

昆仑山前构造三角带成因分析及其油气地质意义

陈友智^{1*}, 吴育林², 徐振平³, 肖江⁴, 王晓阳⁵, 黄天², 赵振伟²,
李龙江², 汪少华²

1. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司研究院, 河北涿州 072750
2. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 四川成都 610213
3. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
4. 中国石油东方地球物理有限责任公司研究院塔里木物探研究院, 新疆库尔勒 841000
5. 中国石油东方地球物理勘探有限责任公司西南物探物探分公司, 四川成都 610213

摘要: 本研究基于地震与钻井资料, 系统分析了昆仑山前构造三角带中滑脱层分布对构造样式差异及圈闭-生烃耦合关系的控制。研究表明: 西昆仑乌泊尔段背驮盆地的演化始于石炭系—二叠系与古近系滑脱层控制的断弯褶皱, 随后褶皱核部冲断剧烈抬升, 最终因岩石重力负载发生挠曲沉降, 完整经历了三阶段演化。西昆仑苏盖特—齐美根—柯东段受中地壳、寒武系及石炭—二叠系多套滑脱层影响, 形成叠瓦冲断带与滑脱冲断带; 前者以新近纪形成的非饱和油气藏为主, 后者继承三叠纪构造, 圈闭保存好, 是白垩系油气有利区。构造楔端点因烃源岩剥蚀强烈, 普遍缺乏有效油气充注。中昆仑杜瓦—乌加特段仅发育寒武系滑脱面, 表现为大型断弯褶皱, 且缺失石炭—二叠系烃源岩。本研究明确了滑脱层在控制构造演化与油气分布中的关键作用。

关键词: 昆仑山; 构造三角带; 背驮盆地; 滑脱层; 帕米尔
中图分类号: P618 收稿日期: 2025-11-13

Genetic analysis of the triangle zones in the Kunlun Mountains and its implications for petroleum geology

CHEN Youzhi^{1*}, WU Yulin², XU Zhenping³, XIAO Jiang⁴, WANG Xiaoyang⁵, HUANG Tian², ZHAO Zhenwei², LI Longjiang², WANG Shaohua²

1. Institute of BGP, CNPC, Zhuozhou Hebei 072750, China
2. BGP Southwest Geophysical Company, CNPC, Chengdu 610213, China
3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China
4. BGP Tarim Geophysical Branch, CNPC, Korla 841000, China
5. BGP Southwest Geophysical Branch, CNPC, Chengdu 610213, China

Abstract: This study systematically analyzes the control of detachment layer distribution on structural style differences and trap-hydrocarbon generation coupling relationships in the frontal tectonic triangle zone of the Kunlun Mountains, based on seismic and drilling data. The research indicates that the evolution of the piggyback basin in the Upal section of the western Kunlun Mountains began with fault-bend folding controlled by Carboniferous–Permian and Paleogene detachment layers. Subsequently, the thrust in the fold core experienced intense uplift, ultimately leading to flexural subsidence due to rock gravity loading, completing a three-stage evolution process. The Sugait-Qimeigen-Kedong section of the western Kunlun Mountains, influenced by multiple detachment layers in the middle crust, Cambrian, and Carboniferous-

基金项目: 中国石油东方地球物理公司油气勘探新领域综合研究项目

作者简介: 陈友智(1982—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事盆地构造分析、石油地质分析工作. E-mail: cugchenyz@126.com, ORCID: 0000-0003-1343-7458.

Permian systems, developed imbricate thrust belts and detachment thrust belts. The former is dominated by Neogene-formed unsaturated hydrocarbon reservoirs, while the latter inherited Triassic structures with well-preserved traps, making it a favorable area for Cretaceous hydrocarbon accumulation. At the endpoints of the tectonic wedge, intense erosion of source rocks generally results in a lack of effective hydrocarbon charging. The Duwa-Wujiate section of the central Kunlun Mountains only developed a Cambrian detachment surface, exhibiting large-scale fault-bend folding and lacking Carboniferous-Permian source rocks. This study clarifies the critical role of detachment layers in controlling structural evolution and hydrocarbon distribution.

Keywords: Kunlun Mountains, tectonic triangle zone, piggy-back basin, detachment layer, Pamir

0 引言

前陆褶皱冲断带是重要的油气聚集区,其前缘的构造三角带因构造圈闭叠置而备受石油地质学家关注 (Goffey et al., 2010)。构造三角带的概念最初源于加拿大南部科迪勒拉山系,用以描述地震剖面中褶皱冲断带前缘的山麓-平原边界 (Gordy et al., 1977)。随后,其内涵不断扩展,常与“构造楔”、“被动顶板双重构造”及“鳄鱼构造”等术语互用,并不仅限于造山带前缘。从变形层次看,它可涵盖从地壳尺度的薄皮与厚皮构造,直至岩石圈尺度 (Laubscher and Bernoulli, 1977; McClay, 1992; Price, 1986; Lawton et al., 1994; Sans and Vergés, 1995; Jones, 1996; Schmid et al., 1996)。

滑脱层的性质与组合是控制冲断带前缘三角带构造样式的关键因素 (Morley, 1986)。它通过制约构造楔的几何形态与运动学过程,主导了三角带的发育机制。在多重滑脱层条件下,易形成复杂的双重构造和上滑脱层规模较大的反向冲断层;而在单一滑脱层背景下,则易发育坡坪式断层和断弯褶皱 (Hagke and Malz, 2018)。这一控制作用在全球多样的构造三角带实例中得以体现,包括加拿大落基山前南阿尔伯塔的被动顶板双重构造 (Bégin et al., 1996)、南大巴山的主动顶板双重构造 (李岩峰等, 2008)、阿根廷内乌肯褶皱冲断带的分支逆冲-反向冲断-底板逆冲组合 (Zamora-Valcarce and Zapata, 2015),以及比利牛斯山南部的巴巴托斯坡-坪-坡反冲断层组合 (Sans et al., 1996),加拿大落基山前中阿尔伯塔双重构造和断弯褶皱组合 (Charlesworth and Gagnon, 1985)。

