al., 1999, 2001; Xiao Qibin et al., 2012; 李廷栋, 1995; 张进等, 2007),断裂主体呈现高角度逆冲特征(何文贵等, 2012; 王金荣等, 2002)。断裂形成于新元古代中期—早古生代早

期,中生代曾发生了褶皱构造作用(王金荣等, 2002),在晚第四纪以来活动较强(何文贵等, 2012)。合黎山南缘断裂位于河西走廊中段北部,是一条晚第四纪以来活动较强且无走滑特征表现的山前高角度逆冲断裂,为河西走廊盆地北侧的控盆断裂(Zheng Wenjun et al., 2013c; 郑文俊, 2009)。

2 地貌面与河流阶地

2.1 金塔南山地貌面

金塔南山地貌面(图3中黑色虚线以北)连续,地貌面表现为由河流相砾石层构成的基座河流阶地(图4)。基座主要为白垩纪砂岩和前震旦纪地层。金塔南山顶面上的砾石层(图4 b—e)部分具有弱胶结的性质,砾石具定向排列特征。砾石磨圆度较好,分选较好,砾石平均砾径为4~5 cm。砾石岩性组成较复杂,主要以砂岩、硅质岩、变质岩为主。其中裸露于地表的砾石经风化作用具有沙漠漆及风棱石特征。砾石层厚度在1~5 m之间,在大墩门水电站附近最薄,向南逐渐增厚。这些特征显示,金塔南山砾石层为较大型河流所沉积。该地貌面向东延续至黑河西岸,在黑河附近表现为黑河河流阶地。

2.2 黑河河流阶地

根据野外调查发现红山村—河西村共发育有四级河流阶地(图3黑色虚线以南)且均为基座阶地。第一级阶地(T_1)呈条带状分布于黑河西岸;第二级阶地(T_2)分布范围最广,呈北西—南东分布于黑河西岸包围着 T_3 和 T_4 。第三级阶地(T_3)呈块状分布在罗城乡以西,分布范围较小,阶地面较窄。第四级阶地(T_4)呈北西走向分布于红山村到河西村之间,分布范围也较小,阶地面连续。采用天宝公司生产的Trimble 5800 GPS对阶地面进行了载波相位实时动态差分测量,得到阶地序列断面L—L'(断面位置见图3)。断面中 T_1 阶地(图6a)基座均为白垩系紫红色砂岩,基座之上河流砾石层砾石磨圆度分选性均较好,岩性比较复杂,砾石层顶部拔河为23 m。 T_2 阶地(图6b、d、e)基座为白垩系砂岩或者早更新世浅黄色河湖相砂—粉砂,基座之上为磨圆度和分选性均较好的河流相砾石层,具弱胶结,砾石以次圆为主,呈扁平状,砾石平均直径约6 cm,岩性复杂。砾石层中有砂透镜体,透镜体大小平均约为 $27 \times 220 \text{ cm}^2$,可见交错层理,砾石层顶部拔河为30 m,砾石层厚度在5~8 m之间。 T_3 阶地基座岩性为早更新世浅黄色河湖相砂—粉砂,其上堆积3~7 m厚的

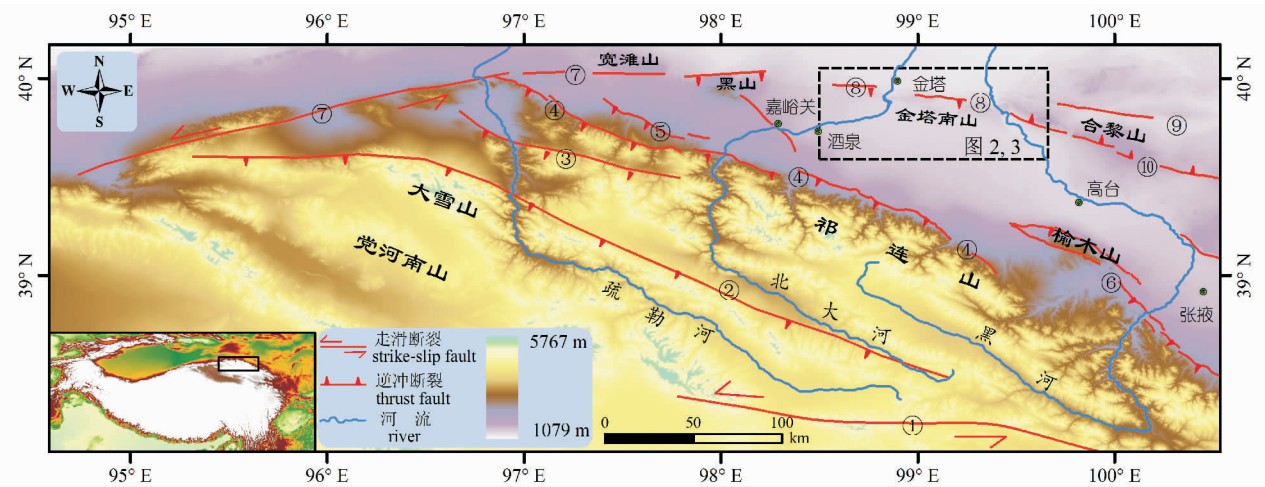


图 1 青藏高原东北部地形特征及主要活动断裂分布

Fig. 1 Terrain features and main active faults in NW Xizang (Tibetan) Plateau

- ①—海原断裂;②—拖莱南山断裂;③—昌马断裂;④—祁连山北缘断裂;⑤—玉门断裂;⑥—榆木山断裂;
⑦—阿尔金断裂;⑧—金塔南山北缘断裂;⑨—幕少梁断裂;⑩—合黎山南缘断裂
- ①—Haiyuan Fault; ②—Tuolainanshan Fault; ③—Changma Fault; ④—Qilianshan Northern margin Fault; ⑤—Yumen Fault; ⑥—Yumushan Fault; ⑦—Altun Tagh Fault; ⑧—Jinta Nanshan Northern margin Fault; ⑨—Mushaoliang Fault; ⑩—Helishan Southern margin Fault

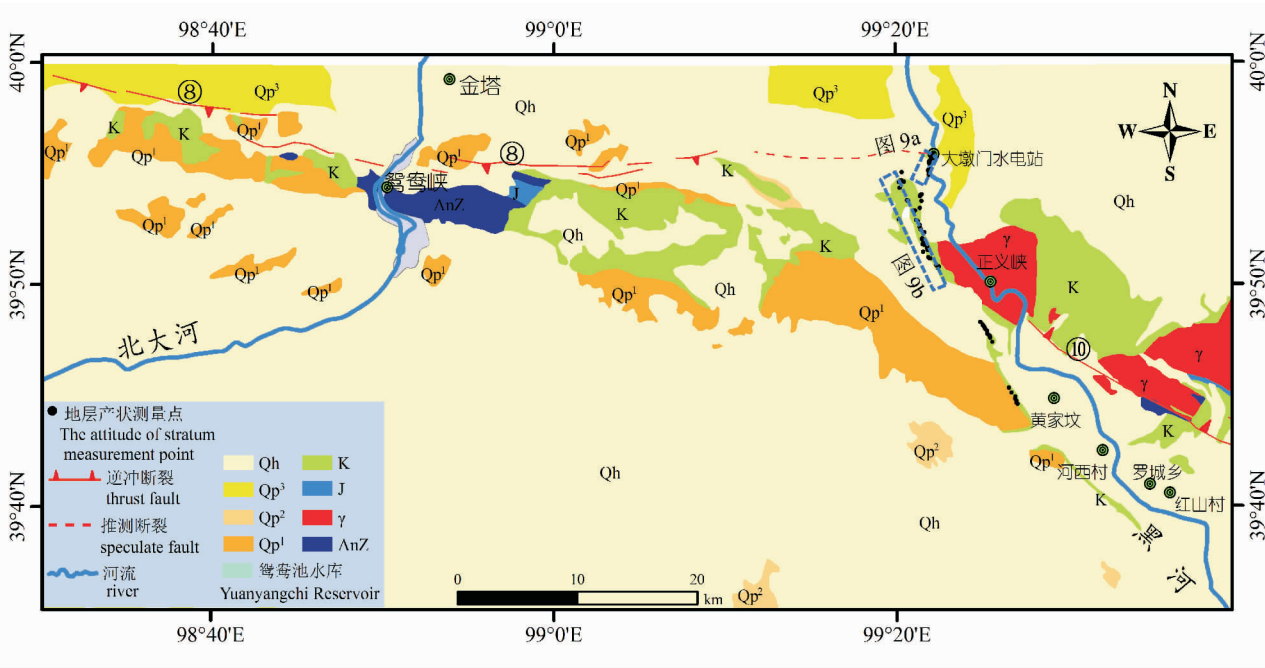


图 2 金塔南山及周边地区地质构造概况 (资料来源于《1:20 万高台幅地质图》和《1:20 万酒泉幅地质图》)

Fig. 2 Geological map of the Jinta' nanshan Mountains and surrounding areas (modified from the 1:200000 Geological Map of Gaotai and Jiuquan)

