

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.594



银额盆地苏红图坳陷西部中生界烃源岩热演化史恢复

祁凯¹,任战利^{1,2*},崔军平^{1,2},陈志鹏¹,任文波¹

1. 西北大学地质学系, 陕西西安 710069

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 苏红图坳陷是位于银额盆地东北部的中生代断陷盆地, 含油气资源勘探潜力较大。利用研究区7口井的75个镜质体反射率资料, 分析了研究区中生界烃源岩热演化程度及分布特点, 银根组烃源岩处于未成熟—低成熟阶段, 苏红图组底部 R_o 分布在0.6%~1.2%, 凹陷中心巴音戈壁组底部 R_o 普遍大于1.1%。苏红图坳陷西部中生代以来的热历史恢复表明, 研究区现今地温梯度为34 °C/km, 晚白垩世地温梯度约为40.6~46.7 °C/km, 地温梯度从40~42 °C/km(135~110 Ma)增加到46~50 °C/km(110~103 Ma), 银根组沉积期(100~95 Ma)地温梯度达到最大, 为48~53 °C/km; 从乌兰苏海组沉积开始到现今, 地温梯度先增大到40~46 °C/km(92~80 Ma), 后逐渐降低为34 °C/km(80~0 Ma)。研究区早白垩世以来较高的地温场对油气生成、成藏起着重要的控制作用, 烃源岩均在乌兰苏海组沉积末期达到最大热演化阶段。

关键词: 热史恢复; 烃源岩热演化; 镜质体反射率; 中—新生代; 银额盆地; 石油地质; 构造。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2018)06-1957-15

收稿日期: 2018-01-04

Thermal History Reconstruction of Mesozoic Source Rocks in Western of Suhongtu Depression, Inner Mongolia, Northern China

Qi Kai¹, Ren Zhanli^{1,2*}, Cui Junping^{1,2}, Chen Zhipeng¹, Ren Wenbo¹

1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Suhongtu depression, located in the northeastern of Yin'e basin (Yingen-Ejinaqi basin), is a Mesozoic faulting-subsiding basin with large oil and gas resources. 75 vitrinite reflectance data from 7 wells in the study area are used to analyze the degree of thermal evolution of Mesozoic source rocks. The thermal evolution degree of source rocks in Yingen Formation is in immature to low mature stage. The vitrinite reflectance (R_o) data distribute in 0.6%–1.2% at the bottom of Suhongtu Formation, and they are generally greater than 1.1% at the bottom of Bayingebi Formation in the center of the sag. The results of Mesozoic and Cenozoic thermal history show that the present-day geothermal gradient is 34 °C/km, and approximately 40.6–46.7 °C/km in Late Cretaceous. The temperature gradient was 40–42 °C/km (135–110 Ma) and increased to 46–50 °C/km (110–103 Ma). Especially, during the deposition period of Yingen Formation (100–95 Ma), the geothermal gradient reached the maximum at about 48–53 °C/km. From the beginning of Wulansuhai Formation, the geothermal gradient gradually increased to 40–46 °C/km (92–80 Ma) and decreased to a present-day value of 34 °C/km (80–0 Ma) ultimately. The higher geothermal field has played an important role in controlling oil and gas generation and accumulation since the Early Cretaceous, and the source rocks have reached the maximum thermal evolution stage at the end of the sedimentary period of the Wulansuhai Formation.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.41630312); 国家科技重大专项(No.2017ZX05005002-008); 国家自然科学基金面上项目(No.41772121)。
作者简介: 祁凯(1993–), 男, 博士, 主要从事构造—热年代学及热演化研究。ORCID: 0000-0002-5883-0088. E-mail: 1150331820@qq.com

* **通讯作者:** 任战利, E-mail: renzhanli@nwu.edu.cn

引用格式: 祁凯, 任战利, 崔军平, 等, 2018. 银额盆地苏红图坳陷西部中生界烃源岩热演化史恢复. 地球科学, 43(6): 1957–1971.

Key words: thermal history reconstruction; thermal evolution of source rock; vitrinite reflectance; Mesozoic-Cenozoic; Yin'e basin; petroleum geology; tectonics.

0 序言

烃源岩热演化史及生烃史恢复一直是盆地分析及石油地质研究领域的热点及难点之一(赵重远等, 1990;任战利等, 2014b). 沉积盆地构造—沉积演化控制着盆地沉积—沉降的快慢、抬升剥蚀量的大小、烃源岩的形成、分布, 盆地热历史则与烃源岩的成熟演化、油气的生成与排烃历史密切相关(邱楠生, 2005; Qiu *et al.*, 2010; Sahu *et al.*, 2013; 任战利等, 2014a). 基于盆地构造演化与热历史研究的烃源岩热演化史及生烃史恢复可以确定烃源岩演化的阶段、油气生成的时间、生成的速率及累积量, 进而估算盆地油气资源量(Kosakowski *et al.*, 2013; 任战利等, 2015; 刘一茗等, 2017).

银根—额济纳旗盆地(简称银额盆地), 位于内蒙古自治区西部, 是中生代以来形成的断陷盆地, 长期以来受自然条件的影响, 盆地地质勘查程度低, 研究程度较为薄弱. 近年来, 随着我国石油勘探开发力度的加大, 在银额盆地东部及西部均取得了良好的含油气显示, 展示了银额盆地中生界具有良好的资源前景(牛子铖等, 2016). 苏红图坳陷, 位于银额盆地东北部, 由多个次级凹陷组成, 其中在西部的哈日凹陷已经发现了具有商业价值的油气藏, YHC-1 井在早白垩世巴音戈壁组 2 946~2 951 m 试气获得 $9.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流(Yang *et al.*, 2017).

然而, 在油气勘探过程中, 还存在着一系列问题, 油气资源在苏红图坳陷分布不均, 主要聚集在西部的哈日凹陷, 而在其他凹陷均未见好的油气显示. 苏红图坳陷研究程度低, 前人主要对研究区地层分层、盆地火山岩的形成及意义、构造特征与演化、油气地质特征和成藏条件等方面做过少量研究(钟福平等, 2014; 陈治军等, 2016; 王香增等, 2016; 白晓寅等, 2017; 卢进才等, 2017; 赵春晨等, 2017), 缺乏对盆地热历史、烃源岩演化程度、热演化史及生烃史方面的研究, 这极大地限制了理解研究区烃源岩成熟过程、生排烃时间、不同凹陷热演化的差异及油气资源勘探潜力.

因此, 本文研究主要集中在 3 个方面: 利用研究区多口井的镜质体反射率资料, 结合区域地层构造埋深, 分析了苏红图坳陷西部中生界烃源岩热演化程度及分布特点; 基于镜质体反射率(R_o)最大古地

温分析及现今地层测温, 结合热史模拟, 恢复了研究区中生界以来的热历史; 以研究区构造演化、剥蚀厚度作为重要约束条件, 建立典型井位(YHC-1、YBC-1)的地层埋藏史模型, 结合热史模型、不同层位烃源岩地化参数, 对苏红图坳陷西部中生界烃源岩层位的热演化史及生烃史进行模拟, 分析研究区不同凹陷构造—沉积过程、古地温演化、油气热演化的阶段及油气生成时间, 综合讨论研究区热历史与烃源岩热演化过程、热演化与油气分布的关系, 为区域油气勘探提供依据.

