



## QT盆地中新生代隆升剥蚀与上三叠统一侏罗系烃源层埋藏史分析

彭金宁, 马泽良, 刘中戎, 范志伟, 庄新兵, 刘栩

引用本文:

彭金宁, 马泽良, 刘中戎, 等. QT盆地中新生代隆升剥蚀与上三叠统一侏罗系烃源层埋藏史分析[J]. 沉积学报, 2026, 44(1): 267-278.

PENG JinNing, MA ZeLiang, LIU ZhongRong, et al. Analysis of the MesozoicCenozoic Uplift and Denudation and Restoration of Burial History of Upper TriassicJurassic Source Beds in the QT Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2026, 44(1): 267-278.

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩

Lithofacies Palaeogeography and Source Rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin

沉积学报. 2020, 38(4): 876-885 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.093>

#### 塔里木盆地晚震旦世—中寒武世构造沉积充填过程及油气勘探地位

Tectonic-sedimentary Filling History through the Later Sinian to the Mid-Cambrian in Tarim Basin and Its Explorational Potential

沉积学报. 2020, 38(2): 398-410 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.045>

#### 川西马尔康—金川地区晚三叠世松潘甘孜残留洋盆复理石建造沉积特征与沉积模式

Sedimentary Characteristics and Model of the Triassic Songpan-Ganzi Flysch Basin, in Maerkang-Jinchuan Area, Western Sichuan

沉积学报. 2019, 37(6): 1210-1223 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.031>

#### 龙门山地区中泥盆统养马坝组风暴沉积中的遗迹化石及其环境意义

Ichnofossils and Their Environmental Significance in Storm Deposit from the Middle Devonian Yangmaba Formation in Longmenshan Area

沉积学报. 2019, 37(4): 749-757 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.170>

#### 辽东苏子河盆地聂尔库组沉积相与沉积环境研究

Study of Sedimentary Facies and Environment of the Nieerku Formation, Suzihe Basin, Eastern Liaoning

沉积学报. 2019, 37(1): 30-39 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.114>

引用格式:彭金宁,马泽良,刘中戎,等.2026.QT盆地中新生代隆升剥蚀与上三叠统一侏罗系烃源层埋藏史分析[J].沉积学报,44(1):267-278.

PENG JinNing, MA ZeLiang, LIU ZhongRong, et al. 2026. Analysis of the Mesozoic-Cenozoic Uplift and Denudation and Restoration of Burial History of Upper Triassic-Jurassic Source Beds in the QT Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 267-278.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.009

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.009

# QT盆地中新生代隆升剥蚀与上三叠统一侏罗系烃源层埋藏史分析

彭金宁<sup>1,2</sup>,马泽良<sup>1,2</sup>,刘中戎<sup>3</sup>,范志伟<sup>3</sup>,庄新兵<sup>1,2</sup>,刘栩<sup>1,2</sup>

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所,江苏无锡 214126

2. 中国石化油气成藏重点实验室,江苏无锡 214126

3. 中国石油化工股份有限公司勘探分公司,成都 610041

**摘要** 【目的】QT盆地处于全球最主要的油气聚集带——特提斯构造域的东段,由于盆地目前勘探程度低,其油气资源潜力一直存在较大的分歧,恢复其关键构造期盆地剥蚀量和埋藏过程对深化QT盆地主力烃源岩生烃潜力与油气资源潜力具有重要的作用。【方法】运用构造—沉积充填外推法,分析了QT盆地主要构造活动期次,恢复关键构造期剥蚀量,同时运用TSM盆地模拟系统,分析了上三叠统一侏罗系三套烃源层埋藏过程。【结果】(1)QT盆地自晚三叠世以来经历了四期剥蚀事件:晚三叠世—早侏罗世(210~180 Ma)、早白垩世(120~110 Ma)、古新世—始新世早期(60~45 Ma)和中新世早期以来(25~ Ma);(2)210~180 Ma:盆地主体发生抬升,盆地中央隆起带和北QT坳陷剥蚀较为强烈;120~110 Ma,盆地中央隆起带及其两侧、盆地东部地区剥蚀最强烈;北QT坳陷中—西部剥蚀相对较弱;60~45 Ma,盆地平均抬升剥蚀约0.75 km左右;25 Ma以来,盆地具有整体抬升性质;(3)受地层沉积厚度、多期构造抬升差异性剥蚀等影响,QT盆地上三叠统一侏罗系烃源层两次最大埋深分别发生在雪山组沉积之后、古近系康托组及新近系喇嘛湖组沉积之后。两期主力生烃期与最大埋深及其随后的构造抬升相对应;(4)两套烃源岩生烃演化存在较大差异:肖茶卡组( $T_3x$ )烃源层生烃相对较早,成烃演化周期较长;布曲组( $J_2b$ )烃源层、夏里组( $J_2x$ )烃源层生烃相对较晚,尤其 $J_2x$ 烃源层,地史时期曾有过生烃停滞过程,古近系沉积后进入二次生烃演化阶段,现今仍有持续生烃潜力。【结论】QT盆地上三叠统一侏罗系烃源岩经历不同的隆升剥蚀史,生烃演化过程存在明显的差异;平面上,地层保存最为完好,北QT坳陷中—西部资源潜力大,应是下一步有利勘探区。

**关键词** 埋藏史;构造剥蚀;上三叠统;侏罗系;QT盆地

**第一作者** 彭金宁,男,1979年出生,博士,高级工程师,油气地质综合研究,E-mail: pengjn.syky@sinopec.com

**中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0550(2026)01-0267-12

## 0 引言

QT盆地位于全球富含油气的特提斯构造域的东段(王成善等,2001,2004;赵政璋等,2001),介于可可西里—金沙江缝合带、班公湖—怒江缝合带之间,面积约 $22\times 10^4$  km<sup>2</sup>,是青藏高原腹地海相地层保存最为完整、面积最大的中生代盆地,但至今未取得油气勘探突破(秦建中,2006b;伍新和等,2008;Fu *et al.*, 2009;王剑等,2009a,b;吴珍汉等,2022)。QT盆地由北QT坳陷、中央隆起带、南QT坳陷3个构造单元组成(王剑等,2007,2009b;Pan *et al.*, 2012;占王忠和谭

富文,2020)(图1)。QT盆地具有长期复杂的演化历史,包括前泥盆纪基底演化阶段、晚古生代裂谷—被动陆缘演化阶段、三叠纪早中期前陆盆地演化阶段、晚三叠世—侏罗纪—早白垩世被动陆缘盆地演化阶段、晚白垩世—新生代陆相盆地演化阶段(王剑等,2007;陈文西和王剑,2009a,b;朱同兴等,2010)。多期多类型盆地的并列叠加改造,为油气形成与富集奠定了基本条件。

随着对QT盆地的油气勘探,烃源岩特征及油气成藏等方面的研究不断深入,前人研究认为QT盆地主力烃源岩主要为上三叠统一侏罗系三套烃源岩

收稿日期:2023-07-12;修回日期:2024-01-15;录用日期:2024-03-13;网络出版日期:2024-03-13

基金项目:中石化股份公司项目(P22198,P22197,P21086-6,YTBXD-CGKT-2022-1-02-004-SKY)

