



引文格式: 张子亚, 郭召杰, 宋岩, 等. 走滑断裂的生长地层识别与应用: 以塔里木盆地西北缘皮羌断裂为例[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 196–205. DOI: 10.12401/j.nwg.2025011

Citation: ZHANG Ziya, GUO Zhaojie, SONG Yan, et al. Identification and Application of Growth Strata Associated with Strike-Slip Faults: Example from the Piqiang Fault in the Northwestern Margin of the Tarim Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 196–205. DOI: 10.12401/j.nwg.2025011

走滑断裂的生长地层识别与应用: 以塔里木盆地 西北缘皮羌断裂为例

张子亚^{1,2}, 郭召杰³, 宋岩¹, 杨威¹, 刘达东¹, 程翔^{4,*}

(1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249; 2. 中国地质科学院, 北京 100037; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 4. 宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州 234000)

摘要: 生长地层是指构造变形过程中沉积的地层, 其年龄可用于限定构造变形发生的时间。通过生长地层分析约束构造活动的发生时限已在挤压和伸展构造发育区得到了广泛应用, 然而与走滑断裂相关的生长地层分析案例尚鲜见报道。笔者通过野外地质调查、遥感影像分析和地震剖面解释等手段与方法, 厘定塔里木盆地西北缘皮羌断裂的几何样式和构造属性; 基于地层的平面特征, 确定与该断裂构造活动同期的生长地层, 并据此限定皮羌断裂的活动时间。研究结果表明, 地表标志层的左旋错断、断层面发育的近水平擦痕和近竖直阶步、断层迹线的线性特征及地震剖面上的正花状构造特征指示皮羌断裂为左行走滑断裂。在平面上, 中新统(N_1)及以下地层的厚度在皮羌断裂西侧向斜的同一翼保持稳定, 地层的曲率也基本协调; 而上新统(N_2)与下伏地层则呈角度不整合接触, 且上新统—早更新统($N_2-Q_1^1$)地层的厚度越靠近皮羌断裂越薄, 且随着地层时代变新, 地层的平面曲率逐渐变小, 表明上新统至早更新统($N_2-Q_1^1$)地层是与皮羌断裂强烈走滑活动相关的生长地层。这一认识与基于地震剖面的生长地层分析结果一致。研究成果不仅有助于深入理解皮羌断裂的构造演化过程, 还可为走滑断裂构造背景下生长地层的识别与应用提供新思路。

关键词: 走滑断裂; 生长地层; 皮羌断裂; 地震剖面解释; 塔里木盆地

中图分类号: P548

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)03-0196-10

Identification and Application of Growth Strata Associated with Strike-Slip Faults: Example from the Piqiang Fault in the Northwestern Margin of the Tarim Basin

ZHANG Ziya^{1,2}, GUO Zhaojie³, SONG Yan¹, YANG Wei¹, LIU Dadong¹, CHENG Xiang^{4,*}

(1. Unconventional Petroleum Science and Technology Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 4. School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou 234000, Anhui, China)

收稿日期: 2024-12-17; 修回日期: 2025-01-10; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102255), 安徽省高校优秀青年科研项目(2022AH030136)和宿州学院博士科研启动基金项目(2023BSK063)联合资助。

作者简介: 张子亚(1990–), 男, 博士研究生, 从事构造地质和油气成藏方向研究。E-mail: zyzhang3327@163.com。

* 通讯作者: 程翔(1989–), 男, 博士研究生, 从事构造地质和油气构造方向研究。E-mail: cxsandy@pku.edu.cn。

Abstract: Growth strata, which are deposited during tectonic deformation, serve as vital markers for dating the timing of such deformation events. While the utilization of growth strata analysis to constrain the timing of tectonic activities is well-established in regions characterized by compressional and extensional tectonics, its application to strike-slip faults remains largely unexplored. This study employs a comprehensive methodology integrating field geological investigations, remote sensing image analysis, and seismic profile interpretation to elucidate the geometric patterns and structural attributes of the Piqiang Fault located at the northwestern margin of the Tarim Basin. By identifying syntectonic growth strata through their map-view characteristics, we aim to determine the active period of the Piqiang Fault. The results show that the Piqiang Fault exhibits characteristics of a sinistral strike-slip fault, evidenced by left-lateral dislocation of surface marker beds, nearly horizontal scratches and vertical steps on the fault plane, the linear fault trace, and the positive flower structural style in seismic profiles. Notably, the strata of N_1 and older intervals maintain consistent thicknesses and curvatures within the same limb of the syncline to the west of the Piqiang fault. In contrast, the N_2 strata display an angular unconformity with the underlying strata. Furthermore, from N_2 to Q_1^1 , strata thicknesses decrease progressively towards the Piqiang Fault, accompanied by a reduction in map-view curvatures with decreasing stratigraphic age. These observations collectively suggest that the strata from N_2 to Q_1^1 represent growth strata associated with intense strike-slip activity along the Piqiang Fault. This interpretation is corroborated by growth strata analysis from seismic profile data. Our findings not only contribute to a deeper understanding of tectonic evolution of the Piqiang Fault, but also provide novel insights into the identification and application of growth strata in the context of strike-slip faulting.

