

## 基于 KronosFlow 软件对逆冲推覆带构造-热演化的初探

李 丹<sup>1 2</sup>，常 健<sup>1 2</sup>，李晨星<sup>1 2</sup>，姚同云<sup>3</sup>，刘敏珠<sup>3</sup>

LI Dan<sup>1 2</sup>, CHANG Jian<sup>1 2</sup>, LI Chenxing<sup>1 2</sup>, YAO Tongyun<sup>3</sup>, LIU Minzhu<sup>3</sup>

1. 中国石油大学 (北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学 (北京) 地球科学学院, 北京 102249;

3. 北京阿什卡技术开发有限公司, 北京 100101

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Beijing Ashka Technology Development Co Ltd, Beijing 100101, China

**LI D, CHANG J, LI C X, et al., 2021. A KronosFlow software-based preliminary study on the tectono-thermal evolution of thrust-nappe belt [J]. Journal of Geomechanics, 27 (6): 975 – 986. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 06. 079**

**Abstract:** Basin modeling is an essential technical method for the exploration and assessment of petroleum basins. However, traditional 2D basin modeling technologies only apply to extensional basins. This makes the thermal history reconstruction in lateral direction of compressional basins an unsolved problem and thus restricts oil and gas exploration. The latest KronosFlow software developed by the French Beicip-Franlab company breaks through the above limitations of traditional softwares on complex structures such as thrust-nappe belts, salt structures, mud diapir structures, and precisely controls the lateral and vertical structural displacements. We restored the burial history, thermal history, hydrocarbon generation, expulsion history, and hydrocarbon migration and accumulation history of compressional basins, by tracking the continuous motion pattern of a single grid, restoring lateral deformation and seamlessly interacting with the TemisFlow software. We then used the KronosFlow software on the Kalpin and Kuqa thrust-nappe belts in the northern margin of the Tarim Basin for quantitatively inverting the tectonic-thermal evolution history of the thrust-nappe belts since the Cenozoic. The modeling results were consistent with the measured paleo-thermal indicator data, confirming the validity of the results of this software for the compressional basin. The Yimugantawu fault in the Kalpin thrust-nappe belt was reactivated during 40~30 Ma, and the temperature of the Silurian-Devonian near the fault was higher than 85 °C. The Kepingtag fault was active during 15~10 Ma, and the formation temperature was lower than 70 °C. The Cambrian (maturity of source rocks between 1.3%~1.7%) and Ordovician (maturity of source rocks between 0.7%~1.2%) source rocks have a high degree of thermal evolution and strong hydrocarbon generation ability. The temperature of the Jurassic strata in the Kuqa thrust-nappe belt ranges from 50 to 70 °C in the northern section and 210 to 230 °C in the southern section. The salt structure results in geothermal anomaly, among which the salt rock in the Qiluitage structural belt is the thickest and the cooling effect is the most obvious.

**Key words:** basin modeling; KronosFlow software; model building; thrust-nappe belt; tectono-thermal evolution

基金项目: 国家自然科学基金 (41972125, U19B6003)

This research is financially supported by the National Natural Sciences Foundation of China (Grant No. 41972125, U19B6003)

第一作者简介: 李丹 (1994—), 女, 在读博士, 从事区域构造及盆地分析研究。E-mail: lidan941009@163.com

通讯作者: 常健 (1982—), 男, 博士, 副教授, 从事低温热年代学、盆山构造-热演化及油气成藏研究。E-mail: changjian@cup.edu.cn

收稿日期: 2021-06-26; 修回日期: 2021-10-11; 责任编辑: 范二平

引用格式: 李丹, 常健, 李晨星, 等, 2021. 基于 KronosFlow 软件对逆冲推覆带构造-热演化的初探 [J]. 地质力学学报, 27 (6): 975-986. DOI: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2021. 27. 06. 079

**摘要:** 盆地模拟是含油气盆地勘探评价的重要技术方法之一,然而传统的盆地建模2D模拟技术仅适用于拉张型盆地,使得挤压型盆地横向上的热史重建一直是个难题,从而制约了进一步的油气勘探。目前由法国Beicip-Franlab公司设计的KronosFlow软件突破了传统盆模软件对逆冲推覆带、盐构造和泥底辟等复杂构造的局限性,精确控制了横向和垂向上的构造位移,通过跟踪单个网格连续运动形态、恢复侧向变形量以及与TemisFlow软件无缝衔接,实现了对挤压型盆地埋藏史、热史、生排烃史以及油气运聚史的恢复。以塔里木盆地北缘柯坪逆冲推覆带和库车逆冲推覆带为例,利用KronosFlow软件定量反演了新生代以来的构造-热演化历史,并以实测数据约束并验证挤压环境下盆地模拟结果的有效性。柯坪逆冲推覆带的依木干他乌断层在40~30 Ma再次活动,断层附近志留系—泥盆系的温度大于85 °C,柯坪塔格断层在15~10 Ma活动,断层附近志留系—泥盆系的温度小于70 °C,寒武系(烃源岩成熟度为1.3%~1.7%)和奥陶系(烃源岩成熟度为0.7%~1.2%)烃源岩热演化程度高,生烃能力强。库车逆冲推覆带侏罗系北段温度介于50~70 °C,南段温度介于210~230 °C,盐构造造成地温异常,其中秋里塔格构造带膏盐岩最厚,降温效果最明显。

**关键词:** 盆地模拟; KronosFlow软件; 模型构建; 逆冲推覆带; 构造-热演化

中图分类号: TE121 文献标识码: A

盆地模拟是由计算机遵从地质过程定量地模拟含油气盆地的形成和演化,从而反映出含油气盆地中油气成藏的本质规律(Hantschel and Kauerauf, 2009; 汪锐等, 2020)。盆地模拟技术发展至今已有40余年,目前国际上应用较为广泛、认可度较高的盆模软件主要包括德国Schlumberger公司的PetroMod软件、美国Platte River公司(PRA)的BasinMod软件、Zetaware公司的Trinity软件和法国石油研究院(IFP)的TemisFlow软件(张庆春, 2001; 石广仁, 2009)。PetroMod软件是超压技术的代表(Gabriele, 2017),BasinMod软件侧重结合测井曲线模拟盆地,Trinity软件能利用地壳厚度和沉积速率预测大地热流值,TemisFlow软件是回剥技术的代表。对国内而言,中石油公司开发的BASIMS软件也具有较广的应用,但是软件数值模拟水平和软件更新速度相比国外有一定差距。这些软件尽管可以进行多尺度的盆地模拟,但对于侧向构造运动的模拟仍存在问题,尤其对于构造复杂地区,如逆冲推覆带、盐构造和泥底辟等(刘可禹和刘建良, 2017),而这些地区通常是油气勘探的重要地区,因此对相关构造的模拟具有一定的科学意义。为了解决复杂构造在盆地模拟中存在的这一问题,文中利用法国Beicip-Franlab公司设计的KronosFlow 2012软件对塔里木盆地柯坪逆冲推覆带和库车逆冲推覆带进行了新生代以来的定量反演,并利用实测数据约束及验证其有效性。

## 1 KronosFlow 2012 软件简介

对于复杂构造环境下的地史恢复,一套地层

可能有多个深度值,除了要考虑垂向上地层厚度的变化,还要考虑横向上的收缩量,因此利用传统的回剥技术已经难以实现。法国Beicip-Franlab公司的KronosFlow 2012软件提出非结构化网格技术和有限体积法结合的模拟思路,在保证网格物质平衡的前提下,恢复地层从沉积初期至今的构造演变过程,输出一系列连续的网格变形动态图,能够解释沉积物减压、侵蚀和侧向位移,适用于逆冲推覆构造、盐构造和泥底辟等复杂构造。另外,KronosFlow 2012软件与TemisFlow 2012软件可以很好的结合,将地史重建的结果输入到TemisFlow软件中,在垂向压实和水平挤压应力共同作用下,进行高精度的多尺度盆地模拟。该软件与其他盆模软件相比,具有以下优势:①突破了盆地建模中对于逆冲推覆带、盐构造和泥底辟等的局限性(Anka et al., 2018);②可以描述复杂构造形态(Anka et al., 2018);③能够恢复盆地侧向变形量(Frery et al., 2017);④可以在动态网格上模拟油气的生排运聚过程(Frery et al., 2017)。