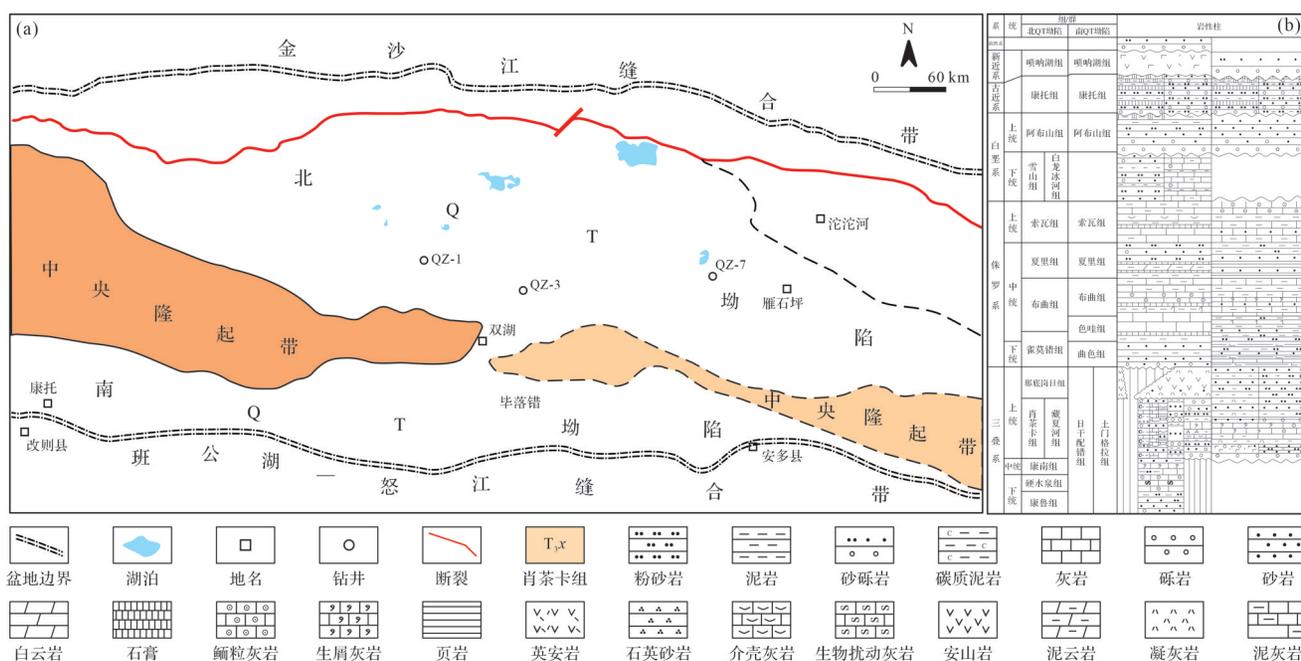


图1 QT盆地构造单元划分及地层柱状图

Fig.1 Structural unit division and stratigraphic bar chart of QT Basin

(秦建中, 2006b; 伍新和等, 2008), 同时通过QT盆地200余处的油气显示及油源对比认为现有的油气苗、沥青油气来源主要为上三叠统肖茶卡组、中侏罗统布曲组、中侏罗统夏里组烃源岩(秦建中, 2006b; 伍新和等, 2008; 吴珍汉等, 2021)。近几年, 前人基于大量的野外采样和浅钻资料, 对QT盆地这三套烃源岩品质及展布、生烃史等工作进行了较为深入的研究, 取得了一系列认识和进展(许怀先和秦建中, 2004; 陈文彬等, 2010; 丁文龙等, 2011)。基于QT盆地的现有资料, 运用构造—沉积外推法, 同时建立有机质成熟度( $R_o$ )与埋深(Dept)的曲线, 对剖面上恢复的剥蚀量进行校验, 分析QT盆地上三叠统一侏罗系三套烃源层主要构造活动特征, 并恢复其关键构造期剥蚀量, 同时运用TSM盆地模拟系统, 动态分析了各烃源岩层埋藏史, 为QT盆地烃源岩生烃及资源潜力分析提供线索和依据, 为扎实推进QT盆地战略选区与勘探部署提供支撑。

## 1 烃源岩沉积背景

QT盆地是青藏高原腹地最大的中生代海相残留盆地, 发育了上三叠统一上侏罗统一套地层。上三叠统肖茶卡组( $T_{3x}$ )在南、北坳陷主体为深海一次深海相沉积, 强还原环境, 岩性为黑色页岩、泥晶灰岩和泥灰岩; 中侏罗统布曲组( $J_2b$ )沉积时期盆地发生

了大规模海侵, 属半温暖、半干热气候, 形成了大面积的海相碳酸盐岩台地沉积体, 台地相中的台凹亚相主要由大套浅灰色、深灰色页岩组成, 夹泥晶灰岩, 总体反映水体相对较深、较闭塞的静水沉积环境; 中侏罗统夏里组( $J_{2x}$ )整体沉积了一套以碎屑岩为主夹碳酸盐岩的局限台地相沉积产物, 盆地内多处发育有封闭环境下较深水潟湖相沉积, 如比洛错、那底岗日等地(王成善等, 2001; 秦建中, 2006a)。上侏罗统索瓦组( $J_{3s}$ )沉积时期, 表现为海侵、水体变深, 发育了一套以碳酸盐岩为主的开阔台地相沉积, 在安多114道班发现有水体较深的台凹泥灰岩微相沉积(陈文西和王剑, 2009a; 王丽波等, 2012)。此外, 南QT坳陷下侏罗统曲色组( $J_{1q}$ )和中侏罗统下部雀莫错组( $J_{2q}$ )为半温暖、半干热变—温暖炎热气候, 在凹陷南部局部发育了深海—一次深海盆地相的强还原环境下形成的大段深灰色、灰黑色页岩(蔡占虎, 2014)。因此, 从烃源岩发育的古地理背景来看, QT盆地中生界主要发育肖茶卡组( $T_{3x}$ )、布曲组( $J_2b$ )、夏里组( $J_{2x}$ )三套烃源岩。

## 2 主要构造活动期剥蚀量

剥蚀量恢复是埋藏史分析的关键, 本次剥蚀量恢复利用了中国石化无锡石油地质研究所自主研发的TSM2.0盆地模拟系统中的埋藏史模块(徐旭辉等,

2017),采用回剥法原理的同时,结合前人已发表的盆地热史,恢复了QT盆地四个构造期(210~180 Ma、120~110 Ma、60~45 Ma和25~ Ma)主要构造活动期的剥蚀特征。

### 2.1 恢复剥蚀量方法的选择

沉积盆地剥蚀量恢复的方法虽多,但受诸多因素影响,应用效果仍不理想。目前用于地层剥蚀量恢复的方法主要有泥岩声波时差法(孔隙度法)、镜质体反射率法、磷灰石裂变径迹法、构造—沉积外推法、沉积波动方程分析法(袁玉松等,2008;鄢伟等,2012;李德勇等,2015;王腾飞等,2019)。此外,用于恢复地层剥蚀厚度的方法还有包裹体测温法、古地温梯度法、沉积速率比值法、沉积速率趋势法、剥蚀速率法、 $R_0$ -TTI法等(王敏芳等,2005;鄢伟等,2012)。每种方法都有各自的应用条件,所以,应根据研究对象选择合适的方法,尽量采用多方法、多手段,相互验证,以提高结果的可信度。

上述大多数方法仅能获得单剖面点的剥蚀量,而且多适用于中新世代构造事件造成的剥蚀量,对于面积大的盆地要获取剥蚀量的平面分布,首选的方法是构造—沉积外推法,同时应用热史分析中建立的 $R_0$ -H曲线在剖面上恢复的剥蚀量进行校验。QT盆地自晚三叠世中生界盆地沉积以来,经历了多达4期的主要构造运动(王成善等,2001;王剑等,2009a),每期构造活动方式及其强度均有自身的特点(表1)。

受可用资料的限制,本次主要采用构造—沉积外推法进行剥蚀量恢复,同时应用 $R_0$ -Dept曲线对剖面上恢复的剥蚀量进行校验。

### 2.2 主要构造活动期次及其剥蚀量

通过广泛收集研究区内区域地质资料、地质—地球物理解释资料、野外实测剖面资料、室内样品分析化验资料等,结合岩相古地理研究,统计上三叠统及其以上各层系地层残余厚度,其次通过叠加各层

系残余地层厚度求得各层系底界埋深,并利用地震剖面资料对所得结果进行校正(图2)。在地层残余厚度分析基础上,采用最大残留地层厚度并结合沉积地层厚度趋势进行外推,估算各层系原始地层沉积厚度及其剥蚀厚度。应用剖面上实测 $R_0$ 随埋深H变化曲线进行单剖面剥蚀量的恢复(图3),同时应用热史分析中的包裹体测温资料建立古地温T- $R_0$ 方程式及地温梯度,通过单剖面 $R_0$ 实测资料对剥蚀厚度进行恢复计算与校验,最后再利用前人已发表的盆地热史相关数据进行验证,从而恢复盆地主要构造活动期的地层剥蚀量。

应用 $R_0$ -H曲线进行单剖面剥蚀厚度的恢复必须建立在烃源层有机质热演化主要与最大古埋深有关的基础上,同时在对 $R_0$ 进行系统的、综合的判断和筛选之后,才能有效地恢复历史上的最大古埋藏深度及其后期剥蚀厚度。应用 $R_0$ 恢复古埋藏深度时,首先要建立 $R_0$ 与现今或用地层累积厚度推算埋藏深度的半对数线性方程,然后用线性方程或在图中推算出 $R_0=0.2\%$ 时的埋藏深度,即可以推算出最大古埋藏深度。例如,南QT坳陷东部烃源层镜质体反射率与地层累积厚度推算的埋藏深度的线性方程为 $D=2\ 695\ln(R_0)-31.24$ ,根据这个方程可以推出南QT坳陷东部的地层剥蚀厚度约5 000 m(图3b),南QT东部色哇 $J_2b-T_3x$ 剖面的剥蚀厚度约6 000 m。