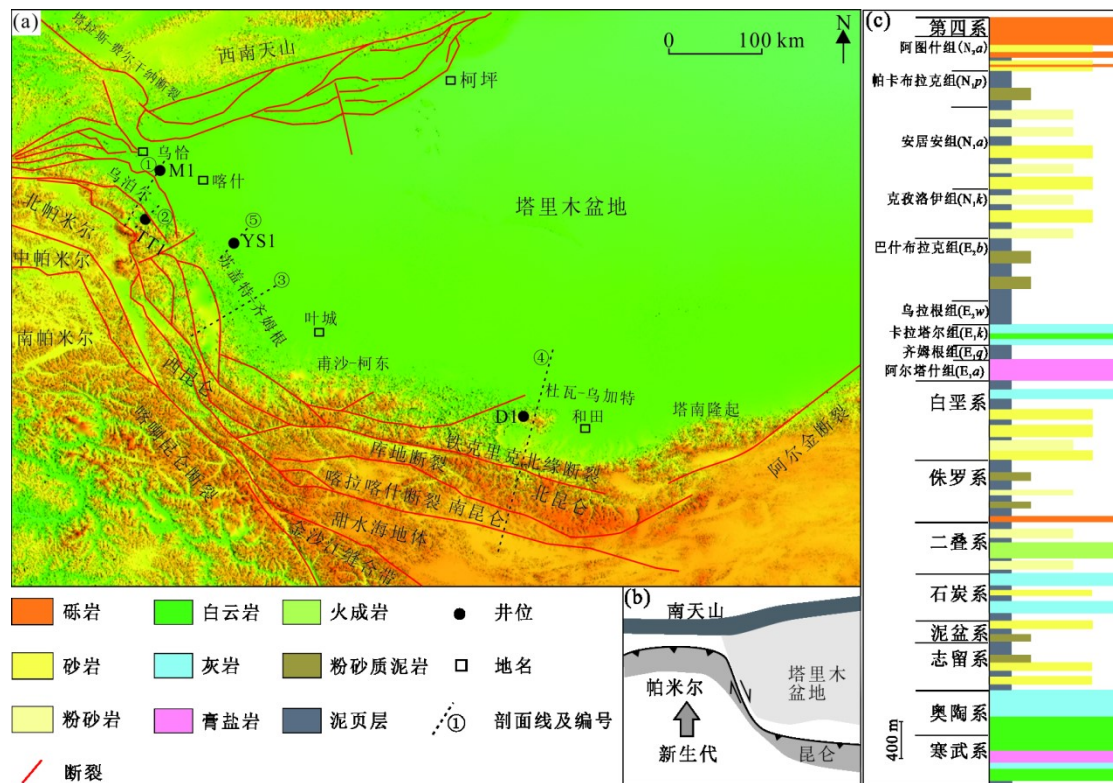
昆仑山前构造三角带的油气勘探已逾七十载 (金之钧和吕修祥, 2000),近年来更取得一系列重要突破 (王清华等, 2023)。前人研究多聚焦于其几何结构、构造模型、背驮盆地变形时序及油气地质特征等方面 (肖安成等, 2000; 何登发等, 2013; 王春阳, 2014; Laborde et al., 2019; 孙统, 2020; Chen et al., 2022a; 陈懋俊, 2022; Baby et al., 2022; 金玉洁等, 2025)。然而,现有研究较少从滑脱层分布的视角系统剖析构造样式的差异性,也未能充分关注圈闭形成时间与烃源岩生烃史的耦合关系,这制约了对该区成藏规律的深入认识。为此,本文基于地震与钻井资料,旨在从滑脱层分布与构造圈闭有效性两个维度,分析昆仑山前构造三角带的构造样式成因,并预测油气勘探有利区,以期为该区下一步勘探提供理论支撑。

1 地质背景

塔里木盆地的沉积建造与构造演化主要受控于多期裂谷与碰撞事件。南华纪为陆内裂谷阶段,盆地西北部作为转换带遭受剥蚀或沉积粗粒碎屑岩,盆地西南部则沉积碳酸盐岩、膏盐岩、泥岩,形成区域滑脱层(陈利新等, 2024)。古生代早期(寒武纪-奥陶纪)以稳定的海相碳酸盐岩沉积为主(陈永权等, 2024; 郑和荣等, 2022)。加里东运动(志留纪)原特提斯洋关闭,使盆地边缘隆升剥蚀,盆地内部沉积海相碎屑岩(王莹莹, 2017)。晚泥盆世木措-双湖洋盆和

南天山洋盆打开,再次出现广覆式海相沉积。早石炭世末南天山洋关闭与中二叠世地幔柱活动,控制了石炭系-二叠系海湾潟湖相烃源岩的发育,该套泥页岩(厚 200~600 m),在后期构造变形中作为关键滑脱层(王清华等, 2023; 何治亮等, 2024)。关键的构造-沉积转折发生在中生代晚三叠世,挤压造成了广泛的褶皱冲断和剥蚀,在昆仑山前三叠系缺失,二叠系-石炭系遭受剥蚀。造山后伸展局部发育侏罗系断陷湖盆。晚三叠世强烈的挤压甚至造成局部冲断带高点白垩系缺失。晚白垩世-古近纪干旱气候下发育的膏盐岩(最厚 500 m)是另一套重要的区域盖层与滑脱层。新近纪以来,青藏高原隆升在昆仑山形成前陆盆地,北段发育背驮式盆地,沉积了巨厚的砾岩和砂岩(何治亮等, 2024)(图 1)。

作为印度-欧亚板块碰撞的最前沿,帕米尔突刺的演化可分为三个阶段:古新世至中新世早中期(约 55~20 Ma)为碰撞初期,帕米尔主要表现为地壳增厚与垂直隆升,而昆仑山前地带则构造活动微弱,以沉降接受沉积为主。至中新世中晚期(约 20~5 Ma),构造机制转为以侧向“逃逸”为主,帕米尔突刺形态基本形成,并伴随昆仑山前的喀什-叶城右旋走滑系统的发育。上新世以来(约 5 Ma 至今),帕米尔突刺进一步向北俯冲于南天山之下,同时帕米尔北段的重力垮塌作用,导致山前构造变形带前锋带变形速率急剧加快(余宏甸, 2021)。