Qh—全新统冲积物、风积物; Qp³—晚更新统砂砾石层; Qp²—中更新统砾石层; Qp¹—早更新统砾石层; K—白垩系砂砾岩; J—侏罗系砾岩夹砂岩; γ—华力西期花岗岩; AnZ—前震旦系。⑧—金塔南山北缘断裂; ⑩—合黎山南缘断裂

Qh—Holocene alluvium and wind sediment; Qp³—Late Pleistocene sandy gravel layer; Qp²—mid-Pleistocene gravel layer; Qp¹—early Pleistocene; K—Cretaceous glutenite; J—Jurassic conglomerate folder sandstone; γ—Variscan granite; AnZ—Presinian. ⑧—northern margin fault on Jinta' nanshan Mountains; ⑩—southern margin fault on Heli Mountains

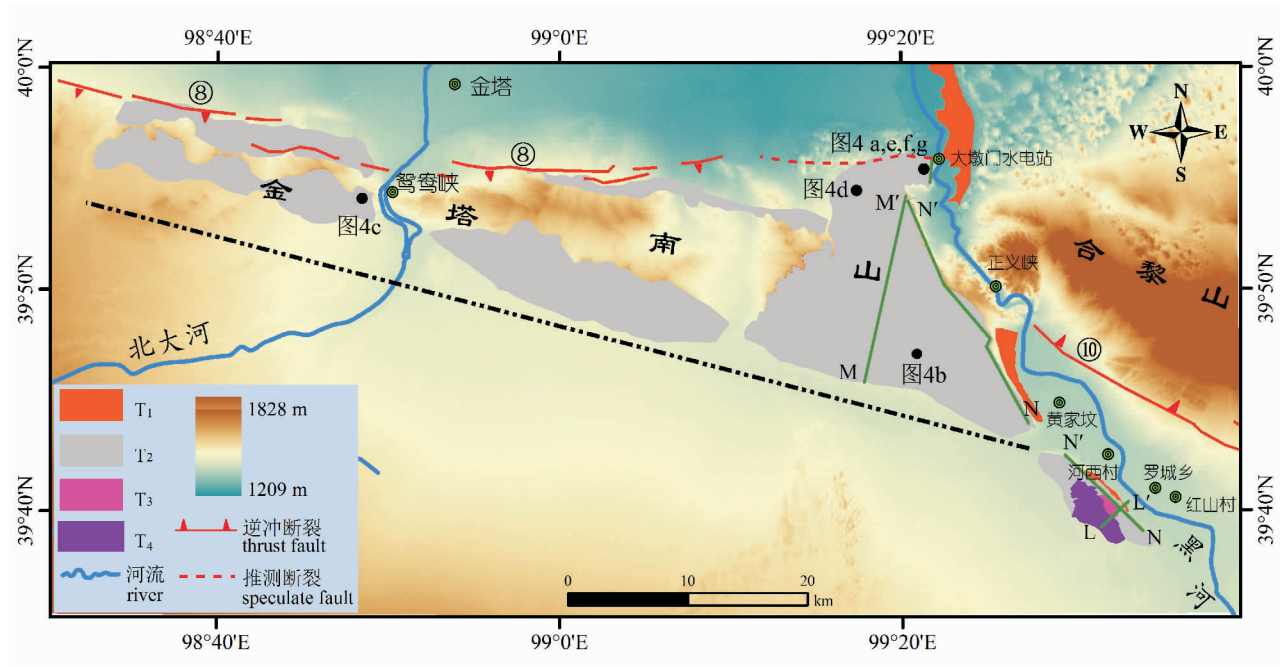


图 3 研究区阶地分布范围及断面分布情况

Fig. 3 The distribution of terraces and sections in the study area

L—L', M—M', N—N'为实测阶地连续地形断面位置; 黑色虚线将研究区分为南北两侧; ⑧—金塔南山北缘断裂; ⑩—合黎山南缘断裂

L—L', M—M' and N—N' represent the measured terrace section position; black dotted line divide the study area into south and north part; ⑧—northern margin fault on Jinta' nanshan Mountains; ⑩—southern margin fault on Heli Mountains

河流相砾石层,砾石层顶拔河为 34 m,阶地面覆盖有沙丘。T₄ 阶地(图 5)基座为浅黄色更新世的砂—粉砂岩,且有胶结。基座之上的砾石层磨圆度和分选性均较好,扁平状,岩性复杂,砾石层顶部拔河为 37 m。野外考察发现 T₂ 阶地砾石层顶部拔河及基座拔河向下游延伸均存在掀斜现象。

2.3 地貌面对比

地质图中金塔南山广泛分布早更新世砾石堆积(图 2),笔者野外考察发现这一砾石层堆积表现为一较连续的地貌面,向东延续为黑河二级阶地面(T₂)。该地貌面在北大河西侧与黑河西侧保存较完整,基本覆盖整个山体顶面;而在北大河以东金塔南山中部,该面分布于金塔南山南北两侧,核部由于后期侵蚀作用出露白垩纪砂砾岩或华力西期侵入岩(图 2)。对比金塔南山地貌面与黑河阶地的砾石层

组成结构特征、砾石组分、磨圆度、分选性及砾径等,结果显示金塔南山砾石与黑河二级阶地砾石组成与特征类似,可能为黑河及北大河堆积形成。为了对比方便,我们将它们统一划为 T₂。

3 河流阶地变形特征

3.1 阶地剖面形态

本次研究对金塔南山地区广泛分布的阶地进行调查并对近似平行于黑河方向的河流阶地进行了纵剖面测量,剖面位置见图 3 中的 N—N' 及 M—M'。结果显示金塔南山阶地(T₂)呈现一个完整的背斜形态(图 7)。背斜呈现前翼(北翼)陡倾,后翼平缓,核部平坦的特征。

在分析现代阶地剖面形态过程中需要知道阶地的原始形态(Lavé and Avouac, 2000),而现代河床

表 1 砾石层下伏基座地层产状

Tabel 1 Attitude of the base strata underlying the gravel layer

距离(m)	4199	4327	4593	4773	4936	4999	9728	8707	11283	11778	12353	13632	12900
倾向(°)	11	9	17	220	241	210	210	270	230	253	333	275	172
倾角(°)	36	69	70	66	60	45	8	22	4	12	22	17	17