通过QT盆地大量实测包裹体均一温度或形成温度或磷灰石裂变径迹温度与同层位烃源层实测 $R_0$ 值的变化关系统计,许怀先和王剑(2004)建立了QT盆地古地温T- $R_0$ 方程式: $T=53.406\ln(R_0)+112.66$ ,并计算出中—新生代QT盆地古地温梯度约为 $2.0\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ (许怀先和王剑,2004)。利用该方程式及其古地温梯度与剖面实测 $R_0$ 数据直接计算各剖面的地史时期的剥蚀厚度。例如:北QT坳陷雀莫错剖面 $J_3-K_1x$ 地层之上的剥蚀厚度约3 800 m,北QT坳陷长水河 $J_2x$ 地层之上剥蚀厚度约4 300 m,QZ1井 $J_2x$

表1 QT盆地主要构造活动期次及构造活动特征

Table 1 Main tectonic activity periods and characteristics of QT Basin

期次	地质时限/Ma	活动方式	活动强度
晚三叠—早侏罗世	210~180	挤压抬升	盆地中央隆起带和北QT坳陷剥蚀较为强烈
早白垩世	120~110	挤压褶皱、逆断层; 不均匀抬升剥蚀	盆地缩短率>8.4%;北QT中部剥蚀厚度达4.15 km,南QT坳陷地层剥蚀厚度约3.8~4.5 km
古新世—始新世早期	60~45	挤压褶皱、断块活动	盆地缩短率达11.9%;南QT平均抬升剥蚀0.75 km左右,北QT整体抬升,处于相对稳定状态
中新世早期以来	25~	挤压抬升	盆地缩短率达11.8%,北QT坳陷剥蚀约2.26 km,南QT坳陷抬升剥蚀约1.13 km

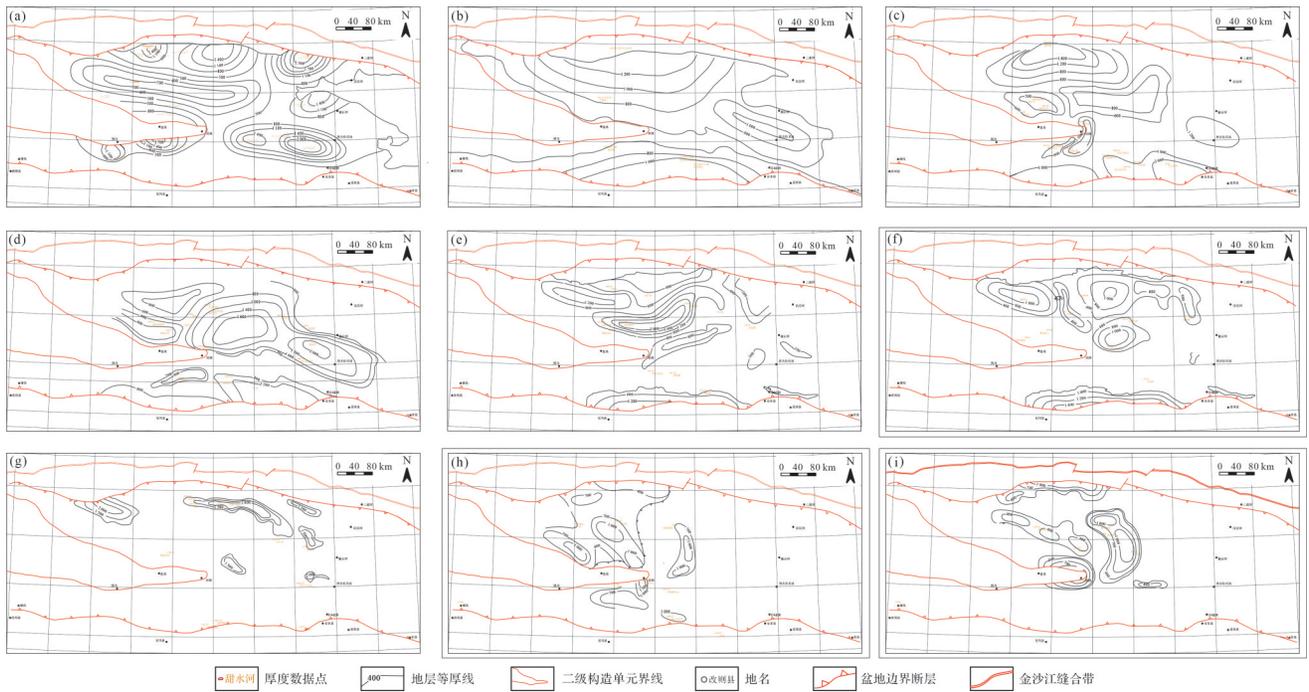


图2 QT盆地上三叠统一侏罗系主要地层残余厚度等值线分布图

(a)上三叠统;(b)下侏罗统;(c)下侏罗统雀莫错组;(d)中侏罗统布曲组;(e)中侏罗统夏里组;(f)上侏罗统索瓦组;(g)上侏罗统雪山组;(h)始新统康托组;(i)中新世喷纳湖组

Fig.2 Contour maps of residual thickness of main Upper Triassic-Jurassic strata in QT Basin

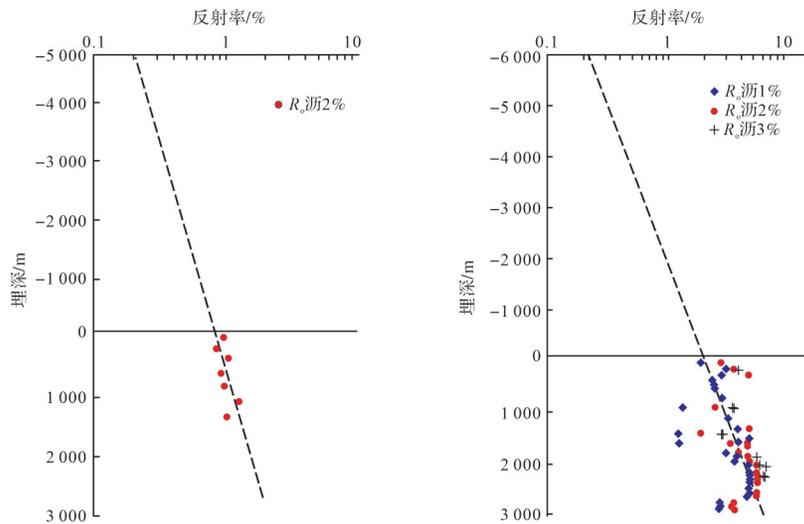


图3 QT盆地单剖面 $R_0$ -H曲线及其剥蚀厚度恢复

Fig.3 Restoration of single profile  $R_0$ -H curve and denudation thickness in QT Basin

及其以上地层剥蚀厚度约4 800 m, QZ2井 $J_2b$ 及其以上地层剥蚀厚度约5 200 m。

上述应用 $R_0$ -H曲线及 $T-R_0$ 方程等两种与 $R_0$ 相关的方法计算出来的剥蚀量均为单剖面上地史时期的最大剥蚀厚度,即反映出来的是最大古埋藏深度或烃源层经历的最高古地温。即便两种方法恢复剥蚀量有所差异,但笔者认为该计算值对于校验各层系

不同地史时期的古埋深(即恢复上覆地层剥蚀厚度)仍然具有重要的参考意义。

### 2.2.1 早侏罗世剥蚀量

晚三叠世期间,南、北QT地体发生碰撞,形成的龙木措—双湖缝合带和中央隆起带,随后晚三叠世—早侏罗世期间,QT地体与其北部的松潘—甘孜地体发生碰撞,形成了金沙江缝合带(Yin and

Harrison, 2000; Kapp and DeCelles, 2019)。早侏罗世金沙江洋的关闭,使得QT盆地北部(北QT坳陷)大部分地区出露地表,在上三叠统肖茶卡组之上形成了古风化壳,并伴随着火山活动,南QT整体处于海平面之下,北QT坳陷地区发生较弱剥蚀作用,北QT坳陷东部雀莫错地区晚三叠世肖茶卡组在这一时期剥蚀量约为200 m。

