

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.11.004

北天山前陆冲断带山麓背斜带新发现反冲断层陡坎及活动褶皱陡坎

姚远^{1,2,3}, 陈杰^{1,2*}, 李涛^{1,2}, 覃金堂^{1,2}, 邸宁^{1,2}, 张伟恒^{1,2}YAO Yuan^{1,2,3}, CHEN Jie^{1,2*}, LI Tao^{1,2}, QIN Jintang^{1,2}, DI Ning^{1,2}, ZHANG Weiheng^{1,2}

1.新疆帕米尔陆内俯冲国家野外科学观测研究站,北京 100029;

2.中国地震局地质研究所,地震动力学国家重点实验室,北京 100029;

3.中国地震局乌鲁木齐中亚地震研究所,新疆 乌鲁木齐 830011

1. *Xinjiang Pamir Intracontinental Subduction National Field Observation and Research Station, Beijing 100029, China;*2. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;*3. *Urumqi Institute of Central Asia Earthquake, China Earthquake Administration, Urumqi 830011, Xinjiang, China*

摘要:构造楔是活动挤压区重要的发震构造。北天山前陆冲断带发育复杂的挤压构造楔,并在地表形成3~4排褶皱带,前人普遍认为最南部的第一排山麓背斜带自第四纪以来已不再活动。野外调查发现,第一排山麓背斜带——南安集海背斜北翼单斜区发育2条近平行排列的、向南逆冲的晚第四纪活动反冲断层(喀沙反冲断层,KBT),断错安集海河两岸的晚第四纪地貌面,并形成一系列坡向南的反向断层陡坎。安集海河组灰绿色泥岩沿KBT顺层向南逆冲至沙湾组砖红色砂岩之上,造成地层的重复出露。在安集海河西岸,南侧的KBT断层面顺层呈铲型构成断弯,断层的持续活动使上盘阶地和基座面均发生同步弯曲,形成向斜断弯褶皱陡坎。褶皱陡坎南侧的阶地堆积较薄,向北明显增厚,具有生长地层的特征,表明KBT在阶地堆积过程中有持续活动。喀沙反冲断层陡坎及活动褶皱陡坎的发现表明,南安集海背斜晚第四纪以来仍在活动。这些地表反冲断层及相关褶皱构造为研究准噶尔南缘构造楔的活动性提供了窗口,为进一步限定活动构造楔的变形机制、速率和生长演化历史提供了可靠便捷的途径。

关键词:活动褶皱;反冲断层;褶皱陡坎;南安集海背斜;北天山**中图分类号:**P548 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)11-1942-08

Yao Y, Chen J, Li T, Qin J T, Di N, Zhang W H. Newly discovered backthrust fault and related active fold scarp in the first piedmont anticline belt of the foreland thrust belt of the North Tianshan. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(11): 1942-1949

Abstract: The tectonic wedge is an important seismogenic structure in the active compression area. The foreland thrust belts of the North Tianshan developed a complex extruded tectonic wedge and formed 3~4 groups of fold belts on the surface. It was generally believed that the first group of piedmont anticline belt in the southern part had ceased to be active since the Quaternary. In the field investigation, we found that there were two nearly parallel Late Quaternary active back thrusts (Kasha backthrust fault, KBT) arranged southward in the first piedmont anticline belt, the monocline area on the north wing of South Anjihai anticline. It had faulted the Late Quaternary landform on both sides of the Anjihai river and formed a series of southward thrust fault scarps. The gray-green mudstones of

收稿日期:2020-06-01; **修订日期:**2021-10-21

资助项目:中国地震局地质研究所基本科研业务专项《北天山前陆冲断带的复杂级联破裂与大地震(I)》(编号:IGCEA1810)、地震动力学国家重点实验室课题《活动隐伏逆断裂研究方法初探》(编号:LED2016A05)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目《天山与大高加索地区的活动褶皱作用与强震》(批准号:41911530109)、国家自然科学基金项目《北天山前陆冲断带山麓褶皱带反冲断层的晚第四纪活动》(批准号:42102275)和自治区重点研发任务专项《天山北坡活动构造三维形态研究及孕震模型构建》(编号:2020B03006-1)

作者简介:姚远(1988-),男,硕士,副研究员,从事第四纪地质、构造地质研究工作。E-mail:yy8096658@126.com***通信作者:**陈杰(1966-),男,博士,研究员,从事活动构造、第四纪地质及其年代学等研究。E-mail:chenjie@ies.ac.cn

the Anjihaihe Formation (E_{2-3a}) thrust southward along the KBT bedding onto the brick-red sandstones of the Shawan Formation (E_3-N_1s), it causing repeated exposure of the strata. On the west of the Anjihai river, the KBT plane on the south side is shovel-shaped along the bedding to form a fault bend. The continuous activity of the fault caused the simultaneous bending of the upper terrace and the base surface, forming a slanting fault-bending fold scarp. The terraces on the south side of the fold scarp are relatively thin, and they have obvious thickening to the north. They have the characteristics of growing strata, indicating that KBT has continuous activities during the terrace accumulation process. The discovery of the Kasha backthrust fault scarp and active fold scarp indicate that the South Anjihai anticline has been active since the Late Quaternary. These backthrust faults and related fold structures provide a window for us to study the activity of tectonic wedges in the southern margin of Junggar, and provide a reliable and convenient way to further define the deformation mechanism, rate and growth history of the active tectonic wedge.