## 2 工作流程及数据准备

利用KronosFlow软件进行盆地建模(图1),是以钻井、地震、测井以及地层对比信息等资料为基础,将剖面数字化并建立构造及骨架模型(图2),并结合岩相资料创建完整的现今剖面。然后依次恢复断层侧向位移,消除后期变形等影响(图3),并进行网格化处理,在保证网格物质平衡

的基础上,恢复研究区构造演化史。最后将构造恢复结果输入到TemisFlow软件中,并设置4类约束条件包括沉积模型(地质单元、地层年代、岩性、厚度、石油系统因素)、断层性质(穿透性)、热条件(现今热流、古热流、地温梯度、地表温度)以及岩石圈模型(地质单元及层厚等)。在此基础上,即可进行模拟。通过Temisflow盆地模拟,可以获得14种结果(图4),结果涉及地史、热史、生烃史、排烃史、运聚史5个方面,准确度较高,使用者可以结合实测数据进行选择。

KronosFlow软件界面清晰,具有4种变形类型(图3):①移动最小二乘法,在位移场中给每个受约束的顶点设置位移量,而达到表面变化最小化;②有限元法,用于离散化和解决可变形材料表面模型的手段;③定向剪切,以一定角度变化;④弯曲滑动,选择相应参考线,以此为标准实现其他线长度变化最小化。另外还有5种变形设置:

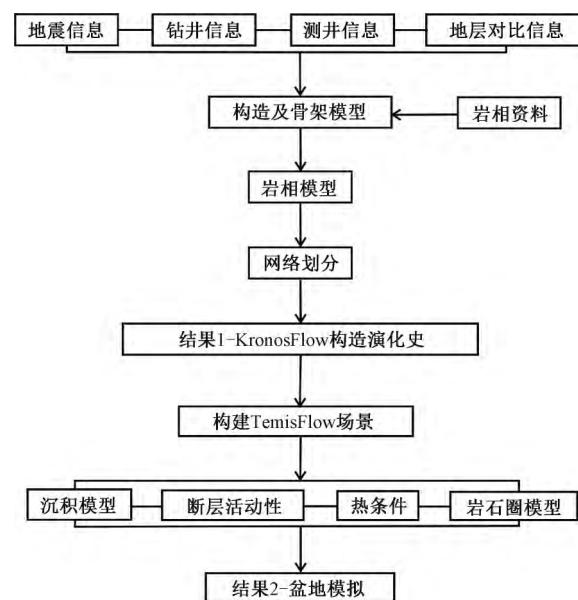


图1 盆地模拟流程图

Fig. 1 Workflow of basin modeling for the KronosFlow software

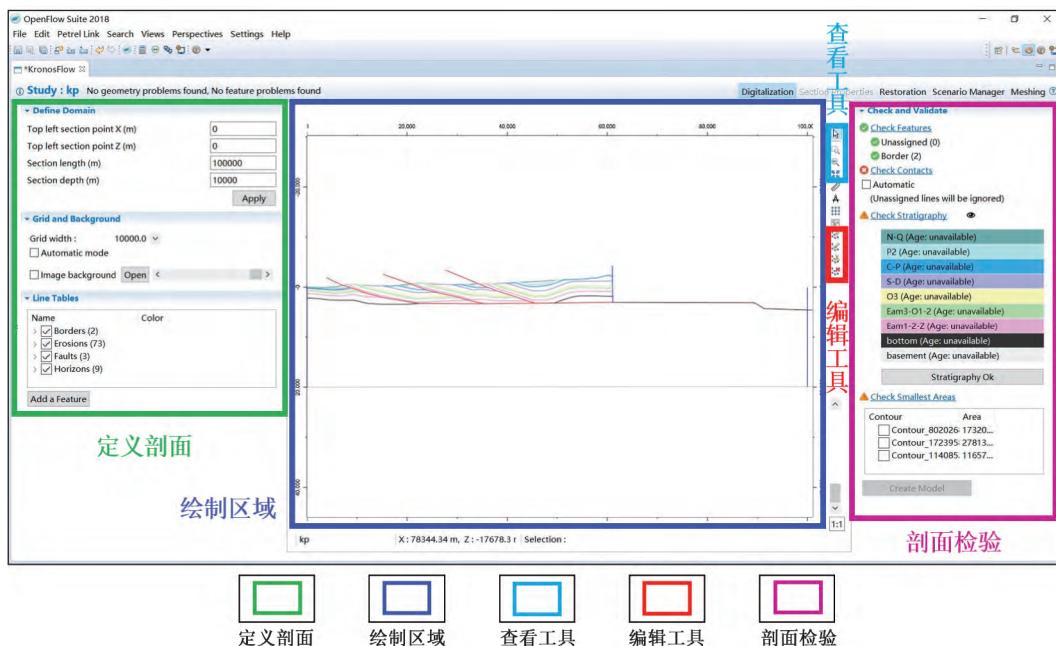


图2 KronosFlow 2012软件剖面数字化界面图

Fig. 2 Digitalization interface of the KronosFlow 2012 software

①自动重新组合行,在一致的行上应用约束;②使用锚点;③调整长度,调整长度以获得更好的贴合度;④允许混合线类型,混合断层和水平线;⑤选择实习线,在内部线上应用约束。这4种变形类型及5种变形设置可以通过3种操作方式实现,分别是双线约束、滑动变形和多元约束。变形方法与操作方式的完美利用,可以高效准确地实现构造恢复,为盆地模拟打下夯实的基础。软

件还具有强大的质量检验功能,在每一步操作结束后均可对几何形状、特征一致性、最小区域等方面进行检验,以确保操作的准确性。

实际操作中,需要注意以下几个方面:①创建现今剖面时基底要有合理的形态,才能保证构造恢复时断块沿滑脱面顺利滑动;②对于简单的褶皱构造,采用多元约束是极为有效且准确的一种操作方式,该方法要求断层两侧的所有地层线