的形态可以近似地做为阶地面原始的沿河比降形态 (Lavé and Avouac, 2000; 李涛等, 2011)。研究中

得到现代河床的纵断面坡度为 -0.05° (图 8 a, 向南倾为正, 向北倾为负), 所以纵断面中阶地面的初始

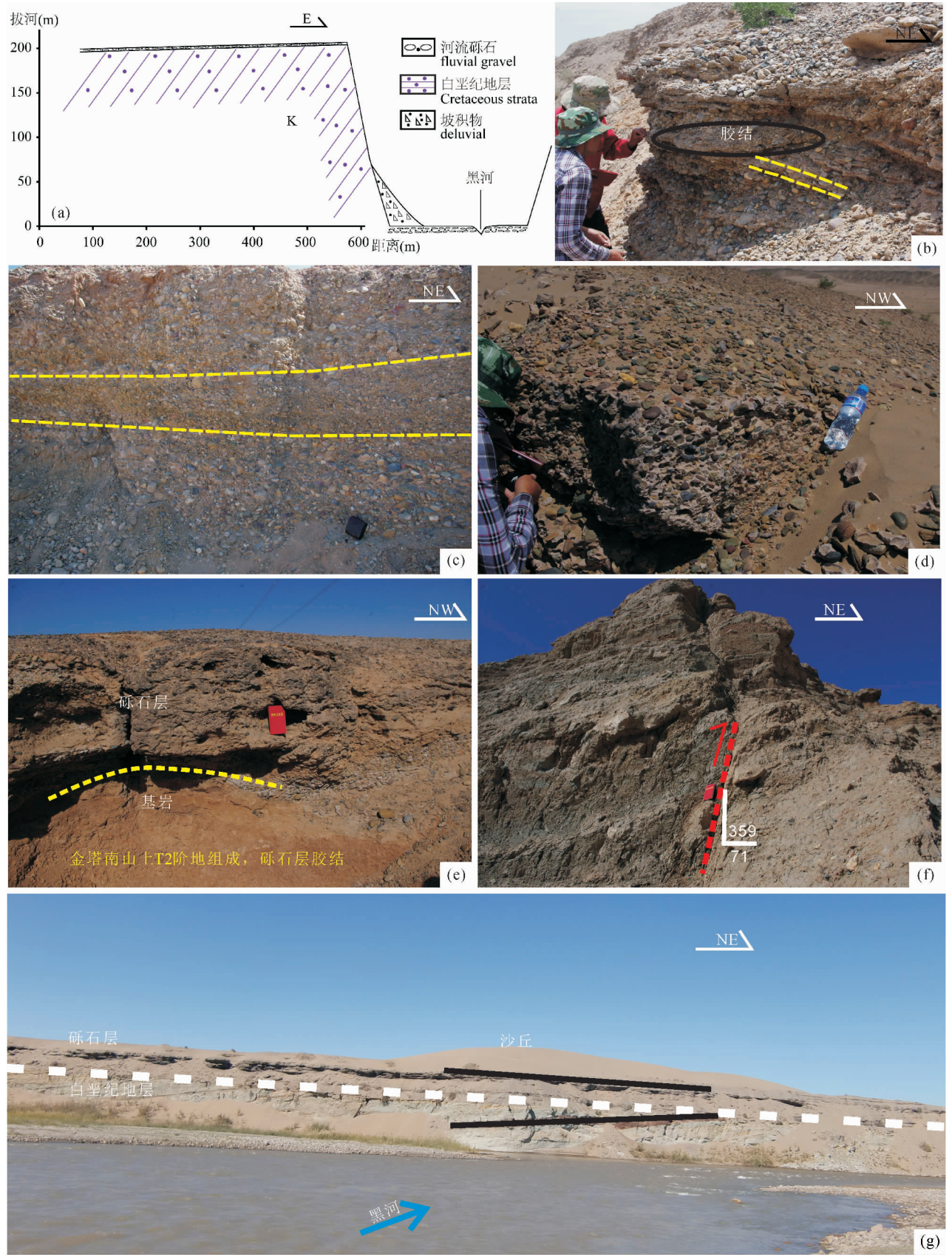


图 4 金塔南山地貌面结构特征及断裂(位置见图 3): (a)大墩门水电站附近阶地; (b)金塔南山南部阶地砾石组成特征; (c)鸳鸯峡西侧砾石层结构; (d)金塔南山北部地貌面砾石层结构; (e)金塔南山东部大墩门水电站附近地貌面砾石层组成; (f)大墩门水电站附近出露的断裂; (h)大墩门水电站附近 T2 阶地砾石层与白垩纪地层接触关系

Fig. 4 Geomorphic characteristics and fault in Jinta' nanshan Mountains(see Fig. 3): (a) terraces near Dadunmen Hydropower Station in Jinta' nanshan Mountains; (b) component characteristics of terraces gravels in south Jinta' nanshan Mountains; (c) gravel layer structure on the west Yuanyang Gorge; (d) gravel layer structure in north Jinta' nanshan Mountains; (e) component characteristics of terraces gravels in east Jinta' nanshan Mountains; (f) the fault outcrop on the south of Dadunmen Hydropower Station; (h) contact relation between terraces gravels and Cretaceous strata

坡度也为 -0.05° 。

阶地剖面形态对比分析选择阶地发育完整的区域(位置见图 7)。纵向上,与初始坡度(-0.05°)相比,褶皱南翼阶地均表现为反向倾斜(图 8a), T_2 、 T_3 和 T_4 的坡度分别为 0.14° 、 0.14° 和 0.18° ,对应的旋转角度为 0.19° 、 0.19° 和 0.23° 。褶皱北翼 T_2 阶地表现为强烈掀斜,掀斜角度为 -5.99° (坡向南为正,图 8b),对应的旋转角度为 -5.94° 。 T_2 、 T_3 和 T_4 随着阶地年龄的增大,掀斜角度逐渐增大。表明褶皱是通过翼旋转运动方式生长的。不同级阶地(T_3 、 T_4)掀斜程度不同,同一级阶地(T_2)在背斜两翼掀斜程度有很大差别。阶地的这种变形与背斜北部相对紧闭、南部相对宽缓的形态相似,反映了背斜向南侧扩展(Li Tao et al., 2013; Scharer et al., 2006; 陈杰等, 2005)。

3.2 阶地砾石层与下伏地层间关系

金塔南山阶地砾石层与下伏基座地层间的接触关系为角度不整合接触(图 4 e、h;图 9,位置见图 2),实测得到阶地砾石层下伏基座地层的产状(表 1)。在阶地背斜的前翼(图 9 a),阶地砾石层与下

伏地层为角度不整合接触,阶地表现为向北倾而下伏地层呈现一个背斜。地层背斜南翼比北翼陡,而阶地在此背斜核部以南产生了明显的抬升。在阶地背斜的核部(图 9 b),阶地与下伏地层同样表现为角度不整合接触,阶地面平坦,地层倾角较小且存在层间褶皱。

4 河流阶地几何学形态

在活动褶皱作用下形成的河流阶地几何形态主要受控于下伏褶皱生长的机制和类型(陈杰等, 2005)。根据陈杰等(2005)及 Amos 等(2007)研究,河流阶地受不同褶皱的翼旋转、枢纽迁移及两者结合等生长作用影响下表现出相应的几何形态及其与下伏基座地层的角度关系(图 10)。枢纽膝折带迁移断展褶皱和断弯褶皱作用下阶地(图 10 a、b)形成不对称背斜,与下伏地层近平行产出,其中断弯褶皱作用下形成的阶地后翼上具有同倾向的台阶状陡坎;枢纽膝折带迁移断滑褶皱作用下阶地(图 10 c、d)形成对称背斜,与下伏地层近平行产出,在背斜两翼具有对称陡坎;翼旋转断滑褶皱作用下阶地

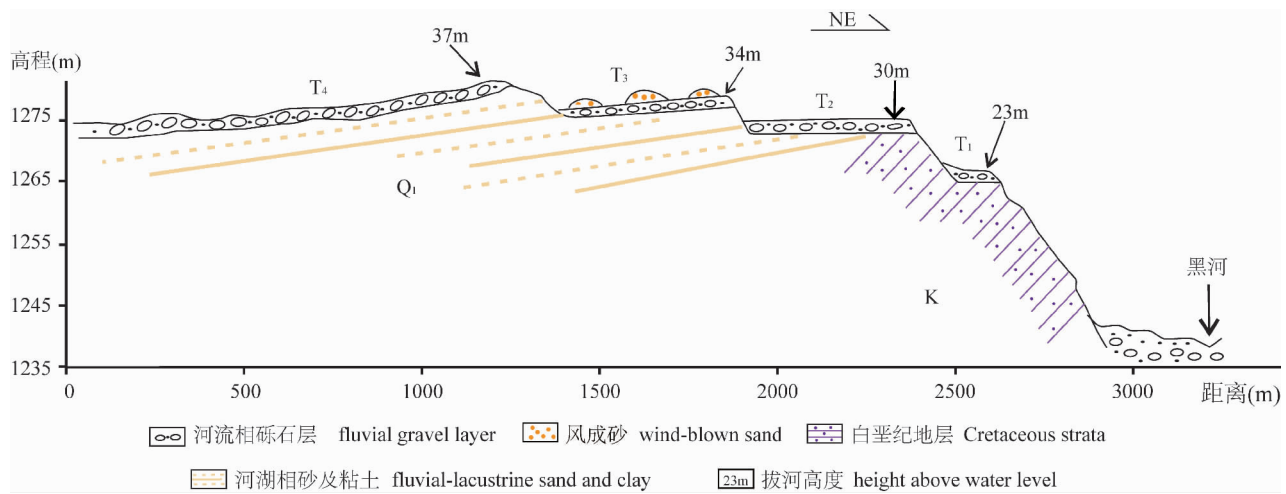


图 5 断面 L—L'黑河阶地序列(位置见图 3)

Fig. 5 Terraces sequence (L—L') of Heihe river



图 6 红山村—河西村黑河阶地特征:(a)黑河 T₁ 阶地剖面;(b)黑河 T₂ 阶地剖面;(c)黑河 T₄ 阶地剖面;
(d)罗城乡附近黑河 T₂ 阶地砾石层;(e) d 图中砾石组构

Fig. 6 The photos of Heihe terraces from Hongshan village to Hexi village: (a) terrace T₁ outcrop of Heihe River; (b) terrace T₂ outcrop of Heihe River; (c) terrace T₄ outcrop of Heihe River; (d) terrace T₂ gravels of Heihe River near Luocheng County; (e) gravel fabric in Fig. d

(图 10 f)形成对称背斜,与下伏地层斜交;在弧形弯曲枢纽膝折带迁移褶皱作用下阶地(图 10 e)可能形成扇形的褶皱陡坎;在枢纽膝折带迁移—翼旋转联合褶皱作用下阶地(图 10 g)形成具明显坡折的