Key words: active fold; backthrust fault; fold scarp; South Anjihai anticline; Northern Tianshan

1906 年玛纳斯 M_8 地震^[1]、1983 年美国 Coalinga ($M_w = 6.5$) 地震^[2]、2015 年新疆皮山 $M_w 6.4$ 地震^[3-4] 等的发震构造可能均为深部的活动构造楔, 涉及多条断层的级联破裂, 表明构造楔是活动挤压区重要的发震构造。构造楔 (tectonic wedge) 指倾向相反的、相互连接的基底 (或下部) 前冲主逆断层和向后陆反冲的被动顶板断层 (roof thrust) 组成的楔形三角带 (图 1), 两断层在楔形体的顶端合并在一起^[5-6], 两断层位移传递的方向相反, 共同吸收了楔形体顶端的构造位移量, 并在地表形成褶皱^[6-8]。由于前冲主逆断层多表现为隐伏断层且未出露地表, 地震反射剖面数据解释也存在多解性和局限性^[9-11], 使构造楔的活动习性研究成为难题。目前尚无法回答被动顶板反冲断层与下部前冲主逆断层是如何共同活动、相互作用的, 前冲主逆断层的滑动量是如何被顶板反冲断层吸收的, 被动顶板反冲断层的几何学、运动学及力学特征如何?

已有地震反射剖面的详细研究表明, 北天山晚新生代前陆冲断带发育复杂的挤压构造楔 (图 2)。发育在准噶尔南缘的深部挤压构造楔不仅控制了前陆冲断带不同构造带间位移量的消减, 而且控制了前陆盆地地表三排褶皱分布的范围和变形方式^[12-18]。该构造楔在向北扩展过程中, 一部分位移量沿构造楔顶部的反冲断层向南消减并切割上覆地层, 形成第一排昌吉-齐古山麓褶皱带^[14-16, 19] (图 2); 另一部分位移量沿中-上侏罗统西山窑组 (J_{2-3x}) 煤层向北传递并在断坡位置引发褶皱变形, 形成第二排吐-玛-霍褶皱带 (图 2) 和第三排安集海褶皱带^[14, 16-20]。然而, 由于地震反射剖面解释的多解性和局限性, 不同学者提出的构造楔模式不一致^[1, 19-22]。尽管在最南部山麓褶皱带的喀拉杂背斜、昌吉背斜、齐古背斜地震反射剖面上解译出多

条反冲断层^[1, 19-20], 但缺乏对这些反冲断层的详细野外调查及活动习性研究。

前人普遍认为, 北天山前陆冲断带第一排山麓背斜带在第四纪已不再活动^[19, 21, 23]。但笔者最近在北天山前陆冲断带第一排南安集海背斜北翼发现多条顺层产出的反冲断层露头及断错晚第四纪地貌面的断层陡坎, 并在安集海河西岸的背斜单斜区反冲断层上盘发现活动褶皱陡坎。

1 区域地质背景

南安集海背斜位于天山前陆冲断带第一排山麓褶皱带内, 西邻托斯台背斜, 东接昌吉-齐古背斜。该背斜轴总体走向 75° 左右, 长轴长 23 km, 南北宽 3~6 km, 为短轴背斜 (图 3)。该背斜为南缓北陡的不对称背斜, 其南、北翼地层的最大倾角分别为 45° 和 70° 。邓起东等^[23] 对南安集海背斜中西段进行了 1:5 万活断层填图, 认为该背斜核部出露的最老地层为侏罗系八道湾组, 地层倾角较平缓; 由核部向北依次出露白垩系 (K), 古近系紫泥泉子组 (E_{1-2z})、安集海河组 (E_{2-3a})、沙湾组 (E_3-N_1s)、塔西河组 (N_1t), 新近系独山子组 (N_2d), 下更新统西域组砾岩 (Q_{1x}) 等 (图 3), 组成一个单斜构造。

南安集海背斜南翼被准噶尔南缘断裂 (SJT) 切割, 直接与石炭系呈断层接触。在安集海河以东, 该背斜与北侧霍尔果斯背斜以一向斜构造相接 (图 3)。

2 喀沙反冲断层 (KBT) 陡坎及相关褶皱陡坎

2.1 喀沙反冲断层 (KBT) 与反向断层陡坎

在邓起东等^[23] 编制的南安集海背斜 1:5 万活断层地质地貌图上, 在安集海河西岸背斜北翼单斜区, 灰绿色安集海河组向南逆冲在砖红色沙湾组之上, 但邓起东等^[23] 并未对该断层描述, 也未发现断

层陡坎。

笔者在野外考察中发现,该断层主要沿北天山前陆盆地区域性滑脱面灰绿色安集海河组($E_{2-3}a$)底部的泥岩、泥灰岩地层顺层滑动,并向南逆冲在砖红色沙湾组之上,沿断层发现多处不同地貌面上的反向断层陡坎(图3—图6)。该断层发育在南安集海背斜的北翼单斜区(图3),全长约40 km,总体走向近东西向,倾向北,倾角 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。

在安集海河以东的阔可村—博尔通古乡一线(图3),该断层断错了所有晚第四纪洪积扇面或阶地面,形成不同高度、坡向南的反向断层陡坎,断层上盘安集海河组灰绿层与沙湾组砖红层倾向北,倾角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。该断坎总体走向近东西向,在安集海河东岸阔可村北最高一级地貌面上断坎高约120 m,在低一级地貌面上断坎高约40 m(图4-a);向东断坎规模渐小。沿该反向断坎下盘为喀沙公路,故将该断裂命名为喀沙反冲断裂(Kasha Back Thrust,简称KBT)。