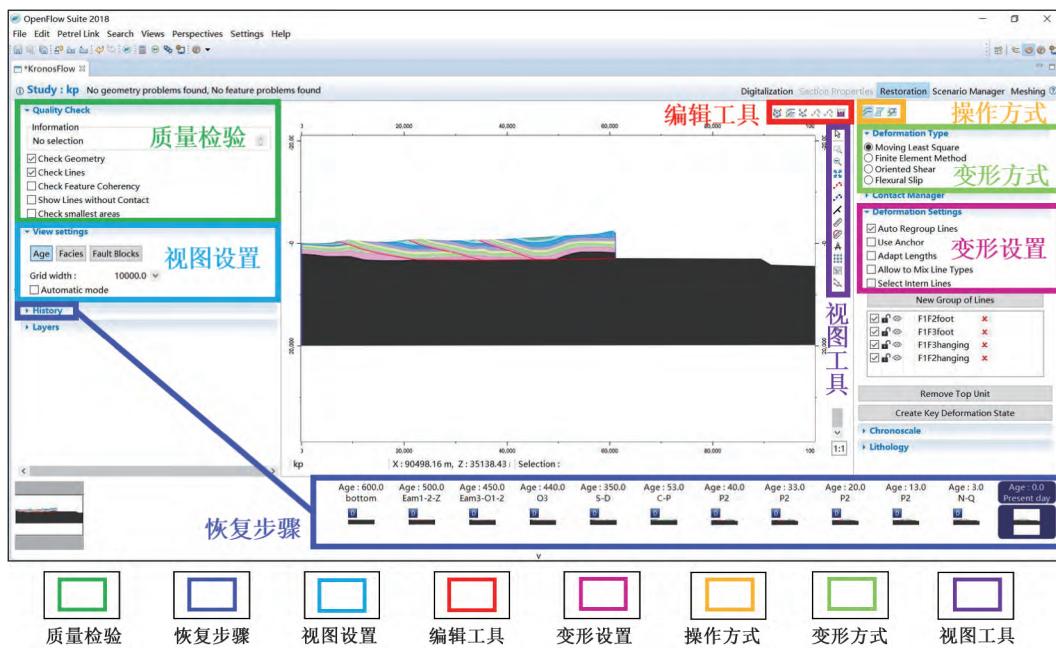


图3 KronosFlow 2012 软件构造恢复界面图

Fig. 3 Restoration interface of the KronosFlow 2012 software

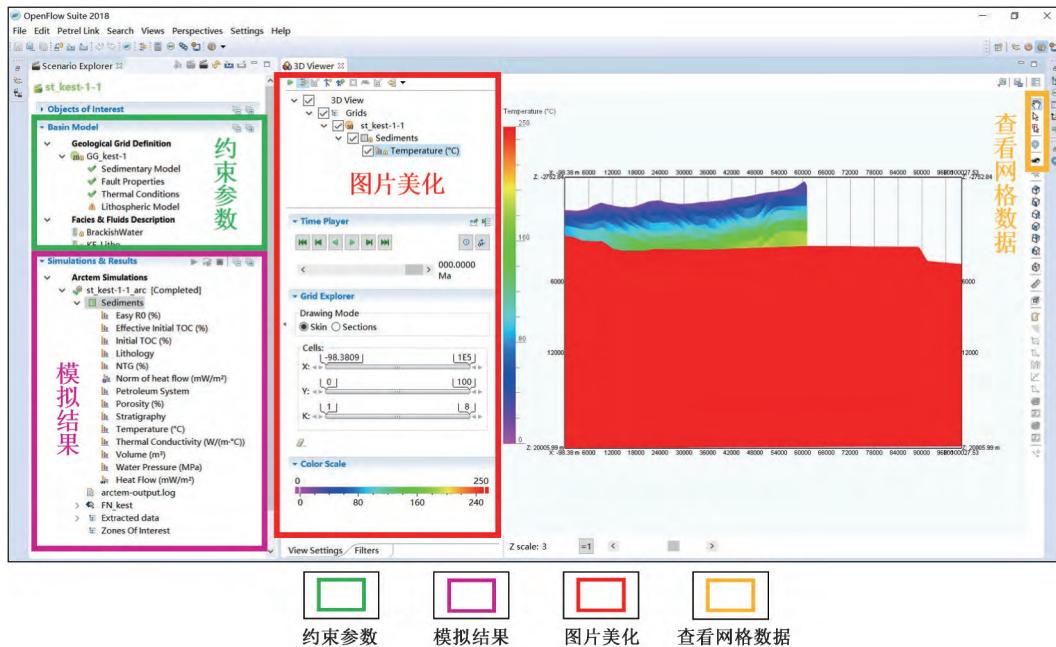


图4 TemisFlow 2012 软件界面图

Fig. 4 Interface of the TemisFlow 2012 software

均手动设置到相应的位置，因此可以较准确地恢复断层两侧的地层，有效地减少检验时的错误提示；③对于复杂的褶皱形态，需要先利用双线约束法中的弯曲滑动来约束断块内部线实现去褶皱，再用多元约束法进行准确恢复；④该软件具备自动检验错误的功能，若在检验时出现断块有部分叠加的错误，利用滑动变形法可以较好地解决这

个问题。

### 3 实例分析

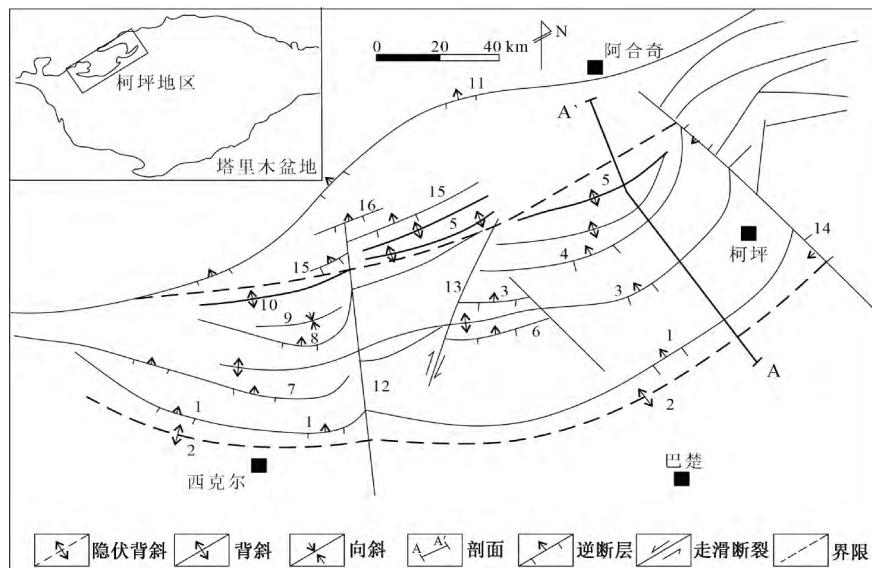
文中以塔里木盆地北缘柯坪逆冲推覆带的A-A'剖面和库车逆冲推覆带的B-B'剖面为例，结合KronosFlow软件在挤压盆地模拟方面的优势，通过

构建数学模型, 进行热史及烃源岩成熟度的恢复, 并将盆地温度场及成熟度模拟结果与已有实测数据进行对比分析, 约束并验证盆地模拟的结果。

### 3.1 柯坪逆冲推覆带构造-热演化研究

柯坪逆冲推覆带位于塔里木盆地西北缘(图5), 表现为叠瓦状逆冲推覆, 于白垩纪发生剥露事件, 具有暴露式逆冲推覆前锋(马德明等, 2007; Chang et al., 2019), 最主要的区域性滑脱

面是中寒武统阿瓦塔格组膏泥岩层(曲国胜等, 2003)。柯坪地区具有广阔的油气勘探前景, 广泛分布的油苗等证实了该地区曾有过大规模的油气运聚, 另外新苏地1井钻遇了奥陶系—志留系多套油气显示层, 尤其在志留系柯坪塔格组获工业气流, 表明其具有良好的石油地质条件(吕修祥和严俊君, 1996; 杨庚, 2003; 吕修祥等, 2014; 黄苏卫, 2014; 张远银等, 2019; 高永进等, 2020)。



1—柯坪塔格断层; 2—柯坪塔格背斜; 3—依木干他乌断层; 4—卡拉布克塞塔格断层; 5—孔乌腊奇背斜; 6—依木干他乌南断层; 7—奥兹尔塔格断层; 8—皮羌山断层; 9—皮羌山向斜; 10—托克散阿达拜山背斜; 11—阿合奇-乌恰断层; 12—皮羌断层; 13—萨尔干断层; 14—印干断层; 15—科克布克三山断层; 16—奥伊布拉克山断层

图5 柯坪逆冲推覆带主要断层和褶皱构造分布图(据吕修祥等, 2014修改)

Fig. 5 Major faults and folds in the Kalpin thrust-nappe belt (modified after Lv et al., 2014)

1—Kepingtag fault; 2—Kepingtag anticline; 3—Yimugantawu fault; 4—Kalabukesaitag fault; 5—Kongwuqi anticline; 6—Southern Yimugantawu fault; 7—Aoziertag fault; 8—Piqiangshan fault; 9—Piqiangshan syncline; 10—Tuokesanadabaishan anticline; 11—Aheqi-Wuqia fault; 12—Piqiang fault; 13—Sergan fault; 14—Yin'gan fault; 15—Kekebukeshanshan fault; 16—Aoyibulakeshan fault

A-A'剖面(图6)发育3个逆冲席(柯坪塔格、依木干他乌、卡拉布克塞塔格), 由上覆于第四系的寒武系一二叠系组成, 指示出一个弧形的突起地貌, 并以中寒武统膏泥岩层为滑脱面(杨庚, 2003)。该剖面原始长度为99.6 km, 现今长度为61.1 km, 缩短量为38.5 km, 缩短率为38.7%。文中模拟A-A'剖面采用的约束条件见表1, 热流数据参考已有研究成果(王良书等, 1995; 刘绍文等, 2017a), 由于柯坪逆冲推覆带自侏罗纪以来处于缓慢冷却阶段, 热流匀速降低, 仅利用古热流和现今热流加以约束。文中利用平衡剖面技术依次恢复了该剖面的初始构造。根据实测低温热年代学年龄和砂箱实验模拟认为卡拉

布克赛格、依木干他乌、柯坪塔格断层活动时间分别为54~46 Ma、40~30 Ma、15~10 Ma(Chang et al., 2019)。此次热史模拟结果表明(图7), 依木干他乌断层在40~30 Ma再次活动, 断层附近志留系—泥盆系(S-D)的温度大于85 °C, 柯坪塔格断层在15~10 Ma活动, 断层附近志留系—泥盆系(S-D)的温度小于70 °C, 与已有研究结果相一致(Chang et al., 2019)。整体上, 温度随地层埋深的增加而升高, 体现了构造-热演化的相关性, 受构造挤压、断层活动和盐体上涌的影响, 局部温度场受到干扰(何丽娟等, 2017)。