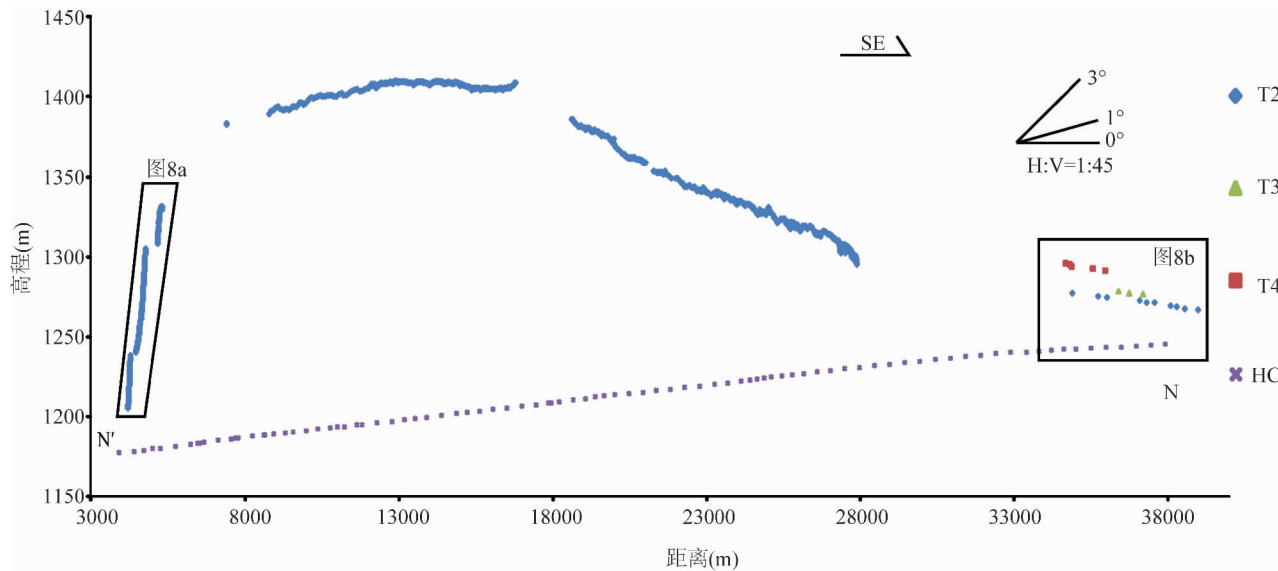


图 7 河西村一大墩门水电站 N—N'断面河流阶地(T₁—T₄)实测地形纵剖面
Fig. 7 Longitudinal topographic profiles of terraces surfaces

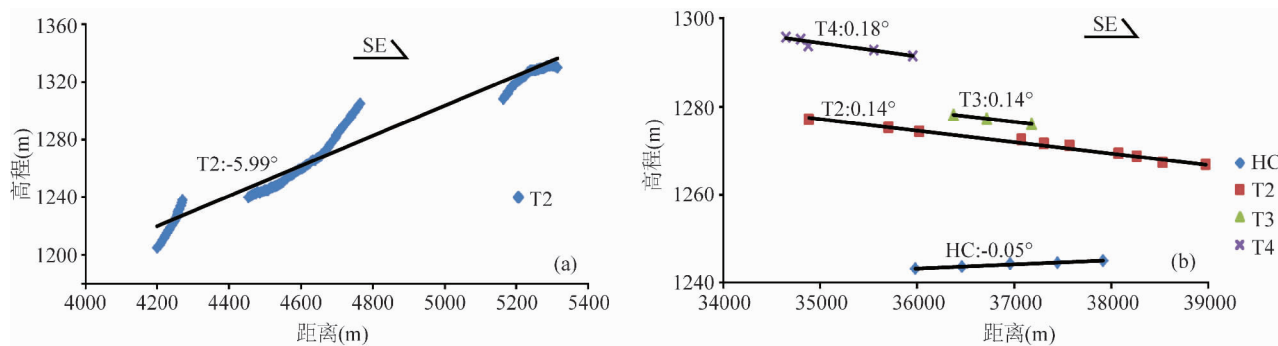


图 8 黑河阶地实测地形纵剖面(位置见图 7): (a) T₂ 阶地褶皱前翼倾角; (b) 褶皱后翼各级阶地倾角
Fig. 8 Longitudinal topographic profiles of terraces surfaces: (a) the forelimb angle of terrace T₂; (b) the back limb angles of terraces and riverbed

褶皱陡坎。在活动断弯褶皱、断展褶皱和断滑褶皱等之上的阶地均存在褶皱陡坎。而本研究得到的阶地褶皱具有后翼平缓且连续及前翼陡倾且没有褶皱陡坎的特征,这与 Amos 等(2007)提出的铲式逆冲断裂构造几何学模型相符(图 10 h),但是本研究中褶皱还具有平坦的核部,因此结合铲式逆冲断裂和笔者对金塔南山北缘断裂东段的考察,建立了符合本研究的铲式逆冲断裂相关褶皱几何学模型(图 11 b)。

在建立几何模型的时候为了能够得到褶皱真实的最大变形量而选择核部最高处且垂直于金塔南山北缘断裂方向阶地面最宽的位置进行 T₂ 阶地连续地形纵剖面测量,得到图 11 a 的结果。因为阶地下

伏基座面相对平整(图 4 h)且近似平行于现代河床,因此在计算几何模型的时候不需要考虑初始的地形形态。模型中 30°为 Gao Rui 等(2001)测得祁连山—阿拉善地震剖面 10s 深处断裂角度,68°为 Zheng Wenjun 等(2013c)对金塔南山断裂调查得到的地表断裂角度;30°和 68°分别代表逆冲断裂在深部和相对浅部的角度。 L_1 为前翼长度, L_2 为核部宽度, L_3 为后翼长度, h 是核部拔河高度(阶地有效抬升量(Simoes et al., 2007))。 L_1 、 L_2 、 L_3 和 h 通过 GPS 测量得到, $L_1 \approx 1.0$ km, $L_2 \approx 10.3$ km, $L_3 \approx 9.4$ km, $h \approx 200$ m。 H_1 、 H_2 及 H_3 分别为下伏断裂铲式构造段的结束深度、开始深度及上升盘地壳深度。

根据面积相等原理(Bernard et al., 2007;

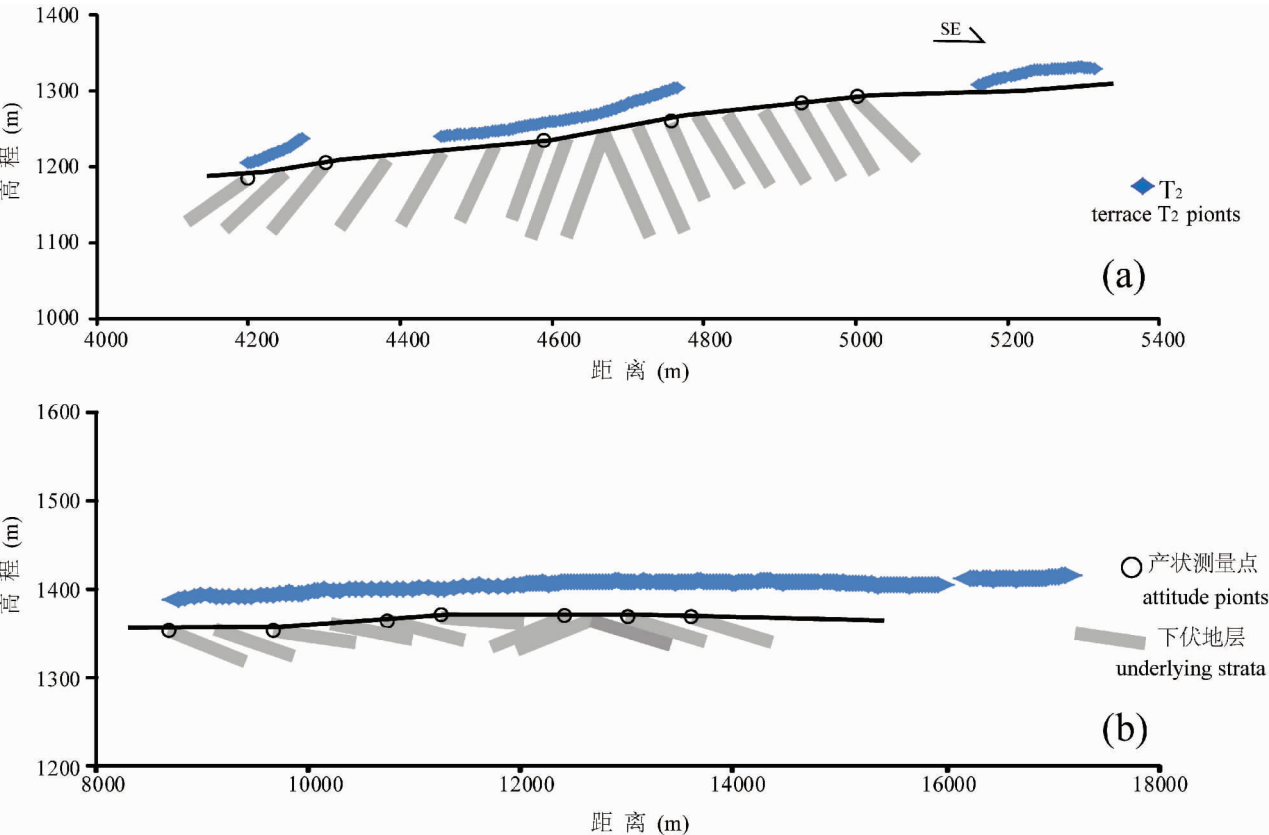


图 9 金塔南山阶地与下伏白垩纪地层间接触关系(位置见图 2): (a) 金塔南山阶地背斜前翼与下伏地层接触关系; (b) 金塔南山阶地背斜核部与下伏地层接触关系

Fig. 9 The contact relation between terrace and the underlied stratum Jin'ta' nanshan Mountains(Location see Fig. 2): (a) the contact relation between terrace of anticline forelimb and the underlying stratum in Jin'ta' nanshan Mountains; (b) the contact relation between terrace of anticline core and the underlying stratum in Jin'ta' nanshan Mountains

图中下半部分为阶地下伏基岩几何形态,水平垂直比为 1:1;上半部分为实测阶地地形剖面,图 a 中水平垂直比为 1:1,图 b 中水平垂直比为 1:8

The bottom half represents geometrical morphology of the underlied bedrock and the ratio of horizontal vertical is 1:1. The upper half represents the measured terrace topographic profile, the ratios of horizontal vertical in a and b are 1:1 and 1:8, respectively.