在博尔通古乡北侧,近东西走向、倾向北的KBT逆冲断错了山前的晚第四纪洪积扇,形成清晰的断层陡坎,垂直错距达28 m(图4-b)。断坎上盘洪积扇沉积为灰黑色砾石层,粒径 $5\sim 15$ cm,偶见巨砾,砾石磨圆度一般,可能为冰水堆积。洪积扇上覆垂直节理发育的风积黄土,厚约8 m。再向东延伸,该断坎规模渐小并尖灭于金沟河西岸阶地上。在博尔通古乡西北侧,发育另一反向断层陡坎,长约8 km。在安集海河以东,KBT在地表总长约为25 km。

在安集海河西岸南安集海背斜北翼单斜区内,由于河流、冲沟的侵蚀,地貌面下伏基岩出露良好(图3、图5、图6),安集海河组、沙湾组和独山子组构成了北翼单斜区的基本结构,地层间相互平行产出,倾向北,倾角约 40° 。在该段地表KBT包括南、北两支(图3、图5),均沿灰绿色安集海河组底部泥岩滑脱层顺层向南逆冲,逆冲至更年轻的沙湾组砖红色砂岩、泥岩地层之上,造成了地层的重复。该断层断错了单斜区内不同期次的地貌面,形成清晰的坡向南的反向断层陡坎(图4-c、图5-b)。该段KBT地表长约15 km,断层倾向北,向西逐渐终止于SJT(准噶尔南缘断裂)。

2.2 喀沙反冲断层(KBT)上盘的向斜断弯褶皱陡坎

在野外调查中,笔者在安集海河西岸发现KBT南支断层上盘向斜区发育的褶皱陡坎(图3、图5、

图6)。褶皱陡坎是一种不同于断层陡坎构造作用的陡坎地貌类型,是初始水平或近水平的地貌面(或地层、不整合面、侵蚀面等)受下伏逆断层或隐伏断层的转折冲断作用,在以膝折带迁移方式通过活动枢纽时发生差异性隆升而在地表形成的陡坎^[24-31]。

该处KBT断层沿安集海河组底部泥岩地层顺层产出,断层面产状上陡下缓,呈铲形构成断弯,同时在剖面处测量得到阶地面和基座面的断层陡坎高度分别为45 m和37 m(图6-b)。该断层上盘的安集海河组、沙湾组也同步呈上陡下缓产出,并随着远离断层向北倾角逐渐变缓,在200 m的水平距离内,地层倾角由 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 渐变为 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。该断层的持续活动使上盘阶地面和基座面发生了同步弯曲变形,形成坡向北的褶皱陡坎。该褶皱陡坎阶地面的高差39 m,基座面的高差为22 m。在T3和T4阶地面上均发育有坡向北的、与活动向斜弧形枢纽带对应的褶皱陡坎(图4-c),坎高分别为7 m和39 m。这些褶皱陡坎的形态明显不同于断层陡坎,坡度较平缓,最大坡度随阶地面越老而越陡。与断层陡坎不同的是,在褶皱陡坎附近下伏基岩和阶地沉积并未发生断错。

为了限定T3阶地的年龄,本次在该阶地上采集了光释光年龄样品,样品为黄土块状样品,外部用胶带包裹锡纸,完全隔绝光线2次照射。本文中光释光样品的处理在中国地震局地质研究所新构造与年代学实验室完成,采用粗颗粒钾长石两步法进行试验测试。据已测得的光释光年龄(表1),T3阶地的有效年龄数据为 108.2 ± 14.0 ka,因此T3阶地被废弃的时代为晚更新世早期。

南安集海背斜单斜区褶皱陡坎具有以下特征:①这些陡坎是由于KBT向南逆冲活动形成的褶皱陡坎,而不是断层陡坎或阶地陡坎。②在产出位置上,褶皱陡坎走向与地层走向一致,均发育在断层上盘的向斜枢纽带附近,地表迹线和地层产状突变的位置均与枢纽位置对应,断层上盘的阶地面及其基座面发生同步弯曲,构成向斜断弯褶皱陡坎,其形成机制与Hubert-Ferrari等^[29]和Chen等^[28]提出的运动学模式完全一致。③陡坎南侧的阶地堆积较薄(34.5 m),向北明显增厚(69 m),具有生长地层的特征(图5-c、图6),表明KBT在阶地面形成过程中有持续的活动。