同时, 烃源岩成熟度模拟结果表明(图8), 寒武系烃源岩成熟度为1.3%~1.7%, 奥陶系烃源

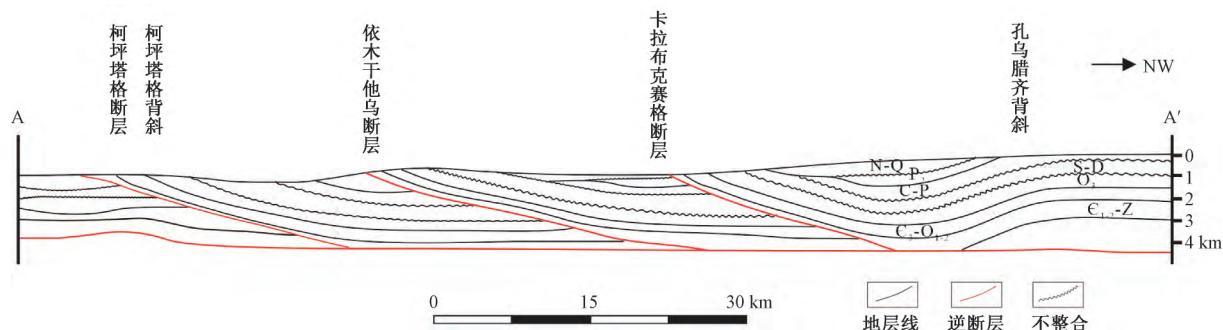


图 6 柯坪逆冲推覆带 A-A'剖面图 (据马德明等, 2007 修改; 剖面位置见图 5)

Fig. 6 A-A' cross section across the Kalpin thrust-nappe belt (modified after Ma et al., 2007; location is shown in Fig. 5)

表 1 柯坪逆冲推覆带 A-A'剖面模拟约束参数

Table 1 Constraint parameters of the A-A' section modeling for the Kalpin thrust-nappe belt

沉积模型	热条件	断层性质	岩石圈模型
新近系—第四系 (N-Q): 砂岩			
中二叠统 (P <sub>2</sub> ): 砂岩			
石炭系一二叠系 (C-P): 石灰岩	现今热流: 48 mW/m <sup>2</sup>		上地壳: 20 km
志留系—泥盆系 (S-D): 砂岩			
上奥陶统 (O <sub>1</sub> ): 石灰岩	古热流: 55 mW/m <sup>2</sup>	可穿透性	下地壳: 12 km
上寒武统—中奥陶统 (E <sub>1</sub> -O <sub>1-2</sub> ): 石灰岩			
震旦系—中寒武统 (Z-C <sub>1-2</sub> ): 膏盐岩	地表温度: 14 °C		上地幔: 93 km
基底: 上地壳			

注: 沉积模型数据引自马德明等 (2007), 现今热流引自刘绍文等 (2017a), 古热流引自王良书等 (1995), 地表温度取自新疆地区多年平均气温为参考, 岩石圈分层数据引自赵俊猛等 (2008)

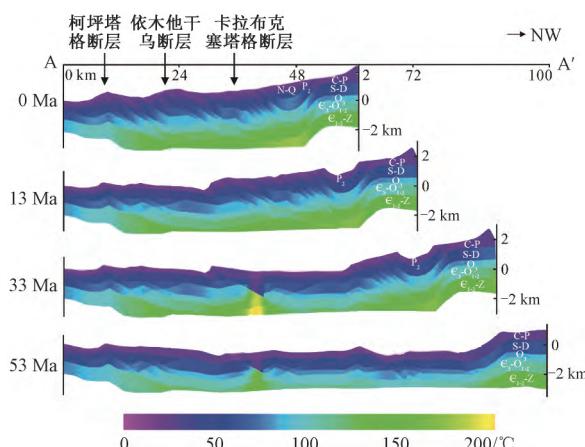


图 7 柯坪逆冲推覆带 A-A'剖面的温度场演化

Fig. 7 Temperature field evolution of the A-A' section in the Kalpin thrust-nappe belt

岩成熟度为 0.7%~1.2%, 石炭系烃源岩成熟度为 0.5%~0.9%, 二叠系烃源岩成熟度为 0.4%~0.6%, 寒武系和奥陶系烃源岩热演化程度高, 处于高成熟阶段, 生烃能力强, 模拟结果与相关学者对柯坪地区烃源岩实测镜质体反射率结果相匹配 (李椿等, 2001; 张远银等, 2019)。柯坪逆冲推覆带奥陶系烃源岩随着埋藏深度的增加而不断成熟, 受隆升剥蚀作用的影响, 烃源岩热演化停

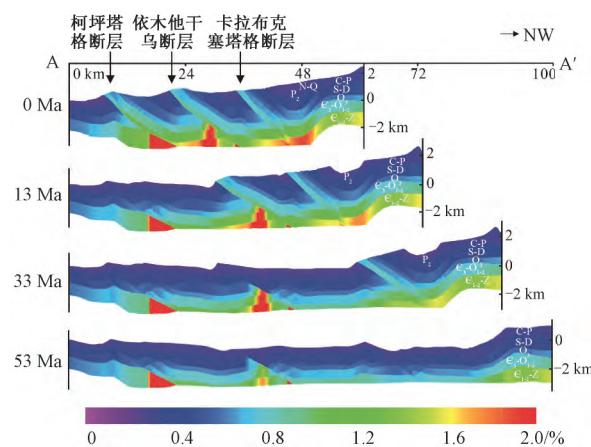


图 8 柯坪逆冲推覆带 A-A'剖面烃源岩成熟度演化图

Fig. 8 Maturity evolution of source rock in the A-A' section in the Kalpin thrust-nappe belt

滞, 现今进入到生油和凝析油-湿气阶段。

### 3.2 库车逆冲推覆带构造-热演化

库车逆冲推覆带位于柯坪逆冲推覆带东部 (图 9), 其北部以厚皮构造为主, 至克拉苏-依奇克里克构造带发育薄皮构造, 总体表现为前列式逆冲断层和断层相关褶皱, 于晚中新世 (15 Ma) 开始快速抬升持续到 5 Ma (金文正等, 2007; 李

曰俊等, 2008; 常健等, 2012)。新近系吉迪克组发育的盐枕构造既是变形层位也是滑脱层位, 盐上发育沿盐岩层内滑脱形成的逆冲断层, 而盐下发育切穿基底的逆冲断层和滑脱于中生界层内的叠瓦状逆冲断层。库车逆冲推覆带具有优越的石油地质条件, 以深部的高成熟天然气为主, 累计探明天然气地质储量  $1.03 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、石油地质储量  $2495 \times 10^4 \text{ t}$  (蔚远江等, 2019)。B-B'剖面原始长度为 44.92 km, 现今长度为 31.58 km, 缩短量为 13.34 km, 缩短率是 29.7% (图 10; 金文正等, 2007)。文中模拟 B-B'剖面采用的约束条件见表 2, 热流数据参考已有研究成果 (王良书等, 1995; 刘绍文等, 2017a), 库车前陆盆地三叠纪以来始终处于较低热流状态 (鲁雪松等, 2014), 热流匀速降低, 热流数据的选择和 A-A'剖面一致。由于该剖面发育有吉迪克组膏盐层, 已不适用于传统的平衡剖面“面积平衡”原则, 文中区分盐上层、盐下层并结合去压实和均衡调整的方法复原剖面 (Rowan, 1993; Bishop et al., 1995;