### 2.2.2 早白垩世剥蚀量

晚侏罗世—早白垩世QT地体与其南部的拉萨地体发生碰撞,形成了班公怒江缝合带,受南北向挤压应力的影响,使得侏罗纪和三叠纪地层形成宽缓的褶皱,并伴随着大量逆断层的发育(李亚林等,2008)。在侏罗纪地层与晚白垩世地层之间形成角度不整合面,该时期内地层剥蚀剧烈,最大剥蚀厚度位于北QT坳陷南缘中央古隆起带附近,不同地区剥蚀厚度横向上变化较大,剥蚀最小处仅几百米(东湖附近及向峰河向斜)。根据雪山组及其下伏各层系的残留地层分布区特征(图3),北QT坳陷东部雀莫错地区侏罗系雪山组剥蚀500 m,索瓦组剥蚀640 m,夏里组剥蚀920 m,布曲组剥蚀700 m,雀莫错组剥蚀300 m,地层共剥蚀约3 060 m,残留雀莫错组708 m。盆地中央隆起带及其两侧、盆地东部地区剥蚀最强烈,北QT坳陷中—西部剥蚀相对较弱,地层保存最为完好,其次为南QT坳陷南部。北QT中部地层剥蚀总厚度达4.15 km,南QT坳陷地层剥蚀厚度约3.8~4.5 km。

### 2.2.3 古新世—始新世早期剥蚀量

晚白垩世—始新世,印度大陆和欧亚大陆发生碰撞,QT地体受碰撞作用远程效应的影响,盆地发育大量近东西走向的逆冲断层(吴珍汉等,2011),在晚白垩世阿布山组和古新世康托组间形成了角度不整合面,这一期构造事件使得QT盆地迅速抬升,盆地在区域挤压应力背景下,盆地缩短率达11.9%,盆地不同地区剥蚀量存在差异。北QT坳陷东部雀莫错地区盆地受挤压,阿布山组剥蚀约200 m,北QT中部地区呈整体抬升状态,盆地地层遭受剥蚀较少,北QT中西部半岛湖地区地层剥蚀厚度约0.94 km。南QT坳陷平均剥蚀约0.75 km(图3)。这一阶段盆地二次隆升强度达2 300 m,局部形成山间盆地,隆起区地形较平缓,反差不大。

### 2.2.4 中新世早期以来的剥蚀量

中新世以来,受印度大陆持续的向北俯冲,QT盆地受南北向挤压应力的影响,康托组褶皱变形,并遭

受后期风化剥蚀,与上覆的喷纳湖组呈角度不整合接触关系。喷纳湖组整体呈水平发育。这一时期QT盆地构造变形较60~45 Ma期间减弱,断层持续活动,整体抬升的性质更为明显,且盆地盆缘走滑断层启动,盆地中部发育大量近南北向的正断层(李海兵等,2021)。盆地整体剥蚀量较小。隆升背景下山间盆地多见康托组,沉积厚度差异大,北QT东部雀莫错地区康托组这一时期剥蚀量约400 m,~25 Ma以来发生持续抬升剥蚀,盆地抬升约500 m,喷纳湖组平均剥蚀300 m,康托组平均剥蚀400 m。北QT坳陷中部剥蚀厚度约2.26 km,南QT坳陷抬升剥蚀厚度约1.13 km(图3)。

## 3 主力烃源层埋藏史

本次运用TSM盆地模拟系统中的埋藏史模块(李德勇等,2015),恢复了QT盆地上三叠统一侏罗系三套主力烃源岩层段(肖茶卡组 $T_{3x}$ 、布曲组 $J_{2b}$ 、夏里组 $J_{2x}$ )在主要构造期(210~180 Ma、120~110 Ma、60~45 Ma和~25 Ma)的底面埋深,动态分析了各烃源岩层埋藏史。

### 3.1 晚三叠世—早侏罗世(210~180 Ma)各烃源岩层埋藏特征

晚三叠世,南、北QT地体碰撞形成了统一的地体,这时QT盆地内部沉积了晚三叠世地层。晚三叠世—早侏罗世期间,QT地体与北部的松潘—甘孜地体碰撞,北QT晚三叠世地层顶面古风化壳的发现表明北QT大部分地区出露地表(王剑等,2007),此时北QT沉积结束,随后被那底岗日组火山岩角度不整合覆盖。此时南QT与北QT相比存在较大差异,未发育沉积间断。晚三叠世—早侏罗世期间,北QT晚三叠世地层肖茶卡组埋藏厚度约3 000 m。

### 3.2 晚侏罗世—早白垩世(120~110 Ma)各烃源层埋藏特征

通过模拟,由肖茶卡组( $T_{3x}$ )顶面埋深图(图4a1)可见,肖茶卡组烃源层在 $J_3$ - $K_1x$ 末以北QT坳陷中东部地区普若岗日—美日切错一带、南QT坳陷东部折巴扎索玛—屑尕日一带埋深最大,在6 500 m以上。北QT坳陷西部地区一般在6 000 m以下,坳陷南部靠近西部中央隆起北缘地区埋深最小,大致介于4 000~5 000 m;坳陷北部地区山隘湖—长水河一带埋藏略深,大致介于4 500~5 500 m。中央隆起带埋深较浅,西部中央隆起带及东部中央隆起带埋深均

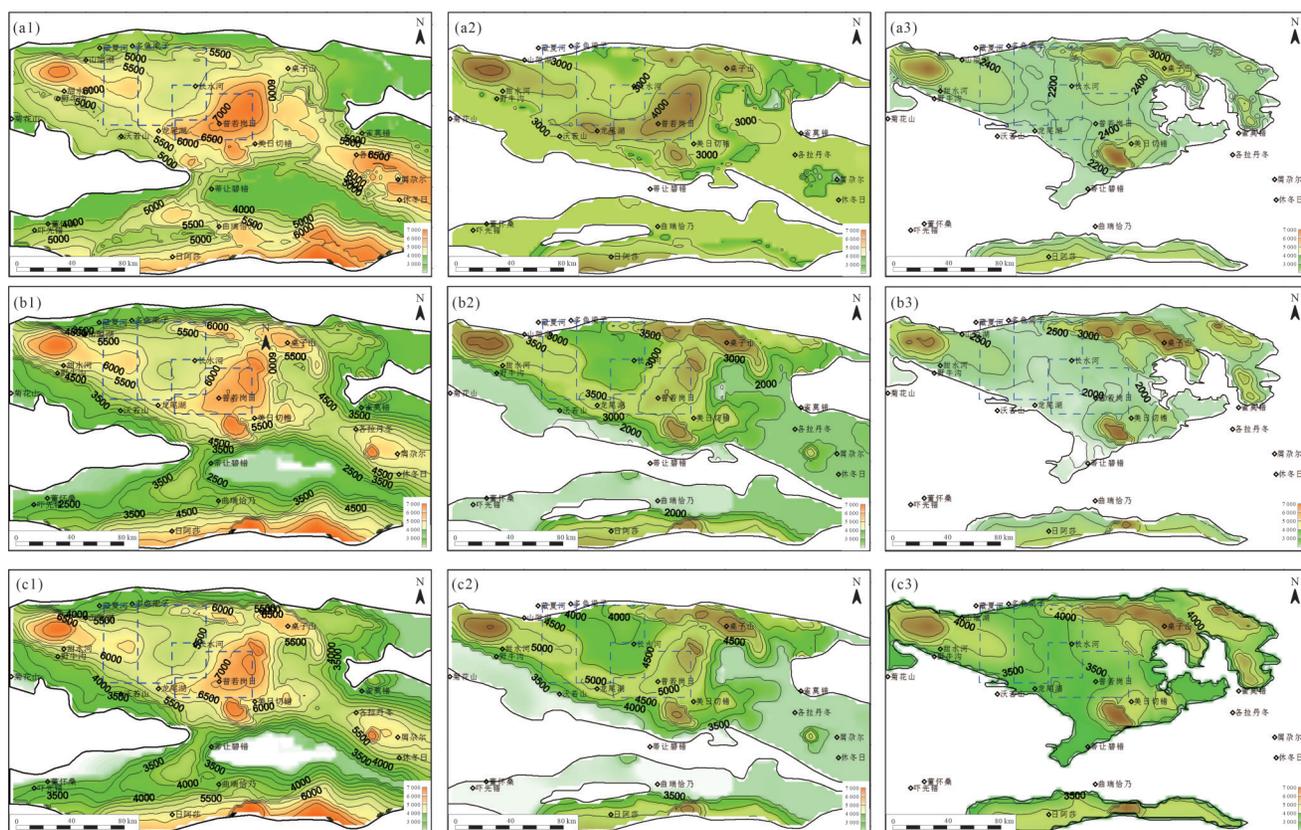


图4 QT盆地上三叠统一侏罗系主要烃源层顶面关键构造时期埋深图

(a1)  $J_3-K_1x$ 末  $T_{3x}$  顶面; (a2)  $J_3-K_1x$ 末  $J_{2b}$  顶面; (a3)  $J_3-K_1x$ 末  $J_{2x}$  顶面; (b1)  $E_1k$ 末  $T_{3x}$  顶面; (b2)  $E_1k$ 末  $J_{2b}$  顶面; (b3)  $E_1k$ 末  $J_{2x}$  顶面; (c1)  $N_1$ 末  $T_{3x}$  顶面; (c2)  $N_1$ 末  $J_{2b}$  顶面; (c3)  $N_1$ 末  $J_{2x}$  顶面