1 地质背景

苏红图坳陷(东经: $102^\circ 05' \sim 106^\circ 00'$; 北纬: $40^\circ 50' \sim 41^\circ 50'$)位于银额盆地东北端, 北部为洪格尔吉山隆起, 南部为宗乃山隆起, 是银额盆地二级构造单元(图 1a), 由多个次级的凹陷及凸起组成, 呈现“凹隆相间”的构造格局. 研究区位于苏红图坳陷西部, 区内主要凹陷包括: 哈日凹陷、巴北凹陷、巴南凹陷及乌兰凹陷. 凹陷形态以单断、双断式箕状凹陷为主, 表现为对称式(图 1b). 哈日凹陷为东深西浅, 巴北凹陷和乌兰凹陷表现为西深东浅, 反映为 NW 向和 SE 向的拉张断陷作用的特征. YHC-1 井及 YBC-1 井分别位于苏红图坳陷西部哈日凹陷及巴北凹陷(图 1a), 是延长油田在探区里部署的第一批参数井.

研究区处于四大板块(塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚和华北板块)结合部位, 构造位置特殊, 具有复杂多变的构造背景, 是形成于古生代褶皱基底上的中生代断陷盆地, 古生代主要以海相沉积为主, 中生代以陆相沉积为主, 可以划分为 5 个演化阶段(赵春晨等, 2017): (1) 三叠纪. 受印支运动影响, 以区域性的地壳隆升为主, 大多地区未沉积或遭受后期剥蚀, 缺少三叠系, 同时伴有强烈的火山活动; (2) 晚三叠纪—早侏罗世. 开始进入张扭应力作用下的断陷盆地初始发育阶段, 发育规模较小(刘春燕等, 2006; 王香增等, 2016), 仅在银额盆地西北向居延海及南部商丹等地形成断陷, 研究区缺少这一时期沉积物; (3) 晚侏罗世. 发生了区域性的构造挤压及抬升剥蚀, 与上覆白垩系为不整合接触; (4) 早白垩世. 为断陷盆地发育的鼎盛阶段, 此时断层活动强烈, 火山作

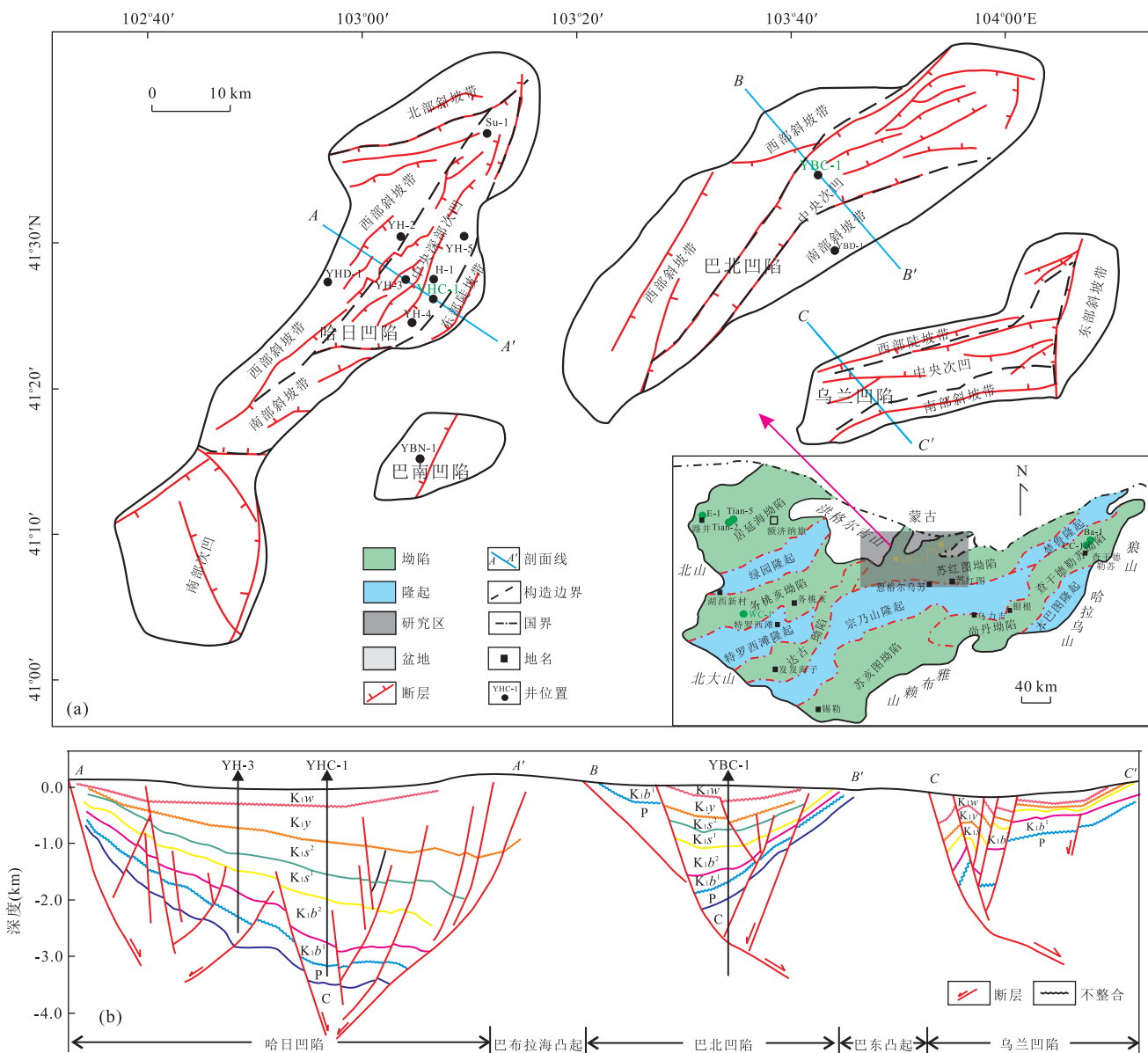


图 1 研究区构造位置

Fig.1 Tectonic location of the study area

a.银额盆地苏红图坳陷西部构造分区及钻井位置;b.AA'-BB'-CC'构造剖面

用频繁,沉积范围不断扩大,水体逐渐加深,在断陷中心形成巨厚沉积,早白垩世末,研究区局部隆升;(5)晚白垩世.盆地整体坳陷沉降,沉积范围再次扩大,晚白垩世以后,研究区全面隆升,直至今今。

苏红图坳陷主要沉积地层包括:下白垩统巴音戈壁组、苏红图组、银根组,上白垩统乌兰苏海组(图 1b,图 2)。研究区中生界烃源岩较发育,主要为暗色泥岩(泥岩、页岩、灰质泥岩、凝灰质泥岩、含膏泥岩粉砂质泥岩和砂质泥岩),局部地区还存在暗色碳酸盐岩(灰岩和白云岩)。烃源岩发育层位在不同凹陷存在一定的差异,哈日凹陷主要烃源岩层段包括:巴

音戈壁组一段、二段、苏红图组二段、银根组(表 1)。巴音戈壁组一段暗色泥岩平均厚度约为 150 m, TOC 含量分布在 0.06%~1.71%,平均为 1.12%,有机质类型以 II₁-II₂ 为主,为主要生油层段之一;巴音戈壁组二段暗色泥岩平均厚度大于 300 m, TOC 含量分布在 0.20%~1.15%;苏红图组二段暗色泥岩厚度介于 85~578 m, TOC 含量分布在 0.82%~2.10%,平均为 1.39%,有机质类型以 I、II₁、II₂ 型为主,整体处于好的生油岩范围;银根组暗色泥岩厚度较大,分布在 200~600 m, TOC 含量普遍大于 1.0%,平均为 2.75%,有机质类型偏腐泥

