

doi: 10.12029/gc20201104003

赵禹杭, 朱传庆, 张宝收, 徐同, 陈天戈. 2024. 塔里木盆地石炭纪—二叠纪岩浆活动对烃源岩热演化的影响[J]. 中国地质, 51(6): 1991–2001.  
Zhao Yuhang, Zhu Chuanqing, Zhang Baoshou, Xu Tong, Chen Tiange. 2024. Influence of Carboniferous–Permian magmatic activities on thermal evolution of hydrocarbon source rocks in Tarim Basin[J]. Geology in China, 51(6): 1991–2001(in Chinese with English abstract).

## 塔里木盆地石炭纪—二叠纪岩浆活动 对烃源岩热演化的影响

赵禹杭<sup>1,2</sup>, 朱传庆<sup>1,2</sup>, 张宝收<sup>3</sup>, 徐同<sup>1,2</sup>, 陈天戈<sup>1,2</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. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

**摘要:**【研究目的】地层温度史决定了烃源岩有机质成熟度演化和生排烃过程。除盆地热流史演化和沉积埋藏过程之外, 岩浆活动等异常热事件对地层温度史的影响不容忽视, 对其研究有利于了解有机质的成熟过程。【研究方法】本文基于塔里木油田勘探开发相关成果, 通过数值模拟方式计算了侵入体时空影响范围和强度, 结合钻井模拟, 讨论了岩浆侵入作用对地层温度和烃源岩热演化的影响。【研究结果】塔里木盆地台盆区中西部地区多口钻井中石炭纪—二叠系实测镜质体反射率值出现与火成岩相关的异常高值, 为晚石炭世—二叠纪时期岩浆活动的记录。单井热史模拟结果显示了岩浆活动对盆地古生界烃源岩层的烘烤加热作用, 有机质成熟度热演化过程促进, 快速进入高一过成熟阶段。【结论】岩浆异常热事件有利于增大烃源岩生烃强度, 使其相对产烃率达到最高, 有机质得以快速成熟。

**关键词:** 镜质体反射率; 烃源岩热演化; 热事件; 岩浆活动; 塔里木盆地; 油气勘查工程

**创新点:** 通过数值模拟及单井热史模拟方法对岩浆侵入的时空影响进行推演。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)06-1991-11

## Influence of Carboniferous–Permian magmatic activities on thermal evolution of hydrocarbon source rocks in Tarim Basin

ZHAO Yuhang<sup>1,2</sup>, ZHU Chuanqing<sup>1,2</sup>, ZHANG Baoshou<sup>3</sup>, XU Tong<sup>1,2</sup>, CHEN Tiange<sup>1,2</sup>

(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. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, Xinjiang, China)

**Abstract:** This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

**[Objective]** The formation temperature history is a pivotal determinant in the maturity evolution of organic matter and the hydrocarbon generation and expulsion process within hydrocarbon source rocks. This history is shaped not only by the evolution of basin heat flow and the sedimentary and burial processes but also significantly influenced by anomalous heat events, such as magmatic activity, which must be considered. Investigating these factors is crucial for a comprehensive understanding of the organic

收稿日期: 2020-11-04; 改回日期: 2021-03-05

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX05008-004)资助。

作者简介: 赵禹杭, 男, 1995 年生, 硕士, 地质工程专业; E-mail: 347155143@qq.com。

通讯作者: 朱传庆, 男, 1981 年生, 博士, 教授, 主要从事地热地质学工作; E-mail: zhucq@cup.edu.cn。

matter maturation process. **[Methods]** This study leverages the exploration and development insights from the Tarim Oilfield to examine the impact of magmatic intrusions on formation temperature and the thermal evolution of hydrocarbon source rocks. We employ numerical simulation and drilling data to discuss these influences and calculate the spatial and temporal extent and intensity of the intrusions. **[Results]** Based on measured vitrinite reflectance data ( $R_o$ ) from several wells in the Carboniferous–Permian strata of the central and western Tarim Basin, reveal abnormally high values associated with igneous rocks. These high values are indicative of magmatic activity during the late Carboniferous–Permian period. Thermal history modeling of the wells indicates that magmatic activity heated the Paleozoic hydrocarbon source rocks, accelerating the thermal evolution and maturity of the organic matter, leading to a swift transition into the high-over-maturation stage. **[Conclusions]** Anomalous magmatic thermal events play a beneficial role in enhancing the hydrocarbon generation intensity of hydrocarbon source rocks, achieving the highest relative hydrocarbon production rates, and facilitating the rapid maturation of organic matter.

**Key words:** vitrinite reflectance; thermal evolution of hydrocarbon source rocks; thermal events; magmatic activities; Tarim Basin; oil and gas exploration engineering

**Highlights:** The spatial and temporal impact of magmatic intrusion is deduced through numerical simulation and single-well thermal history modeling methods.

**About the first author:** ZHAO Yuhang, male, born in 1995, master, majors in geological engineering; E-mail: 347155143@qq.com.

**About the corresponding author:** ZHU Chuanqing, male, born in 1981, doctor, professor, engaged in geothermic geology; E-mail: zhucq@cup.edu.cn.

**Fund support:** Supported by National Science and Technology Major Special Projects (No.2017ZX05008–004).

## 1 引 言

沉积盆地热状态受控于表层的沉积埋藏、抬升剥蚀、岩石热导率以及深层的盆地基底岩石圈拉伸减薄、挤压变形、岩浆上涌等多种地质事件(王良书等, 2005; 邱楠生等, 2015; 李佳蔚等, 2016; Zhu et al., 2018)。沉积盆地热历史的研究对盆地内部油气的生成、运移、聚集、保存以及盆地的成因演化机制有重要意义(刘绍文等, 2006; 金之钧等, 2006; 冯昌格等, 2010; Barry et al., 2019)。目前在国际上进行盆地热历史恢复的方法主要分为两种:一是利用地质温度计或各种热年代学古温标从盆地的尺度上来恢复热史(邱楠生等, 2005; 胡圣标等, 2008; 常健和邱楠生, 2017);二是通过盆地动力学模型以岩石圈的尺度进行热史恢复(何丽娟等, 2017)。塔里木盆地自前震旦纪形成之后,盆地由一个伸长状态的克拉通拗拉槽状态向稳定沉积盆地转变,盆地逐渐冷却,大地热流与地温梯度持续降低,晚古生代时期由于岩浆上涌导致岩石圈减薄,发生大范围火山作用,盆地热流异常升高,沉积了超过 20 万  $\text{km}^2$  玄武岩等火山岩类(李成等, 2000; 刘绍文等, 2006; Li et al., 2012; Chang et al., 2016)。本文通过对塔里

木盆地  $R_o$  与钻井数据对岩浆活动的记录分析,从单井热史反演、侵入体数值模拟等角度对盆地二叠纪热历史进行恢复,探讨二叠纪异常热事件及其对盆地烃源岩成熟演化的影响。

## 2 地质背景

塔里木盆地是一个被天山、喀喇昆仑山、阿尔金山所包围的典型长期演化多期复合叠合盆地(图 1)(何登发等, 2005; 郑孟林等, 2014),面积约  $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地沉积过程中有明显的阶段性特点,在震旦纪—中泥盆世、石炭纪—三叠纪、侏罗纪—新近纪经历了 3 次伸展—聚敛旋回,在多次拉伸、挤压的过程中,最初的盆地经历了隆升剥蚀、海侵海退、褶皱断裂等改造作用,内部形成多个隆起、拗陷的雏形,直到喜马拉雅期周缘造山带隆升,盆地整体下沉,形成了现今内部三隆五坳,周缘 4 个断隆的塔里木盆地(贾承造等, 2007; 季天愚等, 2022)。