Fig.4 Buried depth maps of key tectonic periods at the top surface of the Upper Triassic-Jurassic main source beds in QT Basin

在3 500 m以内。南QT坳陷埋深一般介于4 500~6 000 m,靠近班公湖—怒江缝合带一带埋深最大,在6 000 m以上。

布曲组( $J_2b$ )烃源层、夏里组( $J_{2x}$ )烃源层在该时刻( $J_3-K_1x$ 末)埋深与肖茶卡组烃源层埋深具有大致相似的平面变化趋势,只是埋深要明显小得多。受差异沉降的影响(导致上覆地层沉积厚度差异),布曲组烃源层埋深最大的区域位于北QT坳陷中—东部地区龙尾湖—普若岗日—桌子山一带呈北东向展布,埋深一般介于3 500~4 200 m(图4a2)。北QT坳陷西部地区此时埋深较小,一般在3 200 m以内。南QT坳陷一般介于2 500~3 500 m。

夏里组烃源层在北QT坳陷普若岗日—美日切错一带、桌子山一带埋深相对较大,达2 500~3 000 m,其他地区基本上在2 500 m以内。南QT坳陷南部地区埋深相对较大,介于2 100~2 800 m,其他地区均在2 000 m以内(图4a3)。

### 3.3 古新世—始新世早期(60~45 Ma)各烃源层埋藏特征

阿布山组( $K_2a$ )在QT盆地内横向上普遍沉积厚度可能很小,仅局部地区沉积较厚(如阿布山剖面为1 203 m)。在阿布山组( $K_2a$ )沉积之后各烃源层埋深普遍加深很小。随后受印度—亚洲大陆碰撞的影响,阿布山组( $K_2a$ )沉积之后,区内发生了一次较大规模的构造抬升,抬升过程中遭受较大剥蚀作用,各烃源层在该时期埋深均有小幅减小。

### 3.4 中新世(~25 Ma)各烃源层埋藏特征

古新世康托组沉积之后,盆地西部处于缓慢剥蚀状态。盆地西部与东部烃源层埋深特征发生了明显的分异(图4b1),该时刻  $T_{3x}$  烃源层在盆地东部埋深最大处位于桌子山一带、赛多普岗日一带及南QT坳陷东部凹陷,前者埋深6 000~7 000 m,后者埋深分别为6 000 m左右、5 000~7 000 m,其他地区介于5 000~6 000 m。北QT坳陷中西部地区埋深介于3 500~5 500 m,埋深最大处仍位于普若岗日—美日

切错一带(介于5 000~5 500 m),其他地区则多介于3 500~4 500 m。

$J_2b$  烃源层埋深分布具有与  $T_3x$  相似的特征,即盆地东部埋深较大,盆地西部埋深较小。东部埋深最大处位于桌子山一带、雀莫错地区,分别为4 800~5 200 m、>3 500 m。西部埋深处仍为普若岗日—美日切错一带,介于2 500~3 000 m,其他地区普遍介于1 500~2 500 m。南 QT 坳陷东部凹陷介于2 800~4 000 m,西部凹陷介于1 200~2 500 m(图4b2)。

$J_2x$  烃源层埋深分布与  $T_3x$  同样具有类似特征(图4b3)。即东部埋深较大,埋深相对最大的区域位于盆地东北部地区(介于2 800~4 600 m)、盆地东南部(介于2 800~3 200 m),其他在2 800 m以内。盆地西部地区埋深最大处位于美日切错地区,介于1 600~2 800 m。其他地区普遍埋深介于600~1 200 m。

23 Ma 之后盆地再次挤压沉降,QT盆地广泛沉积了一套喷纳湖组( $N_1s$ )挤压坳陷湖盆沉积,并与下伏的康托组呈角度不整合接触关系。该时期, $T_3x$  烃源层最大埋深位于北 QT 坳陷桌子山—普若岗日—美日切错一带,普遍介于6 500~7 000 m,局部地区深达7 500 m。其他地区  $T_3x$  埋深在5 000~6 000 m不等。南 QT 坳陷南部埋深也较大,介于6 000~7 000 m。中央隆起带及其周缘地区  $T_3x$  埋深在4 000 m 以内直至出露地表(图4c1)。

该时期  $J_2b$  烃源层埋深总体上与  $T_3x$  具有相似的趋势,但普遍浅2 000 m左右(图4c2)。 $J_2x$  烃源层最大埋深位于北 QT 坳陷北东桌子山一带及美日切错地区,深4 000~5 000 m;其他地区埋深则相对较浅,多介于3 500~4 000 m(图4c3)。

## 4 烃源层热演化模式与生烃史

### 4.1 烃源层热演化模式

受差异化地层沉积厚度、差异隆升剥蚀、非均衡构造应力及深层热流影响,QT盆地不同构造单元烃源层热演化大致分为两种模式:其一为受控于深埋加温增熟作用的正常热演化模式,这种模式主要分布于盆地或坳陷中部,远离边界断裂带或强褶皱变形区(图5)。其演化史的主要特征是构造运动最强烈及抬升剥蚀厚度最大的时期是  $K_1$  末、 $N_2$  末;最高古地温形成时间在  $J$  末期— $K_1$  沉积时期或在  $N_2$  沉积时期;QT盆地大部分地区特别是中部地区可能具有二次生烃过程。 $J_3x$  末期是三叠系—侏罗系烃源

层第一次最大埋藏时期; $N_2$  沉积时期是第二次最大埋藏时期。古近系康托组及新近系喷纳湖组的沉积界面相对平缓、稳定,可能为大型湖泊沉积,沉积厚度较大,在北 QT 坳陷西部靠近中央隆起的喷纳湖剖面最大地层厚度可以达到4 000 m。其二为主要受控于非均衡构造应力或深成热流作用的特殊热演化模式,这种模式主要分布于盆地或坳陷边界断裂带附近、强褶皱变形区、岩浆或深成热流影响带,其主要特点表现为烃源层有机质短时限内成熟度大大升高,但影响范围有限,仅局限于盆地或坳陷边缘地区或坳陷内深大断层/强褶皱带附近(图5)。烃源层的油气生成部分或大部分主要是构造挤压的不均衡压力或靠短时间深成热流使局部地区古地温突然增高而形成。构造运动或构造挤压变形或深成热流活动最强烈的时期可能是油气生成和运移及散失和聚集的主要时期,QT盆地三叠系—侏罗系烃源层可能主要有两期:第一期是  $K_1$  时期(雪山组沉积之后,大约125~84 Ma期间);第二期是  $N$  末至  $Q$  时期(约3.5 Ma以来),这两期之间可能还存在几期强度相对较小的构造运动。所以,三叠系—侏罗系烃源层可能具有二次或三次生烃过程。

### 4.2 烃源层热演化模式

QT盆地存在多期的构造抬升导致烃源层存在多期大幅沉降深埋与抬升剥蚀,不同构造部位沉降与抬升幅度具有明显差异(图5)。总体上构造运动最强烈及抬升剥蚀厚度最大发生在  $K_1$ — $K_2$  时期、 $N_2$  末至现今,烃源层两次最大深埋分别发生在  $J_3$ — $K_1$  雪山组沉积之后、古近系康托组( $E_1k$ )和新近系喷纳湖组( $N_1s$ )沉积之后。两期主力生烃期与这两次最大深埋及其随后的构造抬升(构造运动强烈期,盆地边缘尤其是盆地或坳陷边界断裂带附近非均衡构造应力及深成热流影响下,烃源层短时间内升温增熟)相适应。

#### 1) 北 QT 坳陷中西部长水河西剖面

$J_2b$  沉积后,  $T_3x$  烃源层进入生烃门限,此时古地温约75 °C,  $R_0=0.5\%$ 。 $J_2x$  沉积之后,  $T_3x$  烃源层随即进入生油高峰,此时  $R_0$  约为0.8%,此后一段时期烃源层开始大量生排烃,至  $J_3s$  沉积期,生烃强度达到最大为  $60 \times 10^4$  t/km<sup>2</sup>。随着烃源层的持续生烃,此后生烃强度逐渐降低,至  $K_1$  早期(此时  $R_0=1.3\%$ ,古地温约127 °C)生烃潜力已经很低(图6a)。