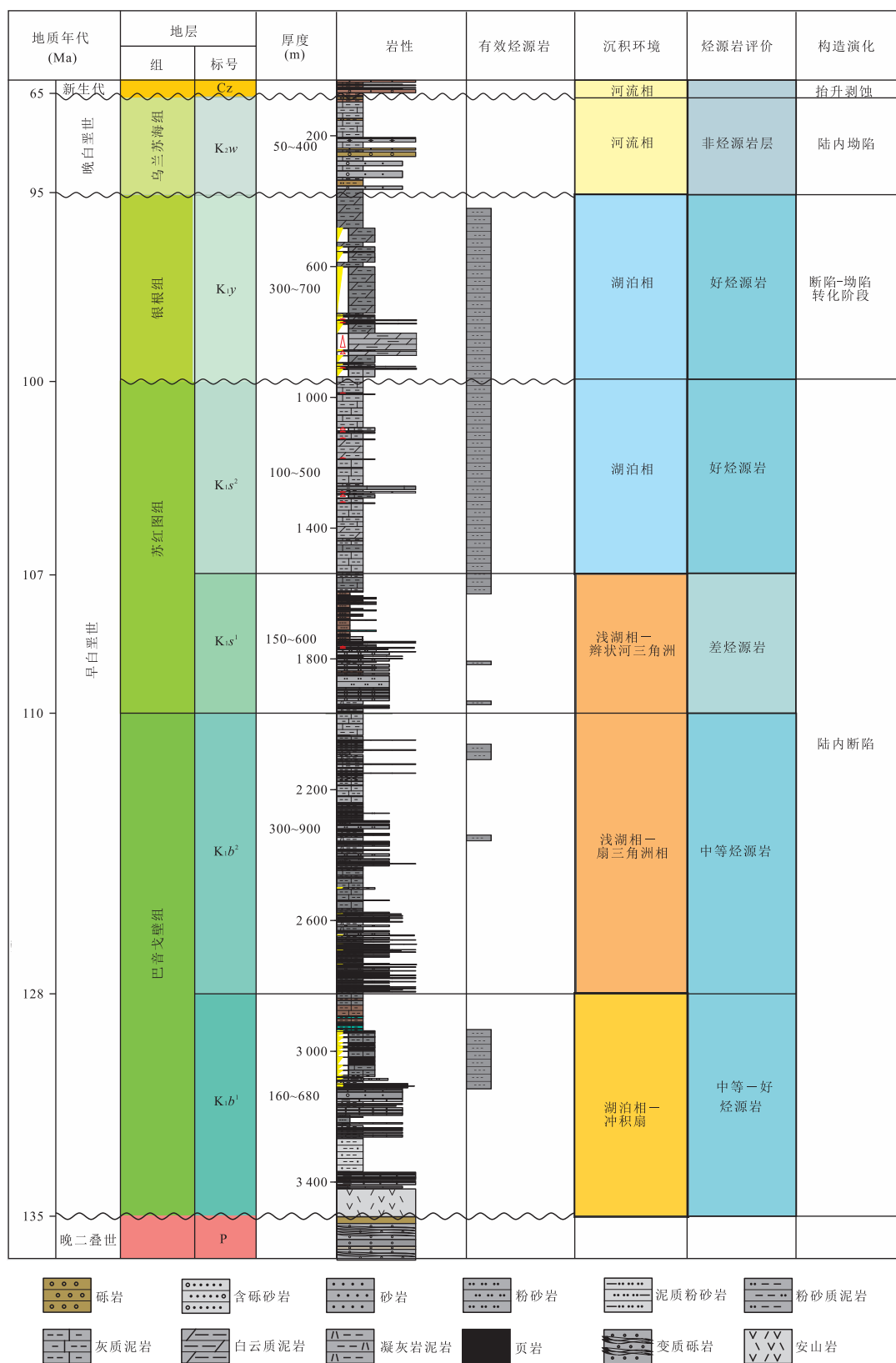


图 2 苏红图拗陷西部地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column in the western Suhongtu depression

图中烃源岩评价主要依据哈日凹陷有机质丰度 TOC(%), 氯仿沥青“A”(%)及 S₁+S₂ (mg/g)

表 1 苏红图坳陷西部延长探区烃源岩有机地化统计

Table 1 Comprehensive evaluation results of Lower Cretaceous source rocks in the western Suhongtu depression

烃源岩 层位	哈日凹陷						巴北凹陷					
	TOC(%)	“A”(%)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	R _o (%)	有机质类型	综合评价	TOC(%)	“A”(%)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	R _o (%)	有机质类型	综合评价
K _{1y}	1.43~4.48 2.75(416)	0.56(2)	7.97~28.77 18.59(512)	0.58	I / II ₁	好	0.02~1.34 0.47(4)	/	0.04~2.20 0.90(8)	0.44	I / II ₁	差
K _{1s} ²	0.82~2.1 1.39(354)	0.08(2)	2.48~11.28 6.69(335)	0.75	I / II ₁ / II ₂	好	0.01~1.04 0.29(44)	0.003(1)	0.1~1 0.45(68)	0.66	II ₂ / III	非
K _{1s} ¹	0.12~1.24 0.56(222)	0.02(3)	0.84~4.5 2.49(164)	0.82	II ₁ / II ₂	差	0.06~0.99 0.24(54)	0.005(2)	0.08~1.12 0.48(67)	0.81	II ₂ / III	非
K _{1b} ²	0.20~1.15 0.62(386)	0.06(10)	0.43~4.68 2.78(246)	1.03	II ₁ / II ₂	中等	0.06~1.29 0.38(64)	0.13(4)	0.10~13.54 1.77(78)	0.87	II ₁ / II ₂	差-中等
K _{1b} ¹	0.06~1.71 1.12(145)	0.08(15)	0.40~7.11 3.34(162)	1.19	II ₁ / II ₂	中等-好	0.05~0.54 0.20(82)	0.005(4)	0.1~1.7 0.55(114)	1.24	II ₁ / II ₂	非

注: TOC 和 S₁ + S₂ 横线下为平均值及数据个数.

型,为 I - II₁ 型.巴北凹陷烃源岩相对哈日凹陷发育较差,主要烃源岩层位包括巴音戈壁组二段及银根组(表 1).银根组暗色泥岩厚度在 100 m 左右,TOC 平均值为 0.47%,有机质类型偏腐泥型,以 I - II₁ 型为主;巴音戈壁组二段暗色泥岩厚度在 300 m 左右,平均 TOC 为 0.38%,局部层段有机质丰度较高,约 100 m,可能为潜在生油岩段.

2 方法与参数选择

2.1 盆地热史恢复及烃源岩热演化-生烃史重建原理及方法

盆地现今地温场特征及热历史是决定烃源岩热演化过程的关键因素(任战利,2000;任战利等,2014b),应用了叠合盆地古地温场叠加与改造的思路.首先,在研究区地质演化历史研究的基础上,利用古温标及热史模拟结合的方法研究盆地中生代以来的热历史;其次,以地层厚度、沉积年代、岩性数据、关键时期剥蚀厚度等作为重要约束条件,利用模拟软件建立苏红图坳陷典型井位的地层埋藏史模型,再结合地温场参数及实测烃源岩地化参数,应用 BasinMod 盆地模拟软件,采用 EASY%Ro 法进行热史模拟(Opera *et al.*,2013),不断调整参数,使模拟镜质体反射率与实测 R_o 一致,进而建立典型井(YHC-1、YBC-1)烃源岩热演化史及生烃史模型,揭示油气热演化的阶段及油气生成、排出时间.