a 昆仑山前主要断裂平面分布图; b 新生代区域构造格架图(修改自 chen et al., 2022a); c 昆仑山前岩性柱状图

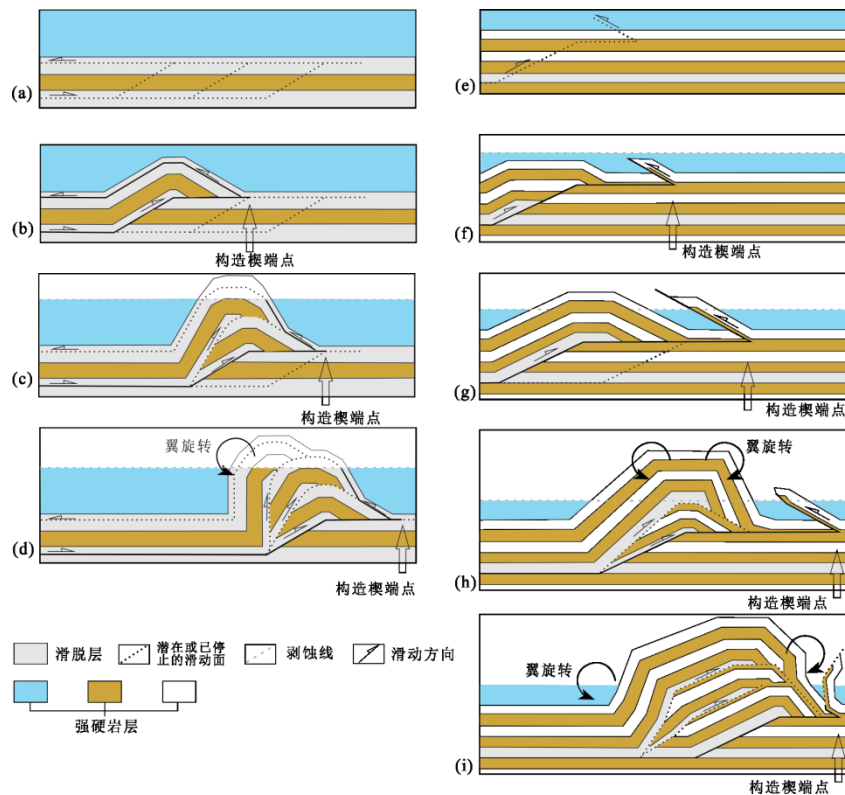
图 1 昆仑山前构造三角带平面图及岩性柱状图

Fig.1 Maps and Lithologic Column Showing the Frontal Kunlun Tectonic Wedge

2 滑脱面对构造三角带运动学的影响

滑脱面的结构与性质深刻影响了昆仑山前构造三角带的形成过程(陈横俊, 2022), 其控制作用在单一与多滑脱面条件下表现出不同的演化路径。多滑脱面情况下, 持续的构造缩短导致双重构造内部的冲断席堆叠与翼部旋转, 这可能使相关的反向冲断层力学失效(图 2a-c)。若该体系再受剥蚀, 前陆端的反冲断层活动也将停止(图 2d)。这合理解释了苏盖特-齐美根-柯东段反冲断层不发育的现象。单一滑脱面构造三角带由坡-坪式断层控制, 在断弯褶皱前缘形成具有反向逆冲特征的三角带。随着构造持续缩短, 三角带前端不断向前陆方向推进,

新的逆冲席发育使褶皱隆升，前翼趋陡，这一过程也使得反向逆冲断层倾角增大(图 2e-i)。当缩短量累积到一定程度，反向逆冲断层因倾角过陡而停止活动(Hagke and Malz, 2018)。两者最显著的差异在于，多滑脱面条件下可见明显的逆冲岩片叠置，而单一滑脱面条件下则形成规模较大的断弯褶皱。



a-d 双滑脱层构造三角带形成过程图; e-i 单一滑脱层构造三角带形成过程图

图 2 构造三角带演化模式图(修改自 Hagke and Malz, 2018)

Fig.2 Schematic diagram of the tectonic wedge evolution (modified from Hagke and Malz, 2018)

3 昆仑山构造三角带成因分析

3.1 西昆仑乌泊尔段

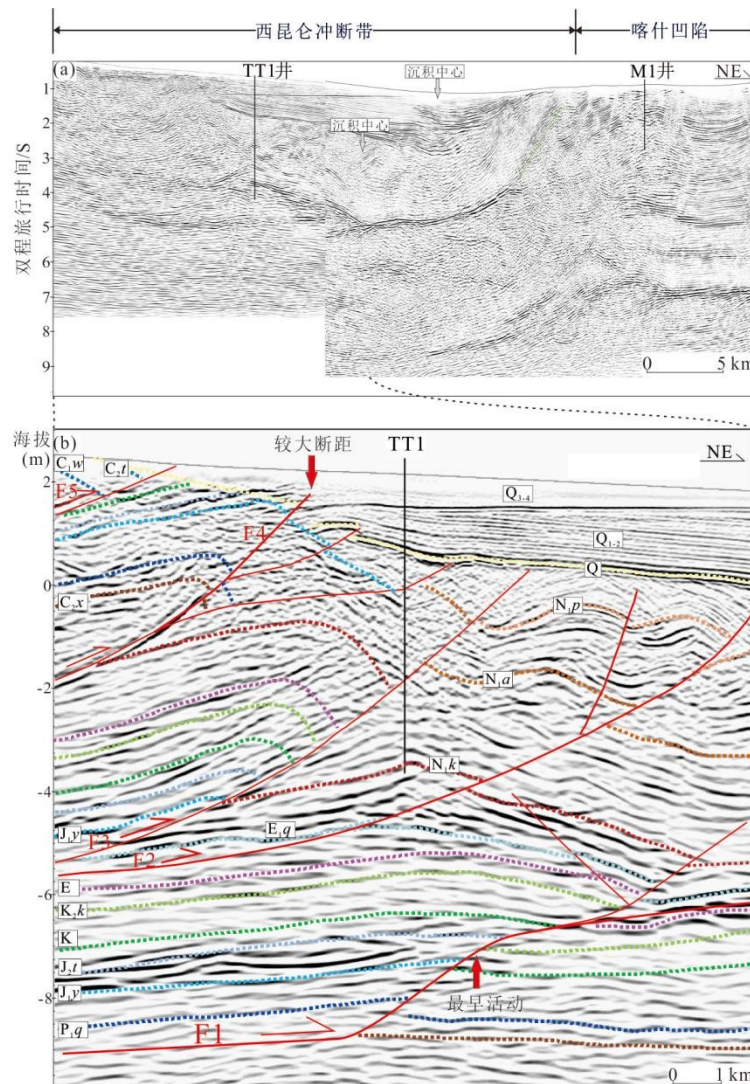
3.1.1 地质条件

乌泊尔山前构造三角带发育背驮盆地。前人虽已对其形成过程进行了大量研究，但多集中于大尺度的盆山耦合响应特征(王春阳, 2014; 黄光明等, 2017; 陈懋俊, 2022; Chen et al., 2022b), 对其内部沉积构架对盆地演化的指示意义研究尚显不足。地震反射剖面揭示, 该盆地的沉积厚度整体呈现向前陆方向增厚的趋势(图 3a), 这与单纯由重力负载导致的向前陆方向减薄的经典挠曲盆地模型(Allen and Allen, 2005)明显不符。此外, 剖面中还可可见明显的沉积中心迁移现象(图 3a)。这些独特的沉积特征共同指示, 该背驮盆地的形成可能受控于一种不同于经典模型的、更为复杂的动力学机制。

造山带与前陆盆地沉积中心不紧邻的现象已引起学界广泛关注, 意大利亚平宁山脉南部的圣安杰洛背驮盆地便是一例(Hippolyte et al., 1994)。对此, Roure et al (1988) 提出双滑脱面模型予以解释, 认为该盆地的沉积中心主要受断弯褶皱控制, 而非经典的挠曲沉降, 其迁移规律与多期断层相关褶皱的发育密切相关(图 4)。西昆仑乌泊尔段新生代地层的厚度分布与沉积中心迁移模式, 与上述模型高度吻合。据此, 笔者推断乌泊尔地区背驮盆地的形成同样受到断弯褶皱作用的深刻影响。这一推论得到以下证据支持: 钻井揭示研究区古近系底部发育上千米厚的膏盐岩, 并存在石炭系-二叠系泥页岩滑脱层(金玉洁等, 2025), 为断弯褶皱

坡-坪式结构提供了必要的滑脱条件；同时，新生代期间，西昆仑乌泊尔段与南天山乌恰段构成对冲构造体系(陈懋俊, 2022)，形成了与亚平宁山脉南部类似的、来自盆地方向的挤压应力场，而且挤压应力主要作用于浅部盖层系统。

斜向俯冲体系的构造样式主要受汇聚角度(即板块运动方向与汇聚带法向的夹角)控制。低汇聚角环境下，挤压应力占主导，走滑分量受到抑制，表现为强烈的收缩变形与地壳隆升，例如太平洋板块向澳大利亚板块斜向俯冲所形成的克马德克-汤加俯冲带(Bonnardot et al., 2007；张志文和杨晓东, 2023)。反之，高汇聚角则有利于走滑分量的释放，形成大规模走滑断层，如新西兰南岛的阿尔卑斯断层(石耀霖等, 1994)。新生代以来，随着帕米尔突刺的斜向楔入与块体旋转(吴珍云等, 2017)，西昆仑地区的汇聚角度随之演变。中新世早期-上新世早期以走滑构造为主，在塔里木盆地西缘形成一系列菱形块体；之后应力场转型，转为以挤压抬升为主导(王哲, 2014)。类似的斜向汇聚机制也控制了意大利亚平宁背驮盆地的发育，区域上广泛发育走滑断层(Roure et al., 1988)。值得注意的是，斜向俯冲/碰撞可能减小山前的重力负载(李向东和王克卓, 2003)，从而为断弯褶皱主导背驮盆地形成创造了有利的力学条件。



a.乌泊尔背驮盆地二维地震反射剖面 1; b.三维地震反射剖面 2(以黑色虚线连接标识在整体背驮盆地中的位置)

图3 西昆仑山前乌泊尔地区地震剖面构造解释图

Fig.3 Structural interpretation of the seismic profile in the Wuboer area, western Kunlun Mountains front.