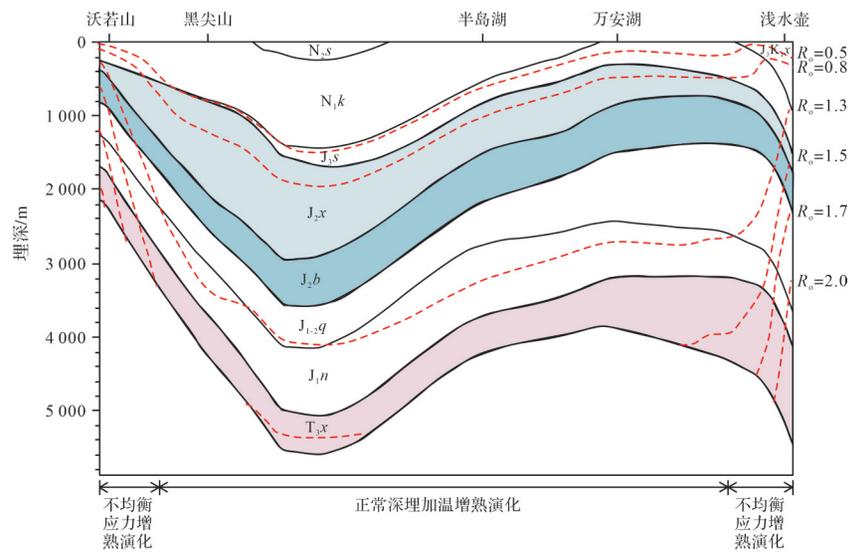


图5 QT盆地单剖面 $R_0$ -H曲线及其剥蚀厚度恢复

Fig.5  $R_0$ -H curve of single profile and restoration of erosion thickness in QT Basin

相对 $T_{3x}$ 烃源层而言, $J_{2b}$ 烃源层生烃则相对较晚。 $J_3$ 末— $K_1$ 初, $J_{2b}$ 烃源层才开始进入生烃门限,随着厚度较大的雪山组沉积( $J_3$ — $K_1x$ ), $J_{2b}$ 烃源岩快速深埋,至雪山组沉积结束时, $J_{2b}$ 进入生油高峰,该期

生烃强度相对较大。受燕山三幕构造抬升的影响,生烃曾一度停滞。 $K_2a$ (阿布山组)沉积之后, $J_{2b}$ 有过短期生排烃过程,但该阶段生烃强度较小。至新近纪,地层快速沉积沉降、深埋, $J_{2b}$ 再次生烃,但鉴于前

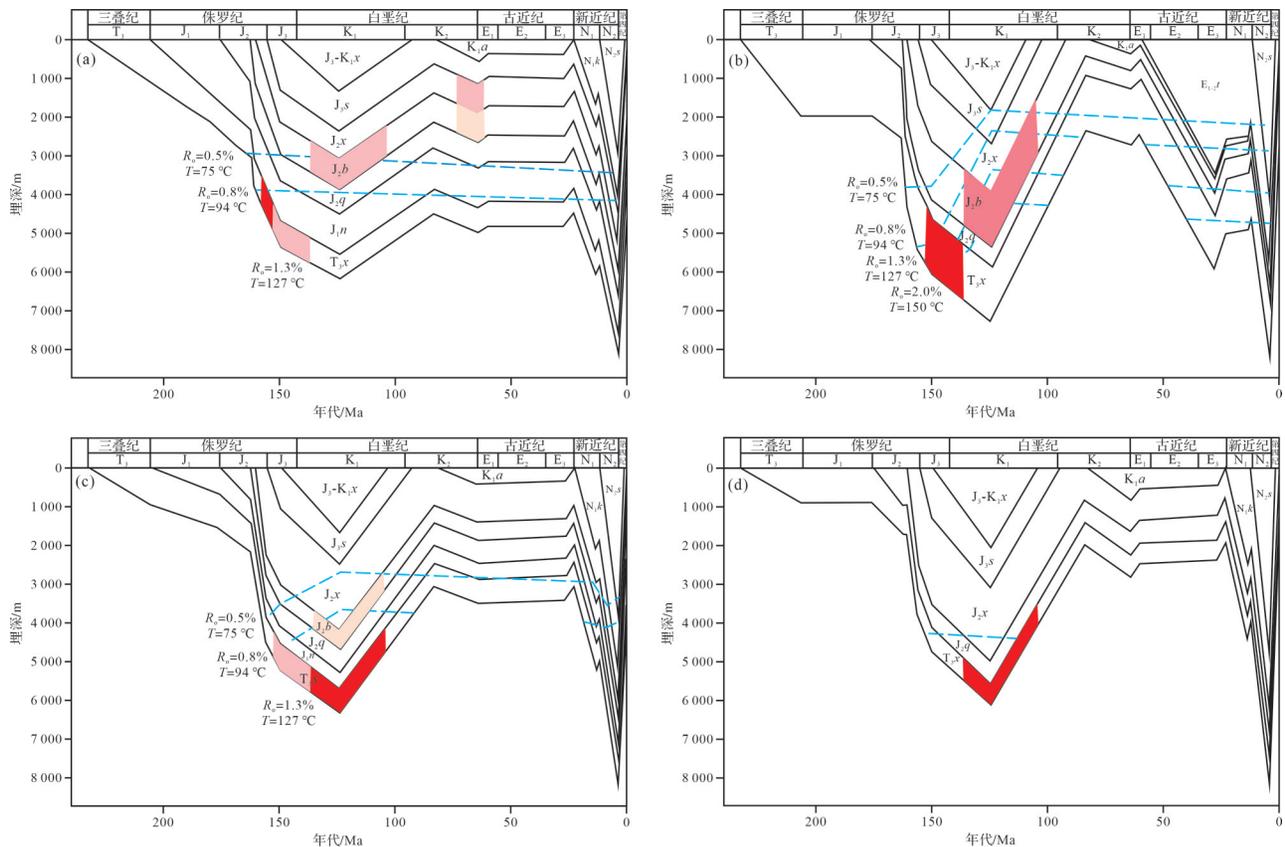


图6 QT盆地不同构造单元主力烃源岩生烃演化史

(a)北QT拗陷中西部长水河西剖面;(b)北QT拗陷东部雀莫错剖面;(c)北QT拗陷南缘那底岗日剖面;(d)中央隆起东部蒂让碧错剖面

Fig.6 Historical hydrocarbon generation evolution in main source rocks in tectonic units of QT Basin

期长时间的生排烃过程,该时期 $J_2b$ 生烃潜力已经很低,生烃强度较小。

相对于前两套烃源岩, $J_2x$ 烃源岩生烃最晚, $K_2$ 末期开始规模生烃,但早期生烃时间较短。受喜山运动影响, $E_1$ 中晚期— $N_1$ 早期生烃处于停滞状态,生烃潜力得以保持。受 $E_1k$ 和 $N_1s$ 巨厚沉积影响, $J_2x$ 再次快速深埋生烃,该期生烃强度较大。此后受后期强烈构造抬升,至现今生烃缓慢。

#### 2) 北QT坳陷东部雀莫错剖面

该剖面位于北QT坳陷东部地区,生烃演化史与长水河西剖面具有一定的相似性,即 $T_3x$ 、 $J_2b$ 烃源层主力生烃期均较早,在 $J_3$ — $K_1$ 即已发生大量生排烃过程。不同的是,后期尽管有 $E_{1-2t}$ — $N_2s$ 巨厚沉积的影响再次深埋,但生烃潜力已有限。生排烃过程集中在早期,就 $T_3x$ 烃源层而言, $J_3$ 开始大规模生烃,至 $K_1$ 时期生烃潜力即已趋于枯竭,该期生烃强度仍然较大,但生烃时限短。 $J_2b$ 烃源岩同样如此,大量生排烃期发生在 $K_1$ ,相对于 $T_3$ 烃源岩 $J_2b$ 烃源岩生烃强度要小(图6b)。