Dahlstron, 1969; Epard and Groshong 1993; Jamison, 1987)有上升盘压缩部分面积(ΔS')等于上升盘抬升变形面积(ΔS),d 为上升盘整体水平的缩短量,因此有如下关系式:

$$\Delta S' = d \cdot H_3 = \Delta S \tag{1}$$

那么断裂上升盘抬升有效变形面积(Simoes et al., 2007)为ΔS:

$$\Delta S = 0.5 \cdot (L_1 + L_2 + L_2 + L_3) \times h = 3100000 \text{ m}^2 \tag{2}$$

$$H_1 = L_2 \cdot \sin 68^\circ \cdot \cos 68^\circ \tag{3}$$

$$l_1 = L_2 \cdot \sin 68^\circ \tag{4}$$

$$H_2 = \frac{L_3}{\tan 30^\circ} \tag{5}$$

$$l_2 = \frac{L_3}{\sin 30^\circ} \tag{6}$$

$$H_3 = l_2 \cdot \sin 60^\circ + l_2 \cdot \sin 30^\circ \cdot \tan \theta \tag{7}$$

由式(3)、(4)、(5)、(6)得到 H₁、L₁、H₂、L₂ 的值分别约为 3.6 km、9.5 km、16.3 km、18.8 km。式子(7)θ 的值位于 0°~30°之间,因此 H₃ 的值最大为 21.7 km,最小值为 16.3 km。

那么上升盘整体缩短量 d 的最大值约为 190 m,最小值为 143 m。下伏断裂产生的整体变形量最大值和最小值分别约为 276 m 和 246 m。利用 Hetzel 等(2004)对核部与后翼连接部分 T₂ 裸露砾石测得的¹⁰Be 暴露年龄(t = 225 ± 30 ka),我们可以计算断裂活动导致变形的最大垂直抬升速率 V_h:

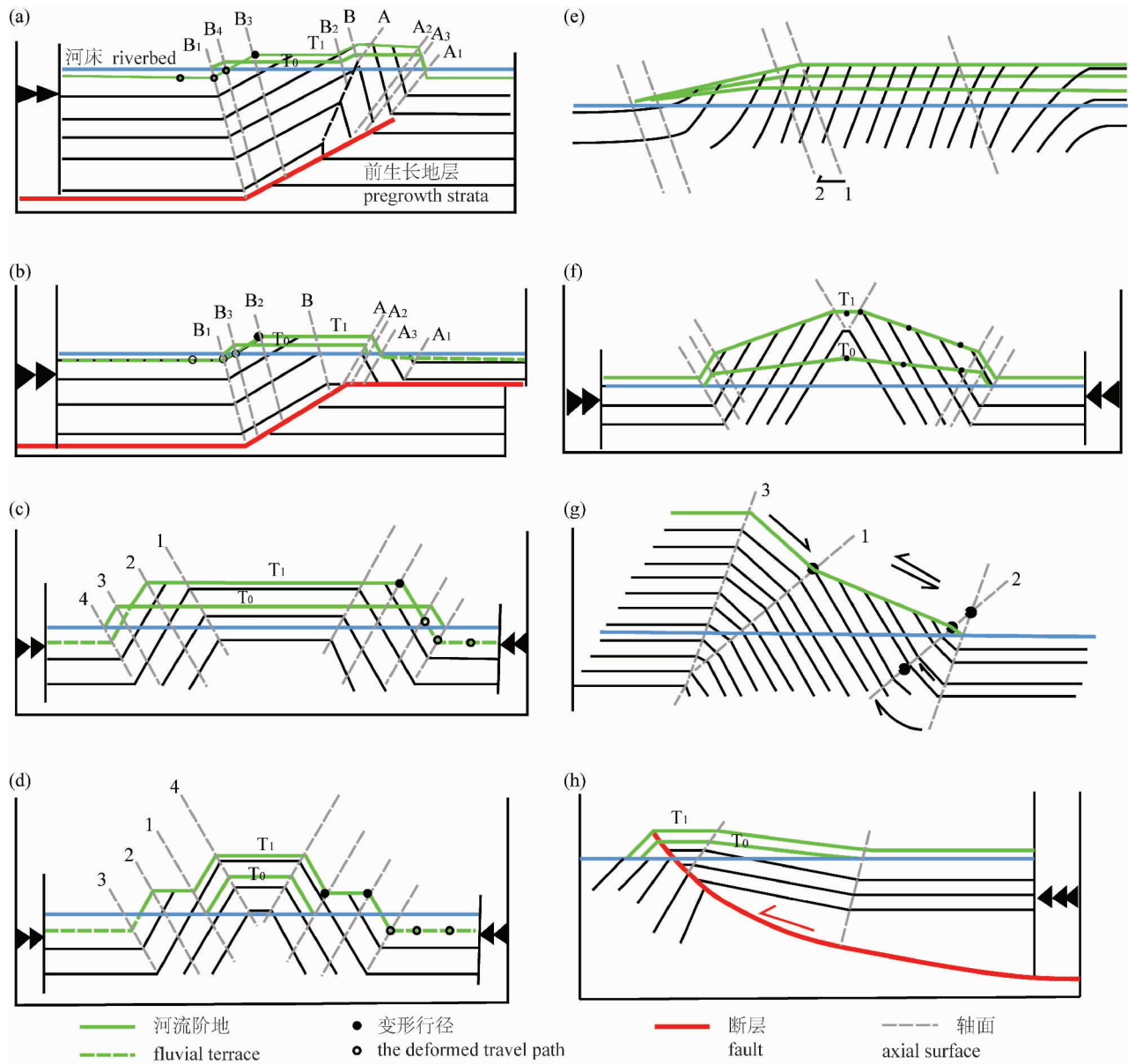


图 10 不同褶皱作用下的阶地形态及阶地与下伏地层间的角度关系(据 Bernard et al. , 2007; 陈杰等, 2005; 修改): (a) 枢纽膝折带迁移断展褶皱作用;(b)枢纽膝折带迁移断弯褶皱作用;(c)和(d)枢纽膝折带迁移断滑褶皱作用;(e): 弧形弯曲枢纽膝折带迁移作用;(f)翼旋转断滑褶皱作用;(g)枢纽膝折带迁移—翼旋转联合褶皱作用;(h)翼旋转铲式逆冲断裂褶皱作用

Fig. 10 The geometry model of terraces surfaces and the underlied stratum(based on Bernard et al. , 2007; Chen Jie et al. , 2005): (a) angular hinge migration fault-propagation folding; (b) angular hinge migration fault-bend folding; (c, d) angular hinge migration detachment folding; (e) curved angular hinge migrating; (f) limb rotation fault-bend folding; (g) combine hinge migration and limb rotation with an angular hinge; (h) limb rotation listric fault-folding

黑、白相间层表示前生长地层,红线表示断层,绿色线表示阶地,蓝色线表示河床,灰色虚线表示轴面,黑三角表示缩短量,阶地面上的黑心圆表示变形行径(黑心圆初始状态位于蓝线上)

Black and white layer represent the pregrowth strata, the red line represents fault, the green line represents terrace, the blue line represents the riverbed, the gray dotted line represents axial surface, the black triangle represents shortening, black round represents the deformed travel path (the initial state of the black round was located on the blue line)

$$V_h = \frac{h}{t} \tag{8}$$

水平缩短速率 V_s :

$$V_s = \frac{d}{t} \tag{9}$$

那么断裂的平均滑动速率 V_m :

$$V_m = \frac{\sqrt{h_1^2 + d_2^2}}{t} \tag{10}$$

得到 V_h 的值为 $0.9 \pm 0.1 \text{ mm/a}$, V_s 的最大值和最小值分别为 $0.8 \pm 0.2 \text{ mm/a}$ 和 $0.6 \pm 0.1 \text{ mm/a}$, V_m 的最大值和最小值分别为 $1.2 \pm 0.2 \text{ mm/a}$ 和 $1.1 \pm 0.2 \text{ mm/a}$, 平均值为 $1.18 \pm 0.16 \text{ mm/a}$ 。