2.2 参数选择

2.2.1 古温标 笔者收集了研究区已有 7 口井的

75 个镜质体反射率数据,绘制了不同井反射率 R_o 与深度的关系(图 3),从图 3 中可以看出,各个井反射率 R_o 与深度的线性指数关系较好,随着埋深的增加,镜质体反射率逐渐连续增大,呈“一段式”分布,各沉积界面之间不存在突变,反射率的大小主要受最大地层温度及埋藏深度控制.两口典型井

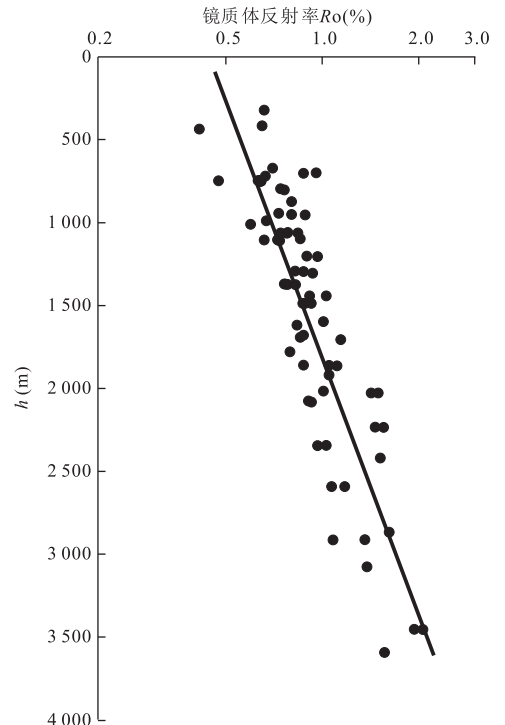


图 3 银额盆地苏红图坳陷西部 R_o-h 关系

Fig.3 Vitrinite reflectance data(R_o) versus depth in the western Suhongtu depression

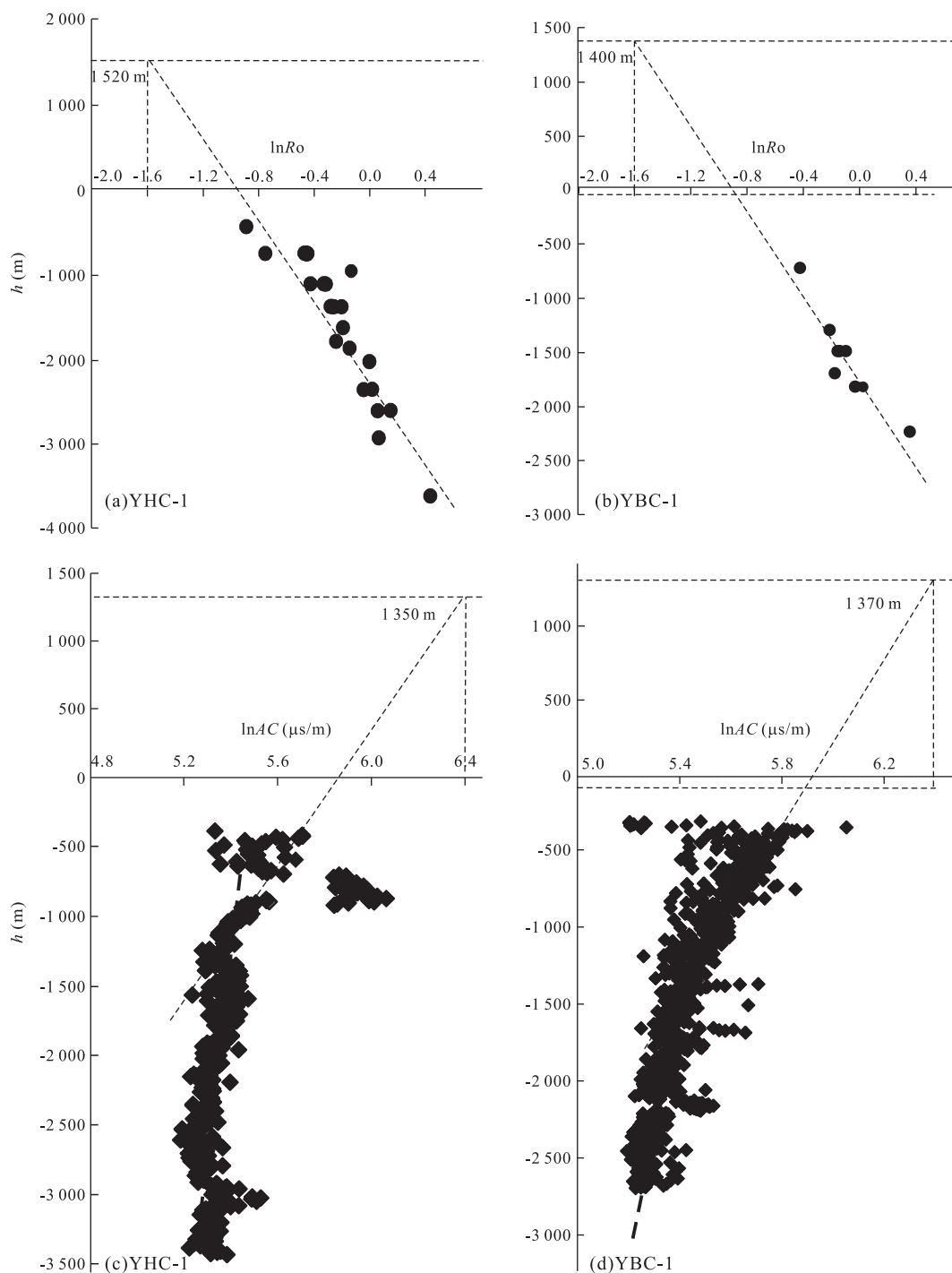


图 4 利用镜质体反射率、声波时差法推算 YHC-1、YBC-1 剥蚀厚度

Fig.4 Calculated erosion thickness using vitrinite reflectance and mudstone acoustic travel time from YHC-1 and YBC-1 wells

(YHC-1、YBC-1) R_o 数据较全且随深度连续分布, 可以被用来重建研究区热历史、烃源岩热演化史及生烃史。

2.2.2 基本地质参数 主要包括地层数据(分层数据)、岩性数据(岩石类型、密度等)、岩石热物理参数(热导率、生热率)、烃源岩地化参数(有机质丰度 TOC、有机质类型、氢指数 I_H 等), 其中岩石热物理

参数主要借鉴邻区查干凹陷的分析结果(Zuo *et al.*, 2015), 其他参数均来自延长油田实际勘探及分析资料, 模拟地层年龄以《国际地层表》为标准并借鉴研究区具体地层的沉积年龄。