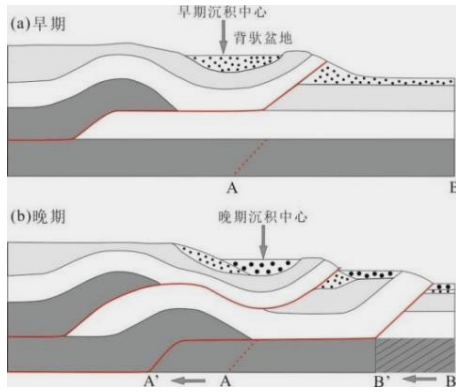


图4 背驮盆地沉积中心向盆地方向迁移模式图(修改自 Roure et al., 1988)

Fig.4 Schematic diagram showing the migration of the sedimentary center in a piggyback basin (modified from Roure et al., 1988)

3.1.2 构造演化过程

地震剖面揭示, 乌泊尔地区在沉积了向西增厚的古近系及新近系克孜洛依组(N_{1k})后, 构造活动开始活跃。此时, 以石炭系-二叠系泥页岩为下滑脱层、以齐姆根组(E_1q)底部膏盐岩为上滑脱层, 发育了 F1 断弯褶皱(图 3、图 5a)。该褶皱初期为一水下隆起, 其沉积特征表现为背斜核部薄、翼部厚, 此现象在安居安组(N_{1a})至帕卡布拉克组(N_{1p})底部之间地层尤为明显, 尽管后期受到小断距逆断层的影响(图 3b)。随后, 西昆仑造山作用波及至此, 冲断活动自造山带向盆地内部逐渐减弱, 形成 F2、F3 与 F4 断层。此次构造事件叠加于早期断弯褶皱之上, 进一步加剧了西高东低的地貌格局(图 5c)。在经历剥蚀夷平后, 该区沉积了一套西薄东厚的早-中更新世(Q_{1+2})地层(图 5d)。至晚更新世-全新世(Q_{3+4}), 随着造山作用增强, 盆地西边界附近的 F4、F5 断层断距显著增大, 巨大的构造负载引发强烈山前挠曲沉降, 从而沉积了一套西厚东薄的地层(图 5e)。

沉积充填对造山带构造变形具有显著影响, 其模式主要分为进积型与加积型(孙统, 2020)。前人研究指出, 在进积模式下, 沉积中心位于造山带前缘, 地层向前陆方向减薄, 并在前缘减薄区易发育新的断裂, 最终形成比无沉积时更宽广的冲断褶皱带(Fillon et al., 2013)。而在加积模式下, 沉积物分布均匀, 变形主要表现为先存断裂的复活, 从而抑制新断裂的形成(Bigi et al., 2010)。然而, 西昆仑山前新生代虽存在进积型沉积, 但其地层(如 Q_{1+2})却呈现向前陆方向增厚的特征。同时, 乌泊尔段山前背驮盆地地层厚度分布极不均匀(图 3、5), 此现象亦与加积模式不符, 且 F2 和 F3 断层可能缺乏多期活动的证据。综上所述, 乌泊尔地区的山前变形扩展特征显然并非主要由同沉积因素所控制。

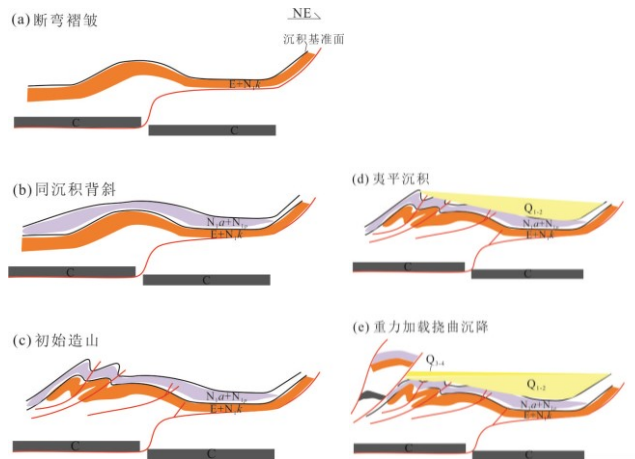


图5 西昆仑山前乌泊尔段构造演化过程模式图

Fig.5 Tectonic evolution model of the Wuboer section at the western Kunlun front.

3.2 西昆仑苏盖特-齐美根-柯东段

苏盖特-齐美根-柯东段构造三角带的几何形态与加拿大落基山南阿尔伯塔三角带相似，可划分为叠瓦冲断带和滑脱冲断带 (Bégin et al., 1996)。叠瓦冲断带中的断层发切于中地壳，向上归并于石炭系一二叠系滑脱层，其顶部发育倾角较小的断展褶皱。该带顶面形态与多滑脱面构造三角带相似，这可能暗示多条叠瓦冲断层在深部归并于同一主滑脱面(图 6)。滑脱冲断带则受控于上、下两个滑脱层：上滑脱层为中-上二叠统泥岩，下滑脱层可能为石炭系泥岩或寒武系膏盐岩。该带的变形样式受滑脱层空间分布的控制，例如，晚三叠世的挤压事件导致石炭系一二叠系滑脱层被剥蚀，这一古构造事件可能影响了新生代滑脱冲断带变形的发育。

按照现今地震剖面古生界地貌形态，白垩系-新生界应该大规模向造山带方向超覆，但地震剖面中并不存在该现象。相反，剖面揭示出新近系安居安组(N_{1a})与帕卡布拉克组(N_{1p})的厚度在滑脱冲断带和叠瓦冲断带存在差异， N_{1a} 分别为 1500m 与 2500m， N_{1p} 分别为 1400m 与 1500m，这表表明新近系阿图什组(N_{2a})沉积之前叠瓦冲断并未影响到西昆仑苏盖特-齐美根段。新近系阿图什组(N_{2a})沉积之后逐渐转变为向西超覆，或呈现进积模式(图 6)，标志着帕米尔-西昆仑新生代造山作用的开始(Chen et al., 2022b)。与乌泊尔段相似，该区未出现巨厚前渊沉积，这同样可能源于斜向俯冲/碰撞所产生的重力负载较弱。

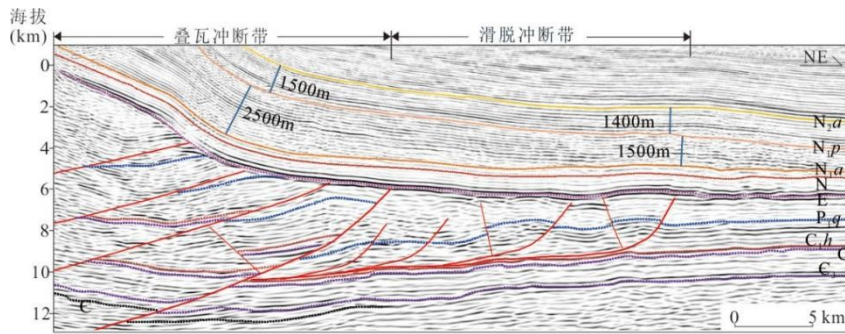


图 6 西昆仑山前齐姆根段构造地震解释剖面(剖面 3)

Fig.6 Structural interpretation of seismic profile from the Qimingen section, western Kunlun front (Profile 3).