Keywords: strike-slip fault; growth strata; Piqiang fault; seismic profile interpretation; Tarim basin

生长地层, 也称同构造沉积地层, 是指构造变形发生过程中沉积的地层, 记录了构造变形和沉积记录的历史信息(Suppe et al., 1992)。生长地层的沉积年代与构造事件发生的时间相同, 因而可通过生长地层分析来约束构造事件发生的时间(Suppe, 1983; Zhang et al., 2016; Charreau et al., 2018; Qin et al., 2020; Zhou et al., 2020)。自从 Riba(1976)在研究比利牛斯造山带 Ebro 前陆盆地时首次发现逆冲造山带前缘发育的与断层、褶皱相关的生长地层和生长不整合现象后, 学界对生长地层的类型、形成机制及其判别方法开展了深入研究, 极大地推动了全球油气勘探和地质学科发展。尤其是以 Suppe 为代表的众多学者, 通过地震剖面解释、物理模拟、数值模拟等手段对前陆盆地逆冲造山带前缘发育的生长地层进行了系统研究, 提出了断层相关褶皱理论, 并根据生长地层发育过程中沉积速率和抬升速率的关系及其相关褶皱的形成机制, 对挤压性构造相关的生长地层进行了分类(Suppe, 1983; Suppe et al., 1992, 1997, 2004; Rafini et al., 2002; Shaw et al., 2005)。

现有研究多基于二维构造横剖面上的地层厚度变化对逆冲造山带发育的生长地层进行判别, 而从平

面上对生长地层的发育特征进行细致分析, 尤其是针对自然界普遍发育的走滑断裂或压扭性断裂相关的生长地层识别及应用研究案例尚鲜见报道。笔者以塔里木盆地西北缘的皮羌断裂为研究对象, 通过野外地质调查、遥感图像解译和地震剖面解释, 厘定皮羌断层的几何样式和构造属性; 基于平面上地层的厚度分布和曲率特征, 对与皮羌断裂构造活动相关的生长地层进行识别, 并与地震剖面上生长地层分析相互印证。基于平面上地层的厚度和曲率特征, 对皮羌断裂构造活动相关的生长地层进行判别, 是关于走滑断裂生长地层判识及其构造意义的一个典型研究案例, 可为走滑断裂构造几何样式和构造属性解析、构造活动时间与期次研究提供新示范。

1 区域地质背景

在南天山与塔里木盆地的过渡地带——柯坪塔格地区, 发育了天山向塔里木盆地逆掩推覆的柯坪冲断带(韩忠等, 2013)(图 1)。柯坪冲断带长约 250 km, 以发育一系列向南逆冲的叠瓦状逆冲断裂为特征, 在地貌上形成了多排走向近 EW 至 NE 向、向南突出的

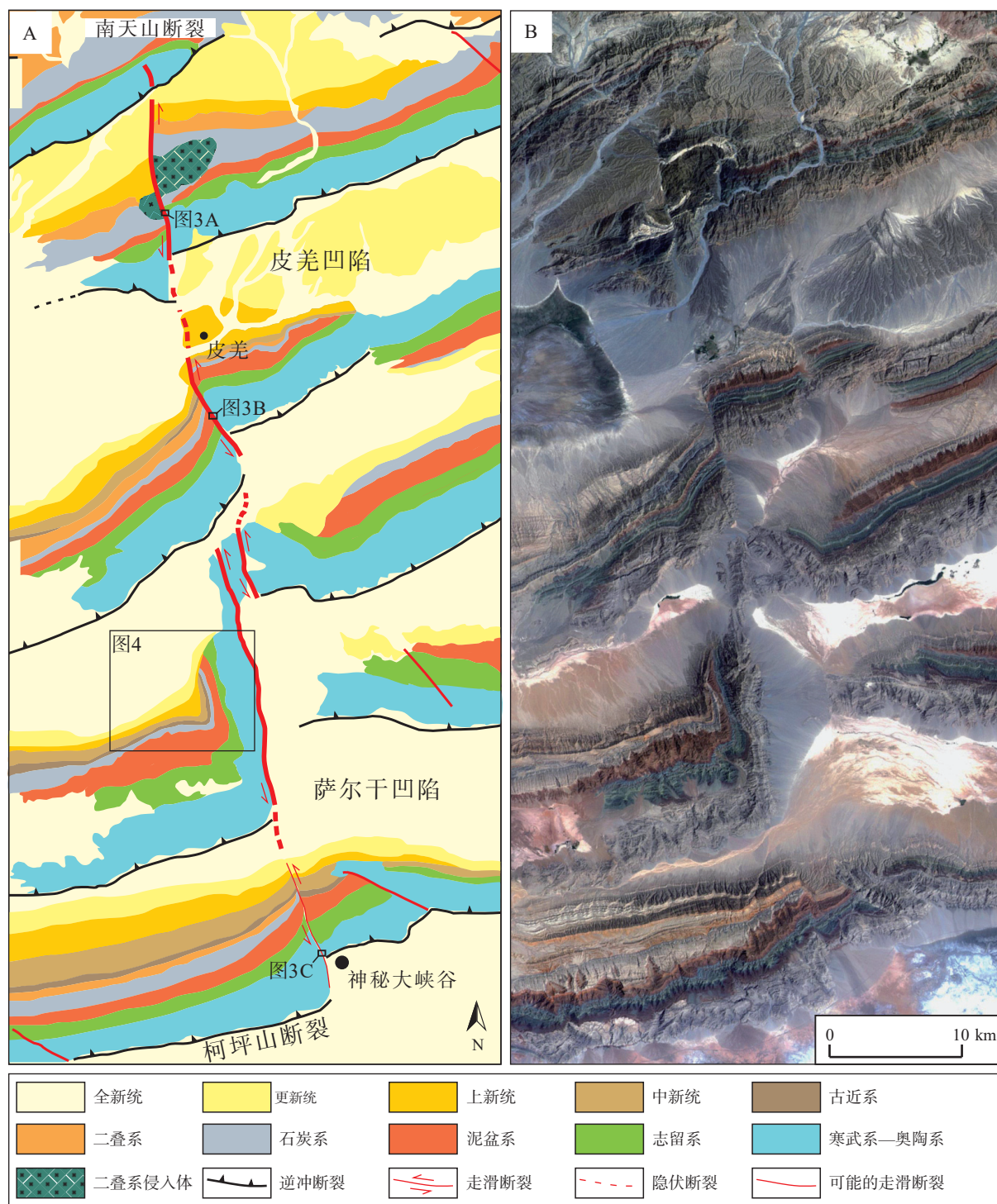


图2 皮羌断裂及其邻区的地质图(A)(改自 ZanBiLe K-43-36 1 : 200 000 地质图)和遥感影像图(B)
(Landsat ETM+真彩色, 全合成)