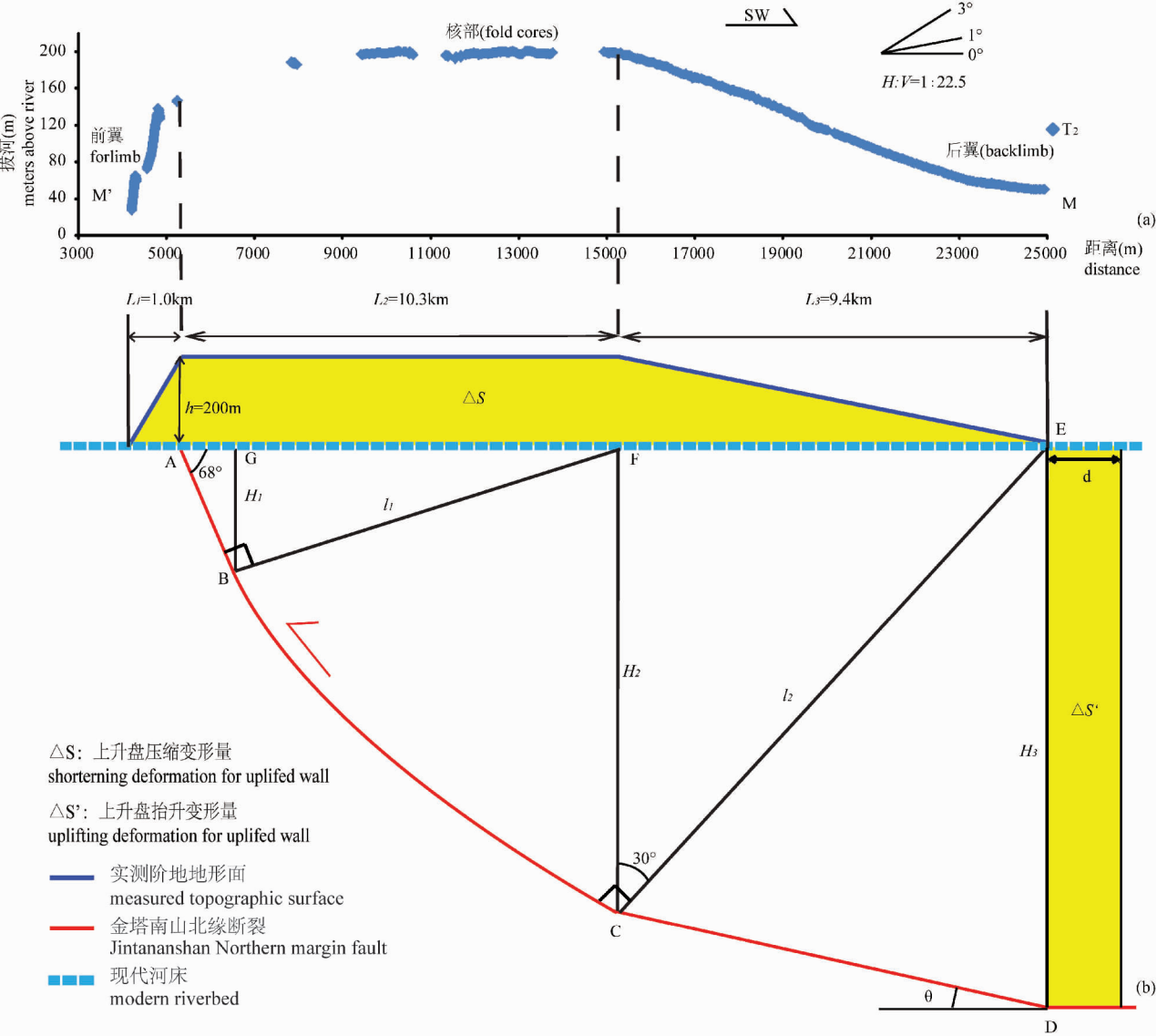


图 11 垂直金塔南山北缘断裂 T₂ 阶地连续地形及几何学模型: (a)垂直于金塔南山北缘断裂测得金塔南山阶地连续地形; (b)金塔南山阶地变形几何学模型示意图(据 Amos et al. , 2007 , 修改)

Fig. 11 Longitudinal topographic profiles of terraces surfaces and the geometry model: (a) the continuous terrace topography perpendicular to the north margin fault on Jinta' nanshan Mountains; (b) the geometry model for terrace deformation (based on Amos et al. , 2007)

图(b)中蓝色实线为现代河流,橙色实线为实测地形面,线 ABCD 为断裂;黄色区域表示变形量。计算方法根据 Dahlstron, 1969; William, 1987; Groshong, 1993; Simos et al. , 2007; Bernard et al. , 2007 等结合本研究略有修改

The blue line represents the modern riverbed, the orange line represents the measured topographic surface, line ABCD represents fault, the yellow area represents deformation. The calculating method is based on Dahlstron, 1969; William, 1987; Groshong, 1993; Simos et al. , 2007; Bernard et al. , 2007

5 讨论

金塔南山下伏基座地层主要为白垩系砂砾岩和华力西期花岗岩,白垩系的变形幅度大于阶地的变形幅度(图9),说明在金塔南山砾石堆积面形成之前,该区域已经开始发生褶皱变形,同时接受河流侵蚀作用,从金塔南山顶较薄的砾石堆积也可看出这一过程(Daëron et al., 2007)。虽然区域构造活动已经开始,但在黑河T₂形成之前该区域还没有隆起成山,且砾石堆积速率大于山体抬升速率;随着抬升速率的增加或者砾石堆积速率的相对减弱,砾石层被遗弃,河流阶地和金塔南山顶面开始形成。金塔南山开始隆升形成山体的时代为中更新世晚期(~230 ka, Hetzel et al., 2004),其山体地形开始形成的时代要晚于下伏构造开始活动的时代。这一过程反映了高原东北缘在新生断裂的影响下,沉积盆地逐渐转变为剥蚀山体的断裂—地貌演化过程。

之前的研究(Cowgill et al., 2000; Gao Rui et al., 2001; Xiao Qibin et al., 2012, 2013; 李廷栋, 1995; 张进等, 2007)认为,金塔南山与宽滩山、黑山、合黎山、龙首山共同组成了青藏高原的北边界。将本研究中的金塔南山北缘断裂与宽滩山—黑山断裂、合黎山南缘断裂(陈柏林等, 2008; 何文贵等, 2012; 郑文俊等, 2009)的活动速率、断裂深度及断裂性质对比,发现金塔南山北缘断裂与宽滩山—黑山断裂相似性较高。我们依据模型得到的断裂深部形态的深度与Gao Rui等(2001)对祁连—阿拉善断面的深地震断面中青藏高原北边界断裂形态及深度的解译结果和Xiao Qibin等(2012; 2013)利用电磁测深方法得到的宽滩—黑山断裂在深部的断裂角度和深度一致,因此认为金塔南山北缘断裂向西延伸可能与阿尔金断裂相连,且金塔南山区域断裂与宽滩山—黑山断裂一样均主要表现为逆冲活动特征。

几何学分析显示金塔南山北缘断裂向下延伸是一条非平坦的、铲式逆冲断裂,通过计算断裂深度表明断裂至少延伸到地表以下16 km深度,这与Xiao Qibin等(2012, 2013)利用电磁测深对宽滩山—黑山断裂深度的研究结果相符,可能是通过阿拉善地块俯冲到柴达木—祁连地体之下而形成(Gao Rui et al., 2001)。合黎山—龙首山—北大山等弧形山体是阿拉善地块以低速体“铲状”形式下插于河西走廊之下,与柴达木—祁连地体相互挤压形成的山体(Xiao Qibin et al., 2013; 董治平等, 2007),并且受到南北作用力的共同作用(吴功建, 1998)。

野外勘察发现金塔南山阶地与下伏基座基岩存在角度不整合(图4h),且在大墩门水电站及其南部黑河西岸均发育有SE—NW走向的高角度逆冲断裂(图4f)。Hetzel等(2004)以本文中的T₂阶地为研究对象得到230 ka以来的垂直抬升速率为1.3 mm/a,并以此推算合黎山开始隆升于~610 ka,金塔南山开始隆升于约230 ka;何文贵等(2012)通过地震剖面也得到金塔南山北缘断裂4.51 ka以来的活动速率不小于1 mm/a。Zheng Wenjun等(2013b)以黑河东岸合黎山南麓冲积扇为研究对象得到合黎山南缘断裂20 ka以来最大垂直滑动速率不大于0.5 mm/a,以此推算合黎山开始隆升的年代最可能是约2 Ma,金塔南山开始隆升于约1.2 Ma。这些研究得到的变形速率相差很大,推测的结果也有较大差别。笔者推测造成结果差异的原因可能主要是研究位置和对象不同。根据本研究的连续阶地变形结果发现,在金塔南山北缘断裂附近阶地变形向南逐渐增大,主要呈现背斜变形模式,因此单以北缘断裂附近变形不能全面反映金塔南山附近的变形幅度与特征,阶地的变形可能只反映了整个深部断裂活动的一部分。本研究中涉及的地貌面为金塔南山及周边黑河以西阶地,因此阶地变形反映的是金塔南山深部断裂逐渐向上发展活动作用的结果,其变形反映了断裂从深部到地表的的活动特征,能更实际的反映断裂的活动速率。中更新世以来,该断裂的逆冲速率应该大于1 mm/a。

在青藏高原东北部,阿尔金断裂滑动速率向东北方向逐渐减小,显示了地壳缩短和逆冲断裂控制下的高原东北部山体的抬升(Zhang Peizhen et al., 2007)。更多地质证据显示高原东北部山体抬升是逐渐向东北方向扩展的,山体年代向东北方向越来越年轻(Yuan Daoyang et al., 2013; Zheng Wenjun et al., 2013a)。处于阿尔金断裂最东北缘的宽滩山、黑山、金塔南山、合黎山等一系列褶皱山体,与其南部的祁连山等可能具有相似的形成机制(Hetzel et al., 2004; Seong et al., 2011)。且本研究及其他研究发现该系列山体的形成远远晚于祁连山,是高原东北部系列山体中形成时代最新的山体(Hetzel et al., 2004; Zheng Dewen et al., 2010; Zheng Wenjun et al., 2013b, 2013c),可能反映了高原在第四纪以来向东北方向的最新扩展过程。