2.3 约束条件

2.3.1 剥蚀厚度恢复 剥蚀厚度的恢复是建立埋藏史模型的重要前提。早白垩世以来, 研究区经历过多

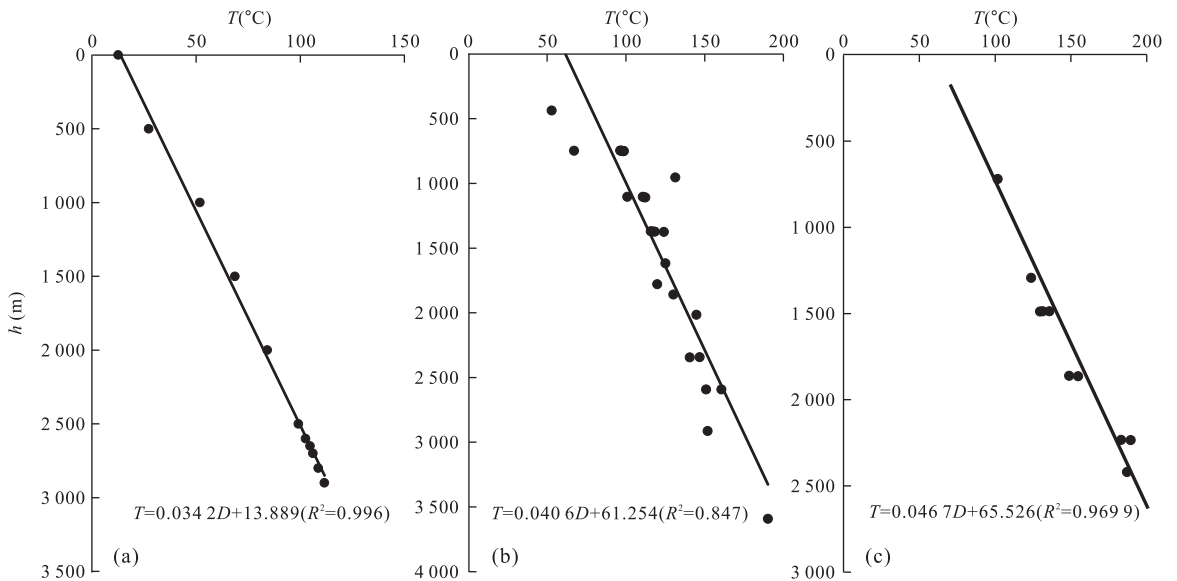


图5 银额盆地苏红图坳陷 YHC-1、YBC-1 井地温场特征

Fig.5 Characteristics of geothermal field in the western Suhongtu depression

a. YHC-1 井现今地温梯度; b. YHC-1 井最大古地温梯度; c. YBC-1 井最大古地温梯度

次抬升剥蚀,造成了早白垩世苏红图组顶部、银根组顶部及晚白垩世乌兰苏海组顶部 3 个不整合面,其中,晚白垩世以来的构造抬升(80~0 Ma)对研究区影响较大,地层发生大规模抬升剥蚀,缺少第三纪沉积地层,并导致乌兰苏海组现今残留地层厚度较薄。

镜质体反射率 R_o 法及泥岩声波时差法通常被用来恢复地层剥蚀厚度。 R_o 可以记录地质历史时期地层达到的最高古地温,其热演化过程具有不可逆性(胡圣标等,1999),利用 $\ln R_o-h$ 线性关系,将间断面之下地层中保留下来的剥蚀前成熟度剖面趋势线,上延至古地表附近的 R_o 最小值,即 0.20% 处,则该点在成熟度剖面中所代表的深度值与间断面深度的差值即为地层剥蚀厚度(佟彦明等,2005)。 R_o 数据暗示研究区经历的最大古地温是在乌兰苏海组沉积之后达到的,因此它可以被用来推算乌兰苏海组(95~80 Ma)沉积之后的剥蚀厚度。声波时差法原理与 R_o 法类似,适用于剥蚀后沉降未对早期(不整合面以下)地层压实规律造成破坏的地质条件(付晓飞等,2004;周路等,2007),根据苏红图坳陷构造演化过程,晚白垩世以后,研究区基本处于抬升过程,新生代沉积厚度在 0~50 m,厚度远小于不整合面的剥蚀厚度。因此,声波时差法在研究区也适用。

YHC-1 井镜质体反射率(对数)与深度的线性关系明显(图 4),取地表 $\ln R_o$ 为 -1.6% 时,对应的晚白垩世以来的剥蚀厚度为 1 520 m 左右,YBC-1 井为 1 400 m 左右,YHC-1 井利用声波时差法恢复

晚白垩世以来的剥蚀厚度为 1 350 m,YBC-1 井为 1 370 m,声波时差与镜质体反射率恢复的结果相接近,结果较为可信。此外,受方法和埋深条件限制,研究区在最大古地温及埋深之前的不整合面剥蚀厚度难以恢复,通过收集研究区相关剥蚀厚度资料(Zuo *et al.*,2015,2016),并结合不同剖面地层厚度展布趋势进行推测,早白垩世苏红图组与银根组、银根组与晚白垩世乌兰苏海组的剥蚀厚度分别为 350 m 和 450 m。

2.3.2 现今地温梯度 现今地温也是古地温场演化的最后一幕,是重建古地温演化史的基础。刻画现今地温场的物理量主要包括地层温度、地温梯度和大地热流分布特征等,常见的地温数据可分为钻孔系统连续测温、地层试油温度(drill stem testing, DST)、孔底温度(bottom hole temperature, BHT)、地层随压测试温度(modular dynamics formation tester, MDT)等。上述各类温度数据中,系统连续测温数据、DST 以及 MDT 数据比较可靠,它们构成了盆地地温场研究的主要数据。本次采用 YHC-1 井试气过程中实测的静温数据,获得了 YHC-1 井现今地温梯度约为 34.2 °C/km(图 5a),地层平均热导率取 2.15 W·m⁻¹·K(Zuo *et al.*,2015,2016),计算大地热流为 73.1 mW/m²,研究区现今地表及古地表温度约为 9 °C。现今地温场研究结果与银额盆地其他坳陷及相邻盆地较为一致,银额盆地查干凹陷平均现今地温梯度为 33.6 °C/km(左银辉等,2013;

Zuo *et al.*, 2016), 二连盆地约为 35.0 °C/km(任战利等, 2000).

2.3.3 古地温梯度恢复 研究区中生代沉积较厚, 大约在晚白垩世 80 Ma 达到最大埋深, 图 5 反映了研究区地层在晚白垩世达到最大埋深时的古地温场状况, 根据推算过来的镜质体反射率值, 采用 Barker & Pawlewicz 法, 即最大埋藏温度 (T_{max}) 与平均镜质体反射率之间的关系式:

$$\ln R_o = 0.0096 T_{max} - 1.4, \quad (1)$$

公式(1)得到研究区两口井最大古温度与深度的关系, 近似地求得 YHC-1 晚白垩世古地温梯度约为 40.6 °C/km, YBC-1 井约为 46.7 °C/km(图 5b, 5c), 均高于现今地温梯度.

3 结果

3.1 现今热演化程度及其分布

根据不同井镜质体反射率与深度的关系, 推算出不同界面反射率的大小, 参考研究区地层构造埋深等值线图, 编制了银根组底部、苏红图组底部、巴

音戈壁组底部 R_o 平面分布图(图 6). 从图 6 中可以看出: 银根组热演化程度不高, R_o 从 0.5% 以下到 0.8% 均有分布, 处于未成熟—低成熟阶段, 沉积中心烃源岩已进入生烃门限, R_o 等值线呈 NE 向条带分布, 绝大多数地区 R_o 小于 0.7%, 仅在 YH-5 井区附近, 演化程度相对变高(图 6a). 苏红图组烃源岩普遍已经处于成熟阶段, 底部 R_o 分布在 0.6% ~ 1.2%, R_o 等值线呈 NE 向分布, 演化高的地区分布于凹陷沉积的最深处, 位于 YHC-1 井、YH-5 井一带(图 6b). 巴音戈壁组底部 R_o 普遍大于 0.9%, 仅在盆地边缘部, 热演化程度相对较低, 在哈日凹陷、巴北凹陷及乌兰凹陷主要沉积中心, 热演化程度普遍大于 1.1%, 整体处于中成熟—高成熟演化阶段, 凹陷中心烃源岩已进入热裂解生湿气阶段(图 6c).