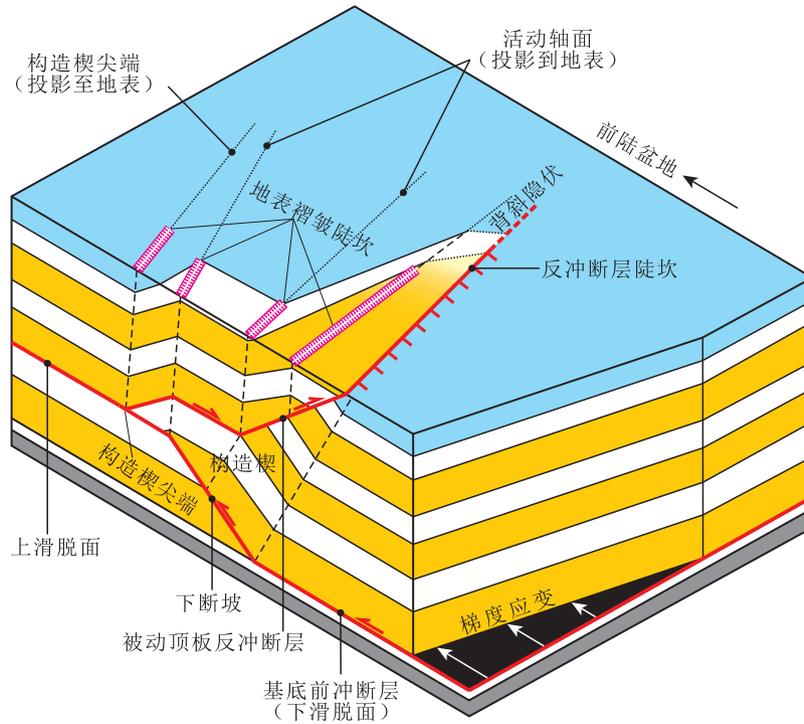


图 1 构造楔的三维几何示意图(据参考文献[5-6]修改)

(构造楔由基底前冲断层(下滑脱面、下断坡)与顶板被动反冲断层所围限。伴随反冲断层向后陆的逆冲作用在上盘形成一背斜构造, 并在地表形成多条坡向前陆的褶皱陡坎。沿走向由于前冲断层的梯度应变作用, 不同位置吸收的缩短量不同, 在地表表现为反冲断层及上盘背斜逐渐尖灭。地表反冲断层及相关褶皱陡坎为研究隐伏构造楔的活动性提供了一个窗口)

Fig. 1 Schematic 3D diagram of a tectonic wedge

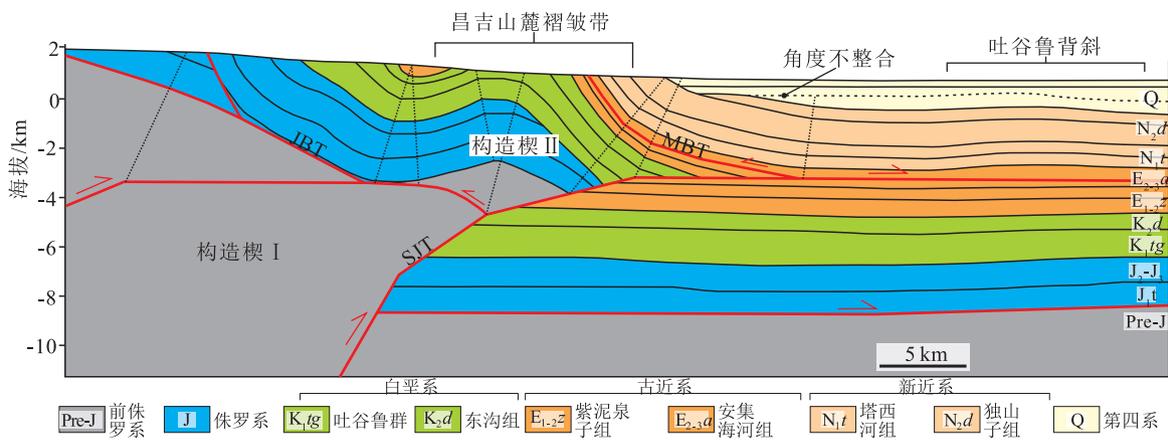


图 2 北天山前陆冲断带第一排昌吉-齐古山麓褶皱带地质横剖面(据参考文献[19]修改)

Fig. 2 Geological cross section of the first row (Changji-Qishan piedmont fold belt) in the North Tianshan Foreland-Thrust Belt (FTB)

SJT—准噶尔南缘断裂; JBT—准噶尔反冲断层; MBT—山麓背斜带反冲断层; 构造楔 I—由基底前冲断层(SJT)与顶板反冲断层(JBT)围限形成的构造楔; 构造楔 II—由基底前冲断层(SJT)和顶板反冲断层(MBT)围限