6 结论

金塔南山及周边地区共发育四级基座阶地,并

不同程度的发生了褶皱变形。通过对阶地地形横、纵剖面的分析,发现褶皱自 T_2 开始形成以来通过翼旋转方式响应构造活动。在实测 T_2 阶地纵剖面基础上建立了铲式断裂相关褶皱几何学模型。并计算得到金塔南山北缘断裂上升盘自 225 ± 30 ka 以来产生了 $143 \sim 190$ m 的水平缩短量和 200 m 的垂直抬升量,断裂平均滑动速率为 1.18 ± 0.16 mm/a。

金塔南山的抬升是金塔南山北缘断裂直接作用的结果,而金塔南山北缘断裂与阿尔金断裂相连,因此金塔南山可以作为青藏高原向北扩展形成的系列山体的代表。它的形成过程和方式反映了高原北部的形成演化及动力学过程。本研究认为阿拉善块体俯冲于河西走廊之下使得金塔南山北缘断裂产生逆冲活动,断裂上升盘地体为了适应(吸收)逆冲作用产生的变形量发生褶皱变形,使金塔南山抬升形成山体。该研究将加深对青藏高原北部构造活动和构造作用机制的理解。

致谢:感谢审稿专家宝贵的修改意见!

参 考 文 献 / References

- 陈柏林, 刘建生. 2009. 祁连山北缘—河西走廊地区大地形变与地震的关系. 地质通报, 28(10): 1439 ~ 1447.
- 陈柏林, 刘建生, 王春宇, 张永双, 刘建民, 董诚, 吴乃芬. 2008. 阿尔金断裂吕马大坝—宽滩山段全新世活动特征. 地质学报, 82(4): 433 ~ 440.
- 陈杰, Scharer K M, Burbank D W, 王昌盛. 2005. 利用河流阶地限定活动褶皱的类型和生长机制: 运动学模型. 地震地质, 27(4): 513 ~ 529.
- 陈文彬, 徐锡伟. 2006. 阿拉善地块南缘的左旋走滑断裂与阿尔金断裂带的东延. 地震地质, 28(2): 319 ~ 324.
- 崔军文, 张晓卫, 李朋武. 2002. 阿尔金断裂: 几何学、性质和生长方式. 地球学报, 23(6): 509 ~ 516.
- 董治平, 张元生, 代炜. 2007. 阿拉善地块下插河西走廊的发现及其构造意义. 甘肃科学学报, 19(1): 91 ~ 93.
- 葛尚虹, 张梅生, 刘永江, 叶慧文, 石采东. 1998. 阿尔金断裂研究的科学问题与研究思路. 现代地质, 12(3): 2 ~ 5 + 7 ~ 8.
- 何文贵, 袁道阳, 王爱国, 刘兴旺, 张波. 2012. 酒泉盆地北侧金塔南山北缘断裂西段全新世活动特征. 地震 32(3): 59 ~ 66.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 孙知明, Tapponnier P, Woerd J V D, Meriaux A S. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约. 地质学前沿, 13(4): 59 ~ 79.
- 李吉均. 2013. 青藏高原隆升与晚新生代环境变化. 兰州大学学报, 49(2): 154 ~ 159.
- 李涛, 陈杰, 肖伟鹏, Burbank D W, 黄明达, Thompson J. 2011. 利用变形河流阶地限定帕米尔北缘木什背斜的缩短、隆升和侧向扩展. 地震地质, 33(2): 308 ~ 322.
- 李廷栋. 1995. 青藏高原隆升的过程和机制. 地球学报, 1: 1 ~ 9.
- 潘保田, 高红山, 李炳元, 李吉均. 2004. 青藏高原层状地貌与高原隆升. 第四纪研究, 24(1): 50 ~ 57 + 133.
- 潘保田, 李吉均, 朱俊杰, 曹继秀. 1995. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器——II. 青藏高原隆起的基本过程. 兰州大学学报, 31(4): 160 ~ 167.
- 邱爱美, 李百祥. 2011. 从地球物理场信息探讨阿尔金断裂带东北尾端效应和延伸. 物探与化探, 35(2): 149 ~ 154.
- 冉勇康, 邓起东. 1998. 海原断裂的古地震及特征地震破裂的分级性讨论. 第四纪研究, (3): 271 ~ 278.
- 王金荣, 翟新伟, 王廷印, 高军平. 2002. 甘肃金塔南山构造变形及其地质意义. 兰州大学学报, 38(1): 122 ~ 126.
- 王伟涛, 张培震, 郑德文, 庞建章. 2014. 青藏高原东北缘海原断裂带晚新生代构造变形. 地质前缘, 21(4): 266 ~ 274.
- 吴功建. 1998. 格尔木—额济纳旗地质断面综合研究. 地质学报, 72(4): 289 ~ 300.
- 张百祖. 2009. 金塔县降水量时空分布规律分析. 甘肃水利水电技术, 45(12): 10 ~ 12.
- 张进, 李锦轶, 李彦峰, 马宗晋. 2007. 阿拉善地块新生代构造作用——兼论阿尔金断裂新生代东向延伸问题. 地质学报, 81(11): 1481 ~ 1497.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 郑德文. 2009. GPS 观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. 地球物理学报, 52(10): 2491 ~ 2508.
- 郑文俊. 2009. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式. 中国地震局地质研究所博士毕业论文.
- Amos C B, Burbank D W, Nobes D C, Read S A L. 2007. Geomorphic constraints on listric thrust faulting: Implications for active deformation in the Mackenzie Basin, South Island, New Zealand. Journal of Geophysical Research, 112, B03S11, doi: 10. 1029/2006JB004291.
- An Zhisheng, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya—Tibetan plateau since Late Miocene times. Nature, 411(6833): 62 ~ 66.
- Bernard S, Avouac J-P, Dominguez S, Simoes M. 2007. Kinematics of fault-related folding derived from a sandbox experiment. Journal of Geophysical Research, 112, B03S12, doi: 10. 1029/2005JB004149.
- Burbank D W, Blythe A E, Putkonen J, Pratt-Sitaula B, Gabet E, Oskin M, Barros A, Ojha T P. 2003. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas. Nature, 426(6967): 652 ~ 655.
- Capitanio F A, Morra G, Goes S, Weinberg R F, Moresi L. 2010. India—Asia convergence driven by the subduction of the Greater Indian continent. Nature Geoscience, 3(2): 136 ~ 139.
- Cowgill E, Yin An, Feng Wangxiao, Qing Zhang. 2000. Is the North Altyn fault part of a strike-slip duplex along the Altyn Tagh fault system? Geology, 28: 255 ~ 258.
- Daëron M, Avouac J P, Charreau J. 2007. Modeling the shortening history of a fault tip fold using structural and geomorphic records of deformation. Journal of Geophysical Research, 112, B03S13, doi: 10. 1029/2006JB004460.
- Dahlström C D A. 1969. The upper detachment in concentric folding. Bulletin of Canadian Petroleum Geology. 17(3): 326 ~ 346.
- Epard J L, Groshong R H Jr. 1993. Excess area and depth to detachment. The American of Petroleum Geologists Bulletin, 77(8): 1291 ~ 1302.
- Erkens G, Dambeck R, Volleberg K P, M. Bouman T I J, Bos J A A, Cohen K M, Wallinga J, Hoek W Z. 2009. Fluvial terrace formation in the northern Upper Rhine Graben during the last 20000 years as a result of allogenic controls and autogenic evolution. Geomorphology, 103(3): 476 ~ 495.
- Gao Rui, Cheng Xiangzhou, Wu Gongjian. 1999. Lithospheric structure and geodynamic model of the Golmud—Ejin transect in northern