Fig. 2 (A)Geological map (revised from ZanBiLe K-43-36 1 : 200 000 geological map) and (B)remote sensing image
(Landsat ETM+ true colour, composite) of the Piqiang Fault and its adjacent areas

呈近水平产出(张子亚, 2014)。

在皮羌断裂的中部, 寒武系—奥陶系丘里塔格群与泥盆系沙拉依姆群出露于陡立的断层面两侧(图2)。泥盆系沙拉依姆群主要为棕红色、紫红色厚层的砂岩、

粉砂岩及泥质粉砂岩, 局部夹有砂砾岩和砾岩。断层破碎带宽 5~8 m, 延伸较远, 沿主断裂面发育近水平的擦痕和近竖直的阶步, 结合断裂带两侧岩层被左旋错开, 指示了皮羌断层具有左旋走滑构造属性(图2、

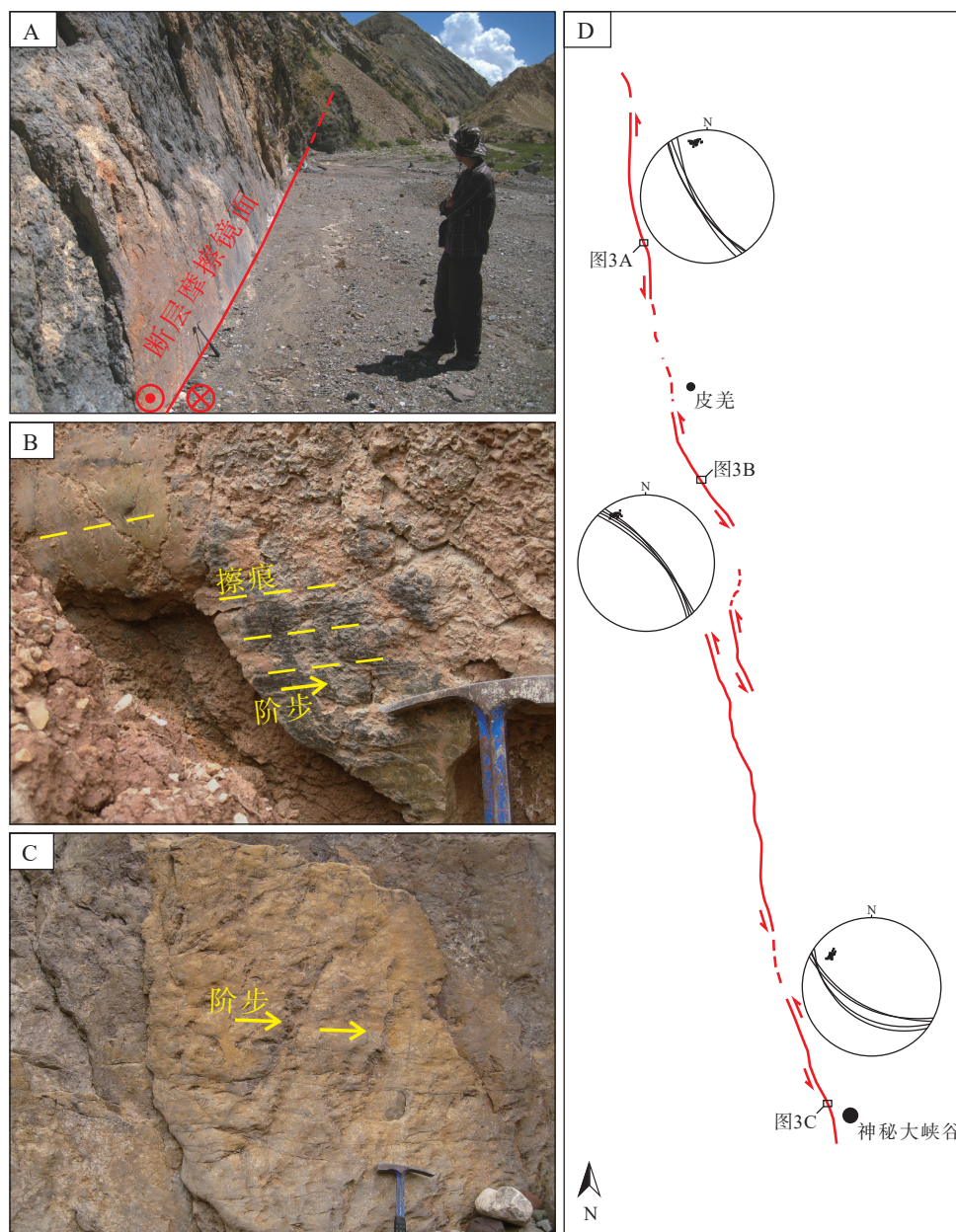


图3 皮羌断裂的断层面表现为线性的摩擦镜面(A)、皮羌断裂的断层面上发育的擦痕和阶步指示左旋走滑构造属性(B和C)、皮羌断裂的断层面及擦痕、方解石生长纤维束等线状构造要素的产状统计(D)

Fig. 3 (A) The fault plane of the Piqiang Fault is present as a linear slickenside, (B and C) striae and steps on the fault plane of the Piqiang Fault indicate sinistral strike-slip property, (D) the attitude statistics of fault planes and the associated linear structural elements of striae and calcite growth slickenfibers of the Piqiang Fault

图3B), 与前人的研究结果一致(Turner et al., 2011; 张子亚, 2014; 李安等, 2016; 杨勇等, 2016; Zhang et al., 2019; 张韬等, 2020; Li et al., 2022)。