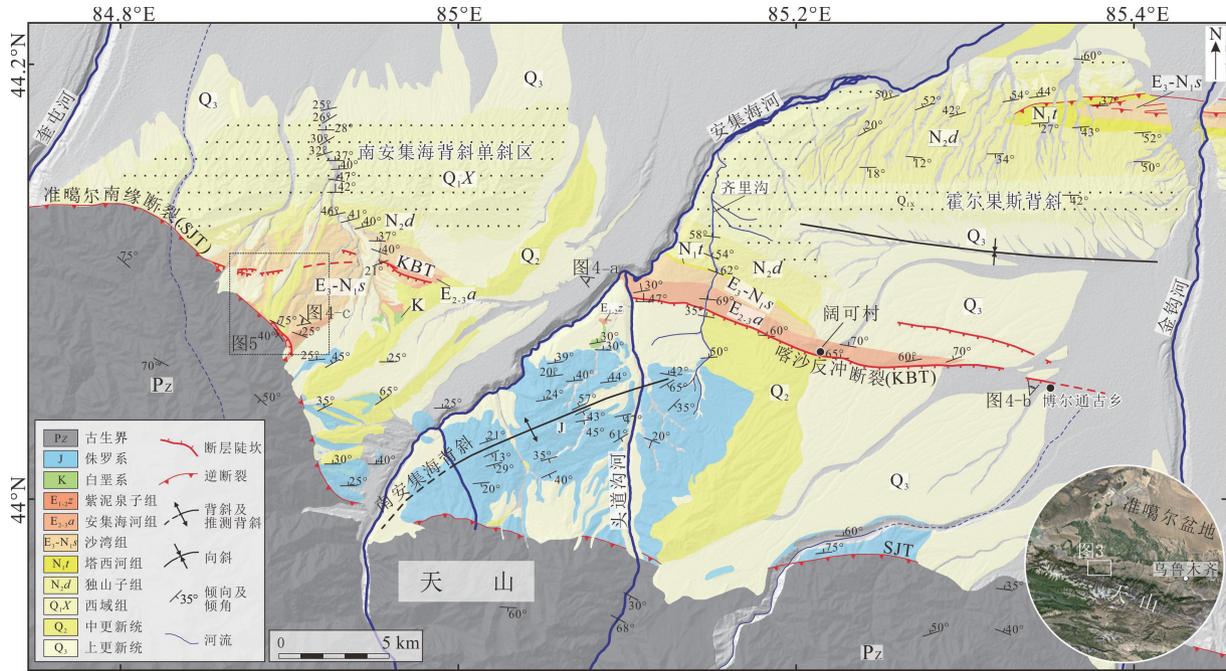


图3 南安集海背斜地质简图(据参考文献[23]和本研究野外填图编制)
 (在博尔通古乡以西,新发现的喀沙反冲断层(KBT)断错了不同地貌面,并在地表形成了清晰的反向断层陡坎,断层陡坎在图中用齿线标注,齿位于下降盘;KBT可能仅发育在南安集海背斜范围内)

Fig. 3 Geological map of South Anjihai anticline

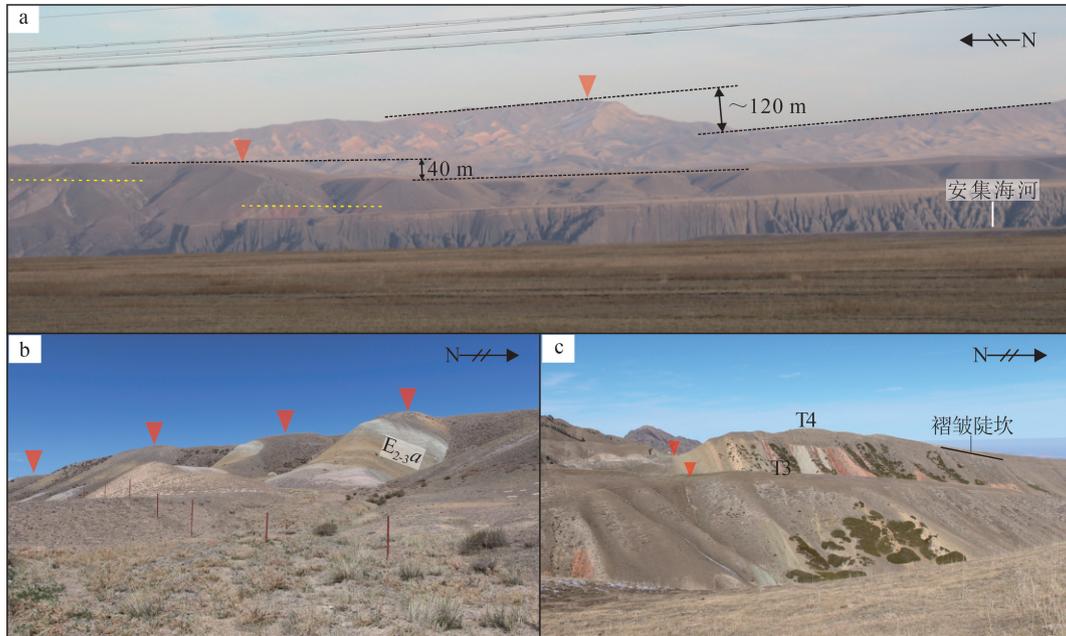


图4 喀沙反冲断层在地表形成反向断层陡坎(照片位置见图3)

Fig. 4 The backthrust scarp formed at the surface by Kasha backthrust fault

a—安集海河东岸 KBT 断错不同期次的山前冲洪积扇,形成高度不一的断层陡坎,镜向东,黄色虚线指示阶地面基座面;b—博尔通古乡西北,KBT 断错山前不同期冲洪积扇,形成反向断层陡坎,镜向北;c—南安集海背斜北翼单斜区,KBT 断错不同期次阶地面,形成反向断层陡坎,在断层上盘形成向斜断弯褶皱陡坎,镜向西。 E_{2-3a} —古近纪安集海河组