3.2 沉积埋藏史分析

沉积埋藏史分析可以为盆地动力学演化提供一定的信息(Rudnick *et al.*, 1998; Qiu *et al.*, 2014). 基于 Sclater and Christie(1980) 提出的压实模型, 恢复了苏红图坳陷两口典型井(YHC-1、YBC-1) 的沉积埋藏历史, 并分析了研究区不同时期沉积速率的变化过程.

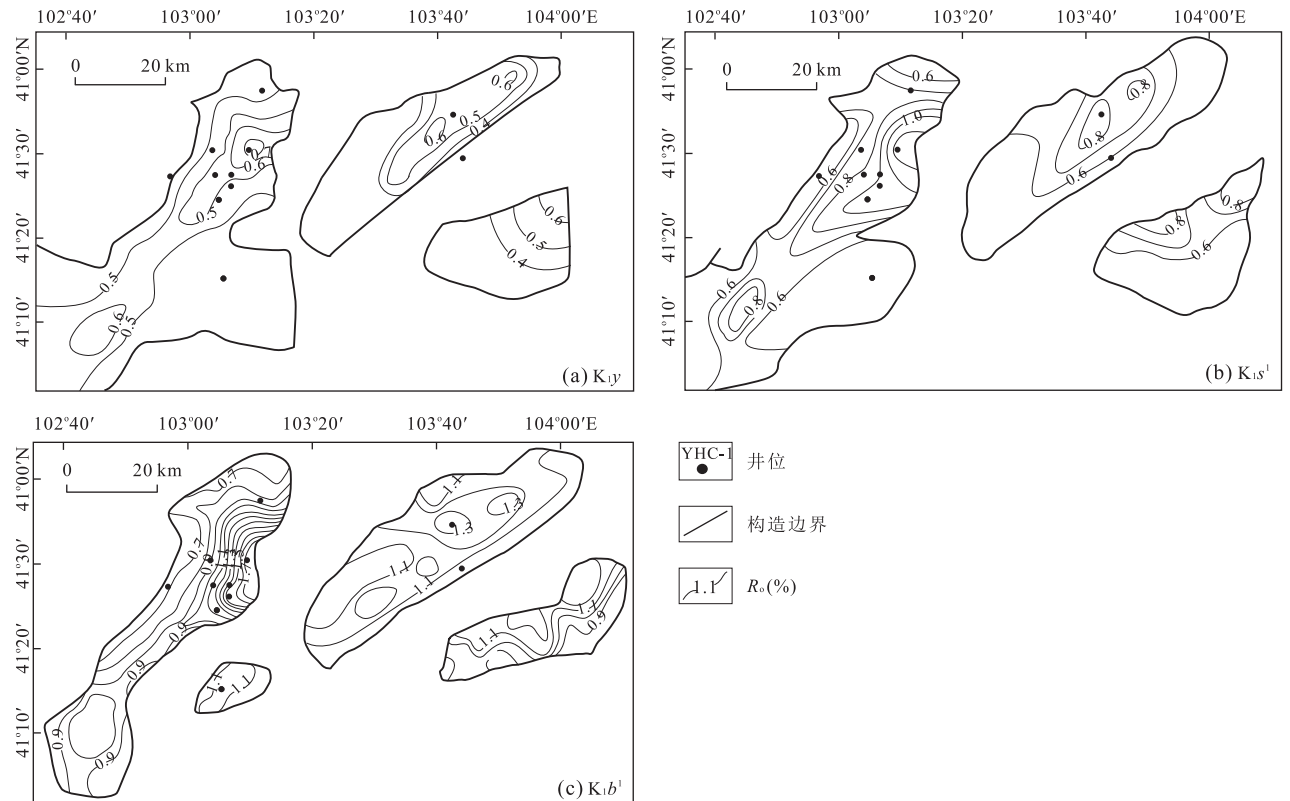


图 6 银额盆地苏红图坳陷西部不同层位镜质体反射率 R_o 等值线平面分布

Fig.6 Vitrinite reflectance isopach maps of the different formations in the western Suhongtu depression
a. 银根组底部等值线图; b. 苏红图组底部; c. 巴音戈壁组底部

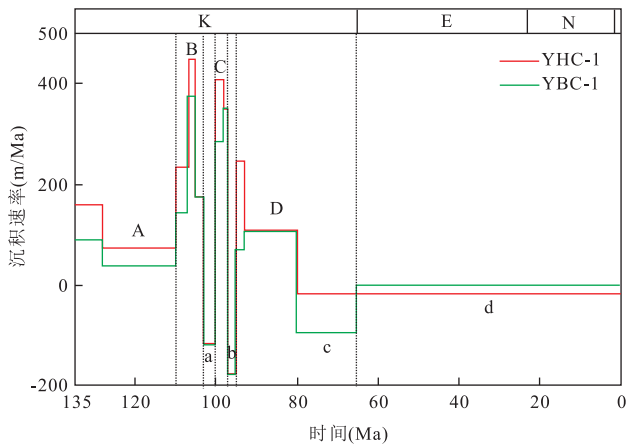


图 7 银额盆地苏红图坳陷西部 YHC-1、YBC-1 井沉积速率演化
Fig. 7 Sedimentary rate evolution history of YHC-1, YBC-1 in the western of Suhongtu depression
大写字母(A,B,C,D)代表沉积阶段;小写字母(a,b,c,d)代表剥蚀阶段

结果表明, YHC-1、YBC-1 井早白垩世以来具有相似的沉积—沉降过程, 整体上与初始断陷发育到随后长期的热沉降的构造背景一致, 依据埋藏史模型及沉积速率的变化过程, 将研究区中生代构造演化过程分为 4 个沉降阶段及 4 次剥蚀改造阶段, 断陷盆地形成初期(135~110 Ma), 为第一期沉降阶段(图 7:A), 沉积速率相对不大, YHC-1、YBC-1 井沉积速率分别约为 90 m/Ma、50 m/Ma; 接着发生第二期盆地快速沉降(110~103 Ma)(图 7:B), 此时断层活动幅度加强, 沉积速率明显加大, YHC-1、YBC-1 井最大沉积速率分别约为 450 m/Ma、300 m/Ma; 第一次剥蚀阶段发生在苏红图组沉积末期(图 7:a; 103~100 Ma), 剥蚀厚度约为 350 m; 第三期盆地快速沉降发生在银根组沉积时期(图 7:C; 100~97 Ma), 沉积速率也相对较大, 银根组沉积末期(97~95 Ma)发生了第二次抬升剥蚀, 造成上下白垩统之间的区域不整合, 剥蚀厚度约为 450 m; 晚白垩世开始, 盆地开始了坳陷演化阶段, 95~80 Ma 为第四期沉降阶段(图 7:D), 沉积速率不大, 约为 100 m/Ma, 晚白垩世之后, 盆地整体抬升, 发生大规模抬升剥蚀, 80~65 Ma 剥蚀速率较大, 剥蚀厚度在 1 400 m 左右(图 7:c), 65~0 Ma, 盆地发生微弱抬升(图 7:d). 整体来看, 研究区中生界沉积速率较大, 各井沉积速率演化趋势基本类似, 但沉积量变化较大, 且不同时期存在差异, 呈现一定的阶段性, 主要是与盆地整体拉张断陷作用过程中, 控凹断陷阶段性活动有关。