前寒武纪—奥陶纪剧烈构造活动之后,盆地处于一个较为稳定的构造背景,晚古生代是塔里木盆地演化过程中的关键时期,晚泥盆世—石炭纪,由于盆地北侧南天山洋盆向北俯冲,南侧古特提斯洋

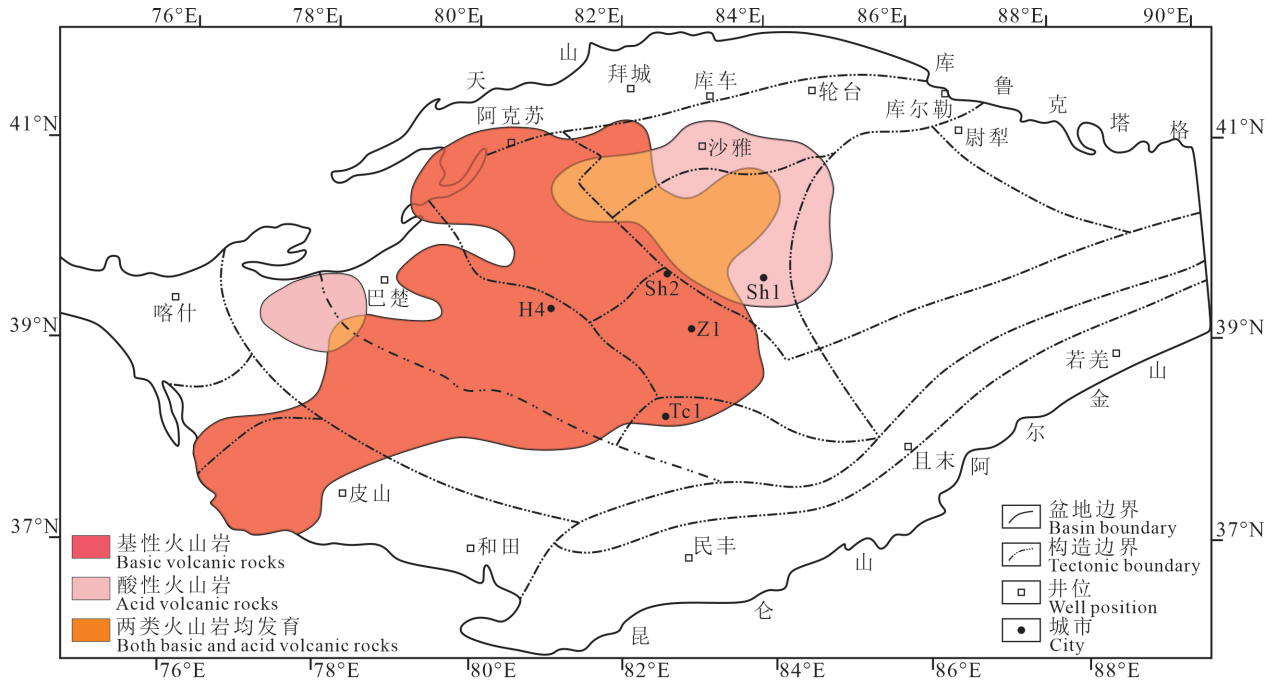


图 1 塔里木盆地火成岩残余分布(据杨树锋等, 2014 修改)

Fig.1 Residual igneous rocks distribution in Tarim Basin (modified from Yang Shufeng et al., 2014)

形成, 发生了 4 次较大范围的海侵, 海侵范围逐步向东扩展, 在盆地内部沉积了多个砂泥岩、碎屑岩与碳酸盐岩互层层段(朱如凯等, 2002)。早二叠世晚期, 塔里木板块主体部分隆升, 海水退却, 由海相沉积转为陆相沉积阶段, 同时伴随有强烈岩浆喷发溢流作用, 在盆地内部发育了以玄武岩、辉绿岩、玄武安山岩等为主的基性火成岩, 也有凝灰岩、流纹岩、火山碎屑岩等岩类发育, 主要集中在二叠系开派雷兹克组和库普库兹曼组(潘赞等, 2013; 肖重阳等, 2020)。通过航磁、地震、测井等资料显示塔北隆起—满加尔坳陷北坡等盆地北部地区以花岗岩、英安岩等中酸性侵入岩为主, 巴楚隆起—塔中地区玄武岩较为发育, 并有同时期的侵入岩发育(闫磊等, 2014)。前人通过岩石地球化学方法以及 U-Pb 定年分析得出, 塔里木大火成岩省的岩浆活动时间在 300~275 Ma, 持续大约 20 Ma 的时间, 其中大范围玄武岩喷出主要集中在 292~285 Ma, 塔北地区 277 Ma 左右形成的 A 型花岗岩标志着塔里木盆地最后一期剧烈岩浆热事件的结束(房子龙等, 2008; 陈咪咪等, 2010; Wei et al., 2014)。有学者认为二叠纪岩浆热事件影响范围极广, 在塔里木盆地、阿尔泰造山带、准噶尔盆地等地均有同期喷出

相火山岩或侵入岩分布(夏林圻等, 2006; Qin et al., 2011)。

### 3 数据分析

镜质体反射率作为有机质成熟度的直接指标, 被广泛使用在古地温研究中。Burnham and Sweeney (1989)、Sweeney and Burnham (1990) 根据化学反应活化能分布的阿伦尼乌斯一级平行反应方程建立了  $R_o$  与热成熟度相关的 VITRIMAT 模型, 之后将其改进优化为 Easy% $R_o$  模型并被广泛应用。

$$R_o = \exp(3.7F - 1.6) \quad (1)$$

$$F = 1 - \sum_i f_i \frac{C_i}{C_{0i}} = 1 - \sum_{i=1}^n f_i \exp\left(-\int_0^t A \exp\left[-\frac{E_i}{RT(t)}\right] dt\right) \quad (2)$$

式中,  $F$  为总反应程度;  $C_i$  为尚未反应的镜质体中各反应物浓度;  $A$  为频率因子, 取  $1 \times 10^3/s$ ;  $E$  为反应活化能;  $R$  为气体常数, 取  $8.314 J/(mol \cdot K)$ ;  $T(t)$  为古地温。

式(1)可以明显看出,  $R_o$  的对数与有机物总反

应程度  $F$  呈明显的正相关, 因此其也与温度存在线性关系。由式(2)可知,  $R_o$  主要与有机质增温与受热时间相关, 其中温度的变化起着主要作用 (Burnham and Sweeney, 1989; Sweeney and Burnham, 1990)。盆地中岩石热物性确定时, 盆地内有机质成熟度主要受到古地温与埋藏深度的影响, 当盆地处于稳定沉降的过程时,  $R_o$  随埋深增加而随之增大; 当地质历史时期中有剧烈的构造运动使岩石圈破碎导致岩浆上涌或大规模火山喷发等异常高温热事件发生时, 温度异常升高引起  $R_o$  异常增大, 造成  $R_o$  演化曲线的不连续, 地层中样品的最高镜质体反射率即可反映出盆地的最高古地温 (邱楠生等, 2005; 任战利等, 2014)。