Buchanan et al., 1996; 金文正等, 2007)。结合低温热年代学以及沉积学, 已有研究认为新生代以来库车逆冲推覆带经历了 4 期隆升, 分别是 54~36 Ma、25~23 Ma、19~13 Ma、9~5 Ma (马前等, 2006; 杜治利等, 2007; Wang et al., 2015; Zhang et al., 2016)。此次模拟结果显示 (图 11), 库车逆冲推覆带温度随埋深的增加而增大, 横向上同一地层的温度具有由北向南逐渐升高的趋势, 其中以侏罗系地层为例, 北段温度介于 50~70 °C, 南段温度介于 210~230 °C, 这与相关学者认为的依奇克里克地温梯度最高, 秋里塔格背斜和南部平缓背斜带较低的结果一致 (魏志彬等, 2001; 王良书等, 2003; 李梅等 2004; 王飞宇等, 2005; 鲁雪松等, 2014)。盐构造的存在能显著地改变地温场分布格局, 造成地温异常 (刘绍文等, 2017b)。模拟结果表明, 中新统吉迪克组膏盐岩使下伏古近系地层温度降低, 温度介于 130~150 °C, 比围岩低约 10~20 °C, 其中秋里塔格构造带膏盐岩最厚, 降温效果最明显。

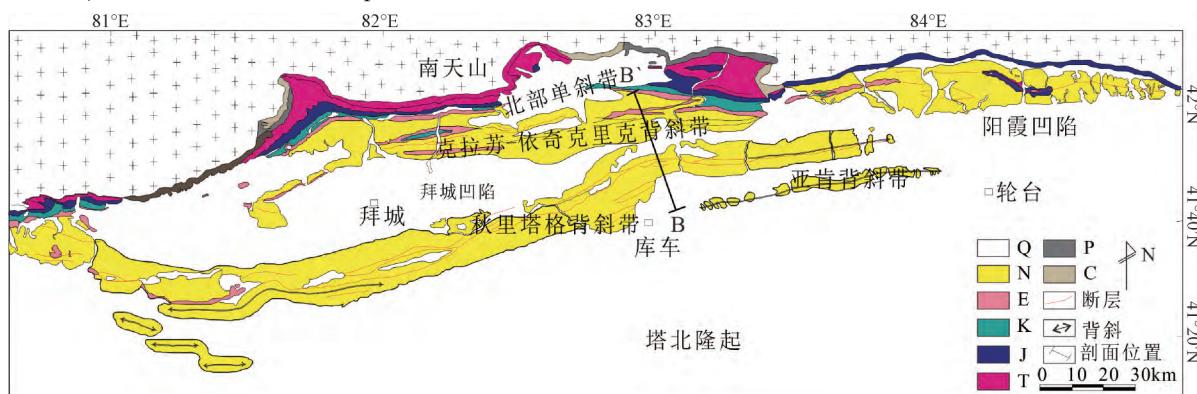


图 9 库车逆冲推覆带构造单元及主要断层和褶皱分布图 (据 Wen et al., 2017 修改)

Fig. 9 Tectonic units of the Kuqa thrust-nappe belt with the major faults and folds (modified after Wen et al., 2017)

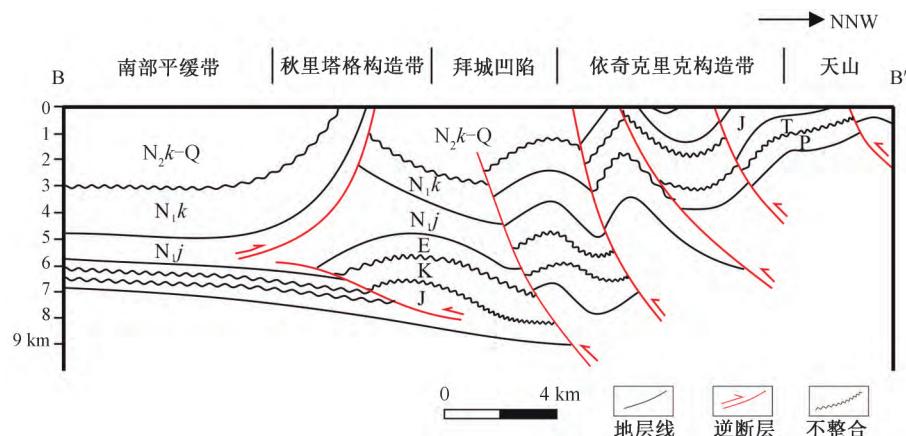


图 10 库车逆冲推覆带 B-B'剖面图 (据金文正等, 2007 修改; 剖面位置见图 9)

Fig. 10 B-B' cross section across the Kuqa thrust-nappe belt (modified after Jin et al., 2007; location is shown in Fig. 9)

表 2 库车逆冲推覆带 B-B'剖面模拟约束参数

Table 2 Constraint parameters of the B-B' section modeling for the Kuqa thrust-nappe belt

沉积模型	热条件	断层性质	岩石圈模型
上新统库车组—第四统 (N <sub>2</sub> k-Q): 砂泥岩			
中新统康村组 (N <sub>1</sub> k): 泥岩			
中新统吉迪克组 (N <sub>1</sub> J): 膏盐岩	现今热流: 44.6 mW/m <sup>2</sup>		上地壳: 20 km
古近统 (E): 砂泥岩			
白垩统 (K): 砂岩	古热流: 55 mW/m <sup>2</sup>	可穿透性	下地壳: 12 km
侏罗统 (J): 煤			
三叠统 (T): 砂岩	地表温度: 14 °C		
二叠统 (P): 砂泥岩			上地幔: 93 km
基底: 上地壳			

注: 沉积模型数据引自金文正等 (2007), 现今热流引自刘绍文等 (2017a), 古热流引自王良书等 (1995), 地表温度取自新疆地区多年平均气温为参考, 岩石圈分层数据引自赵俊猛等 (2008)

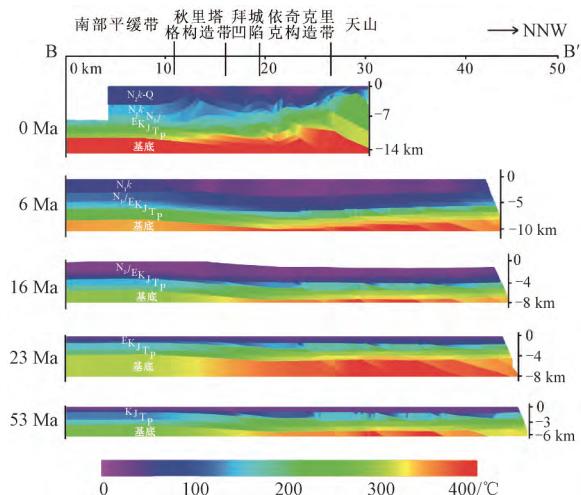


图 11 库车逆冲推覆带 B-B'剖面的温度场演化

Fig. 11 Temperature field evolution of the B-B' section for the Kuqa thrust-nappe belt

## 4 讨论及存在的问题

### 4.1 温度对逆冲推覆带油气成藏的影响

逆冲推覆带广泛发育于被动大陆边缘和内克拉通挤压盆地边缘 (Nemcok et al., 2005), 已成为中国未来油气勘探的重要接替区 (张蔚等, 2019), 如吐哈盆地火焰山逆冲推覆带 (姚宏鑫等, 2013)、羌塘盆地逆冲推覆带 (季长军等, 2019)、库车逆冲推覆带 (魏国齐和贾承造, 1998) 和柯坪逆冲推覆带 (吕修祥等, 2014)。其中库车逆冲推覆带发现了克拉 2、迪那 2、却勒 1 等大型油气田, 以及南部的中秋 1 井特大型凝析气藏 (杜金虎等, 2019; 刘春等, 2019), 柯坪逆冲推覆带东部的新苏地 1 井钻遇了奥陶系—志留系多套的油气显示层 (张远银等, 2019; 高永进等, 2020), 表明了逆冲推覆带具有良好的勘探前景。

目前国际上已有一些学者通过建立二维热动力学模型探讨了逆冲推覆带变形过程中的复杂地温场 (Almendral et al., 2015; Mora et al., 2015; McQuarrie and Ehlers, 2017), 但是国内还缺少相关研究, 文中首次利用 KronosFlow 与 TemisFlow 的盆地模拟结果与实测数据对比, 分析了温度场对逆冲推覆带油气成藏的影响。A-A'剖面模拟结果表明南段奥陶系烃源岩温度为 75~90 °C, 成熟度为 0.6%~0.8%, 与位于柯坪断隆沙井子构造带的新苏地 1 井的实测数据匹配, 奥陶系烃源岩整体处于成熟热演化阶段, 以生油为主 (张远银等, 2019); B-B'剖面模拟结果表明北段白垩系储层在 16 Ma 的温度为 90~100 °C, 6 Ma 的温度为 110~120 °C, 现今温度为 100~125 °C 与克拉 2 井的流体包裹体均一温度数据一致 (于志超等, 2016), 而南段白垩系现今地层温度为 143~150 °C, 与中秋 1 井地层测试资料一致, 该井区以生凝析气藏为主 (刘春等, 2019)。温度的差异造成了烃源岩热演化和储层温度的差异, 从而形成了不同的油气藏类型。库车逆冲推覆带广泛发育中新统吉迪克组膏盐岩, 由于南部的膏盐岩厚度比北部大, 其下伏地层温度较低, 而上覆地层温度较高, 从而造成逆冲推覆带逆冲带和隐伏构造都具有生烃潜力, 从而成为油气勘探有利地区。