3.3 热历史恢复结果

在前文最大古地温恢复的基础上, 利用 Ba-

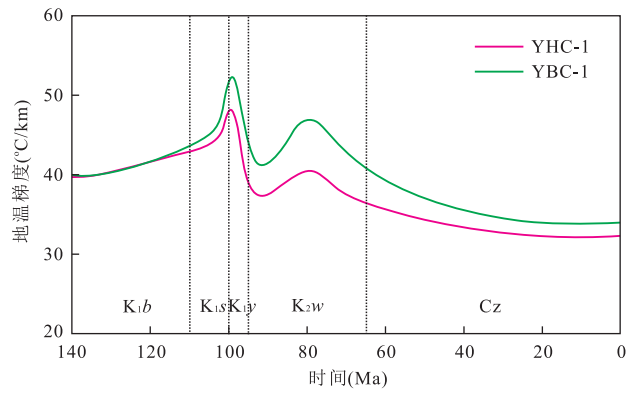


图 8 银额盆地苏红图坳陷 YHC-1、YBC-1 井地温梯度演化历史
Fig. 8 Thermal gradient evolution history of the studied wells in the Suhongtu depression

sinMod 模拟软件, 微调地温场参数, 最终得到研究区地温梯度演化模型(图 8)及热史演化过程(图 9). 自白垩世开始, 受断陷盆地拉张作用的影响, 研究区地温梯度开始增大, 巴音戈壁组沉积期(135~110 Ma), 地温梯度约为 40~42 °C/km; 苏红图沉积时期(110~103 Ma), 地温梯度增加速率加快, 沉积末期达到 46~50 °C/km; 到银根组沉积期(100~95 Ma), 地温梯度达到最大, 为 48~53 °C/km; 随后, 受早白垩世末期构造抬升影响, 地温梯度急剧下降, 从乌兰苏海组沉积开始, 地温梯度先增大到 40~46 °C/km(92~80 Ma), 后逐渐降低, 到现今地温梯度为 34 °C/km(80~0 Ma). 古地温场演化恢复的结果与前人通过裂变径迹法获得研究区的古地温场特征基本一致(Zuo *et al.*, 2017), 表明结果较为可信. 热史演化过程表明(图 9), 在晚白垩世末(85~80 Ma), 古地温达到最大值, 巴音戈壁组底部温度在 170~190 °C, 古地温大小主要受地温梯度及埋藏深度影响。

3.4 烃源岩热演化史及生烃史分析

在埋藏史、热史恢复的基础上, 结合烃源岩地化指标(HI、TOC 和干酪根类型), 应用 BasinMod 盆地模拟软件, 建立 YHC-1、YBC-1 烃源岩热演化史及生烃史模型, 模拟的 R_o 值与实测 R_o 值吻合度较高, 表明结果可信. 此外, 对研究区不同层位烃源岩生烃史、油气生成速率及累积产量演化历史进行了分析。

3.4.1 哈日凹陷 从 YHC-1 热演化史图可以看出(图 9), 巴音戈壁组一段底部烃源岩在 116 Ma 左右进入生烃门限, R_o 达到 0.5%; 110 Ma, R_o 达到

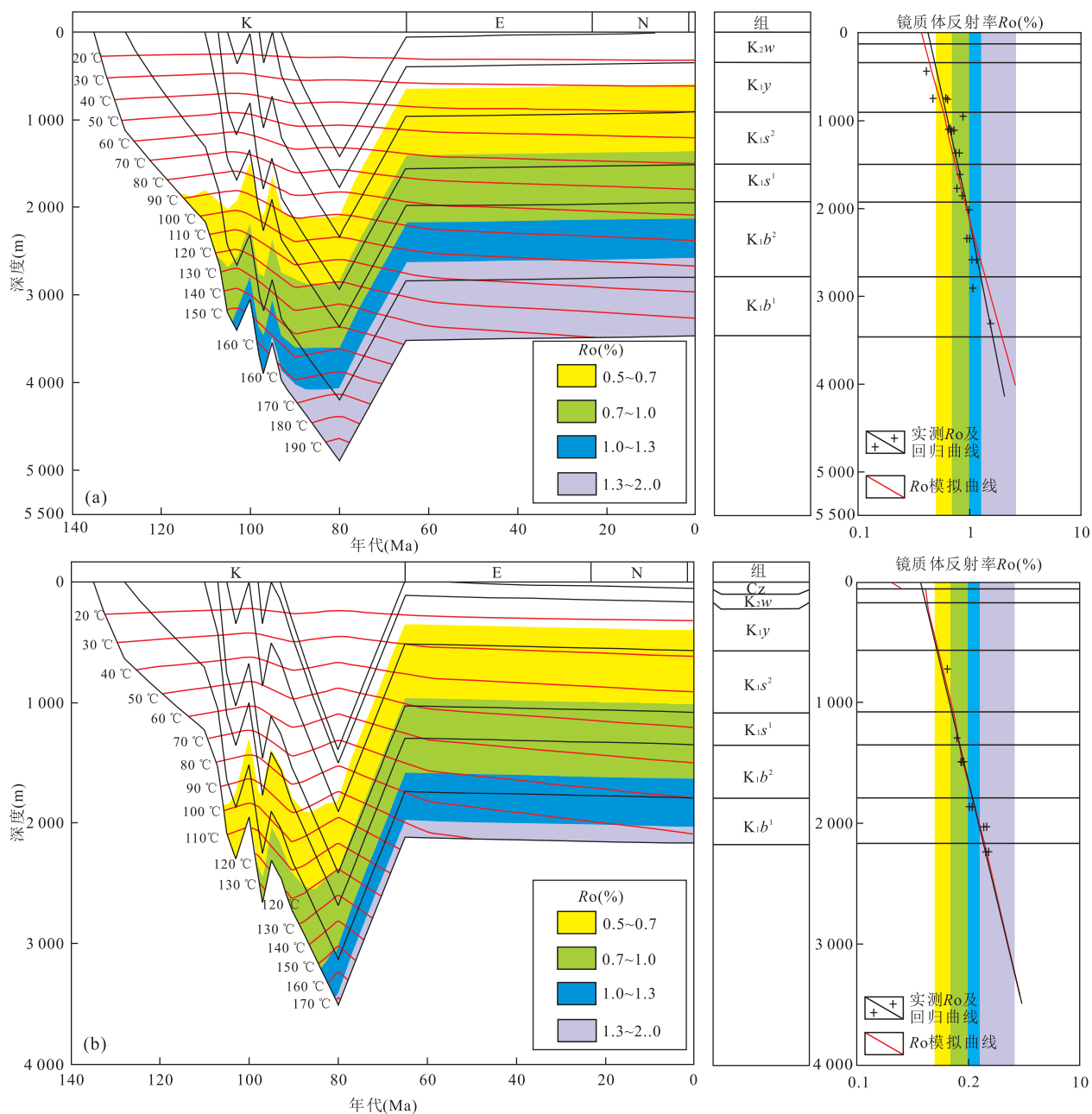


图 9 苏红图坳陷西部热演化史

Fig.9 Thermal histories in the western Suhongtu depression

a.延哈参 1 井;b.延巴参 1 井.“+”代表实测 R_o 数据,图中黑实线与红实线分别表示 R_o 回归及模拟拟合曲线

0.7%, 烃源岩进入中成熟生烃阶段, 进入生油高峰; 104 Ma 左右, 烃源岩 R_o 达到 1.0%, 进入高成熟阶段; 93 Ma 左右, 烃源岩进入热裂解生湿气阶段。巴二段底部烃源岩在 107 Ma 左右进入生烃门限; 100 Ma 左右, R_o 达到 0.7%, 进入中成熟生烃阶段; 90 Ma 左右, 烃源岩 R_o 达到 1.0%, 进入高成熟阶段; 82~0 Ma 左右, 烃源岩处于热裂解生湿气阶段。巴二段上部烃源岩在 90 Ma 左右, R_o 达到 0.7%, 此后一直处于中成熟生烃阶段。苏红图组二段下部