本文统计了塔里木盆地多口钻井实测  $R_o$  数据分析 (表 1), 在不同井位的石炭系—二叠系中  $R_o$  均

出现了偏离正常演化趋势的  $R_o$  异常高值 (图 2), 结合其与火成岩发育的关系, 推断为石炭纪—二叠纪岩浆活动的热古温标记录。

火成岩段测井响应特征主要是岩石的地球化学特性、物理性质、成分结构等的综合反映, 不同的火成岩类型响应特征也各不相同, 因此可以通过测井手段纵向连续地对地层进行探测识别 (陈立英等, 2005)。如顺 2 井 (图 2c) 中, 石炭系—二叠系  $R_o$  出现异常值, 推测其受到火山喷发作用影响, 结合测井资料 (图 3), 可对该井区内火成岩发育形态及分布情况得到进一步认识。

塔里木盆地地区二叠系玄武岩、辉绿岩等基性火成岩主要由斜长石、辉石等矿物组成, 放射性元素含量低, 因此自然伽马极低, 密度较大, 电阻率较高; 顺北地区主要发育以英安岩为主的酸性火成

表 1 塔里木盆地典型研究钻井  $R_o$  值

Table 1  $R_o$  values of research wells in Tarim Basin

井号	深度/m	层位	$R_o$ %	岩性	井号	深度/m	层位	$R_o$ %	岩性
Sh1	3177	$T_1k$	0.68	泥岩	TC1	3283	P	0.62	泥岩
Sh1	3198	$T_1k$	0.7	泥岩	TC1	3556	P	0.63	泥岩
Sh1	3239	$T_1k$	0.78	泥岩	TC1	4049	P	1.03	泥岩
Sh1	3252	$T_1k$	0.8	泥岩	TC1	4135	C	1.05	泥岩
Sh1	3613	$P_1kk$	1.7	英安质凝灰熔岩	TC1	4242	C	0.97	泥岩
Sh1	3992	$C_{2x}$	0.99	灰泥岩	TC1	4339	C	0.83	泥岩
Sh1	4124	$C_1kl$	0.97	细砂岩	TC1	4356	C	0.83	泥岩
Sh1	4223	$C_1kl$	1.07	细砂岩	TC1	4442	C	0.89	泥岩
Sh1	4836	$D_3k$	1.32	泥质粉砂岩	Z1	2658	T	0.6	泥岩
H4	954	P	0.41	泥岩	Z1	2764	T	0.66	泥岩
H4	1058	P	0.48	泥岩	Z1	2808	T	0.62	泥岩
H4	1061	P	0.51	泥岩	Z1	3784	P	1	泥岩
H4	1070	P	0.52	泥岩	Z1	3880	P	0.93	泥岩
H4	1240	C	0.96	泥岩	Z1	4035	$C_1kl$	1.03	泥岩
H4	1243	C	0.96	泥岩	Z1	4066	$C_1kl$	1.04	黑色泥岩
H4	1244	C	0.98	粉砂质泥岩	Z1	4093	$C_1kl$	1.06	黑色碳质泥岩
H4	1260	C	1	泥岩	Z1	4142	$C_1kl$	1.09	灰色泥岩
H4	1264	C	0.97	泥质粉砂岩	Z1	4210	$C_1b$	1.09	粉砂质泥岩
H4	1285	C	0.76	泥岩	Z1	4270	$C_1b$	1.06	泥岩
H4	1312	C	0.74	泥岩	Sh2	3180	T	0.55	泥岩
H4	1340	C	0.75	泥岩	Sh2	3620	T	0.62	泥岩
H4	1542	C	0.8	泥质粉砂岩	Sh2	4326	P	0.81	泥岩
H4	1544	C	0.8	泥质粉砂岩	Sh2	4446	P	0.83	泥岩
H4	1570	C	0.81	泥岩	Sh2	4520	$C_{2x}$	0.97	泥岩
H4	1653	C	0.8	灰质泥岩	Sh2	4700	$C_{1-2kl}$	1.04	泥灰岩
H4	1815	D	0.83	粉砂质泥岩	Sh2	5240	$D_{1-2}$	1.01	泥岩
H4	1818	D	0.83	粉砂质泥岩	Sh2	5698	$S_1t$	1.07	含粉砂泥岩
H4	1820	D	0.84	粉砂质泥岩	Sh2	5722	$S_1t$	1.14	泥岩
TC1	2680	T	0.56	泥岩	Sh2	5806	$S_1t$	1.15	浅绿色泥岩
TC1	2844	T	0.57	泥岩	Sh2	5951	$S_1t$	1.19	深灰色泥岩
TC1	3128	P	0.61	泥岩	Sh2	6051	$S_1t$	1.23	深灰色泥岩

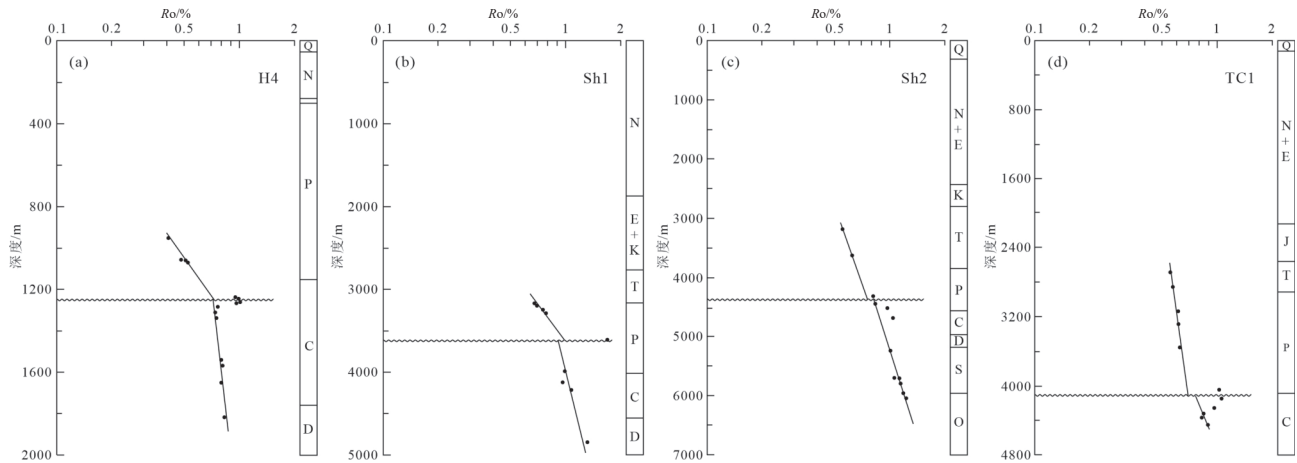


图 2 塔里木盆地典型井 Ro-深度剖面  
Fig.2 Ro-depth profile of typical wells in Tarim Basin

岩, 自然伽马测井显示高值; 火山凝灰岩多形成于玄武岩喷发后, 常上覆于玄武岩层之上, 电阻率略低; 盆地内致密火成岩微孔隙中往往被绿泥石等矿物充填, 自然电位表现为高于泥岩基线的正异常(杨树锋等, 2014; 肖重阳等, 2020)。