3.3 中昆仑杜瓦-乌加特段

地震剖面显示，受甜水海地块与塔里木克拉通正向碰撞的影响，杜瓦-乌加特段发生重力挠曲沉降，新生界地层由山前向盆地内部逐渐减薄。山前构造三角带内发育一大型断弯褶皱，其地表宽度约 40 km，长宽比为 3:1(图 7)。该褶皱以寒武系膏盐岩为主滑脱层，形成机制符合 Hagke 和 Malz (2018) 的单一滑脱面构造三角带模型。该褶皱隆升幅度大，其北翼因褶皱旋转而发育陡倾的反向断层。此构造样式的出现，验证了石炭-二叠系烃源岩的缺失，这与钻井未获工业油气流的结论相一致。多滑脱面与单一滑脱面所形成的断弯褶皱，其滑脱层的空间分布存在显著差异。在多滑脱面模型中，断层上部的“坪”可以完全位于滑脱层内部(图 3a)。而在单一滑脱面条件下，断层上部的“坪”则可能部分位于非滑脱层或滑脱性较弱的岩层中，导致褶皱的水平扩展受限，从而更倾向于发生垂向增厚(图 7)。

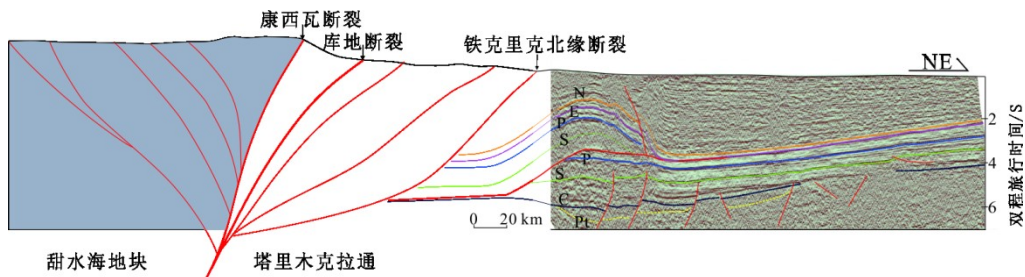


图7 中昆仑山前杜瓦-乌加特构造三角带地震地质剖面图(剖面4)

Fig.7 Structural interpretation of the seismic profile across the Duwa-Wujiate tectonic wedge, central Kunlun front (Profile 4)

3.4 构造三角带形成时间

结合地震剖面与野外露头研究, 学者们认为新近系阿图什组(N_{2a})与下伏地层之间的不整合面标志乌泊尔背驮盆地发育的开始, 由不整合面确定背驮盆地起始时间为中新世晚期至上新世早期(约 5.8-4.5 Ma)(Chen et al., 2022b)。造山运动时间与苏盖特-齐美根段相同(图 6)。然而, 乌泊尔背驮盆地最新钻井 TT1 井, 钻遇新近系最新地层为帕卡布拉克组底(N_{1p}), 之上可能没有沉积新近系上新统(N_2), 或沉积后被剥蚀, 无法准确限定乌泊尔段新生代造山开始时间(图 3b)。乌泊尔段早-中更新统(Q_{1+2})下伏层遭受逆冲褶皱作用以及断弯褶皱作用, 而苏盖特-齐美根段与杜瓦-乌加特段未见此现象(图 3、6、7)。说明帕米尔突刺前缘构造三角带形成时间可能早于侧翼, 构造作用强度更大。

4 构造三角带油气勘探有利区分析

4.1 晚三叠纪构造对构造三角带的影响

白垩系是昆仑山及周缘地区重要的勘探目的层, 已发现柯东、阿克莫木等气田(张蔚, 2020)。为恢复三叠纪晚期逆冲构造所引起的石炭系-二叠系剥蚀范围, 本研究采用残余厚度法重建昆仑山及南西天山下白垩统沉积厚度(图 8)。显示南西天山前白垩系厚度总体连续, 但在 QT1-KS6 井一线相对较薄, 并在乌拉根古隆起及 W101 井以北区域出现缺失。在西昆仑山前, 尤其是苏盖特-齐姆根段向东至盆地内部, 白垩系呈间隔式缺失, 反映该区在三叠纪晚期构造前锋高部位持续遭受剥蚀, 直至今近纪。甫沙-柯东一带整体表现为白垩系厚度薄值区, 局部见零星缺失, 表明白垩系沉积前该区古地貌可能略低于西侧苏盖特-齐姆根段的三叠纪构造前锋带。

三叠纪古逆冲褶皱冲断带的高部位, 常表现为白垩系薄层分布或直接缺失, 导致石炭系一二叠系塑性层被大量剥蚀, 形成滑脱层间断点(图 9)。此类间断点在新生代构造活动中具有重要控制意义(吴鸿翔, 2018)。构造三角带顶部的反向断层通常沿塑性层发育(Hagke and Malz, 2018), 而塑性层的中断位置则在后期成为构造楔的端点(王哲, 2014)。地震剖面进一步揭示, YS1 井附近构造楔的形成位置, 正好对应于下白垩统的缺失区(图 10), 也印证了这一点。

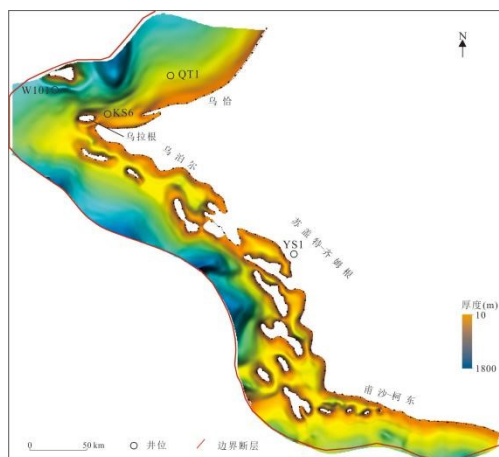


图8 昆仑山及南西天山前白垩系沉积前古地貌图

Fig.8 Sub-Cretaceous paleogeomorphic map of the Kunlun and Southwestern Tianshan forelands