逆冲推覆作用不仅能够加速烃源岩的热演化, 还能改善运聚条件, 并形成一系列构造圈闭, 从而影响含油气系统 (何登发和贾承造, 2005; 梁明亮等, 2020)。柯坪和库车逆冲推覆带具有不同的生、储、盖组合和构造特征 (表 3), 其中柯坪逆冲推覆带主要发育断层传播褶皱和叠瓦状逆冲断层, 而库车逆冲推覆带盐下层发育断层转折褶皱, 盐上层发育断层传播褶皱和断滑褶皱。大量

的与逆冲推覆相关的构造圈闭,为油气聚集提供了优异的条件。逆冲推覆作用还对构造形态产生了影响,构造隆起区如柯坪塔格断层和依奇克里克构造带等温度较高,而坳陷区如柯坪塔格背斜、孔乌腊齐背斜和拜城凹陷等温度偏低。这是由于坳陷区浅部沉积物较厚,且岩石热导率较低,而隆起区岩层厚度大,岩石热导率也较大,造成坳

陷区形成低温区,而隆起区形成高温区,从而影响烃源岩的热演化(熊亮萍和高维安,1982)。另外,逆冲断层作为油气运移的通道,多期的断层活动导致广泛的油气运移,柯坪地区丰富的地面油气显示证实了这一点。由于构造活动强烈,因此油气成藏的关键取决于断裂的发育是否能够沟通烃源岩、储层、圈闭,以及对盖层是否有所破坏。

表3 柯坪、库车逆冲推覆带生储盖及构造差异

Table 3 Differences in source rock, reservoir, cap rock and tectonic style between the Kalpin and Kuqa thrust-nappe belts

逆冲推覆带	烃源岩	储层	盖层	构造样式
柯坪逆冲推覆带	寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系	上震旦统、寒武系、下奥陶统、二叠系碳酸盐岩; 志留系、石炭系碎屑岩	中寒武统、上奥陶统、下二叠统	叠瓦状逆冲、断层传播褶皱
库车逆冲推覆带	三叠系、侏罗系	下白垩统、古近系碎屑岩	古近系	盐上: 断层传播褶皱、滑脱褶皱; 盐下: 断层转折褶皱

#### 4.2 存在的问题

通过对柯坪逆冲推覆带和库车逆冲推覆带的二维模拟,验证其新生代以来的温度场的演化过程,基本可以认为KronosFlow与TemisFlow结合的盆地模拟的结果与实测数据匹配度高,弥补了逆冲推覆带等复杂构造区域的盆地模拟的不足,便于学者们进行多角度综合性的盆地分析。然而,在操作过程中也存在以下问题:①该软件对于计算机设备要求较高,电脑系统为Windows 10, RAM为12 GB以上且可用磁盘空间至少为5 GB,才能保证软件成功安装并且操作流畅;②该软件需要在剖面数字化时确定合理的基底形态,以保证断层的正常滑移以及完成构造恢复,因此需要使用者合理表示出基底形态;③该软件具备强大的质量检验功能,在每一步操作结束后均可以对于几何形状、特征一致性、最小区域等方面进行检验,操作者很难做到在没有任何错误提示的情况下完成盆地模拟,这可能会使新手产生困惑而进行无谓的修改。

## 5 结论

逆冲推覆带的逆冲过程、膏盐岩塑性流动等会对温度造成干扰,从而对油气成藏产生重要影响。KronosFlow软件作为一种比较实用的软件,其界面清晰易懂,使用方便快捷,图件准确美观,可与TemisFlow无缝衔接同时生成复杂构造演化、温度场模拟、以及油气系统模拟的多种图件,该软件拟合出的结果也与实际数据匹配度非常高,在实际操作中也很便利,并且弥补了盆地模拟中

对于逆冲推覆带等复杂构造的局限性。实例分析表明:柯坪逆冲推覆带的依木干他乌断层在40~30 Ma再次活动,断层附近志留系—泥盆系的温度大于85 °C,柯坪塔格断层在15~10 Ma活动,断层附近志留系—泥盆系的温度小于70 °C,寒武系(烃源岩成熟度1.3%~1.7%)和奥陶系(烃源岩成熟度0.7%~1.2%)烃源岩热演化程度高,生烃能力强。库车逆冲推覆带侏罗系北段温度介于50~70 °C,南段温度介于210~230 °C,盐构造造成地温异常,其中秋里塔格构造带膏盐岩最厚,降温效果最明显。

致谢:感谢Beicip-Franlab和北京阿什卡技术开发有限公司在剖面模拟时给予的帮助。

#### References

- ALMENDRAL A, ROBLES W, PARRA M, et al., 2015. FetKin: coupling kinematic restorations and temperature to predict thrusting, exhumation histories, and thermochronometric ages [J]. AAPG Bulletin, 99 (8): 1557-1573.
- ANKA Z, CALLIES M, DARNAULT R, et al., 2018. New Tools for New Challenges: Petroleum System Modeling of the Kurdish Foothills [C]. AAPG Annual Convention & Exhibition.
- BISHOP D J, BUCHANAN P G, BISHOP C J, 1995. Gravity-driven thin-skinned extension above Zechstein Group evaporites in the western central North Sea: an application of computer-aided section restoration techniques [J]. Marine and Petroleum Geology, 12 (2): 115-135.
- BUCHANAN P G, BISHOP D J, HOOD D N, 1996. Development of salt-related structures in the central North Sea: Results from section balancing [C] //ALSOP G I, BLUNDELL D J, DAVISON J. Salt tectonics. Geological Society, London, Special Publications, 100 (1): 111-128.