皮羌断裂的最南端一直到神秘大峡谷附近, 断层发育在寒武系—奥陶系丘里塔格群层内(图2), 断裂延伸超过 2 km。寒武系—奥陶系丘里塔格群层内断裂带的断层面上发育近竖直的阶步, 指示皮羌断裂具有左旋走滑构造属性(图3C)。

根据野外测量得到的断层面产状及其上发育的擦痕产状进行下半球等面积投影(图3)。大圆弧代表断层面的产状, 黑点表示擦痕、方解石生长纤维束等线状构造的产状(图3)。从立体网投影图可以看出, 在考察点 3A、3B 和 3C 处, 主断层面的优势倾向分别为: 238° 、 49° 和 210° (图3D)。对应地, 擦痕、方解石生长纤维束的优势倾伏向分别为: 348° 、 328° 和 308° , 且倾伏角较小, 分别为: 25° 、 17° 和 27° (图3D)。擦痕、

方解石生长纤维束等线状构造的产状分析, 结合地表标志层的左旋错断, 证明皮羌断裂具有左旋走滑构造属性(图2、图3)。

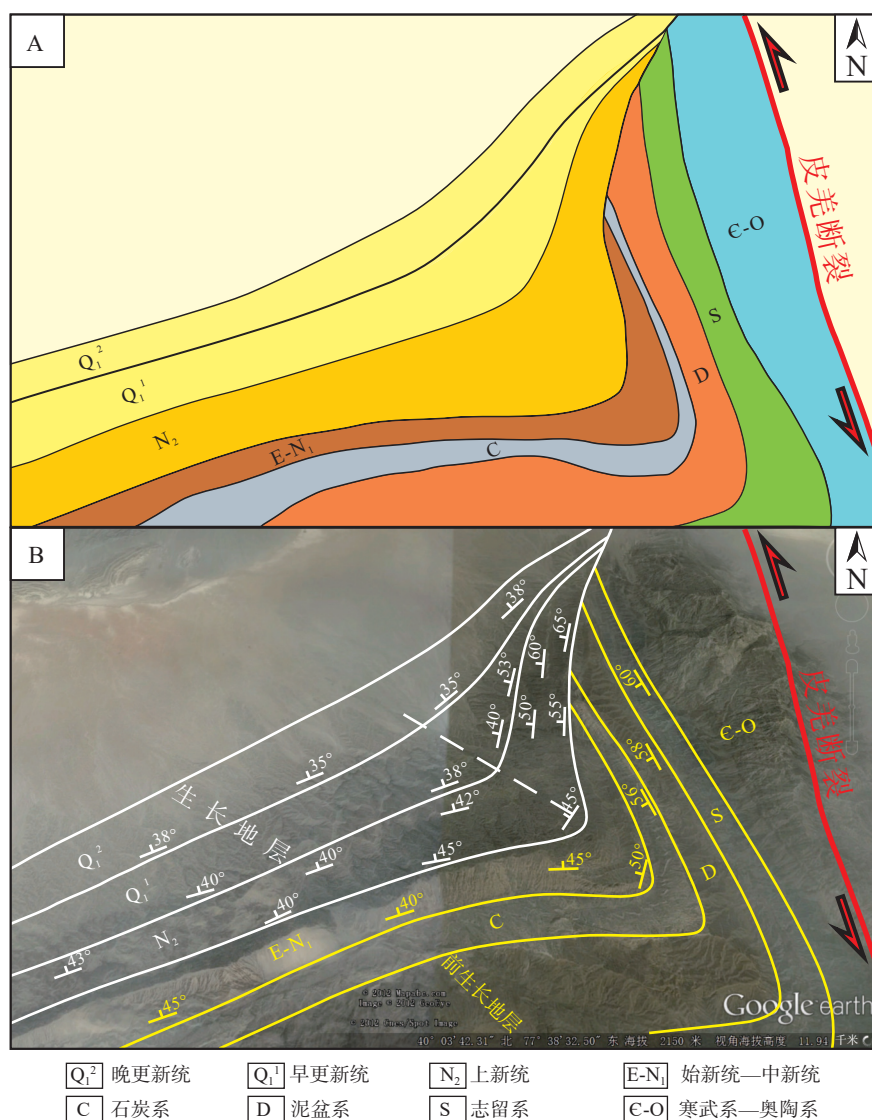
3 皮羌断裂的生长地层分析

3.1 生长地层的平面特征

野外地质填图和遥感影像图显示, 皮羌断裂的西侧发育一个轴面为NW走向的向斜(图2、图4)。中新统(N_1)及以下地层具备以下特征: ①地层厚度在向斜的同一翼保持稳定, 即在靠近断裂的向斜北东翼和

远离断裂的向斜南翼基本不变。②地层的平面曲率基本协调, 未见有类似“不整合”的特征(图4)。基于这两个特征, 可判断中新统(N_1)及以下的地层变形是在地层沉积成岩后, 遭受皮羌断裂强烈左旋走滑运动而发生统一变形的结果, 即为前生长地层。

与 N_1 及以下地层明显不同的是, 上新统(N_2)底界面的地层线与下伏不同时代的地层明显不协调, 呈角度不整合接触关系(图4)。上新统至更新统(N_2-Q_1)地层的平面曲率逐渐减小, 且地层厚度向着皮羌断裂方向显著减薄, 表明皮羌断裂的构造活动控制了上新统至更新统(N_2-Q_1)地层的沉积及其平



N_1 及以下地层为前生长地层; $N_2-Q_1^1$ 为生长地层

图4 皮羌断裂西侧的向斜及前生长地层、生长地层的平面几何学地质图(A)和遥感图(B)