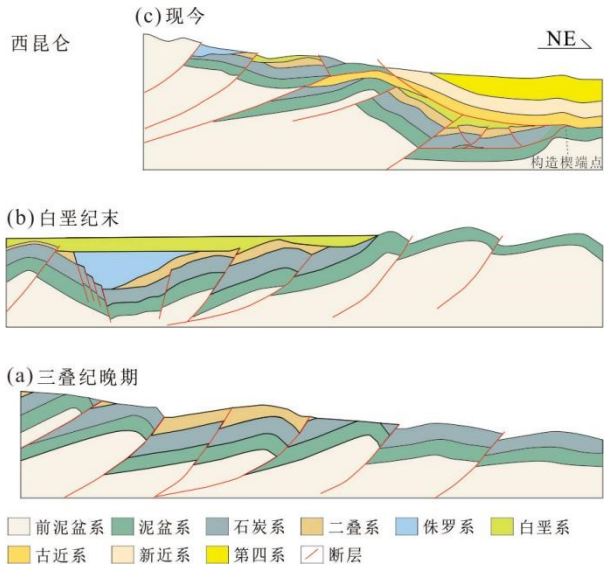


图 9 西昆仑山前构造楔形成示意图

Fig.9 Model of tectonic wedge formation in the western Kunlun foreland

4.2 油气勘探有利区

塔西南坳陷的热史与油气成藏史研究表明，寒武系烃源岩的生烃高峰出现在晚奥陶世，至中志留世进入干气阶段；石炭系一二叠系烃源岩的生烃高峰位于中三叠世，并于早一中侏罗世进入干气阶段；上侏罗统裂陷陆相烃源岩在晚白垩世达到生烃高峰，古近纪早期进入干气阶段；而新近系烃源岩目前仍处于生烃高峰(金玉洁等，2025)。在此背景下，圈闭形成时间与烃源岩排烃时序的匹配关系对油气有效性具有关键控制作用。

若白垩系之下冲断褶皱带形成于晚三叠世，则该类构造圈闭的形成早于石炭系-二叠系及上侏罗统烃源岩的大规模排烃期，有利于油气捕获，形成有效圈闭。此类圈闭主要分布于构造三角带内的滑脱冲断带(图 10)。反之，若白垩系之下冲断褶皱带形成于新近纪，则相关圈闭多为早期岩性圈闭后期构造调整的产物，或依赖新近系烃源岩的油气充注，常表现为非饱和油气藏或空圈闭，该类圈闭主要位于叠瓦冲断带(图 6)。

此外，位于构造楔附近的圈闭(如 YS1 井处背斜)形成于三叠纪晚期冲断前缘，该部位石炭系一二叠系烃源岩不发育，白垩系储层也较为缺乏(牟中海等，2001)，因此多为空圈闭。综合上述分析，塔西南地区白垩系油气勘探的有利区带集中于构造三角带的中部，即滑脱冲断带内的圈闭；而对叠瓦冲断带及构造楔端点附近的圈闭则应谨慎选择。

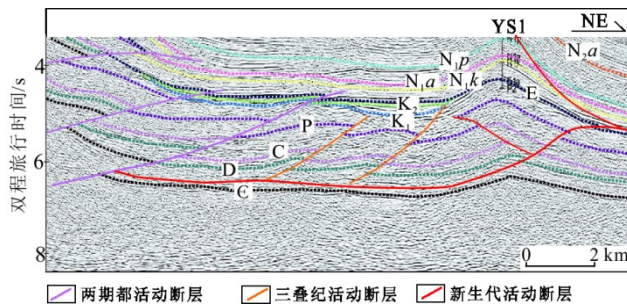


图 10 西昆仑山前苏盖特-齐姆根段构造楔剖面图(剖面 5，修改自卢启业, 2022)

Fig.10 Schematic cross-section of the tectonic wedge across the Sugait-Qinggen section, western Kunlun front (Profile 5; modified from Lu Qiye, 2022).

5 结论

(1) 西昆仑乌泊尔构造三角带背驮盆地的形成过程可分为三个阶段：新近系克孜洛依组沉积后，在区域对冲构造体系下，受石炭系-二叠系和古近系滑脱层的影响，首先发育断弯褶皱；至帕卡布拉克组沉积后，受帕米尔-西昆仑造山作用增强影响，褶皱核部抬升幅度显著大于东翼；早-中更新世沉积层呈现西薄东厚的楔形结构，而晚更新世-全新世期间则转为西厚东薄的挠曲沉积充填特征。

(2) 西昆仑苏盖特-齐美根-柯东段受中地壳、寒武系、石炭系-二叠系滑脱层的影响，构造三角带可划分为叠瓦冲断带与滑脱冲断带两部分。叠瓦冲断带中的构造圈闭主要形成于新近纪，多属非饱和油气藏；滑脱冲断带则继承了三叠纪晚期构造格架，早期圈闭保存完整，是白垩系油气勘探的有利区带。构造楔端点通常对应于三叠纪晚期冲断构造的最高部位，形成塑性层间断点，石炭系-二叠系烃源岩剥蚀强烈，导致该部位构造圈闭普遍缺乏有效油气充注。

(3) 中昆仑杜瓦-乌加特段构造三角带仅发育寒武系单一滑脱面，以大型断弯褶皱为特征，该区缺失石炭系-二叠系烃源岩。

References

- Baby, G., Simoes, M., Barrier, L., et al., 2022. Kinematics of Cenozoic Shortening of the Hotan Anticline Along the Northwestern Margin of the Tibetan Plateau (Western Kunlun, China). *Tectonics*, 41(5): e2021TC006928. <https://doi.org/10.1029/2021TC006928>
- Bégin, N.J., Lawton, D.C., Spratt, D.A., 1996. Seismic interpretation of the Rocky Mountain thrust front near the Crowsnest deflection, southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 44(1), 1-13. [https://10.1016/0960-8524\(96\)00001-6](https://10.1016/0960-8524(96)00001-6)
- Bigi, S., Paolo, L.D., Vadacca, L., et al., 2010. Load and unload as interference factors on cyclical behavior and kinematics of Coulomb wedges: Insights from sandbox experiments. *Journal of Structural Geology*, 32(1): 28-44. <https://10.1016/j.jsg.2009.06.018>
- Bonnardot, M.A., Re'gnier, M., Ruellan, E., et al., 2007. Seismicity and state of stress within the overriding plate of the Tonga-Kermadec subduction zone. *Tectonics*, 26(5), TC5017. <https://10.1029/2006TC002044>
- Charlesworth, H.A., Gagnon, L., 1985. Intercutaneous wedges, the triangle zone and structural thickening of the Mynheer coal seam at Coal Valley in the Rocky Mountain Foothills of central Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 33(1): 22-30. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.33.1.022>
- Chen, H.L., Lin, X.B., Cheng, X.G., et al., 2022a. Two-phase intracontinental deformation mode in the context of India-Eurasia collision: insights from a structural analysis of the West Kunlun-Southern Junggar transect along the NW margin of the Tibetan Plateau. *Journal of the Geological Society*, 179(2):1-14. <https://doi.org/10.1144/jgs2021-029>
- Chen, H.L., Yang, S.M., Vincenzo, P., et al., 2022b. The late Cenozoic expansion of the northeastern Pamir: insights from the stratigraphic architecture of the Wupoer Piggyback Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 232: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2021.105012>
- Chen, J.J., 2022. Cenozoic thrust deformation and genetic mechanism of the Southwestern Tarim Basin. China University of Geosciences, Beijing: 153-166(in Chinese with English abstract).
- Chen, L.X., Jia C.Z., Wu, G.H., et al., 2024. Basement architecture and evolution of Neoproterozoic Tarim rift basin. *Earth Science*, 49(10): 3445-3458(in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.Q., Pan, B., Yang, G., et al., 2024. Cambrian chronostratigraphy, sequence stratigraphy, and sedimentary evolution of the Tarim Craton. *Journal of Stratigraphy*, 48(3): 219-236 (in Chinese with English abstract).
- Fillon, C., Huismans, R.S., van der Beek, P., et al., 2013. Syntectonic sedimentation controls on the evolution of the southern Pyrenean fold-and-thrust belt: Inferences from coupled tectonics surface processes models. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 118(10): 5665-5680. <https://10.1002/jgrb.50368>