顺托果勒隆起顺 2 井测井曲线可以看出, 二叠系开派雷兹克组 4110~4121 m 处为灰黑色凝灰岩, 电阻率曲线较为平直, 值较低但仍大于砂泥岩段, 自然伽马曲线呈锯齿状, 声波时差曲线呈箱状。其下部有 48 m 厚的玄武岩与凝灰岩互层沉积, 自然伽马曲线与自然电位曲线形成箱型区域, 砂泥岩段再次重合, 依据这一明显特征识别为火成岩段, 与下伏砂泥岩地层进行区分。下部 4190 m 起为泥质粉砂岩与凝灰质泥岩互层, 存在少量玄武岩薄夹层。据此推断, 顺 2 井石炭系—二叠系沉积有厚层喷出状火成岩, 证实了该时期岩浆运动较为活跃。

#### 4 火成岩热效应模拟

深部的岩浆向上运移的过程中, 主要以两种方式对沉积层造成影响, 一是侵入周围岩石, 在地下冷凝、结晶、固结成岩形成侵入体, 二是喷出地表后经溢流逐渐冷却形成喷出岩。石炭纪时期仍为海相沉积, 直到中二叠世基底抬升开始向陆相转换, 因此在热事件发生时期, 盆地内大部分区域仍被海水所覆盖, 岩浆喷发后迅速冷却固结成岩, 热量散失极为迅速, 对地表沉积层加热作用并不明显。因此此次研究主要针对侵入岩的热作用进行研究, 通过建立侵入岩的模型, 模拟岩浆作用产生的异常高

温对周围地层影响的时空尺度(图 4)。在地层中, 侵入岩的热量散发过程主要是以热传导的方式完成的, 假设增温的过程是瞬间完成的, 那么其散热过程可用方程描述为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为介质密度;  $c$  为介质比热;  $T$  为温度;  $t$  为时间;  $k$  为与固体导热性相关常数或函数。

塔里木盆地中岩浆侵入体有岩墙、岩株等多种形式, 十分复杂, 为便于模拟计算, 本文将其设置为常见的岩株形态, 假设一长 400 m、宽 40 m 的岩株型侵入体横向侵入进砂岩地层中, 岩浆作用发生时期的古大地热流设为  $50 \text{ mW/m}^2$ , 古地温梯度设为  $20 \text{ }^\circ\text{C/km}$ , 岩浆侵入地层的初始温度设为 1273 K。经模拟可知(图 5), 岩浆加热影响时间范围最大在 12 ka 左右, 之后地层温度趋于稳态, 侵入体温度降低到地层温度, 加热效应基本消失。从空间范围来说, 距离侵入体中心向上 100 m 的位置在岩浆加热作用下, 温度上升了 160 K; 距离其 300 m 位置仅上升 10 K 左右, 可视为几乎不受影响, 在 12 ka 之后温度差仅受地温梯度控制, 温度与侵入体距离呈反比关系。自侵入体向下区域在侵入初期岩浆烘烤作用占据主导地位, 温度趋势与上部地层大致相同, 但在恢复稳态之后, 越深的区域被大地热流影响越强烈, 在地温梯度和大地热流两者共同作用下, 向下方温度升高。

塔里木盆地自形成后至今大体上是一个冷却的过程, 受到一个持续的拉张作用, 在寒武纪时期

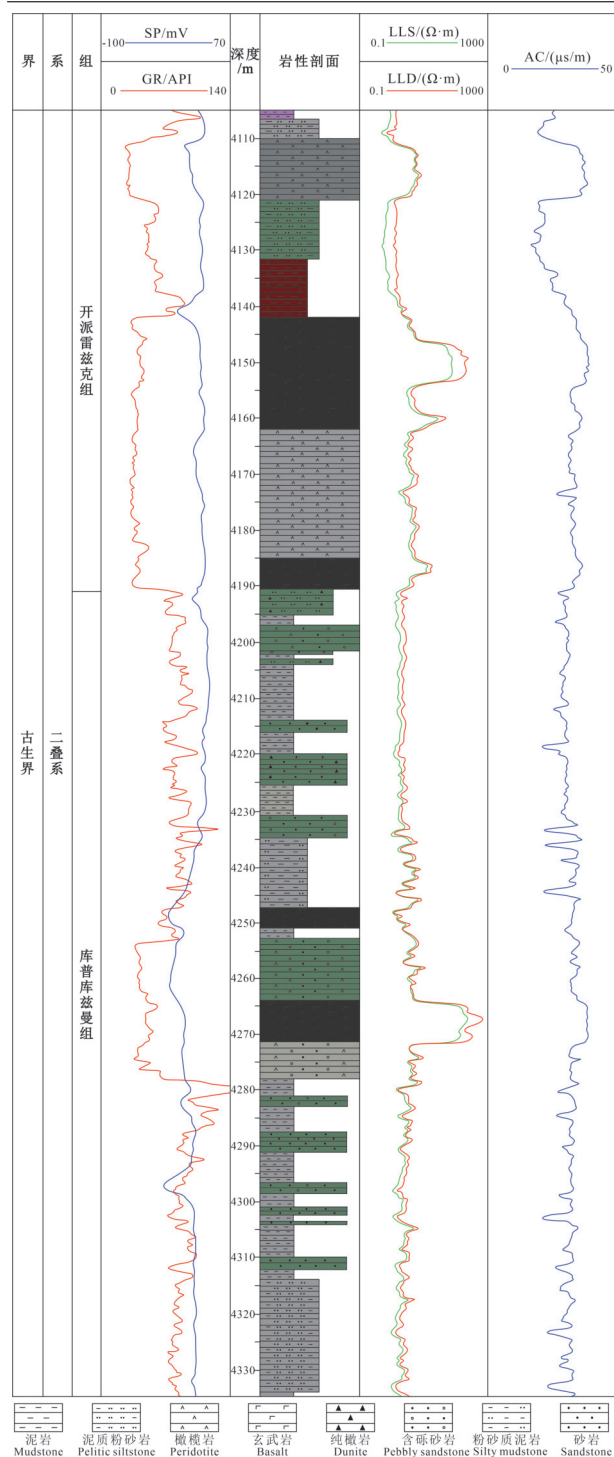


图3 塔里木盆地顺2井二叠系部分层段测井剖面  
Fig.3 Logging section of Permian in Well Sh2, Tarim Basin

由于拉张速率进一步增大,盆地热流小幅度上升,地温梯度增高,随后构造运动减弱,盆地继续冷却至早石炭世末期,由于石炭纪—二叠纪火成岩活动,大地热流迅速上升到  $60 \text{ mW/m}^2$  以上,随后盆地

冷却降温,直到现今大地热流降低到  $40 \text{ mW/m}^2$  (何登发等, 2005; 李慧莉等, 2005)。本文经重建地层埋藏史后,以盆地热流、地表温度等边界条件为限制重建热流模型,以 Easy%Ro 模型 (Sweeney and Burnham, 1990) 拟合实测镜质体反射率,基于模拟结果,结合岩浆侵入方式及其温度变化情况,建立了火成岩侵入温度与烃源岩热演化模式(图6,图7)。

由图6和图7可知,石炭纪—二叠纪盆地岩浆活动对地层温度具有明显的提升促进作用,导致了石炭系中烃源岩快速成熟, Ro 值增大。二叠纪中后期构造活动趋于稳定,大地热流迅速下降,中生代以来盆地进入稳定沉降阶段,热流持续缓慢降低。模拟的镜质体反射率在二叠纪出现不连续演化异常值,与实测数据拟合良好。但其与同期形成的四川地幔柱大火成岩省大面积岩浆房对沉积层形成烘烤作用不同的是,本文选取的井位仅在石炭纪—二叠纪沉积层中有部分 Ro 异常高值,因此推测主要影响因素为岩浆脉由裂缝、错断等构造通道斜向或侧向侵入,且由于岩浆热效应影响具有时空差异性,钻井 Ro 剖面对热效应的记录并不能精确反映侵入体的形态和距离。在二叠纪时期由于异常侵入,使石炭系—二叠系短暂地升温到  $140^\circ\text{C}$  以上,有机质热解过程被进一步促进,成熟度迅速上升到 1.3% 左右,并且在之后的地质年代中再未经历更高的温度,因而石炭系烃源岩仍保持了最高成熟度,将二叠纪火山喷发、侵入事件记录下来。