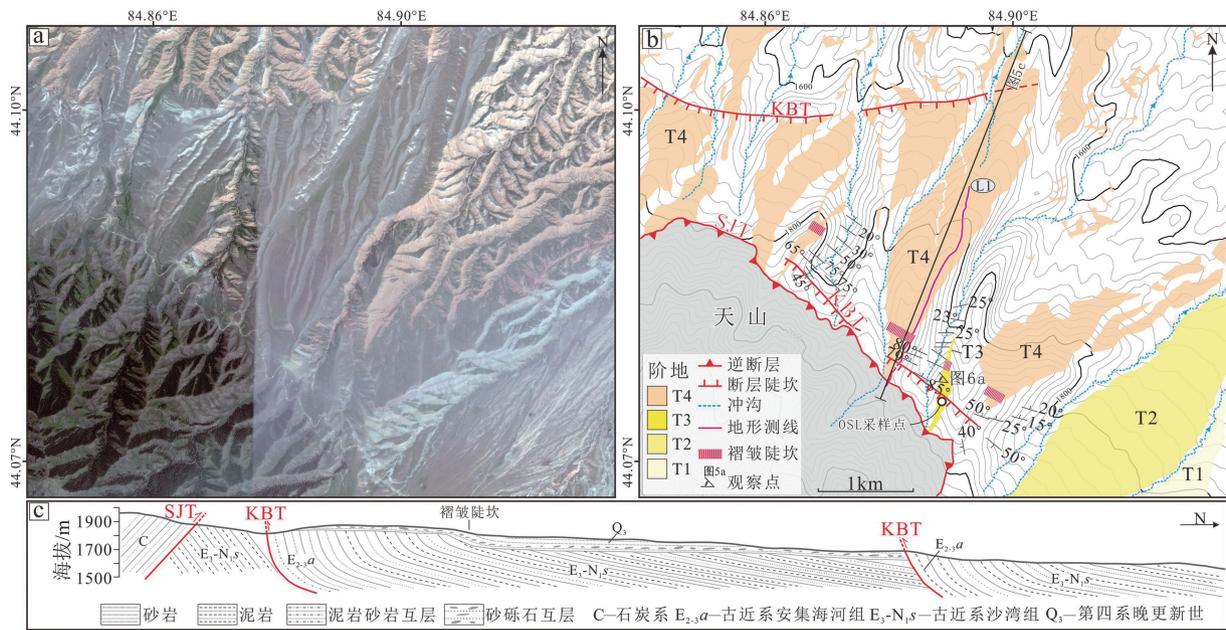


图 5 南安集海背斜北翼单斜区河流阶地、反冲断层陡坎和褶皱陡坎分布(位置见图 3)

Fig. 5 The distribution of terraces, backthrust scarps and fold scarps in the northern limb of South Anjihai anticline

a—Google Earth 影像及实测地层产状;b—阶地、断层和褶皱陡坎地貌解译图及地形测线位置,底图为 20 m 等高线,齿线为新发现的断层陡坎,齿指向下降盘,阴影红色间断线为新发现的褶皱陡坎;c—沿 L1 测线的地质剖面简图,该剖面至少发育 2 条反冲断层,造成地层的重复

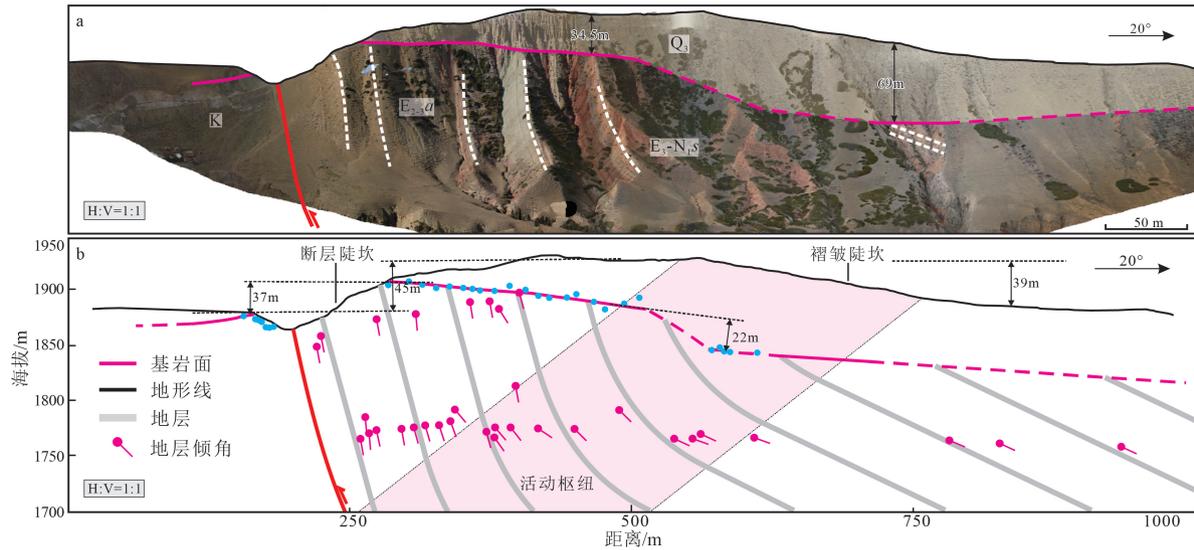


图 6 南安集海背斜北翼单斜区 T4 阶地发育的反冲断层陡坎与褶皱陡坎地质剖面(测线位置见图 5-b;地层代号同图 5)

Fig. 6 The geological profile of backthrust fault scarp and fold scarp formed in the northern limb of South Anjihai anticline.

a—褶皱陡坎和断层陡坎野外照片(镜向西),位置见图 5,紫红色实线为阶地基座面,白色点线为地层层面;b—解译地质剖面,紫红色实线、间断线为阶地基座面、推测基座面,灰色粗线条为推测地层。地层倾角上陡下缓,倾角变化最大处所在活动褶皱枢纽对应地表的褶皱陡坎

表 1 T3 阶地面沉积物光释光年龄测定值
Table 1 OSL age of sediments on terrace T3

阶地	埋深 /m	²³⁸ U / (Bg · kg ⁻¹)	²²⁶ Ra / (Bg · kg ⁻¹)	²³² Th / (Bg · kg ⁻¹)	⁴⁰ K / (Bg · kg ⁻¹)	含水 量/%	内剂量 / (Gy · ka ⁻¹)	环境剂 量率 / (Gy · ka ⁻¹)	等效剂量 / Gy	年龄/ka
T3	1.7	33.9±6.7	35.4±0.6	33.0±0.4	567.4±10.1	5	0.545±0.026	3.5±0.2	382.6±45.4	108.2±14.0