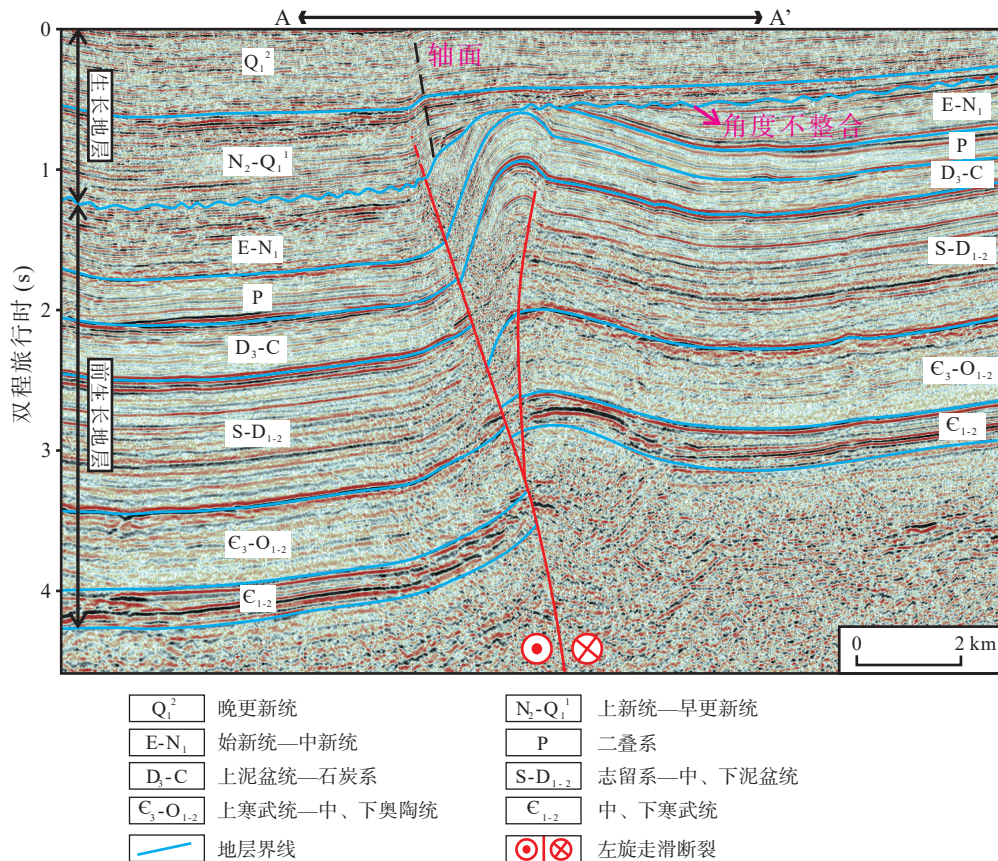
Fig. 4 (A) Geological map and (B) remote sensing image of the syncline in the western block of the Piquang Fault and the map-view geometry of the pre-growth strata and growth strata

面展布。 Q_1^2 地层顶部在皮羌断裂附近的走向与远离断裂的西端基本相同,指示断裂活动对地层形态的控制作用减弱。据此,可判断上新统至更新统($N_2-Q_1^1$)地层为与皮羌断裂发生强烈左旋走滑运动同期沉积的生长地层。

3.2 生长地层的地震剖面印证

色力布亚-麻扎塔格断裂与皮羌断裂具有连续对

应型关系,在地表显示平移走滑特征。前人研究认为皮羌断裂和色力布亚断裂属于同一条断裂,色力布亚断裂是皮羌断裂向塔里木盆地的延伸(Allen et al., 1999; 肖安成等, 2002; 何文渊等, 2003; 任建业等, 2011; Turner et al., 2011; 张永等, 2018)。本研究将二者统称为皮羌走滑断裂。地震剖面 A-A' 横穿皮羌断裂,走向为 NE 向(图 1、图 5)。



皮羌断裂由两条陡倾断裂构成,整体表现为一个正花状构造; N_2 与下伏二叠系至中新统($P-N_1$)地层之间呈角度不整合接触关系, $N_2-Q_1^1$ 向着皮羌断裂的构造高点显著减薄,表明 $N_2-Q_1^1$ 是皮羌断裂强烈左旋走滑活动相关的生长地层

图5 横穿皮羌断裂南段的地震剖面图 A-A'

Fig. 5 Seismic section A-A' across the southern segment of the Piqiang Fault

在地震剖面 A-A' 中,皮羌断裂由两条相向倾斜的陡倾断裂组成,控制了中间一个压扭性背斜的形成,整体表现为正花状构造(图 5)。 N_2 与下伏的二叠系至中新统($P-N_1$)之间呈角度不整合接触关系(图 5)。 $N_2-Q_1^1$ 地层向着构造高点显著减薄,同时 Q_1^2 地层也因受皮羌断裂活动的影响而发生弯曲,形成的地层轴面倾向皮羌断裂方向(图 5)。这些特征表明, $N_2-Q_1^1$ 是与皮羌断裂发生强烈走滑活动有关的生长地层,并且皮羌断裂在 Q_1^2 沉积时也发生一定强度的构造活动,可验证前述关于皮羌断裂左旋走滑运动相关生长地

层的平面分析结果。

4 生长地层对皮羌断裂左旋走滑活动时限的约束

生长地层沉积在生长构造(褶皱、断裂)的顶部或者翼部,可为解译地下构造的几何样式和构造属性、分析构造活动时序提供依据(Suppe et al., 1992, 1997; Zhang et al., 2016a; 袁波等, 2023)。生长地层记录了大量关于构造变形和沉积演化的信息,并在挤压和伸展

构造背景下的断裂、褶皱构造解析方面得到了广泛的应用,尤其是与前陆盆地冲断带相关的生长地层的研究(Riba, 1976; Medwedeff, 1989, 1992; Suppe et al., 1992; Zoetemeijer et al., 1992; Shaw et al., 1994; Zapata et al., 1996; Chen et al., 2002; 张广良等, 2006; 吕明等, 2014)。前人主要在二维的构造横剖面上,依据褶皱翼部地层的楔形几何形态,也即地层厚度向着构造高点减薄,对前陆盆地生长逆断层或褶皱带相关的生长地层进行判别,并对膝折带迁移和翼部旋转两种褶皱机制下的生长地层特征及其差异性进行细致分析(Suppe, 1983; Suppe et al., 1990; Rafini, 2002; 张义平等, 2019)。但是,从平面上对走滑断裂或压扭性断裂相关生长地层的发育特征进行研究尚鲜见报道。