塔里木盆地台盆区烃源岩以中—下奥陶统和石炭系为主力层系,对其进行生烃强度模拟计算,图8a为假设未发生过异常热事件情况下石炭系烃源岩层生烃强度演化过程,相对产烃率与地层埋藏史之间的关系较为显著,稳定沉降期间相对产烃率逐步上升,抬升剥蚀地层温度降低,生烃反应中止,新生代末期沉降活动较为剧烈,埋深增加较大,超过之前沉积期地层温度,开始第二次生烃。图8b为有异常热流影响的真实情况下石炭系烃源岩沉积后有机质演化程度。自 300 Ma 开始被火山喷发以及大地热流的上升所影响,温度升高,有机质生烃被进一步促进,相对产烃率增到峰值,成熟度迅速增大,后续即使地层埋深增大较快,但由于地层温度未超出地质历史时期最高温度,因反应的不可逆性,烃源岩在早期即达到最高成熟度,晚期不再变化。

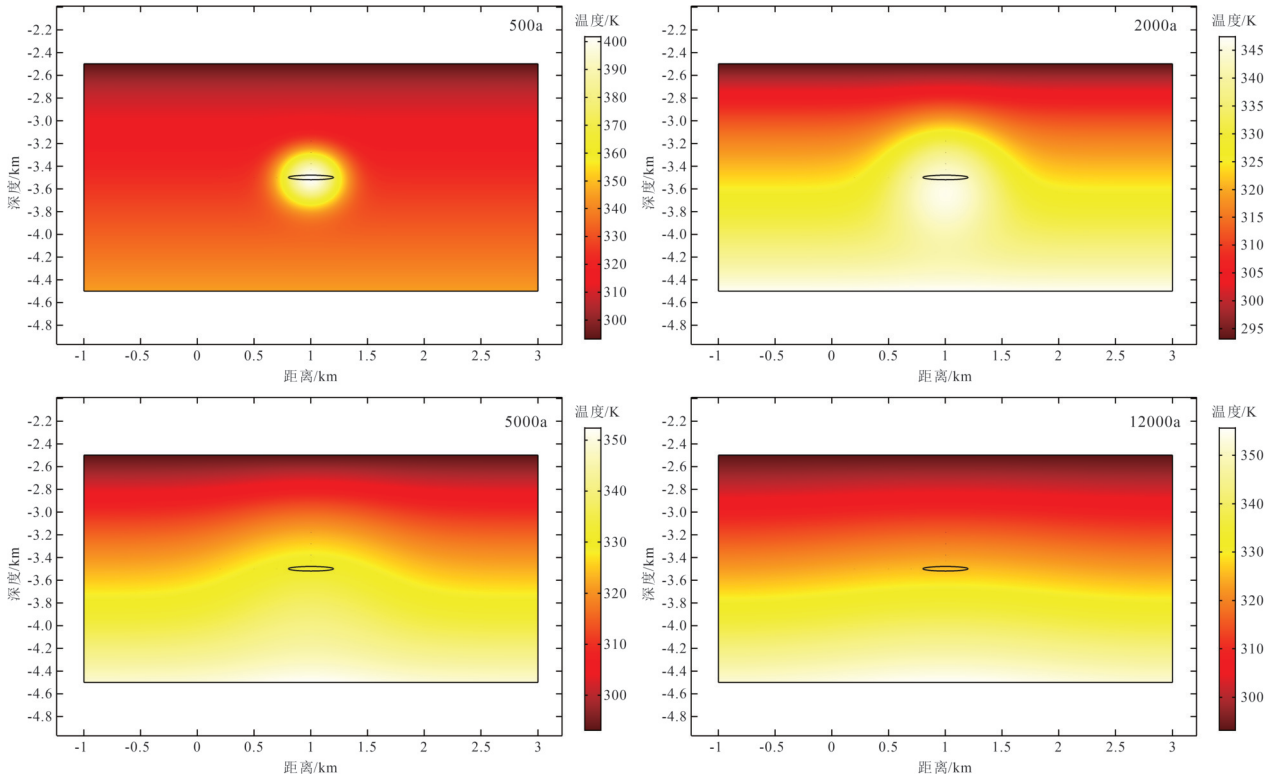


图 4 塔里木盆地岩浆侵入体冷却模拟结果  
Fig.4 Simulation results of magmatic intrusive cooling in Tarim Basin

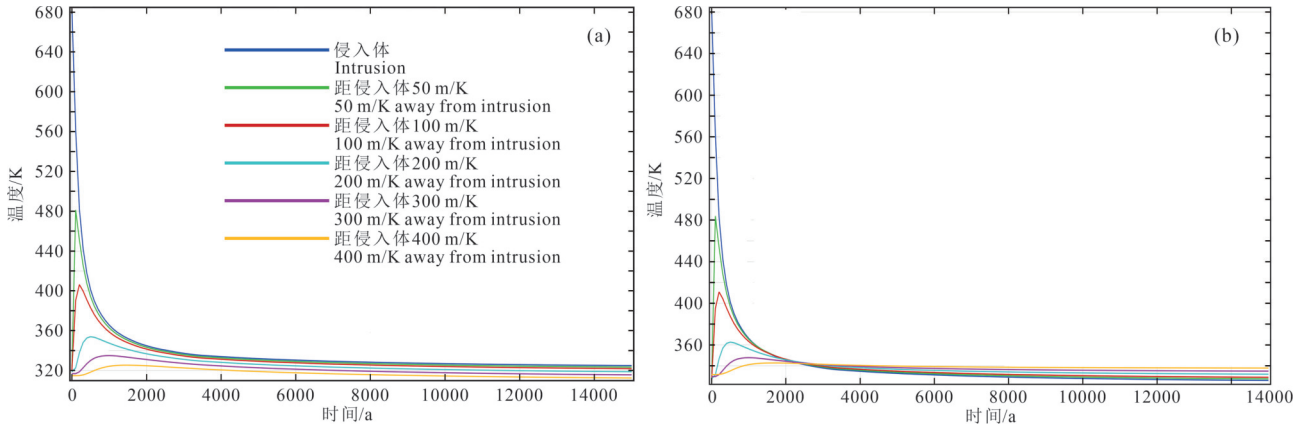


图 5 侵入体向上方(a)和向下方(b)不同位置温度冷却曲线  
Fig.5 Temperature cooling curves of the intrusive body upward (a) and downward (b) in different positions

## 5 讨论

### 5.1 地温场变化对烃源岩成熟演化的影响

盆地内海相烃源岩主要分布在台盆区,对热事件有积极响应的区域与火成岩分布范围大致重合。在岩浆上涌喷出的过程中,高温熔融物质在地层中运移的同时向四周侵入,冷却结晶并释放热量