3 讨论与结论

笔者在北天山前陆冲断带山麓背斜带南安集海背斜北翼北倾单斜区发现了晚第四纪活动的数条近平行排列、向南逆冲的反冲断层,断层断错了安集海河两岸晚第四纪阶地,在阶地面上发育了反向断层陡坎。这些反冲断层地表均表现为沿灰绿色安集海河组泥岩、泥灰岩顺层发育的向南逆冲的逆断层,使安集海河组逆冲在更年轻的砖红色沙湾组砂岩之上,导致部分地层重复出露。

在安集海河西岸,南安集海背斜北翼北倾的新生代地层单斜区中至少发育 2 条反冲断层陡坎(KBT),地表清晰可见南侧反冲断层露头。该断层断错了 T3 和 T4 阶地基座面和阶地面,形成坡向南的反向断层陡坎。断层上盘安集海河组倾角随着远离断层向北渐缓,该断层顺层呈铲形产出,构成断弯。由于断层的持续活动,断层上盘阶地基座面和阶地面发生同步弯曲变形,形成向斜断弯褶皱陡坎,其形成机制与 Hubert-Ferrari 等^[29]和 Chen 等^[28]提出的运动学模式完全一致。光释光测年数据揭示,T3 阶地被废弃年龄为 108.2 ± 14.0 ka,属于晚更新世早期,证明该反冲断层在晚更新世仍有活动,属于一条晚更新世活动断裂。

前人在北天山山麓背斜带均发现了不同规模的反冲断层^[1, 17, 19-20],但普遍认为山麓背斜带及其北翼反冲断层第四纪已不再活动。发育在齐古背斜北翼向南逆冲的江南庙断层及昌吉背斜北翼向南逆冲的西山断层、王家沟断层均可能是反冲断层。邓起东等^[23]认为,江南庙断层是晚更新世断层,杨纪林^[32]、Hu 等^[33]则认为,该断层是全新世活动断层。西山断裂、王家沟断层均断错了全新世以来的地貌面或地层^[34-36]。需要指出的是,这些反冲断层沿走向仅发育在各自所在背斜范围内,其地表迹线彼此之间并不相连。

2016 年 12 月 8 日,呼图壁 Ms6.2 地震的发震断层可能也是一向南反冲的逆断层^[22]。由此看来,这些向南逆冲的反冲断层现今可能仍在活动并具有一定的发震能力,但对于这些反冲断层的系统,全面研究尚少见。亟需回答:何种类型的构造楔控制了南安集海背斜的成生?如何控制的?该构造楔现今是否仍在活动?是否有可能发生 7 级以上强震?这些发育在山麓背斜带北翼单斜区的反冲断

层与 SJT 及第二排霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁逆断裂—褶皱带有何关系?这些反冲断层形成机制如何?全新世以来是否仍在活动?反冲断层吸收的变形量及速率如何?构造楔下部前冲主逆断层控制了上部被动顶板反冲断层及相关褶皱的发展演化,显然,出露地表的反冲断层及相关褶皱构造是回答上述问题和理解构造楔形成发育力学机制的关键,为研究构造楔的活动性提供了一个窗口,为进一步限定活动构造楔的变形机制、速率和生长演化历史提供了可靠便捷的途径。

致谢:感谢天津大学胡贵明博士在野外工作中的帮助,并且开展了非常重要的讨论;感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] Stockmeyer J M, Shaw J H, Guan S. Seismic Hazards of Multisegment Thrust-Fault Ruptures: Insights from the 1906 Mw 7.4-8.2 Manas, China, Earthquake [J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 85 (4): 801-808.
- [2] Guzofski A, Shaw J H, Lin G Q, et al. Seismically active wedge structure beneath the Coalinga anticline, San Joaquin basin, California [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(B3): B03S05.
- [3] Li T, Chen J, Fang L H, et al. The 2015 Mw6.4 Pishan earthquake: Seismic hazards of an active blind wedge thrust system at the Western Kunlun range front, Northwest Tibetan Plateau [J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(3): 601-608.
- [4] Sun J, Shen Z K, Li T, et al. Thrust faulting and 3D ground deformation of the 3 July 2015 Mw 6.4 Pishan, China Earthquake from Sentinel-1A radar interferometry [J]. *Tectonophysics*, 2016, 683: 77-85.
- [5] VonHagke C, Malz A. Triangle zones - Geometry, kinematics, mechanics, and the need for appreciation of uncertainties [J]. *Earth - Science Reviews*, 2018, 177: 24-42.
- [6] Medwedeff D A. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge-thrust, Wheeler Ridge, California [C]//Mitra S, Fisher G W. *Structural Geology of Fold and Thrust Belts*. Johns Hopkins University Press, 1992.
- [7] Medwedeff D A. Structural analysis and tectonic significance of Late-Tertiary and Quaternary, Compressive - Growth Folding [D]. San Joaquin Valley, California: Ph.D. thesis, Princeton University, 1988: 1-184.
- [8] Shaw J, Connors H C, Suppe J. Seismic Interpretation of Contractional Fault-Related Folds [J]. *An AAPG Seismic Atlas, Studies in Geology*, 2005: 53.
- [9] Taborda A, Spratt D. Structural style in the Peel region [C]//Butler R, McCaffrey B, Torvela T. Mobil057 - 79 - 44: Peel Plateau; Northwest Territories. *Virtual Seismic Atlas*. <http://www.seismicatlas.org/entity?id=5cba926c-3cbf-4de8-8861-18f3335aaede>. 2008.