#### 3) 北QT坳陷南缘那底岗日剖面

该剖面位于北QT坳陷南缘、西部中央隆起北缘,生烃演化与前述两个剖面有一定的相似之处。 $T_3x$ 烃源层于中侏罗世末( $J_2$ 末)进入生烃门限,生烃之初生烃量极小。 $J_3$ 时期进入生油高峰( $R_o=0.8\%$ ),开始大规模生烃,生烃强度显著上升。至早白垩世( $K_1$ 时期)烃源层达高成熟阶段( $R_o>1.3\%$ ),生烃强度持续增大。至早白垩世晚期,生烃强度趋于降低,生烃潜力逐渐枯竭。 $J_2b$ 烃源岩生烃稍晚, $J_3$ 时期进入生烃门限( $R_o=0.5\%$ ),但此时生烃量较小。直至 $K_1$ 时期, $J_2b$ 进入生油高峰( $R_o=0.8\%$ ),发生大规模生排烃过程, $K_2$ 以后生烃潜力逐渐降低(图6c)。

#### 4) 中央隆起东部蒂让碧错剖面

中央隆起东部地区,现今残留的有效烃源岩为 $T_3x$ ,区域上广泛分布的 $J_2b$ 、 $J_2x$ 烃源岩在本区大部分地区已遭受剥蚀。 $T_3x$ 烃源层主力生烃期发生在 $K_1$ 时期(图6d)。

烃源层埋藏—热演化史、生烃史分析研究表明, $T_3x$ 烃源层生烃相对较早,于侏罗纪末期就已开始大量生烃,至早白垩世末,大规模生烃基本结束,此后相当长时期内为烃类相态转化阶段; $J_2b$ 烃源层于早白垩世开始大量生烃; $J_2x$ 烃源层生烃更晚,晚白垩世开始大量生烃,曾一度有过生烃停滞过程,新近纪末可能发生二次生烃过程,现今仍有持续生烃潜力。

## 5 结论

(1) QT盆地自晚三叠世以来经历了晚三叠世—早侏罗世(210~180 Ma)、早白垩世晚期—晚白垩世(125~84 Ma)、古新世—始新世早期(60~45 Ma)、中新世早期以来(25~ Ma)四期构造运动事件。早白垩世晚期—晚白垩世,盆地中央隆起带及其两侧、盆地东部地区剥蚀最强烈;北QT坳陷中—西部剥蚀相对较弱,地层保存最为完好,其次为南QT坳陷南部;早白垩世,是盆地主要抬升剥蚀的阶段,盆地平均剥蚀约3.8~4.5 km;古新世—始新世,在区域挤压应力背景下,平均抬升剥蚀约0.75 km;中新世早期逆断层活动普遍且较均匀,各处抬升速率较为接近,在一定程度上具整体抬升性质,盆地平均抬升剥蚀约1.13 km左右。

(2) 受地层沉积厚度、多期构造抬升差异性剥蚀等影响,QT盆地上三叠统一侏罗系烃源层两次最大深埋分别发生在 $J_3$ — $K_1$ 雪山组沉积之后、古近系E康托组及新近系N喷呐湖组沉积之后。两期主力生烃期与这两次最大埋深及其随后的构造抬升相对应。

(3)  $T_3x$ 烃源层生烃相对较早,成烃演化周期较长; $J_2b$ 、 $J_2x$ 烃源层生烃略晚,尤其 $J_2x$ 烃源层,地史时期曾有过生烃停滞过程,古近系沉积后进入二次生烃演化阶段,现今仍有持续生烃潜力。

致谢 本文研究过程中受到成都地调中心杨平教授和占王忠副教授在野外地质调查中给予的帮助,感谢编辑部老师和三位审稿专家的宝贵意见,在此一并感谢!

## 参考文献(References)

- 蔡占虎. 2014. 西藏南羌塘地区侏罗系地层特征及沉积环境分析[D]. 成都:成都理工大学. [Cai Zhanhu. 2014. Jurassic stratigraphic characteristics and sedimentary environment analysis in South Qiangtang region of Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology.]
- 陈文彬,廖忠礼,刘建清,等. 2010. 西藏南羌塘盆地侏罗系烃源岩地球化学特征[J]. 现代地质,24(4):654-661. [Chen Wenbin, Liao Zhongli, Liu Jianqing, et al. 2010. Geochemistry of the Jurassic source rocks in the South Qiangtang Basin, Tibet[J]. Geoscience, 24(4): 654-661.]
- 陈文西,王剑. 2009a. 晚三叠世—中侏罗世羌塘盆地的形成与演化[J]. 中国地质,36(3):682-693. [Chen Wenxi, Wang Jian. 2009a. The formation and evolution of the Qiangtang Basin during the Late Triassic-Middle Jurassic period in northern Tibet[J]. Geology

- in China, 36(3): 682-693. ]
- 陈文西, 王剑. 2009b. 藏北羌塘盆地晚三叠世地层特征与对比[J]. 中国地质, 36(4): 809-818. [Chen Wenxi, Wang Jian. 2009b. Correlation of Upper Triassic strata in Qiangtang Basin, northern Tibet [J]. Geology in China, 36(4): 809-818. ]
- 丁文龙, 李超, 苏爱国, 等. 2011. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩综合地球化学剖面研究及有利生烃区预测[J]. 岩石学报, 27(3): 878-896. [Ding Wenlong, Li Chao, Su Aiguo, et al. 2011. Study on the comprehensive geochemical cross section of Mesozoic marine source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in Qiangtan Basin, Tibeta[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(3): 878-896. ]
- 李德勇, 郭太宇, 姜效典, 等. 2015. 东海陆架盆地南部剥蚀厚度恢复及构造演化特征[J]. 石油与天然气地质, 36(6): 913-923. [Li Deyong, Guo Taiyu, Jiang Xiaodian, et al. 2015. Erosion thickness recovery and tectonic evolution characterization of southern East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 36(6): 913-923. ]
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等. 2021. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例[J]. 地质学报, 95(1): 194-213. [Li Haibing, Pan Jiawei, Sun Zhiming, et al. 2021. Continental tectonic deformation and seismic activity: A case study from the Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 194-213. ]
- 李亚林, 王成善, 黄继钧. 2008. 羌塘盆地褶皱变形特征、定型时间及其与油气的关系[J]. 石油与天然气地质, 29(3): 283-289, 296. [Li Yalin, Wang Chengshan, Huang Jijun. 2008. Deformation characteristics and finalizing age of the folds in the Qiangtang Basin and their relations to oil and gas accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 29(3): 283-289, 296. ]
- 秦建中. 2006a. 青藏高原羌塘盆地海相烃源层的沉积形成环境[J]. 石油实验地质, 28(1): 8-14, 20. [Qin Jianzhong. 2006a. Depositional environment of the marine hydrocarbon source rock in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1): 8-14, 20. ]
- 秦建中. 2006b. 青藏高原羌塘盆地中生界主要烃源层分布特征[J]. 石油实验地质, 28(2): 134-141, 146. [Qin Jianzhong. 2006b. Distributions of the main Mesozoic hydrocarbon source rocks in the Qiangtang Basin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Petroleum Geology & Experiment, 28(2): 134-141, 146. ]
- 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社: 184-251. [Wang Chengshan, Yi Haisheng, Li Yong, et al. 2001. The geological evolution and prospective oil and gas assessment of the Qiangtang Basin in northern Tibetan Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House: 184-251. ]
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 等. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 25(2): 139-143. [Wang Chengshan, Yi Haisheng, Liu Chiyang, et al. 2004. Discovery of paleo-oil-reservoir in Qiangtang Basin in Tibet and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 25(2): 139-143. ]
- 王剑, 丁俊, 王成善, 等. 2009a. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社: 164-422. [Wang Jian, Ding Jun, Wang Chengshan, et al. 2009a. Investigation and evaluation of strategic selection of oil and gas resources in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House: 164-422. ]
- 王剑, 付修根, 李忠雄, 等. 2009b. 藏北羌塘盆地胜利河—长蛇山油页岩带的发现及其意义[J]. 地质通报, 28(6): 691-695. [Wang Jian, Fu Xiugen, Li Zhongxiong, et al. 2009b. Discovery of the Shenglihe-Changsheshan oil shale belt in the Qiangtang Basin, northern Tibet, China and its significance[J]. Geological Bulletin of China, 28(6): 691-695. ]
- 王剑, 汪正江, 陈文西, 等. 2007. 藏北羌塘盆地那底岗日组时代归属的新证据[J]. 地质通报, 26(4): 404-409. [Wang Jian, Wang Zhengjiang, Chen Wenxi, et al. 2007. New evidences for the age assignment of the Nadi Kangri Formation in the North Qiangtang Basin, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(4): 404-409. ]
- 王丽波, 苏爱国, 郑有业, 等. 2012. 羌塘盆地中生界海相黑色泥页岩特征及页岩气远景区预测[J]. 地学前缘, 19(3): 264-279. [Wang Libo, Su Aiguo, Zheng Youye, et al. 2012. Characteristics of Mesozoic marine black shales and prediction of shale gas prospective area in Qiangtang Basin, Tibet[J]. Earth Science Frontiers, 19(3): 264-279. ]
- 王敏芳, 焦养泉, 黄传炎. 2005. 地层剥蚀量恢复方法浅述[J]. 承德石油高等专科学校学报, 7(4): 6-11. [Wang Minfang, Jiao Yangquan, Huang Chuanyan. 2005. Basic study on denuded strata recovery methods[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 7(4): 6-11. ]
- 王腾飞, 金振奎, 田甜, 等. 2019. 利用声波时差资料的剥蚀量恢复方法与实例[J]. 世界地质, 38(4): 1082-1090. [Wang Tengfei, Jin Zhenkui, Tian Tian, et al. 2019. Denudation recovering by interval transit-time: Principle and an example[J]. Global Geology, 38(4): 1082-1090. ]
- 伍新和, 张丽, 王成善, 等. 2008. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质, 29(3): 348-354. [Wu Xinhe, Zhang Li, Wang Chengshan, et al. 2008. Characteristics of the Mesozoic marine source rocks in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. Oil & Gas Geology, 29(3): 348-354. ]
- 吴珍汉, 姚建明, 季长军, 等. 2022. 羌塘北部胜利河地区液态原油及生烃史分析[J]. 地质学报, 96(11): 3698-3704. [Wu Zhenhan, Yao Jianming, Ji Changjun, et al. 2022. Crude oil and formation history of hydrocarbon in the Shenglihe area, northern Qiangtang Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 96(11): 3698-3704. ]
- 吴珍汉, 叶培盛, 胡道功, 等. 2011. 青藏高原羌塘盆地南部古近纪逆冲推覆构造系统[J]. 地质通报, 30(7): 1009-1016. [Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Hu Daogong, et al. 2011. Paleogene thrust system in southern Qiangtang Basin, central Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 30(7): 1009-1016. ]
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 等. 2021. 北羌塘凹陷沃若山及邻区海相烃源岩形成时代[J]. 地质学报, 95(2): 352-361. [Wu Zhenhan, Zhao