- CHANG J , LI D , MIN K , et al . , 2019. Cenozoic deformation of the Kalpin fold-and-thrust belt , southern Chinese Tian Shan: New insights from low-T thermochronology and sandbox modeling [J]. *Tectonophysics* , 766: 416-432.
- CHANG J , QIU N S , LI J W , 2012. The coupling relationship between the South Tianshan Mountains and the Tarim Basin: New evidence from the ( U-Th) /He ages [J]. *Earth Science Frontiers* , 19 ( 5 ) : 234-243. ( in Chinese with English abstract)
- DU J H , TIAN J , LI G X , et al . , 2019. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa depression [J]. *China Petroleum Exploration* , 24 ( 1 ) : 16-23. ( in Chinese with English abstract)
- DU Z L , WANG Q C , ZHOU X H , 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa-South Tianshan Basin-Mountain System from the evidence of apatite fission track analysis [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 26 ( 5 ) : 399-408. ( in Chinese with English abstract)
- FRERY E , CALLIES M , GIBOREAU R , et al . , 2017. Fault impact on hydrocarbon migration-2D complex modelling of the north Perth basin petroleum systems , Australia [C] //Conference proceedings , 79th EAGE conference and exhibition 2017. Madrid , Spain: European Association of Geoscientists & Engineers.
- GABRIELE M , 2017. Basin and Petroleum System Modeling [J]. *Oilfield Review* , 21 ( 2 ) : 14-23.
- GAO Y J , ZHANG J F , ZHANG Y Y , et al . , 2020. The first discovery of Silurian commercial gas flow in the Well XSD1 in the northwest Tarim Basin , Xinjiang [J/OL]. *Geology in China*. ( 2020-09-15 ) . <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200915.1033.011.html>. ( in Chinese with English abstract)
- HANTSCHEL T , KAUERAUF A I , 2009. Introduction to basin modeling [M] //KAUERAUF A I , HANTSCHEL T. *Fundamentals of basin and petroleum systems modeling*. Berlin , Heidelberg: Springer.
- HE D F , JIA C Z , 2005. Thrust tectonics and hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development* , 32 ( 2 ) : 55-62. ( in Chinese with English abstract)
- HE L J , XU H H , LIU Q Y , 2017. Tectono-thermal modeling of the foreland basins: a case study of the Longmenshan foreland basin [J]. *Earth Science Frontiers* , 24 ( 3 ) : 127-136. ( in Chinese with English abstract)
- HUANG S W , 2014. Hydrocarbon accumulation conditions beneath Cambrian salt layer in Kalpin thrust belt of Tarim Basin [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field* , 21 ( 3 ) : 282-286. ( in Chinese with English abstract)
- JI C J , WU Z H , LIU Z W , et al . , 2019. Structural features of thrust nappes in the Qiangtang basin and hydrocarbon resources effect [J]. *Journal of Geomechanics* , 25 ( S1 ) : 66-71. ( in Chinese with English abstract)
- JIN W Z , TANG L J , WANG Q H , et al . , 2007. Cenozoic tectonic evolution of the eastern Qiulitag structural belt , Kuqa foreland basin in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Geology* , 42 ( 3 ) : 444-454. ( in Chinese with English abstract)
- LI C , WANG Y L , DU H L , et al . , 2001. Evaluation of source rocks in Keping Area , Tarim Basin [J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute* , 13 ( 1 ) : 22-25. ( in Chinese with English abstract)
- LI M , BAO J P , WANG H , et al . , 2004. The analysis on the maturity parameters of source rock and hydrocarbons in Kuche foreland basin of Tarim basin [J]. *Natural Gas Geoscience* , 15 ( 4 ) : 367-378. ( in Chinese with English abstract)
- LI Y J , WU G Y , LEI G L , et al . , 2008. Deformational features , ages and mechanism of the Cenozoic Kuqa foreland fold-and-thrust belt in Xinjiang [J]. *Geological Science* , 43 ( 3 ) : 488-506. ( in Chinese with English abstract)
- LIANG M L , WANG Z X , LI C L , et al . , 2020. Effect of structural deformation on permeability evolution of marine shale reservoirs [J]. *Journal of Geomechanics* , 26 ( 6 ) : 840-851. ( in Chinese with English abstract)
- LIU C , XU Z P , CHEN G , et al . , 2019. Hydrocarbon accumulation conditions and evolution process of the ZQ1 large condensate gas reservoir in the Qiulitage structural belt , Tarim Basin [J]. *Natural Gas Industry* , 39 ( 4 ) : 8-17. ( in Chinese with English abstract)
- LIU K Y , LIU J L , 2017. Current status and future development trends of Basin and Petroleum System Modeling ( BPSM ) [J]. *Petroleum Science Bulletin* , 2 ( 2 ) : 161-175. ( in Chinese with English abstract)
- LIU S W , LI X L , HAO C Y , et al . , 2017a. Heat flow , deep formation temperature and thermal structure of the Tarim Basin , Northwest China [J]. *Earth Science Frontiers* , 24 ( 3 ) : 41-55. ( in Chinese with English abstract)
- LIU S W , YANG X Q , QIU N S , et al . , 2017b. Geothermal effects of salt structures on marine sedimentary basins and implications for hydrocarbon thermal evolution [J]. *Chinese Science Bulletin* , 62 ( 15 ) : 1631-1644. ( in Chinese with English abstract)
- LU X S , SONG Y , ZHAO M J , et al . , 2014. Thermal history modeling of complicated extrusional section and source rock maturation characteristics in Kuqa foreland basin [J]. *Natural Gas Geoscience* , 25 ( 10 ) : 1547-1557. ( in Chinese with English abstract)
- LV X X , YAN J J , 1996. Hydrocarbon prospects of Keping Area on the northwestern margin of Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* , 14 ( 3 ) : 32-39. ( in Chinese with English abstract)
- LV X X , BAI Z K , XIE Y Q , et al . , 2014. Reconsideration on petroleum exploration prospects in the Kalpin thrust belt of northwestern Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* , 32 ( 4 ) : 766-775. ( in Chinese with English abstract)
- MA D M , CHEN J L , ZENG C M , et al . , 2007. Structural deformation characteristics of the Kalpin thrust belt on the northwestern margin of the Tarim Basin [J]. *Journal of Geomechanics* , 13 ( 4 ) : 340-347. ( in Chinese with English abstract)
- MA Q , SHU L S , ZHU W B , 2006. Mesozoic-Cenozoic burial , uplift and exhumation: a profile along the Urumqi-Korla highway in the Tianshan mountains [J]. *Xinjiang Geology* , 24 ( 2 ) : 99-104. ( in Chinese with English abstract)
- MCQUARRIE N , EHLERS T A , 2017. Techniques for understanding fold-and-thrust belt kinematics and thermal evolution [M] //LAW R D , THIGPEN J R , MERSCHAT A J , et al . , *Linkages and*

- feedbacks in orogenic systems. Boulder: Geological Society of America, 213: 1-30.
- MORA A, CASALLAS W, KETCHAM R A, et al., 2015. Kinematic restoration of contractional basement structures using thermokinematic models: a key tool for petroleum system modeling [J]. AAPG Bulletin, 99 (8): 1575-1598.
- NEMCOK M, SCHAMEL S, GAYER R, 2005. Thrustbelts: Structural architecture, thermal regimes and petroleum systems [M]. New York: Cambridge University Press.
- QU G S, LI Y G, CHEN J, et al., 2003. Geometry, kinematics and tectonic evolution of kepingtage thrust system [J]. Earth Science Frontiers, 10 (S1): 142-152. (in Chinese with English abstract)
- ROWAN M G, 1993. A systematic technique for the sequential restoration of salt structures [J]. Tectonophysics, 228 (3-4): 331-348.
- SHI G R, 2009. Review and outlook for the 30th anniversary of basin modeling techniques [J]. Computer Applications of Petroleum (1): 3-6. (in Chinese with English abstract)
- WANG F Y, DU Z L, LI Q, et al., 2005. Organic maturity and hydrocarbon generation history of the Mesozoic oil-prone source rocks in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Geochimica, 34 (2): 136-146. (in Chinese with English abstract)
- WANG L N, JI J Q, SUN D X, et al., 2015. Chronological constraints on multi-staged rapid cooling of the Tianshan Mountains inferred from apatite fission track analysis of modern river sands [J]. Science China Earth Sciences, 58 (8): 1305-1319.
- WANG L S, LI C, SHI Y S, 1995. Distribution of terrestrial heat flow density in Tarim basin, western China [J]. Acta Geophysica Sinica, 38 (6): 855-856. (in Chinese with English abstract)
- WANG L S, LI C, LIU S W, et al., 2003. Geotemperature gradient distribution of Kuqa foreland basin, north of Tarim, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 46 (3): 403-407. (in Chinese with English abstract)
- WANG R, WU X H, XIA X H, et al., 2020. Application of basin simulation technology on the assessment of hydrocarbon resources potential of the Lunpola Basin in Tibet [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 84-95. (in Chinese with English abstract)
- WEI G Q, JIA C Z, 1998. Structural characteristics and oil & gas of thrust belts in Tarim basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 19 (1): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- WEI Y J, YANG T, GUO B C, et al., 2019. Oil and gas resources potentials, exploration fields and favorable zones in foreland thrust belts [J]. China Petroleum Exploration, 24 (1): 46-59. (in Chinese with English abstract)
- WEI Z B, ZHANG D J, XU H X, et al., 2001. Application of EASY%  $R_0$  model to the studies of thermal history for Mesozoic basins, western China [J]. Petroleum Exploration & Development, 28 (2): 43-46. (in Chinese with English abstract)
- WEN L, LI Y J, ZHANG G Y, et al., 2017. Evolution of fold-thrust belts and Cenozoic uplifting of the South Tianshan Mountain range in the Kuqa region, Northwest China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 135: 327-337.
- XIONG L P, GAO W A, 1982. Characteristics of geotherm in uplift and depression [J]. Acta Geophysica Sinica, 25 (5): 448-456. (in Chinese with English abstract)
- YANG G, 2003. The analyses on NW-striking paleoulift and the hydrocarbon potential, northwest Tarim [J]. Xinjiang Geology, 21 (2): 157-162. (in Chinese with English abstract)
- YAO H X, LI W S, WANG G H, 2013. Oil and gas characteristics of thrusting-nappe structure belt in Huoyanshan, Xinjiang [J]. Journal of Geomechanics, 19 (2): 206-213. (in Chinese with English abstract)
- YU Z C, LIU K Y, ZHAO M J, et al., 2016. Characterization of Diagenesis and the Petroleum Charge in Kela 2 Gas Field, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Earth Science, 41 (3): 533-545. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q C, SHI G R, TIAN Z Y, 2001. Present developing situation and future prospects of basin simulation technology [J]. Petroleum Geology & Experiment, 23 (3): 312-317. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG W, LIU C L, WU X Z, et al., 2019. Statistical characteristics and prediction models for oil and gas resources abundance in different types of Chinese basins [J]. Geology and Exploration, 55 (6): 1518-1527.
- ZHANG Y Y, GAO Y J, BAI Z K, et al., 2019. New hydrocarbon discoveries via drilling in the eastern Keping uplift, Tarim Basin [J/OL]. Geology in China. (2019-12-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191230.1806.011.html>. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z Y, ZHU W B, ZHENG D W, et al., 2016. Apatite fission track thermochronology in the Kuluketage and Aksu areas, NW China: Implication for tectonic evolution of the northern Tarim [J]. Geoscience Frontiers, 7 (2): 171-180.
- ZHAO J M, CHENG H G, PEI S P, et al., 2008. Deep structure at northern margin of Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (10): 1544-1554.