生长地层的发育特征对于理解地下深部构造的动力学过程具有重要意义。由于不同构造背景下沉积过程中的构造变形方式多样、后期的侵蚀或剥蚀作用以及沉积地层的覆盖严重,生长地层的几何形态刻画和模式建立并不容易。本次研究是与走滑断裂相关的生长地层判识与应用的一个典型研究案例。良好的地表地层出露情况及高分辨率的地表、地下地质数据为精细刻画皮羌断裂相关生长地层的几何学提供了得天独厚的条件。通过遥感影像解译、野外地质调查和地震剖面解释等手段,依据地表标志层的左旋错断、断层面发育的近水平擦痕和近竖直阶步、断层迹线的线性特征及地震剖面上的正花状构造特征,可证明皮羌断裂是一条左旋走滑断裂(图1~图5)。

皮羌断裂的西盘发育一个轴面为NW走向的向斜(图4)。在平面上对向斜内不同时代地层的厚度和形态进行细致分析发现,中新统(N_1)及以下地层的厚度在向斜的同一翼保持稳定,也即在靠近断裂的向斜东北翼和远离断裂的向斜南翼基本不变,且不同时代地层的曲率基本协调,表明这些地层是沉积成岩后统一遭受皮羌断裂走滑运动控制而发生变形,即为前生长地层(图4)。与之形成对比的是,上新统(N_2)地层底界面的地层线与下伏地层明显不协调,呈角度不整合接触关系,且上新统至更新统($N_2-Q_1^1$)地层的平面曲率逐渐减小,且地层厚度向着皮羌断裂方向减薄,反映这些地层是与皮羌断裂左旋走滑运动同期沉积的,也即生长地层(图4)。从平面上对皮羌断裂左旋走滑运动相关的生长地层分析与基于地震剖面解释的结果相互印证(图5),且与前人关于皮羌断裂上新世—早更新世走滑活动时间的研究认识一致(何文渊

等, 2003; Turner et al., 2011; 杨勇等, 2016; Yang et al., 2018; 张韬等, 2020)。何文渊等(2003)通过野外地质调查和地震剖面分析,认为皮羌断裂上新世为左旋走滑(撕裂)断层。Turner等(2011)基于卫星影像分析和野外数据,提出塔里木盆地西北缘新生代中晚期的挤压作用导致皮羌断裂活化为一左旋走滑断裂。杨勇等(2016)在野外地质调查和地震资料解释的基础上,认为南天山上新世以来向塔里木盆地内的不协调逆冲作用导致皮羌断裂发生明显的左旋走滑位移。

上述分析结果表明,除了基于构造剖面上地层的厚度变化对生长断层或褶皱相关的同沉积生长地层进行分析外,还可以依据平面上不同时代地层的厚度和曲率特征对走滑断裂或压扭性断裂活动相关的生长地层进行判识,以此来约束断裂构造的活动时间。中等尺度走滑断裂或压扭性断裂的水平位移分量对断裂临近地区同构造沉积地层和地貌的控制往往可以与逆冲-褶皱冲断带发育的生长地层进行类比。值得注意的是,典型的走滑断裂和压扭性断裂的断裂带通常较为狭窄,对其周围地层的影响范围也相对有限,所以在平面上对其进行生长地层分析时需重点关注离断裂较近部位的地层变形特征。

5 结论

(1)地表标志层的左旋错断、断层面上发育的近水平擦痕和近竖直阶步、断层迹线的线性特征及正花状构造样式,表明皮羌断裂是一条左旋走滑断裂。

(2)在平面上,中新统(N_1)及以下地层的厚度在皮羌断裂西侧向斜的同一翼保持稳定,地层的平面曲率基本协调;而上新统至早更新统($N_2-Q_1^1$)地层的厚度越靠近皮羌断裂越薄,且不同时代地层的弯曲曲率明显不同,表明上新统至更新统($N_2-Q_1^1$)地层是与皮羌断裂发生强烈左旋走滑活动相关的生长地层。这一认识与基于地震剖面的生长地层分析结果相互印证,可为塔里木盆地西北缘皮羌断裂的左旋走滑构造活动时限提供重要约束。

(3)对中等尺度的走滑断裂和压扭性断裂来说,断裂活动时限可通过平面构造分析方式予以限定,其水平位移分量对断裂附近同构造沉积地层和地貌的控制可与挤压性断裂的生长地层进行类比。此外,典型走滑断裂或压扭性断裂的断裂带通常较为狭窄,在平面上对其进行生长地层分析时需重点关注断裂邻

区地层的变形特征。

致谢：西南石油大学朱贝副研究员在本文撰写过程中给予诸多指导和帮助，两位匿名审稿专家针对文稿提出宝贵修改建议，在此一并致谢。

参考文献(References):