- Zhen, Ji Changjun, et al. 2021. Geological time of marine source rocks in the Wuruoshan Mountain and its adjacent areas, northern Qiangtang Depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 352-361. ]
- 许怀先,秦建中. 2004. 羌塘盆地中生界海相烃源层热演化史[J]. *石油勘探与开发*, 31(2): 59-63. [Xu Huaixian, Qin Jianzhong. 2004. Thermal evolution history of the Mesozoic marine source rock in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 31(2): 59-63. ]
- 徐旭辉,朱建辉,江兴歌,等. 2017. TSM盆地模拟原理方法与应用[J]. *石油实验地质*, 39(6): 729-737. [Xu Xuhui, Zhu Jianhui, Jiang Xingge, et al. 2017. Principle of TSM basin simulation system and its application[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(6): 729-737. ]
- 鄢伟,樊太亮,王宏语,等. 2012. 梨树断陷层关键不整合面特征及剥蚀量恢复[J]. *石油天然气学报*, 34(9): 12-17. [Yan Wei, Fan Tai-liang, Wang Hongyu, et al. 2012. Characteristics and denudation restoration of key unconformities in Lishu Fault Depression[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(9): 12-17. ]
- 袁玉松,郑和荣,涂伟. 2008. 沉积盆地剥蚀量恢复方法[J]. *石油实验地质*, 30(6): 636-642. [Yuan Yusong, Zheng Herong, Tu Wei. 2008. Methods of eroded strata thickness restoration in sedimentary basins[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(6): 636-642. ]
- 占王忠,谭富文. 2020. 羌塘盆地晚三叠世岩相古地理特征与烃源岩[J]. *沉积学报*, 38(4): 876-885. [Zhan Wangzhong, Tan Fuwen. 2020. Lithofacies palaeogeography and source rock of the Late Triassic in the Qiangtang Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(4): 876-885. ]
- 赵政璋,李永铁,叶和飞,等. 2001. 青藏高原中生界沉积相及油气储盖层特征[M]. 北京:科学出版社:78-79. [Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, et al. 2001. Mesozoic sedimentary facies and characteristics of oil and gas reservoirs and caps in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press: 78-79. ]
- 朱同兴,冯心涛,王晓飞,等. 2010. 青藏高原羌塘地区晚三叠世构造—古地理研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 30(4): 1-10. [Zhu Tongxing, Feng Xintao, Wang Xiaofei, et al. 2010. Late Triassic tectono-palaeogeography of the Qiangtang area on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(4): 1-10. ]
- Fu X G, Wang J, Zeng Y H, et al. 2009. Geochemical and palynological investigation of the Shengli River marine oil shale (China): Implications for paleoenvironment and paleoclimate[J]. *International Journal of Coal Geology*, 78(3): 217-224.
- Kapp P, DeCelles P G. 2019. Mesozoic-Cenozoic geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen and working tectonic hypotheses [J]. *American Journal of Science*, 319(3): 159-254.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3-14.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.

## Analysis of the Mesozoic-Cenozoic Uplift and Denudation and Restoration of Burial History of Upper Triassic-Jurassic Source Beds in the QT Basin

PENG JinNing<sup>1,2</sup>, MA ZeLiang<sup>1,2</sup>, LIU ZhongRong<sup>3</sup>, FAN ZhiWei<sup>3</sup>, ZHUANG XinBing<sup>1,2</sup>, LIU Xu<sup>1,2</sup>

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214126, China

2. SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu 214126, China

3. SINOPEC Exploration Company, Chengdu 610041, China

**Abstract:** [Objective] The QT Basin is located in the eastern segment of the Tethyan tectonic domain, the world's most important oil-gas accumulation zone. Due to the low degree of exploration in the basin, there has been great controversy over its hydrocarbon resource potential. Restoring the basin erosion amount and burial process during key tectonic periods is crucial for deepening the understanding of the hydrocarbon generation potential of major source rocks and the overall oil-gas resource potential in the QT Basin. [Methods] Using the tectono-sedimentary filling extrapolation method, we analyzed the major tectonic activity episodes of the QT Basin and restored the erosion

amount during key tectonic periods. Meanwhile, the burial processes of three sets of source rocks from the Upper Triassic to Jurassic were analyzed by the TSM basin simulation and resource evaluation system. [Results] (1) Since the Late Triassic, the QT Basin has experienced four phases of erosion events: Late Triassic-Early Jurassic (210-180 Ma), Early Cretaceous (120-110 Ma), Paleocene-Early Eocene (60-45 Ma), and since the Early Miocene (25 Ma - present). (2) During 210-180 Ma, the main part of the basin was uplifted, with intense erosion in the central uplift belt and the northern QT Depression; during 120-110 Ma, the strongest erosion occurred in the central uplift belt, its both sides and the eastern part of the basin, while the erosion in the mid-western part of the northern QT Depression was relatively weak; during 60-45 Ma, the average uplift and erosion of the basin was about 0.75 km; since ~25 Ma, the basin has shown an overall uplift characteristic. (3) Affected by sedimentary thickness, differential erosion during multi-stage tectonic uplift and other factors, the two maximum burial depths of the Upper Triassic-Jurassic source rocks in the QT Basin occurred after the deposition of the Xueshan Formation, and after the deposition of the Paleogene Kangtuo Formation and Neogene Suonahu Formation, respectively. The two major hydrocarbon generation periods correspond to the maximum burial depths and the subsequent tectonic uplift. (4) There are significant differences in the hydrocarbon generation evolution of the two sets of source rocks: the source rocks of the Xiaochaka Formation ( $T_{3x}$ ) generated hydrocarbons relatively early with a long hydrocarbon generation and evolution cycle; the source rocks of the Buqu Formation ( $J_{2b}$ ) and Xiali Formation ( $J_{2x}$ ) generated hydrocarbons relatively late. In particular, the  $J_{2x}$  source rocks once experienced a hydrocarbon generation stagnation during the geological history, entered the secondary hydrocarbon generation evolution stage after the Paleogene deposition, and still have continuous hydrocarbon generation potential at present. [Conclusions] The Upper Triassic-Jurassic source rocks in the QT Basin have experienced different uplift and erosion histories, and there are obvious differences in their hydrocarbon generation and evolution processes. Horizontally, the mid-western part of the northern QT Depression, where the strata are best preserved, has great resource potential and should be the favorable exploration area for the next step.

**Key words:** burial history; tectonic denudation; Upper Triassic; Jurassic; QT Basin