对围岩烘烤加热,加快了有机质热演化的进度,使其相对产烃率增长到接近 1,生烃强度增大到峰值。受到火成岩影响的沉积层内有机质成熟度相对于未受到影响地层成熟度升高了约 0.6%,使其成为良好的生烃层系(Liu et al, 2020)。

### 5.2 岩浆热事件对地温场影响的时空范围

岩浆在上涌过程中是沿着断裂、裂缝等构造相

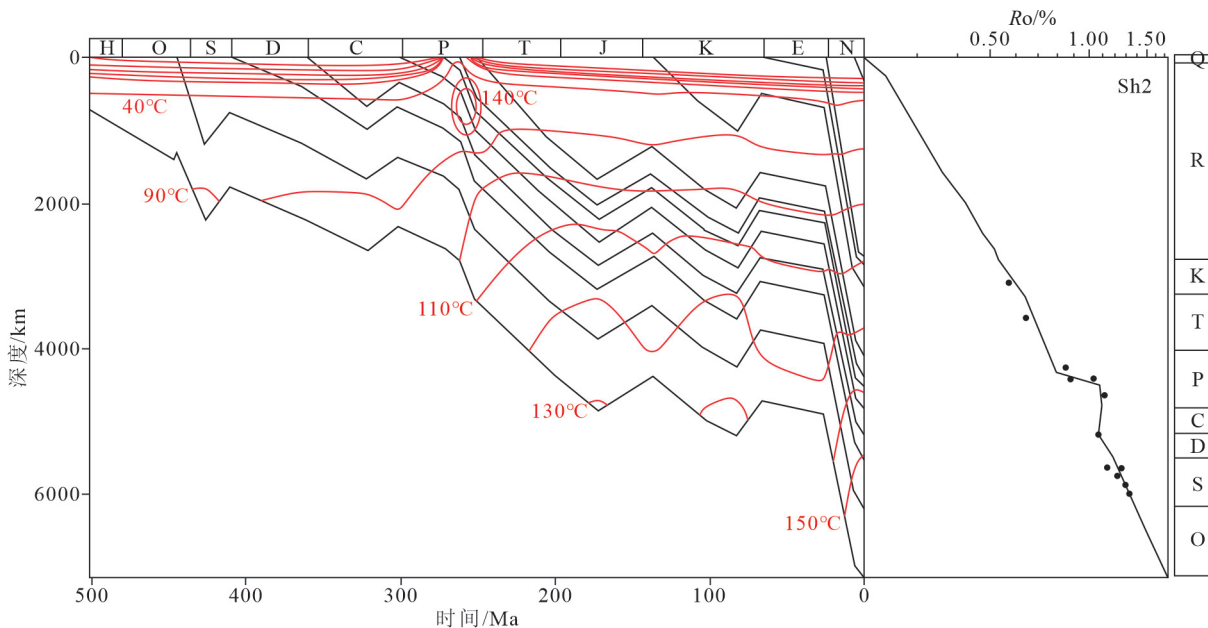


图6 顺2井火成岩侵入热效应与地层温度史综合模型

Fig.6 Temperature response of igneous activity and strata temperature history of Well Sh2

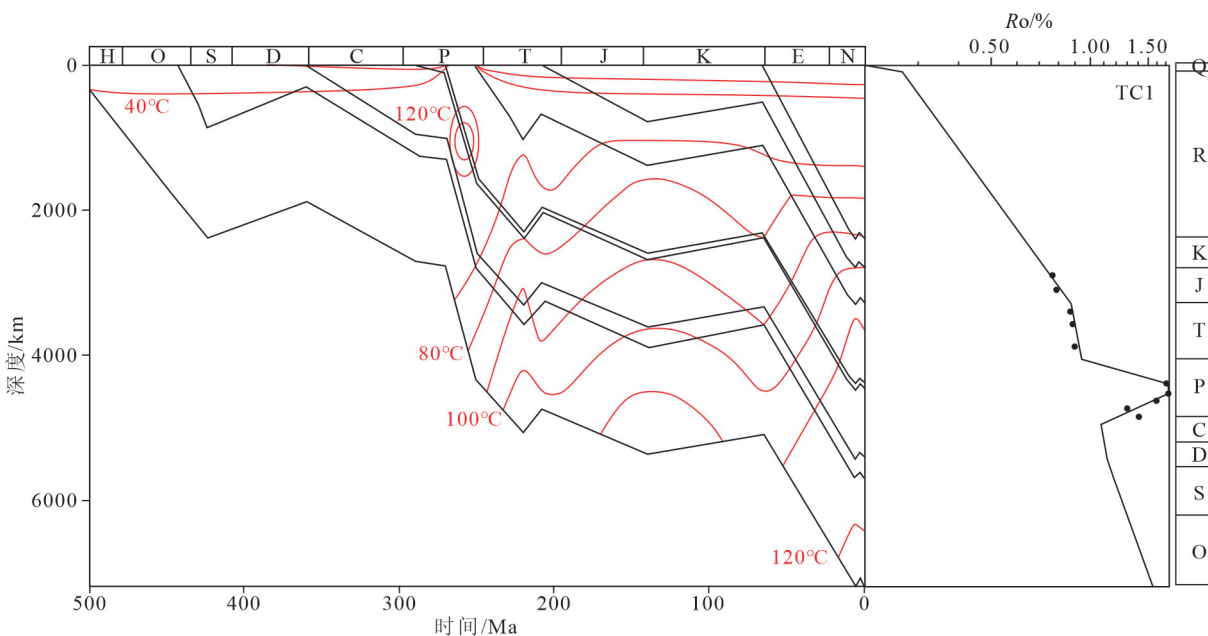


图7 塘参1井火成岩侵入热效应与地层温度史综合模型

Fig.7 Temperature response of igneous activity and strata temperature history of Well TC1

对薄弱地带向上运移,进而形成侵入体,将深层地幔的温度带到浅部地层,由此可见岩浆事件仅针对局部地区加热效果较为明显,对于单一的数百米长岩株型侵入体来说,距离在300 m、间隔时间12 ka以上便几乎受不到加热的影响,具有明显的分布区域性和时间空间复杂性。王铁冠等(2010)针对台盆

区有机质热史的研究表明,在塔中东部、塔北隆起塔河—轮南地区的多口井中Ro均存在突变和二阶错断现象,李慧莉等(2005)计算的塔里木盆地多个不同构造区块古地温梯度在石炭纪—二叠纪也均有上升,这就意味着岩浆不只在构造薄弱地带发生小范围的侵入,而是很有可能在盆地内部向低压区