- [10] Ortner H, Aichholzer S, Zerlauth M, et al. Geometry, amount, and sequence of thrusting in the subalpine Molasse of western Austria and southern Germany, European Alps[J]. *Tectonics*, 2015, 34: 1-30.
- [11] Schuller V, Frisch W, Herzog U. Critical taper behaviour and out-of-sequence thrusting on orogenic wedges—an example of the eastern Alpine Molasse Basin[J]. *Terra Nova*, 2015, 27: 231-237.
- [12] 管树巍, 张朝军, 何登发, 等. 前陆冲断带复杂构造解析与建模——以准噶尔盆地南缘第一排背斜带为例[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1131-1140.
- [13] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 复杂构造解析中的几何学方法与应用[J]. *地球科学*, 2007, 42(4): 722-739.
- [14] 管树巍, 李本亮, 何登发, 等. 构造模形体的识别与勘探——以准噶尔盆地南缘为例[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 129-137.
- [15] 管树巍, 陈竹新, 方世虎. 准噶尔盆地南缘油气勘探的 3 个潜在领域——来自构造模型的论证[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 37-44.
- [16] 管树巍, 何登发, 雷勇良, 等. 中国中西部前陆冲断带运动学分类、模型与勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1): 66-78.
- [17] 李本亮, 管树巍, 陈竹新, 等. 断层相关褶皱理论与应用——以准噶尔盆地南缘地质构造为例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [18] 李本亮, 管树巍, 陈竹新, 等. 楔形构造在山前冲断构造位移动量消减中的作用——以准噶尔盆地南缘为例[J]. *地质学报*, 2012, 86(6): 890-897.
- [19] Qiu J H, Rao G, Wang X, et al. Effects of fault slip distribution on the geometry and kinematics of the southern Junggar fold-and-thrust belt, northern Tian Shan[J]. *Tectonophysics*, 2019, 772: 1-14.
- [20] Guan S W, Stockmeyer J M, Shaw J H, et al. Structural inversion, imbricate wedging, and out-of-sequence thrusting in the southern Junggar fold-and-thrust belt, northern Tian Shan, China [J]. *The American Association of Petroleum Geologists*, 2016, 100(9): 1443-1468.
- [21] Lu H H, Cheng L, Wang Z, et al. Latest Quaternary rapid river incision across an inactive fold in the northern Chinese Tian Shan foreland[J]. *Quaternary Sciences Review*, 2018, 179: 167-181.
- [22] Li Y, Wei D, Tian H, et al. 3D structural model of an out-of-sequence earthquake in China: Implication for the reactivation of positive inversion structures along the northern Tianshan fold-and-thrust belt[J]. *Tectonics*, 2018, 37(12): 4359-4376.
- [23] 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [24] 卢华复, 王胜利, 贾东, 等. 天山中段南麓的第四纪褶皱作用[J]. *科学通报*, 2002, 47(21): 1675-1679.
- [25] Thompson S C, Weldon R J, Rubin C M, et al. Late Quaternary slip rates across the central Tien Shan, Kyrgyzstan, central Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(B9): 2203.
- [26] 陈杰, Scharer K M, Burbank D W, 等. 西南天山明尧勒背斜的第四纪滑脱褶皱作用[J]. *地震地质*, 2005, 27(4): 513-529.
- [27] Scharer K M, Burbank D W, Chen J, et al. Kinematic models of fluvial terraces over active detachment folds: constraints on the growth mechanism of the Kashi-Atushi fold system, Chinese Tian Shan[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2006, 1(18): 1006-1021.
- [28] Chen Y G, Lai K Y, Lee Y H, et al. Coseismic fold scarps and their kinematic behavior in the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: B03S02.
- [29] Hubert-Ferrari A, Suppe J, Gonzalez-Mieres R, et al. Mechanisms of active folding of the landscape (southern Tianshan, China) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: B03S09.
- [30] 李涛, 陈杰, 肖伟鹏. 滑脱褶皱陡坎的变形特征和运动学模型: 以帕米尔-南天山前陆地区明尧勒背斜为例[J]. *地震地质*, 2014, 36(3): 677-691.
- [31] 张玲, 杨晓平, 黄伟亮, 等. 褶皱陡坎中相关断层在缩短量计算中的作用——以东秋里塔格背斜为例[J]. *地震地质*, 2015, 37(3): 697-708.
- [32] 杨纪林. 新疆北天山江南庙断层陡坎及其形成机制[J]. *内陆地震*, 2000, 14(2): 128-131.
- [33] Hu G M, Chen J, Zhang W H, et al. Out-of-sequence backthrusting since the Middle Pleistocene revealed by the Jiangnanmiao thrust fault along the northern Tian Shan, China[J]. *Tectonics*, <https://doi.org/10.1029/2020TC006662>. 2021.
- [34] 吴传勇, 沈军, 李军, 等. 乌鲁木齐西山断层系的新构造变形特征与机制[J]. *地震学报*, 2009, 31(1): 42-49.
- [35] 吴传勇, 沈军, 史杰, 等. 乌鲁木齐王家沟断层组地表变形特征及强变形带宽度[J]. *地震地质*, 2011, 33(1): 56-66.
- [36] 陈立春. 北天山乌鲁木齐转换区构造系晚第四纪活动性[D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 2011.