- Goffey, G.P., Craig, J., Needham, T., et al., 2010. Hydrocarbons in Contractional Belts. Geological Society, London, Special Publications, 348. <https://10.1144/sp348>
- Gordy, P., Frey, F., Norris, D.K., 1977. Geological Guide for the Canadian Society of Petroleum Geologists and the 1977 Waterton-Glacier Park Field Conference. *Canadian Society of Petroleum Geologists*.
- Hagke, C.V., Malz, A., 2018. Triangle zones-Geometry, kinematics, mechanics, and the need for appreciation of uncertainties. *Earth Science Reviews*, 177, 24-42. <https://10.1016/j.earscirev.2017.11.003>
- He, D.F., Li, D.S., He, J.Y., et al., 2013. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim basin and its exploration significance. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2): 201-218(in Chinese with Englishabstract).
- He, Z.L., Yang, X., Gao, J., et al., 2024. Hydrocarbon enrichment effects in the non-foreland area of the Tarim Basin under the coevolution control of the Tethys and Paleo-Asian oceans. *Oil & Gas Geology*, 45(3): 637-657(in Chinese with Englishabstract).
- Hippolyte, J.C., Angelier, J., Roure, F., et al., 1994. Piggyback basin development and thrust belt evolution: structural and palaeostress analyses of Plio-Quaternary basins in the Southern Apennines. *Journal of structural geology*, 16(2): 159-173.[https://10.1016/0191-8141\(94\)90102-3](https://10.1016/0191-8141(94)90102-3)
- Huang, G.M., Li, Z.H., Zhou, Y.Z., 2017. The different origins between passive-roof duplex in the Fusha area and piggyback basin in the Wupoer area in Southwestern Tarim Basin based on numerical modelling study. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1674-1693(in Chinese with Englishabstract).
- Jin, Y.J., Wang, L., Pang, X.Q., 2025. Multi-sourced composite hydrocarbon accumulation and ordered distribution pattern of the whole petroleum system in the Southwestern Depression, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 46(4): 1316-1332(in Chinese with Englishabstract).
- Jin, Z.J., Lv, X.X., 2000. Hydrocarbon resources and exploration strategy of foreland basins in Southwest Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 21(2):110-113+117(in Chinese with Englishabstract).
- Jones, P.B., 1996. Triangle zone geometry, terminology and kinematics. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 44(2): 139-152.<https://org/10.35767/gscpgbull.44.2.139>
- Laborde, A., Barrier, L., Simoes, M., et al., 2019. Cenozoic deformation of the Tarim Basin and surrounding ranges (Xinjiang, China): A regional overview. *Earth-Science Reviews*, 197: 102891. <https://10.1016/j.ear-scirev.2019.102891>
- Laubscher, H., 1977. Fold development in the Jura. *Tectonophysics*, 37, 337-362. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90056-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90056-7)
- Li, X.D., Wang, K.Z., 2003. An important mechanism of crustal shortening during of Pamir—taking Qimugen tectonic transformation domain as an example. *Xinjiang Geology*, 21(1): 9-15(in Chinese with Englishabstract).
- Li, Y.F., Qu, G.S., Liu, S., et al., 2008. Structural characters and mechanism in the Micangshan and Southern Dabashan Mountains front. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3):285-292(in Chinese with Englishabstract).
- Liao, X., 2018. Meso-Cenozoic tectonic evolution characteristics and its controlling effects on hydrocarbon accumulation in the Southwest Depression of Tarim Basin. Northwest University, Xian: 52-65(in Chinese with Englishabstract).
- Lu, Q.Y., 2022. Mesozoic tectonic process in southwestern Tarim Basin and its constraints on the dynamic evolution of the Paleo-Tethys orogenic belt. Zhejiang University, Hangzhou: 20-37(in Chinese with Englishabstract).
- McClay, K.R., 1992. Glossary of thrust tectonic terms, in: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, 419-433.
- Morley, C.K., 1986. A classification of thrust fronts. *AAPG*, 70(1): 12-25.<https://10.1306/94885615-1704-11D7-8645000102C1865D>
- Mu, Z.H., Lu, T.Q., Xie, G.S., et al., 2001. Restoration of the denuded thicknesses of Permian in the Southwest part of Talimu Basin. *Natural Gas Industry*, 21(2): 41-43(in Chinese with Englishabstract).
- Price, R.A., 1986. The southeastern Canadian Cordillera: Thrust faulting, tectonic wedging, and delamination of the lithosphere. *Journal of structural geology*, 8(3-4): 239-254.[https://10.1016/0191-8141\(86\)90046-5](https://10.1016/0191-8141(86)90046-5)
- Roure, F., Casero, P., Vially, R., 1988. Evolutive geometry of ramps and piggyback basins in the Bradanic trough. In:

- L'AppenninoCampano-lucano nel quadro geologico dell'Italia Meridionale*. Attidel 74 ° Congresso Soc. Geol. It. Sorrento 13-17 settembre 1988(edited by Societa Geologica Italiana). De Frede, Napoli. B, 360-363.
- Sans, M., Vergés, J., 1995. Fold development related to contractional salt tectonics: southeastern Pyrenean thrust front, Spain. *AAPGMemoir* 65, 369-378. <https://10.1306/M65604C18>
- Sans, M., Muñoz, J., Vergés, J., 1996. Triangle zone and thrust wedge geometries related to evaporitic horizons (southern Pyrenees). *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 44(2), 375-384. <https://org/10.35767/gscpgbull.44.2.375>
- Schmid, S.M., Pfiffner, O.A., Froitzheim, N., et al.,1996. Geophysical-geologicaltransect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps. *Tectonics*, 15(5): 1036-1064. <https://org/10.1029/96TC00433>
- Shi, Y.L., Rick Allis, Fred Davey, 1994. The main controlling factors of tectonic thermal evolution in the Southern Alps of New Zealand // Chinese Geophysical Society. Proceedings of the 10th Academic Annual Conference of the Chinese Geophysical Society, 180-181.
- Sun, T., 2010. Structural analysis of the piedmont fault zone in Southwestern depression of Tarim Basin. China University of Petroleum, Beijing: 16-18(in Chinese with Englishabstract).
- Wang, C.Y., 2014. The deformation controlling factors of fold-and-thrust belt in SWTarim Basin: physical analogue modeling study. Zhejiang University, Hangzhou: 1-97(in Chinese with Englishabstract).
- Wang, Q.H., Yang, H.J., Li, Y., et al., 2023. Major breakthrough in the Carboniferous-Permian in Well Qiatan 1 and exploration prospect in the piedmont southwestern TarimBasin. *China Petroleum Exploration*, 28(4):34-45(in Chinese with Englishabstract).
- Wang, Y.Y., 2017. The study of sequence stratigraphy and depositional facies of Silurian in the Tarim Basin. Chengdu University of Technology, Chengdu: 43-47(in Chinese with Englishabstract).
- Wang, Z., 2014. Late Cenozoic structural framework and evolution along the eastern margin of the Pamir Salient, Northwestern China. Zhejiang University, Hangzhou: 32-76(in Chinese with Englishabstract).
- Wu, H.X., 2018. Characteristic of paleostructure in the mountain front region of southwestern Tarim Basin and its control of Jurassic-Cretaceous. Zhejiang University, Hangzhou: 25-32(in Chinese with Englishabstract).
- Wu, Z.Y., Yin, H.W., Zhang, T., et al., 2017. Characteristics and Formation Mechanism of Thrust Structures in the Eastern Margin of Pamir Salient: Insights from Analogue Modeling and Discussion. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(4):663-677(in Chinese with Englishabstract).
- Xiao, A.C., Yang, S.F., Chen, H.L., et al., 2000. Structural characteristics of thrust system the front of the west Kunlun Mountains. *Earth Science Frontiers*, 7(S2):128-136(in Chinese with Englishabstract).
- Yang, Y.M., Bai, X.L., Yi, H.Y., et al., 2023. Progress and potential of natural gas exploration in the complex tectonic belt of Longmen Mountain: Learning from drilling achievements of Well Hongxing 1. *Natural Gas Industry*, 43(2): 1-14 (in Chinese with Englishabstract).
- Yu, H.D., 2021. Spatial-temporal characteristics of late Cenozoic deformation in eastern margin and its implication for the propagation of Pamir arcuate tectonic belt. Zhejiang University, Hangzhou: 59-68(in Chinese with Englishabstract).
- Zamora-Valcarce, G., Zapata, T., 2015. Building a valid structural model in a triangle zone: An example from the Neuquén fold and thrust belt, Argentina. *Interpretation*, 3(4): SAA117-SAA131. <https://org/10.1190/INT-2015-0014.1>
- Zhang, W., 2020. Hydrocarbon migration and accumulation and its enrichment characteristics in Southwest depression of the Tarim Basin, NW China. China University of Petroleum, Beijing: 59-71(in Chinese with Englishabstract).
- Zhang, Z.W., Yang, X.D., 2023. Geological structures and earthquake and volcano hazards along Tonga-Kermadec Subduction Zone. *Science & Technology Review*, 41(2): 56-64.
- Zheng, H.R., Tian, J.C., Hu, Z.Q., et al., 2022. Lithofacies palaeogeographic evolution and sedimentary model of the Ordovician in the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 733-745(in Chinese with Englishabstract).

附中文参考文献

- 陈纘俊. 2022. 塔西南新生代冲断构造变形及成因机制. 中国地质大学, 北京: 153-166.

- 陈利新, 贾承造, 邬光辉, 等. 2024. 塔里木新元古代裂谷盆地基底结构与演化. 地球科学, 49(10): 3445-3458.
- 陈永权, 潘兵, 杨果, 等. 2024. 塔里木克拉通寒武系年代框架、层序地层与沉积演化. 地层学杂志, 48(3): 219-236.
- 何登发, 李德生, 何金有, 等. 2013. 塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示. 石油学报, 34(2): 201-218.
- 何治亮, 杨鑫, 高键, 等. 2024. 特提斯洋与古亚洲洋协同演化控制下的塔里木台盆地油气富集效应. 石油与天然气地质, 45(3): 637-657.
- 黄光明, 李忠海, 周永智, 2017. 塔西南甫沙地区被动顶板双重构造和乌泊尔地区背驮盆地的数值模拟. 地质学报, 91(8): 1674-1693.
- 李向东, 王克卓, 2003. 帕米尔隆升过程中地壳的一种重要缩短机制—以齐姆根构造转换域为例. 新疆地质, 21(1): 9-15.
- 李岩峰, 曲国胜, 刘殊, 等. 2008. 米仓山、南大巴山前缘构造特征及其形成机制. 大地构造与成矿学, 32(3): 285-292.
- 廖晓, 2018. 塔里木盆地西南坳陷中生代构造演化特征及对油气成藏的控制作用. 西北大学, 西安: 52-65.
- 卢启业, 2022. 塔西南中生代构造过程及其对古特提斯造山带动力学演化的制约. 浙江大学, 杭州: 20-37.
- 金玉洁, 王雷, 庞雄奇, 等. 2025. 塔里木盆地西南坳陷全油气系统多源复合成藏特征与有序分布模式. 石油与天然气地质, 46(4): 1316-1332.
- 金之钧, 吕修祥, 2000. 塔西南前陆盆地油气资源与勘探对策. 石油与天然气地质, 21(2): 110-113+117.
- 牟中海, 陆廷清, 谢桂生, 等. 2001. 塔西南地区二叠系剥蚀厚度恢复. 天然气工业, 21(2): 41-43.
- 孙统, 2010. 塔里木盆地塔西南坳陷山前断裂带构造解析. 中国石油大学, 北京: 16-18.
- 石耀霖, Rick Allis, Fred Davey, 1994. 新西兰南阿尔卑斯构造热演化的主要控制因素//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第十届学术年会论文集, 180-181.
- 王春阳, 2014. 塔西南褶皱—冲断带变形控制因素物理模拟研究. 浙江大学, 杭州: 1-97.
- 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 2023. 塔西南山前地区恰探1井石炭系—二叠系重大突破与勘探前景. 中国石油勘探, 28(4): 34-45.
- 王莹莹, 2017. 塔里木盆地志留系层序地层与沉积相研究. 成都理工大学, 成都: 43-47.
- 王哲, 2014. 帕米尔突刺东缘晚新生代构造格架与演化. 浙江大学, 杭州: 32-76.
- 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(S2): 128-136.
- 吴鸿翔, 2018. 塔西南山前古构造-古地貌特征及对侏罗-白垩系沉积的控制. 浙江大学, 杭州: 25-32.
- 吴珍云, 尹宏伟, 张涛, 等. 2017. 帕米尔突刺东缘冲断带构造形成机制: 物理模拟及讨论. 大地构造与成矿学, 41(4): 663-677.
- 杨跃明, 白晓亮, 易海永, 等. 2023. 龙门山复杂构造带红星1井天然气勘探突破及其油气地质意义. 天然气工业, 43(2): 1-14.
- 余宏甸, 2021. 帕米尔东缘山前晚新生代构造变形时空发育特征及其对帕米尔弧形构造带扩展的启示. 浙江大学, 杭州: 59-68.
- 张蔚, 2020. 塔里木盆地西南坳陷油气运聚成藏过程及富集特征. 中国石油大学, 北京: 59-71.
- 张志文, 杨晓东, 2023. 汤加-克马德克俯冲带的地质构造与地震火山特征. 科技导报, 41(2): 56-64.
- 郑和荣, 田景春, 胡宗全, 等. 2022. 塔里木盆地奥陶系岩相古地理演化及沉积模式. 石油与天然气地质, 43(4): 733-745.