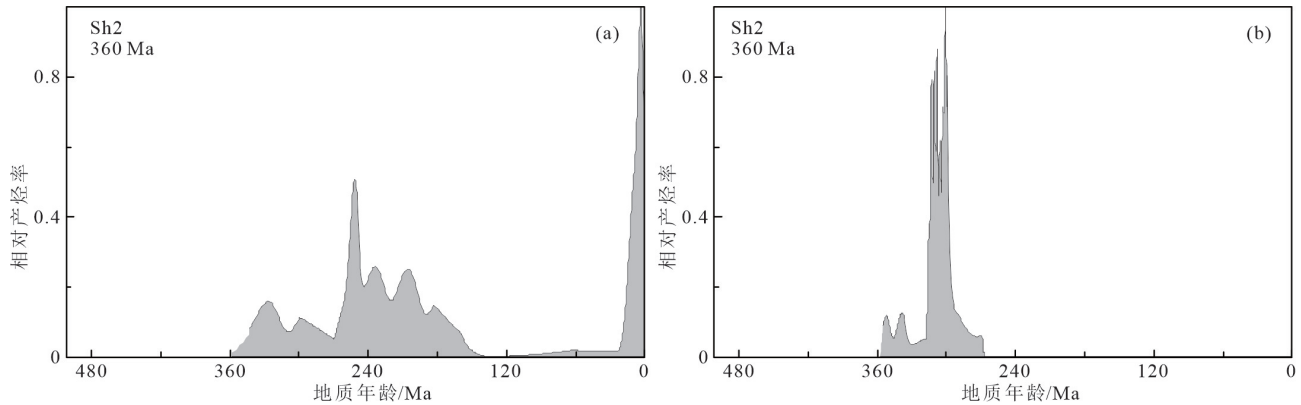


图 8 塔里木盆地顺 2 井石炭系烃源岩相对产烃率演化史对比图

Fig. 8 Evolution history of relative hydrocarbon yield of Carboniferous hydrocarbon source rocks in Well Sh2, Tarim Basin

域运移并形成大面积岩浆房,进而对台盆区大面积进行烘烤,烘烤面积远远超过岩浆侵入体影响范围。这与前人通过地震、航磁、岩石地球化学等方法得出的结论相似,塔里木石炭纪—二叠纪地幔柱头隆升位置位于盆地西北部地区(Li et al., 2012; Huang et al., 2014; 闫磊等, 2014)。但由于岩浆活动的区域性和复杂性,火成岩的形态产出及其具体分布所造成的影响还有一定的不确定性,有待进一步研究探讨。

## 6 结 论

(1)塔里木盆地台盆区中西部地区多口钻井中二叠系与其上下地层实测镜质体反射率值不连续,出现异常高值。结合  $R_o$  异常值与火成岩分布特征,认为钻井  $R_o$  数据的异常值记录了晚石炭世—二叠纪时期发生的岩浆热事件。

(2)盆地内侵入岩产生的烘烤强度较为明显,火成岩热效应主要集中在侵入体周围,其时空影响范围随时间与距离的增大而相应减弱,直到侵入体冷却固结成岩,地层温度恢复到稳态。

(3)对于被岩浆作用所影响的地区,烃源岩生烃进程被明显加快。在稳定沉积的情况下,主要受控于沉积埋藏过程,但在异常热事件发生后,生烃强度显著增大,相对产烃率达到最高,有机质快速成熟,在以后的地质时期中,若没有更高的地层温度,将保持已有的成熟度不再变化。

## References

Barry K, Tuvia W, Ling C, Ken F, Simon B. 2019. Low-temperature

thermochronology of francolite: Insights into timing of Dead Sea Transform motion[J]. *Terra Nova*, 31(3): 205–219.

Burnham A K, Sweeney J J. 1989. A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10): 2649–2657.

Chang J, Qiu N S, Song X Y, Li H L. 2016. Multiple cooling episodes in the Central Tarim (Northwest China) revealed by apatite fission track analysis and vitrinite reflectance data[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 105(4): 1257–1272.

Chang Jian, Qiu Nansheng. 2017. Apatite low-temperature thermochronometry and applications to Tarim Basin in the Northwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 79–93 (in Chinese with English abstract).

Chen Liying, Wu Haibo, Xing Libo. 2005. Complex igneous rock lithologic logging recognition and numerical process of logging data[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 27(6): 877–879 (in Chinese with English abstract).

Chen Mimi, Tian Wei, Zhang Zili, Pan Wenqing, Song Yu. 2010. Geochronology of the Permian basic-intermediate-acidic magma suite from Tarim, Northwest China and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 559–572 (in Chinese with English abstract).

Feng Changge, Liu Shaowen, Wang Liangshu, Li Cheng. 2010. Present-day geotemperature field characteristics in the Central Uplift Area of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation and preservation[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 645–656 (in Chinese with English abstract).

He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, Zhang Chaojun, Meng Qingren, Shi Xin. 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 26(1): 64–77 (in Chinese with English abstract).

He Lijuan, Xu Hehua, Liu Qiongying. 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).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Zhu Chuanqing, Wang Jiyang. 2008. Method system of thermal reconstruction for marine basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 29(5): 607–613 (in Chinese with English abstract).
- Huang S J, Huang K K, Lv J, Lan Y F. 2014. The relationship between dolomite textures and their formation temperature: A case study from the Permian–Triassic of the Sichuan Basin and the Lower Paleozoic of the Tarim Basin[J]. *Petroleum Science*, 11(1): 39–51.
- Ji Tianyu, Yang Wei, Wu Xueqiong, Pu Renhai, Li Dejiang, Liu Mancang, Miao Weidong, Su Nan, Ye Ying. 2022. Evaluation of Cambrian caprock in the platform-basin area of Tarim Basin and optimization of favorable area for oil and gas caprock[J]. *Geology in China*, 49(2): 369–382 (in Chinese with English abstract)..
- Jia Chengzao, Li Benliang, Zhang Xingyang, Li Chuanxin. 2007. Formation and evolution of China Sea facies basins[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(S1): 1–8 (in Chinese).
- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, Wang Yi, Yan Xiangbin. 2006. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 245–253 (in Chinese with English abstract).
- Li Cheng, Wang Liangshu, Guo Suiping, Shi Xiaobin. 2000. Thermal evolution in Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 21(3): 13–17 (in Chinese with English abstract).
- Li Huili, Qiu Nansheng, Jin Zhijun, He Zhiliang. 2005. Geothermal history of Tarim Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 26(5): 613–617 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiawei, Li Zhong, Qiu Nansheng, Zuo Yinhui, Yu Jingbo, Liu Jiaqing. 2016. Carboniferous–Permian abnormal thermal evolution of the Tarim basin and its implication for deep structure and magmatic activity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(9): 3318–3329 (in Chinese with English abstract).
- Li Zilong, Yang Shufeng, Chen Hanlin, Langmuir C H, Yu Xing, Lin Xiubin, Li Yinqi. 2008. Chronology and geochemistry of Taxinan basalts from the Tarim basin: Evidence for Permian plume magmatism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 959–970 (in Chinese with English abstract).
- Li Z L, Li Y Q, Chen H L, Santosh M, Yang S F, Xu Y G, Charles H. L, Chen Z X, Yu X, Zou S Y. 2012. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 49: 191–202.
- Liu P X, Deng S B, Guan P, Jin Y Q, Wang K, Chen Y Q. 2020. The nature, type, and origin of diagenetic fluids and their control on the evolving porosity of the Lower Cambrian Xiaerbulak Formation dolostone, northwestern Tarim Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 17(4): 873–895.
- Liu Shaowen, Wang Liangshu, Li Cheng, Zhang Peng, Li Hua. 2006. Lithospheric thermo–rheological structure and Cenozoic thermal regime in the Tarim Basin, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 80(3): 344–350 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yun, Pan Mao, Tian Wei, Wang Zongxiu, Guan Ping, Liu Xiao, Pan Wenqing. 2013. Redefined distribution of the Permian basalt in the Central Tarim Area: A new approach based on down hole logging data explanation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 87(10): 1542–1549 (in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H, Liu P P. 2011. SIMS zircon U–Pb geochronology and Sr–Nd isotopes of Ni–Cu–bearing mafic–ultramafic intrusions in Eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 311(3): 237–260.
- Qiu Nansheng, Li Huili, Jin Zhijun. 2005. Study of the thermal history reconstruction for Lower Paleozoic carbonate succession[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 561–567 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng, Zuo Yinhui, Chang Jian, Xu Wei, Zhu Chuanqing. 2015. Characteristics of Meso–Cenozoic thermal regimes in typical eastern and western sedimentary basins of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 157–168 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Tian Tao, Li Jinbu, Wang Jiping, Cui Junping, Li Hao, Tang Jianyun, Guo Ke. 2014. Review on methods of thermal evolution history in sedimentary basins and thermal evolution history reconstruction of superimposed basins[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(3): 1–21 (in Chinese with English abstract).
- Sweeney J J, Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 10(10): 1559–1570.
- Wang Liangshu, Li Cheng, Liu Shaowen, Li Hua, Xu Mingjie, Yu Dayong, Jia Chengzao, Wei Guoqi. 2005. Terrestrial heat flow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tieguan, Dai Shifeng, Li Meijun, Zhang Weibiao, Qiu Nansheng, Wang Guangli. 2010. The thermal history of stratigraphic organic matter in the platform basin of Tarim Basin and its implications for regional geological evolution[J]. *Science China: Earth Sciences*, 53: 1495–1505.
- Wei X, Xu Y G, Feng Y X, Zhao J X. 2014. Plume–lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints[J]. *American Journal of Science*, 314(1): 314–356.
- Xia Linqi, Li Xiangmin, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2006. Carboniferous–Permian rift–related volcanism and mantle plume in the Tianshan, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 39(1): 1–49 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Chongyang, Yang Lin, Lin Bo, You Donghua. 2020. Volcanic activity stages and distribution during the Permian in the Shunbei