- 何文渊, 杨宪一, 刘胜. 塔里木盆地西北部构造演化特征——从皮羌断裂发育史想到[J]. *地球学报*, 2003, 24(z1): 17–21.
- HE Wenyuan, YANG Xianyi, LIU Sheng. The Evolution History of Northwest Tarim as Viewed from the Features of Piqiang Fault[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(z1): 17–21.
- 韩忠, 张泉, 刘晓煌, 等. 新疆哈拉奇地区柯坪塔格组砂岩粒度特征[J]. *西北地质*, 2013, 46(4): 106–114.
- HAN Zhong, ZHANG Xiao, LIU Xiaohuang, et al. The Grain Size Characteristics of Kalpintag Formation's Sandstones in Kharrazi Region, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 106–114.
- 李安, 冉勇康, 刘华国, 等. 西南天山柯坪推覆系西段全新世构造活动特征和古地震[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(4): 377–390.
- LI An, RAN Yongkang, LIU Huaguo, et al. Active Characteristics and Paleoeearthquakes in the West Kalpin Nappe Since the Holocene, SW Tianshan Mountain[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(4): 377–390.
- 吕明, 汤良杰, 岳勇. 塔里木盆地西南部麦盖提斜坡构造演化过程的记录——生长地层及生长不整合[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 91–101.
- LV Ming, TANG Liangjie, YUE Yong. Records of Tectonic Evolution in Maigaiti Slope Southwestern Tarim Basin: Growth Strata and Growth Unconformity[J]. *Geological Review*, 2014, 60(1): 91–101.
- 曲国胜, 李亦刚, 陈杰, 等. 柯坪塔格推覆构造几何学、运动学及其构造演化[J]. *地学前缘*, 2003, 10(z1): 142–152.
- QU Guosheng, LI Yigang, CHEN Jie, et al. Geometry, Kinematics and Tectonic Evolution of Kepingtage Thrust System[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(z1): 142–152.
- 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 219–230.
- REN Jianye, ZHANG Junxia, YANG Huaizhong, et al. Analysis of fault systems in the Central uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 219–230.
- 王国林, 李曰俊, 孙建华, 等. 塔里木盆地西北缘柯坪冲断带构造变形特征[J]. *地质科学*, 2009, 44(1): 50–62.
- WANG Guolin, LI Yuejun, SUN Jianhua, et al. Structural deformation characteristics of the Kalpin thrust belt. NW Tarim[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2009, 44(1): 50–62.
- 王鹏昊, 汤良杰, 邱海峻, 等. 塔里木盆地皮羌断裂晚期活动 ESR 年代学证据及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(1): 107–111.
- WANG Penghao, TANG Liangjie, QIU Haijun, et al. Chronology evidence of EAR dating for the late movements of the Piqiang fault in the Tarim Basin and its geological implication[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(1): 107–111.
- 肖安成, 杨树锋, 王清华, 等. 塔里木盆地巴楚-柯坪地区南北向断裂系统的空间对应性研究[J]. *地质科学*, 2002, 37(z1): 64–72.
- XIAO Ancheng, YANG Shufeng, WANG Qinghua, et al. Corresponding Relation of S-N-Striking Fault Systems in The Bachu-Kalpin Area, Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2002, 37(z1): 64–72.
- 肖安成, 杨树锋, 李曰俊, 等. 塔里木盆地巴楚隆起断裂系统主要形成时代的新认识[J]. *地质科学*, 2005, 40(2): 291–302.
- XIAO Ancheng, YANG Shufeng, LI Yuejun, et al. Main Period for Creation of Fracture System in the Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(2): 291–302.
- 杨海军, 李曰俊, 师骏, 等. 南天山晚新生代褶皱冲断带构造特征[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 1030–1043.
- YANG Haijun, LI Yuejun, SHI Jun, et al. Tectonic Characteristics of The Late Cenozoic South Tianshan Fold-Thrust Belt[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 1030–1043.
- 杨勇, 汤良杰, 郭颖, 等. 柯坪冲断带皮羌断裂的新生代构造演化特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(6): 1204–1210.
- YANG Yong, TANG Liangjie, GUO Ying, et al. Cenozoic structural evolution characteristics of Piqiang fault, Kalpin thrust belt[J]. *Journal of China University*, 2016, 45(6): 1204–1210.
- 袁波, 汪新, 王心强, 等. 准噶尔盆地南缘构造分层分带特征及其油气勘探意义[J]. *地球科学*, 2023, 48(10): 3946–3956.
- YUAN Bo, WANG Xin, WANG Xinqiang, et al. Characteristics of Structural Stratification and Zoning in Southern Junggar Basin and Its Significance for Oil and Gas Exploration[J]. *Earth Science*, 2023, 48(10): 3946–3956.
- 张广良, 张培震, 闵伟, 等. 逆冲-褶皱造山过程中生长地层的识别及应用[J]. *地震地质*, 2006, 28(2): 299–311.
- ZHANG Guangliang, ZHANG Peizhen, MIN Wei, et al. The Identification and Application of Growth Strata Linked to The Foreland Fold-and-Thrust Belt During Mountain Building[J]. *Seismology and Geology*, 2006, 28(2): 299–311.
- 张子亚. 塔里木盆地西北缘晚新生代构造解析——帕米尔前缘与南天山前缘的叠合[D]. 北京: 北京大学, 2014.
- ZHANG Ziya. The structural analysis at the northwest margin of the Tarim Basin—the foreland thrusts superimposition between Pamir and Southwest Tianshan[D]. Beijing: Peking University, 2014.
- 张义平, 陈宣华, 张进, 等. 印支运动在鄂尔多斯盆地和四川盆地启动时间的讨论: 来自生长地层的证据[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 1021–1038.
- ZHANG Yiping, CHEN Xuanhua, ZHANG Jin, et al. Discussion on the initial timing of the Indosinian movement in the Ordos basin and the Sichuan basin: Constraints from growth strata evidence[J]. *Geology in China*, 2019, 46(5): 1021–1038.
- 张永, 崔永平, 刘长磊. 塔里木盆地色力布亚断裂带几何学及运动学特征[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(3): 264–276.
- ZHANG Yong, CUI Yongping, LIU Changlei. Geometrical and Kinematics Characteristics of Selibuya Fault Belt, Tarim Basin[J].

- Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(3): 264–276.
- 张韬, 邬光辉, 陈鑫, 等. 皮羌走滑断裂构造演化研究综述[J]. [中国石油和化工标准与质量](#), 2020(1): 117–118.
- ZHANG Tao, WU Guanghui, CHEN Xin, et al. Review of tectonic evolution of the Piquang strike-slip fault[J]. [China Petroleum and Chemical Standard and Quality](#), 2020(1): 117–118.
- Allen M B, Stephen V J. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interaction between the Tian Shan and the Tarim Basin, northwest China[J]. [Tectonics](#), 1999, 18(4): 639–654.
- Charreau J, Saint-Carlier D, Lavé J, et al. Late Pleistocene acceleration of deformation across the northern Tianshan piedmont (China) evidenced from the morpho-tectonic evolution of the Dushanzi anticline[J]. [Tectonophysics](#), 2018, 730: 132–140.
- Chen J, Burbank D W, Scharer K M, et al. Magnetostratigraphy of the upper Cenozoic strata in the southwestern Chinese Tian Shan: Rates of pleistocene folding and thrusting[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 2002, 195: 113–130.
- Guo Q, Wen Y M, Xu C J, et al. Present-Day Tectonic Activities of Transverse Faults in the Keping Region, Southwest Tianshan [J]. [Seismological Research Letters](#), 2024, 1–10.
- Li A, Ran Y K, Gomez F, et al. Segmentation of the Kepingtage thrust fault based on paleoearthquake ruptures, southwestern Tianshan, China[J]. [Natural Hazards](#), 2020, 103: 1385–1406.
- Li J, Yao Y, Li R, et al. Present-Day Strike-Slip Faulting and Thrusting of the Kepingtage Fold-and-Thrust Belt in Southern Tianshan: Constraints From GPS Observations[J]. [Geophysical Research Letters](#), 2022, 49: e2022GL099105.
- Medwedeff D W. Growth fault-bend folding at southeast Lost Hills, San Joaquin Valley, California[J]. [AAPG Bulletin](#), 1989, 73(1): 54–67.
- Medwedeff D W. Geometry and kinematics of an active, laterally propagating wedge thrust, Wheeler Ridge, California[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1992.
- Qin X, Chen X H, Shao Z G, et al. Initiation timing of Cenozoic compression deformation of the southern Tianshan mountains: Implications from growth strata in the Kuqa Depression[J]. [Geological Journal](#), 2020, 55(11): 7206–7226.
- Qiu J T, Ji L Y, Zhu L Y, et al. Present-day tectonic deformation partitioning across South Tianshan from satellite geodetic imaging [J]. [Frontiers in Earth Science](#), 2022, 9: 793890.
- Rafini S, Mercier R, Eric M. Forward modelling of foreland basins progressive unconformities[J]. [Sedimentary Geology](#), 2002, 146(1-2): 75–89.
- Riba O. Syntectonic unconformities of the Alto Cardener, Spanish Pyrenees: a genetic interpretation[J]. [Sedimentary Geology](#), 1976, 15: 213–233.
- Shaw J H. Seismic interpretation of Structural styles in deepwater Fold-and-Thrust Belts[M]. Harvard University: Course Manual, 2005.
- Shaw J H, Suppe J. Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel, California[J]. [Geological Society of America Bulletin](#), 1994, 106(5): 607–626.
- Suppe J. Geometry and Kinematics of fault bend folding[J]. [American Journal of Science](#), 1983, 283: 684–721.
- Suppe J, Chou, G T, Hook S C. Rates of folding and faulting determined from growth strata In Thrust Tectonics[M]. London: Chapman and Hall, 1992.
- Suppe J, Hubertferrari A, Wang X. Relationships Between Incremental and Cumulative Fold Growth With Neotectonic Examples From the Southern Tianshan, China[C]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2004.
- Suppe J, Medwedeff D A. Geometry and kinematics of fault-propagation folding[J]. [Eclogae Geologicae Helveticae](#), 1990, 83(3): 409–454.
- Suppe J, Sàbat F, Munoz J A. Bed-by-bed fold growth by kink-band migration Sant Llorenç de Morunys, eastern Pyrenees[J]. [Journal of Structural Geology](#), 1997, 19: 443–461.
- Turner S A, Jian L G, John C W. Structural evolution of the Piquang Fault Zone, NW Tarim Basin, China[J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2011, 40: 394–402.
- Yang Y, Yao W Q, Yan J J, et al. Mesozoic and Cenozoic structural deformation in the NW Tarim Basin, China: a case study of the Piquang-Selibuya Fault[J]. [International Geological Review](#), 2018, 60(7): 929–943.
- Zapata T R, Allmendinger R W. Growth stratal records of instantaneous and progressive limb rotation in the Precordillera thrust belt and Bermejo basin, Argentina[J]. [Tectonics](#), 1996, 15: 1065–1083.
- Zhang T, Han W X, Fang X M, et al. Intensified tectonic deformation and uplift of the Altyn Tagh range recorded by rock magnetism and growth strata studies of the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau[J]. [Global and Planetary Change](#), 2016, 137: 54–68.
- Zhang Z L, Sun J M, Tian Z H, et al. Magnetostratigraphy of syntectonic growth strata and implications for the late Cenozoic deformation in the Baicheng Depression, Southern Tian Shan[J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2016a, 118: 111–124.
- Zhou Y X, Wu C D, Yuan B, et al. Cenozoic tectonic patterns and their controls on growth strata in the northern Tianshan fold and thrust belt, northwest China[J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2020, 198: 104237.
- Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, et al. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume?[J]. [Lithos](#), 2010, 119: 537–552.
- Zhang Y, Yang S M, Chen H L, et al. The effect of overburden thickness on deformation mechanisms in the Keping fold-thrust belt, southwestern Chinese Tian Shan Mountains: Insights from analogue modeling[J]. [Tectonophysics](#), 2019, 753: 79–92.
- Zoetemeijer R, Sassi W, Roure F, et al. Stratigraphic and kinematic modeling of thrust evolution, northern Apennines, Italy[J]. [Geology](#), 1992, 20: 1035–1038.