- Tibet. Geological Society of America, Special Paper 328: 9.
- Gao Rui, Li Pengwu, Li Qiusheng, Guan Ye, Shi Danian, Kong Xiangru and Liu Hongbing. 2001. Deep process of the collision and deformation on the northern margin of the Tibetan Plateau: Revelation from investigation of the deep seismic profiles. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 44(1): 71 ~ 78.
- Giano S. I. and Giannandrea P. 2014. Late Pleistocene differential uplift inferred from the analysis of fluvial terraces (southern Apennines, Italy). *Geomorphology*, 217: 89 ~ 105.
- Harrison T M, P. Copeland W S, Kidd F, Yin A. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255(5052): 1663 ~ 1670.
- Hetzel R, Tao Mingxin, Niedermann S, Strecker M R, Ivy-Ochs S, Kubik P W, Gao Bo. 2004. Implications of the fault scaling law for the growth of topography: mountain ranges in the broken foreland of north-east Tibet. *Terra Nova*, 16(3): 157 ~ 162.
- Hetzel R. 2013. Active faulting, mountain growth, and erosion at the margins of the Tibetan Plateau constrained by in situ-produced cosmogenic nuclides. *Tectonophysics*, 582: 1 ~ 24.
- Jamison W R. 1987. Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, 9(2): 207 ~ 219.
- Lavé J and Avouac J P. 2000. Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B3): 5735 ~ 5770.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Pan Baotian, Ma Yuzhen, Yan Maodu. 2014. Late Miocene – Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes. *Quaternary Research*, 81(3): 400 ~ 423.
- Li Tao, Chen Jie, Thompson J A, Burbank D W, Yang Xiaodong. 2013. Quantification of three-dimensional folding using fluvial terraces: A case study from the Mushu anticline, northern margin of the Chinese Pamir. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8): 4628 ~ 4647.
- Litchfield N, Wilson K, Berryman K, Wallace L. 2010. Coastal uplift mechanisms at Pakarae River mouth: Constraints from a combined Holocene fluvial and marine terrace dataset. *Marine Geology*, 270(1 ~ 4): 72 ~ 83.
- Molnar P, Anderson R S, Anderson S P. 2007. Tectonics, fracturing of rock, and erosion. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F3): F03014.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357 ~ 396.
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357 ~ 396.
- Molnar P. 2004. Interactions among topographically induced elastic stress, static fatigue, and valley incision. *Journal of Geophysical Research*, 109, F02010, doi:10.1029/2003JF000097.
- Molnar P. 2005. Mio – Pliocene Growth of the Tibetan Plateau and Evolution of East Asian Climate. *Palaeontologia Electronica*, 8(1): 32.
- Pan Baotian, Hu Xiaofei, Gao Hongshan, Hu Zhenbo, Cao Bo, Geng Haopeng, Li Qiong. 2013. Late Quaternary river incision rates and rock uplift pattern of the eastern Qilian Shan Mountain, China. *Geomorphology*, 184: 84 ~ 97.
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(5892): 1054 ~ 1058.
- Scharer K M, Burbank D W, Chen Jie, Weldon R J. 2006. Kinematic models of fluvial terraces over active detachment folds: Constraints on the growth mechanism of the Kashi – Atushi fold system, Chinese Tian Shan. *Geological Society of America Bulletin*, 118(7 ~ 8): 1006 ~ 1021.
- Seong Y B, Kang H-C, Ree J-H, Choi J-H, Lai Zhongping, Long Hao, Yoon H O. 2011. Geomorphic constraints on active mountain growth by the lateral propagation of fault-related folding: A case study on Yumu Shan, NE Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(2): 184 ~ 194.
- Simoës M, Avouac J P, Chen Y-G, Singhvi A K, Wang C-Y, Jaiswal M, Chan Y-C, Bernard S. 2007. Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: Shortening rate and age of folding inception. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03S14, doi:10.1029/2005JB004198.
- Tapponnier P, Xu. Z, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J. 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibetan Plateau. *Science*, 294(5547): 1671 ~ 1677.
- Thompson S C, Weldon R J, Rubin C M, Abdurkhatov K, Molnar P, Berger G W. 2002. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9): 2203, doi: 10.1029/2001JB000596.
- Viveen W, van Balen R T, Schoorl J M, Veldkamp A, Temme A J A M, Vidal-Romani J R. 2012. Assessment of recent tectonic activity on the NW Iberian Atlantic Margin by means of geomorphic indices and field studies of the Lower Mi? o River terraces. *Tectonophysics*, 544 ~ 545: 13 ~ 30.
- Wang Chengshan, Dai Jingen, Zhao Xixi, Li Yalin, Graham S A, He Dengfa, Ran Bo, Meng Jun. 2014. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: A review. *Tectonophysics*, 621(0): 1 ~ 43.
- Wilson L F, Pazzaglia F J, Anastasio D J. 2009. A fluvial record of active fault-propagation folding, Salsomaggiore anticline, northern Apennines, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 114, B08403, doi:10.1029/2008JB005984.
- Xiao Qibin, Zhang Jin, Wang Jijun, Zhao Guoze, Tang Ji. 2012. Electrical resistivity structures between the Northern Qilian Mountains and Beishan Block, NW China, and tectonic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200 ~ 201: 92 ~ 104.
- Xiao Qibin, Zhang Jin, Zhao Guoze, Wang Jijun. 2013. Electrical resistivity structures northeast of the Eastern Kunlun Fault in the Northeastern Tibet: Tectonic implications. *Tectonophysics*, 601: 125 ~ 138.
- Yin An, Dang Yuqi, Wang Licun, Jiang Wuming, Zhou Suping, Chen Xuanhua, Gehrels G E, McRivette M W. 2008. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan – Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7 ~ 8): 813 ~ 846.
- Yin An, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, R. Ingersoll V, Zhang Qing, Zhou Xianqiang, Wang Xiaofeng, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257 ~ 1295.
- Yuan Daoyang, Ge Weipeng, Chen Zhenwei, Li Chuanyou, Wang Zhicai, Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Zheng Wenjun, Craddock W H, Dayem K E, Duvall A R, Hough B G,

- Lease R O, Champagnac J D, Burbank D W, Clark M K, Farley K A, Garzione C N, Kirby E, Molnar P, Roe G H. 2013. The growth of northeastern Tibet and its relevance to large-scale continental geodynamics: A review of recent studies. *Tectonics*, 32: 1358 ~ 1370, doi:10.1002/tect.20081
- Yue Yongjun, Graham S A, Ritts B D, Wooden J L. 2005. Detrital zircon provenance evidence for large-scale extrusion along the Altyn Tagh fault. *Tectonophysics*, 406: 165 ~ 178.
- Yue Yongjun, Ritts B D, Graham S A, Wooden J L, Gehrels G E, Zhang Zhicheng. 2004. Slowing extrusion tectonics: lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 217: 111 ~ 122.
- Zhang Peizhen, Molnar P, Xu Xiwei. 2007. Late Quaternary and present-day rates of slip along the Altyn Tagh Fault, northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26(5): TC5010.
- Zheng Dwen, Clark M K, Zhang Peizhen, Zheng Wenjun, Farley K A. 2010. Erosion, fault initiation and topographic growth of the North Qilian Shan (northern Tibetan Plateau). *Geosphere*, 6: 937 ~ 941.
- Zheng Wenjun, Zhang Huiping, Zhang Peizhen, Molnar P, Liu Xingwang, Yuan Daoyang. 2013a. Late Quaternary slip rates of the thrust faults in western Hexi Corridor (Northern Qilian Shan, China) and their implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Geosphere*, 9: 342 ~ 354.
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, Ge Weipeng, Molnar P, Zhang Huiping, Yuan Daoyang, Liu Jianhui. 2013c. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi Corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 32(2): 271 ~ 293.
- Zheng Wenjun, Zhang Peizhen, He Wengui, Yuan Daoyang, Shao Yanxiu, Zheng Dwen, Ge Weipeng, Min Wei. 2013b. Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults. *Tectonophysics*, 584(0): 267 ~ 280.

Deformation Analysis of Fluvial Terrace in Jinta' nanshan Mountains, Gansu Province

WEN Zhenling, HU Xiaofei, PAN Baotian, LU Yaoyang, CAO Xilin, ZHANG Jian

Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 730000

Abstract: The uplift and deformation of Jinta' nanshan Mountains is generally attributed to the northward pushing effect of the Xizang (Tibetan) Plateau. The characteristics of the tectonic mechanism in this active area therefore provide a valuable insight into the northward extension of the Xizang (Tibetan) Plateau. According to field observation, a well-preserved gravel layer was accumulated on the top surface of Jinta' nanshan Mountains, presenting weak consolidation, well psephicity and sorted. Their lithological composition mainly consists of sandstone, quartz sandstone, and siliceous sandstone. The surface level of this gravel layer can be tracked for a long distance, and correlated with the terrace T_2 along the Heihe River, based on their lithological composition and special distribution. The field measurements of terrace elevation were performed using a differential GPS system. These results combined with the analysis for the attitude of underlying stratum, indicate that the terrace level was folded obviously and in the form of limb rotation. The geometrical characteristics of this fold deformation along the terrace T_2 are characterized by tilted forelimb, gentle back limb with broad core. On the basis of the deformational analysis for the terrace T_2 , a preliminary model was constructed to evaluate and calculate this fold deformation and correlated fault systems. These results suggest that the uplift and the shortening occurring on the hanging wall of this fault, after the formation of terrace T_2 , are 200 m and 143 ~ 190 m, respectively. A averaged sliding rate of 1.18 ± 0.16 mm/a along the listric fault is further calculated since the middle Pleistocene. Owing to the deep-thrust fault, Jinta Nanshan has been deformed in the form of fold, and resultant faults can extend a depth of ca. 16 km into subsurface. Based on the tectonic analysis in the region, the fold deformation along the terrace T_2 are probably associated with the faults, which were formed by collision between Alashan and Qaidam—Qilian block in the north margin of Jinta' nanshan Mountains. The uplift of Jinta' nanshan Mountains since the middle Pleistocene maybe represents the current process of northeastward extension of the Xizang (Tibetan) Plateau.

Keywords: Jinta' nanshan Mountains; fluvial terrace deformation; listric fault related fold; geometry model