- area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 42(2): 177–185 (in Chinese with English abstract).
- Yan Lei, Li Ming, Pan Wenqing. 2014. Distribution characteristics of Permian igneous rock in Tarim basin: Based on the high-precision aeromagnetic data[J]. Progress in Geophysics, 29(4): 1843–1848 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Li Zilong, Li Yinqi, Yu Xing, Li Dongxu, Meng Lifeng. 2014. Early Permian large igneous provinces in Tarim Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 56: 2015–2026.
- Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun, Li Jingchang, Zhang Zhongpei, Jiang Huashan, Xie Daqing, Guo Xin. 2014. Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin[J]. Oil and Gas Geology, 35(6): 925–934 (in Chinese with English abstract).
- Zhu C Q, Hu S B, Qiu N S, Jiang Q, Rao S, Liu S. 2018. Geothermal constraints on Emeishan mantle plume magmatism: Paleotemperature reconstruction of the Sichuan Basin, SW China[J]. International Journal of Earth Sciences, 107(1): 71–88.
- Zhu Rukai, Luo Ping, Luo Zhong. 2002. Lithofacies palaeogeography of the Late Devonian and Carboniferous in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 4(1): 13–24 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 常健, 邱楠生. 2017. 磷灰石低温热年代学技术及在塔里木盆地演化研究中的应用[J]. 地学前缘, 24(3): 79–93.
- 陈立英, 吴海波, 邢丽波. 2005. 火成岩复杂岩性测井识别及测井资料数字处理[J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 27(6): 877–879.
- 陈咪咪, 田伟, 张自力, 潘文庆, 宋宇. 2010. 塔里木二叠纪基性—中性—酸性岩浆岩的年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 26(2): 559–572.
- 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 李成. 2010. 塔里木盆地中央隆起区现今地温场分布特征及其与油气的关系[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 35(4): 645–656.
- 何登发, 贾承造, 李德生, 张朝军, 孟庆任, 石昕. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 26(1): 64–77.
- 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.
- 胡圣标, 何丽娟, 朱传庆, 汪集旻. 2008. 海相盆地热史恢复方法体系[J]. 石油与天然气地质, 29(5): 607–613.
- 季天愚, 杨威, 武雪琼, 蒲仁海, 李德江, 刘满仓, 缪卫东, 苏楠, 叶颖. 2022. 塔里木盆地台盆区寒武系盖层评价及对油气盖层有利区的优选[J]. 中国地质, 49(2): 369–382.
- 贾承造, 李本亮, 张兴阳, 李传新. 2007. 中国海相盆地的形成与演化[J]. 科学通报, 52(S1): 1–8.
- 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 张学丰, 王毅, 闫相宾. 2006. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 80(2): 245–253.
- 李成, 王良书, 郭随平, 施小斌. 2000. 塔里木盆地热演化[J]. 石油学报, 21(3): 13–17.
- 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 何治亮. 2005. 塔里木盆地的热史[J]. 石油与天然气地质, 26(5): 613–617.
- 李佳蔚, 李忠, 邱楠生, 左银辉, 于靖波, 刘嘉庆. 2016. 塔里木盆地石炭—二叠纪异常热演化及其对深部构造—岩浆活动的指示[J]. 地球物理学报, 59(9): 3318–3329.
- 厉子龙, 杨树锋, 陈汉林, Langmuir C H, 余星, 林秀彬, 励音骐. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约[J]. 岩石学报, 24(5): 957–959.
- 刘绍文, 王良书, 李成, 张鹏, 李华. 2006. 塔里木盆地岩石圈热—流变学结构和新生代热体制[J]. 地质学报, 80(3): 344–350.
- 潘赞, 潘懋, 田伟, 王宗秀, 关平, 刘晓, 潘文庆. 2013. 塔里木中部二叠纪玄武岩分布的重新厘定: 基于测井数据的新认识[J]. 地质学报, 87(10): 1542–1550.
- 邱楠生, 李慧莉, 金之钧. 2005. 沉积盆地中生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索[J]. 地学前缘, 12(4): 561–567.
- 邱楠生, 左银辉, 常健, 许威, 朱传庆. 2015. 中国东西部典型盆地中—新生代热体制对比[J]. 地学前缘, 22(1): 157–168.
- 任战利, 田涛, 李进步, 王继平, 崔军平, 李浩, 唐建云, 郭科. 2014. 沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 36(3): 1–21.
- 王良书, 李成, 刘绍文, 李华, 徐鸣洁, 于大勇, 贾承造, 魏国齐. 2005. 库车前陆盆地大地热流分布特征[J]. 石油勘探与开发, 32(4): 79–83.
- 王铁冠, 戴世峰, 李美俊, 张卫彪, 邱楠生, 王广利. 2010. 塔里木盆地台盆区地层有机质热史及其对区域地质演化研究的启迪[J]. 中国科学: 地球科学, 40(10): 1331–1341.
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 徐学义, 马中平, 王立社. 2006. 天山石炭—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. 西北地质, 39(1): 1–49.
- 肖重阳, 杨林, 林波, 尤东华. 2020. 塔里木盆地顺北地区二叠纪火山活动期次与分布[J]. 石油实验地质, 42(2): 177–185.
- 闫磊, 李明, 潘文庆. 2014. 塔里木盆地二叠纪火成岩分布特征——基于高精度航磁资料[J]. 地球物理学进展, 29(4): 1843–1848.
- 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 励音骐, 余星, 李东旭, 孟立丰. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省[J]. 中国科学: 地球科学, 44(2): 187–199.
- 郑孟林, 王毅, 金之钧, 李京昌, 张仲培, 蒋华山, 谢大庆, 郭忻. 2014. 塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 35(6): 925–934.
- 朱如凯, 罗平, 罗忠. 2002. 塔里木盆地晚泥盆世及石炭纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 4(1): 13–24.