## 附中文参考文献

- 常健,邱楠生,李佳蔚,2012. 塔里木盆地与南天山的耦合关系:来自(U-Th)/He年龄的新证据 [J]. 地学前缘, 19 (5): 234-243.
- 杜金虎,田军,李国欣,等,2019. 库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望 [J]. 中国石油勘探, 24 (1): 16-23.
- 杜治利,王清晨,周学慧,2007. 中新生代库车-南天山盆山系统隆升历史的裂变径迹证据 [J]. 岩石矿物学杂志, 26 (5): 399-408.
- 高永进,张君峰,张远银,等,2020. 塔里木盆地西北部新苏地1井首获志留系工业气流 [J/OL]. 中国地质. (2020-09-15). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20200915.1033.011.html>.
- 何登发,贾承造,2005. 冲断构造与油气聚集 [J]. 石油勘探与开发, 32 (2): 55-62.
- 何丽娟,许鹤华,刘琼颖,2017. 前陆盆地构造-热演化:以龙门山前陆盆地为例 [J]. 地学前缘, 24 (3): 127-136.
- 黄苏卫,2014. 塔里木盆地西北缘柯坪冲断带寒武系盐下成藏条件

- [J]. 断块油气田, 21 (3): 282-286.
- 季长军, 吴珍汉, 刘志伟, 等, 2019. 羌塘盆地逆冲推覆构造特征及油气资源效应 [J]. 地质力学学报, 25 (S1): 66-71.
- 金文正, 汤良杰, 王清华, 等, 2007. 新疆库车盆地东天山褶皱带新生代的构造演化 [J]. 地质科学, 42 (3): 444-454.
- 李椿, 王艳丽, 杜鸿烈, 等, 2001. 塔里木盆地柯坪地区烃源岩评价 [J]. 新疆石油天然气, 13 (1): 22-25.
- 李梅, 包建平, 汪海, 等, 2004. 库车前陆盆地烃源岩和烃类成熟度及其地质意义 [J]. 天然气地球科学, 15 (4): 367-378.
- 李曰俊, 吴根耀, 雷刚林, 等, 2008. 新疆库车新生代前陆褶皱带的变形特征、时代和机制 [J]. 地质科学, 43 (3): 488-506.
- 梁明亮, 王宗秀, 李春麟, 等, 2020. 构造变形对海相页岩储层渗透率演化的影响 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 840-851.
- 刘春, 徐振平, 陈戈, 等, 2019. 塔里木盆地中秋1凝析气藏成藏条件及演化过程 [J]. 天然气工业, 39 (4): 8-17.
- 刘可禹, 刘建良, 2017. 盆地和含油气系统模拟 (BPSM) 研究现状及发展趋势 [J]. 石油科学通报, 2 (2): 161-175.
- 刘绍文, 李香兰, 郝春艳, 等, 2017a. 塔里木盆地的热流、深部温度和热结构 [J]. 地学前缘, 24 (3): 41-55.
- 刘绍文, 杨小秋, 邱楠生, 等, 2017b. 沉积盆地盐构造热效应及其油气地质意义 [J]. 科学通报, 62 (15): 1631-1644.
- 鲁雪松, 宋岩, 赵孟军, 等, 2014. 库车前陆盆地复杂挤压剖面热演化历史模拟及烃源岩成熟度演化特征 [J]. 天然气地球科学, 25 (10): 1547-1557.
- 吕修祥, 严俊君, 1996. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气前景 [J]. 沉积学报, 14 (3): 32-39.
- 吕修祥, 白忠凯, 谢玉权, 等, 2014. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气勘探前景再认识 [J]. 沉积学报, 32 (4): 766-775.
- 马德明, 陈江力, 曾昌民, 等, 2007. 塔里木盆地西北缘柯坪冲断带的构造变形特征 [J]. 地质力学学报, 13 (4): 340-347.
- 马前, 舒良树, 朱文斌, 2006. 天山乌-库公路剖面中、新生代埋藏、隆升及剥露史研究 [J]. 新疆地质, 24 (2): 99-104.
- 曲国胜, 李亦纲, 陈杰, 等, 2003. 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, 10 (S1): 142-152.
- 石广仁, 2009. 盆地模拟技术 30 年回顾与展望 [J]. 石油工业计算  
机应用 (1): 3-6.
- 汪锐, 伍新和, 夏响华等, 2020. 应用盆地模拟技术评价西藏伦坡拉盆地油气资源潜力 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 84-95.
- 王飞宇, 杜治利, 李谦, 等, 2005. 塔里木盆地库车坳陷中生界油源岩有机成熟度和生烃历史 [J]. 地球化学, 34 (2): 136-146.
- 王良书, 李成, 施央申, 1995. 塔里木盆地大地热流密度分布特征 [J]. 地球物理学报, 38 (6): 855-856.
- 王良书, 李成, 刘绍文, 等, 2003. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征 [J]. 地球物理学报, 46 (3): 403-407.
- 蔚远江, 杨涛, 郭彬程, 等, 2019. 前陆冲断带油气资源潜力、勘探领域分析与有利区带优选 [J]. 中国石油勘探, 24 (1): 46-59.
- 魏国齐, 贾承造, 1998. 塔里木盆地逆冲带构造特征与油气 [J]. 石油学报, 19 (1): 11-17.
- 魏志彬, 张大江, 许怀先, 等, 2001. EASY%  $R_o$  模型在我国西部中生代盆地热史研究中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 28 (2): 43-46.
- 熊亮萍, 高维安, 1982. 隆起与拗陷地区地温场的特点 [J]. 地球物理学报, 25 (5): 448-456.
- 杨庚, 2003. 塔里木西北缘北西向古隆起的存在及油气勘探前景 [J]. 新疆地质, 21 (2): 157-162.
- 姚宏鑫, 李文圣, 王根厚, 2013. 新疆火焰山逆冲推覆构造油特征 [J]. 地质力学学报, 19 (2): 206-213.
- 于志超, 刘可禹, 赵孟军, 等, 2016. 库车凹陷克拉2气田储层成岩作用和油气充注特征 [J]. 地球科学, 41 (3): 533-545.
- 张庆春, 石广仁, 田在艺, 2001. 盆地模拟技术的发展现状与未来展望 [J]. 石油实验地质, 23 (3): 312-317.
- 张蔚, 刘成林, 吴晓智, 等, 2019. 中国不同类型盆地油气资源丰度统计特征及预测模型 [J]. 地质与勘探, 55 (6): 1518-1527.
- 张远银, 高永进, 白忠凯, 等, 2019. 塔里木盆地柯坪断隆东段钻获奥陶-志留系油气显示 [J/OL]. 中国地质. (2019-12-31). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20191230.1806.011.html>.
- 赵俊猛, 程宏岗, 裴顺平, 等, 2008. 塔里木盆地北缘的深部结构 [J]. 科学通报, 53 (8): 946-955.

#### 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