烃源岩在 90 Ma 左右开始进入生烃门限, R_o 达到 0.5%; 80 Ma 左右, R_o 达到 0.7%, 烃源岩进入中成熟生烃阶段一直延续至现今。苏二段上部及银根组烃源岩热演化程度较低, 长期处于未成熟—早成熟生烃阶段。

油气生成速率及累积产量演化历史分析表明(图 10): 巴音戈壁组一段烃源岩产油速率最大时期为 107~105 Ma, 最大产油率为 120 mg/(g · TOC · Ma); 最大生气时期为 88~85 Ma, 最大产气率为 23~

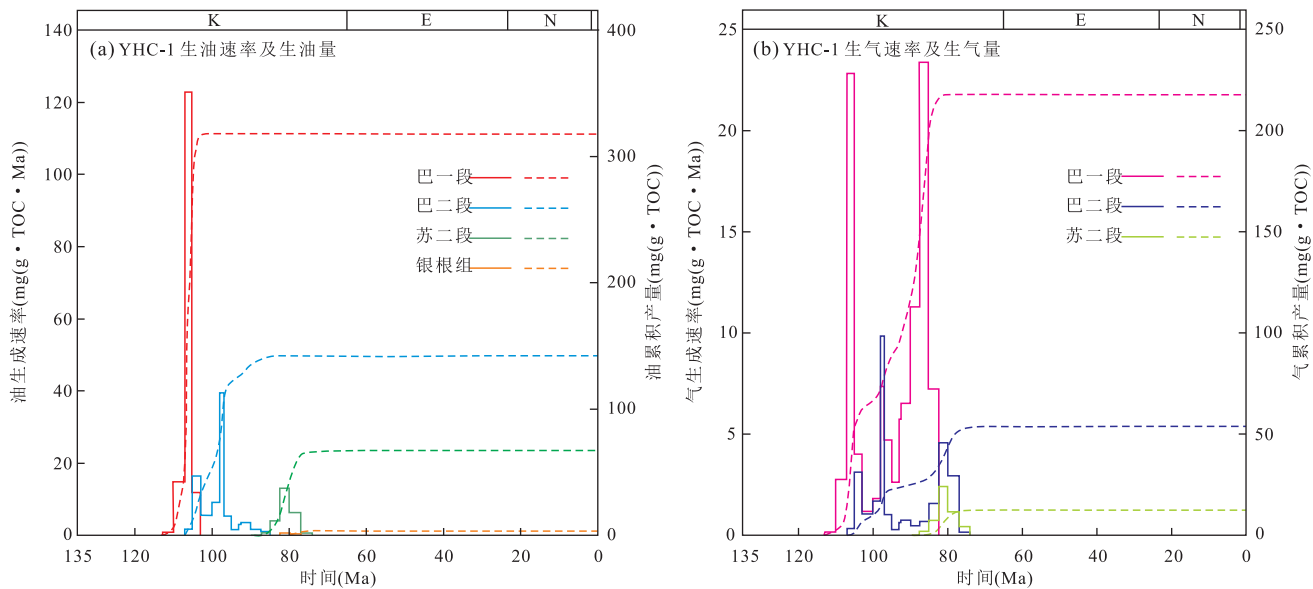


图10 苏红图坳陷西部 YHC-1 井油气生成速率及累积产量演化历史

Fig.10 Rate and accumulation of oil and gas generation evolution history of YHC-1 well in the western Suhongtu depression a.产油速率及累积产油量;b.产气速率及累积产气量.折线代表生烃速率,点线代表生烃累积量,不同层位烃源岩生烃速率及累积量均以底部烃源岩为主

25 mg/(g · TOC · Ma), 累积油气产率分别为: 300 mg/(g · TOC · Ma)、200 mg/(g · TOC · Ma); 巴二段烃源岩油和气生成速率最大时期分别为 97~95 Ma、82~79 Ma, 累积油气产量分别为 140 mg/(g · TOC)、50 mg/(g · TOC); 苏红图组二段烃源岩热演化程度较低, 主要以产油为主, 产油速率最大时期为 80 Ma 左右, 累积产油率约为 70 mg/(g · TOC · Ma); 银根组处于未成熟—早成熟生烃阶段, 油气贡献微弱。

3.4.2 巴北凹陷 YBC-1 热演化史图揭示巴北凹陷烃源岩层位热演化程度相对较高, 巴二段底部烃源岩在 105 Ma 时 R_o 达到 0.5%, 开始进入生烃门限, 90 Ma 进入中成熟阶段, 82 Ma 左右 R_o 达到 1.0%, 开始进入高成熟阶段, 此后一直持续到现今。巴二段上部烃源岩 100 Ma 左右进入生烃门限, 83 Ma 达到中成熟生烃阶段。

4 讨论

4.1 热历史与烃源岩成熟演化的关系

YHC-1、YBC-1 井热历史、埋藏史及热演化恢复表明苏红图坳陷西部哈日凹陷与巴北凹陷具有相似的演化过程。早白垩世以来, 研究区地温梯度普遍较高, 这与中国中东部北方大多数盆地中生代末期以来相对较高的热背景基本一致, 二连盆地白垩世

最大古地温梯度在 50~58 °C/km (Zuo *et al.*, 2016; 陈树光等, 2017), 银额盆地查干凹陷中生代晚期古地温梯度在 42~58 °C/km (Zuo *et al.*, 2017), 酒西、花海盆地在 38~42 °C/km (任战利等, 2000), 雅布赖盆地在 34~48 °C/km (田涛等, 2015), 海拉尔盆地早白垩世末期达到最大古地温, 约为 40~50 °C/km (任战利等, 2006), 渤海湾盆地新生代断陷盆地形成初期, 最大古地温在 48~56 °C/km (Xu *et al.*, 2016)。事实上, 地温场的异常变化能够在一定程度上揭示岩石圈深部活动过程, 中国中东部北方大多数盆地(包括银额盆地), 中生代以来受库拉—太平洋板块向华北板块俯冲作用的影响, 深部地幔活动性增强, 伸展背景下软流圈物质上涌导致岩石圈减薄, 形成了高的热状态背景。

研究区早白垩世以来较高的地温场对油气生成、成藏、富集起着非常重要的控制作用, 热演化史恢复表明研究区烃源岩均在乌兰苏海组沉积末期(晚白垩世)达到最大热演化阶段, 苏红图组下部及其下地层较早的进入生烃门限, 烃源岩持续生烃直到现今, 高的地温场与较快的沉积—沉降速率一起控制了烃源岩层位经历的古地温, 导致研究区烃源岩生烃门限普遍较浅 (<2 000 m), 有助于油气的生成。晚白垩世以来, 研究区整体抬升、剥蚀改造, 烃源岩成熟度基本不再增加。

4.2 苏红图坳陷油气资源勘探前景

苏红图坳陷是早白垩世以来形成的断陷盆地,早白垩世研究区快速断陷沉降,水体不断加深,发育了多套暗色泥岩,生烃物质条件丰富.在盆地形成过程中,构造活动强烈,并发育多期抬升剥蚀,盆地内断层、裂缝极其发育,以正断层及张性裂缝为主,为油气运移提供了良好的运输通道,研究区主要构造圈闭形成时间与大规模油气形成的时间基本吻合,有利于油气聚集成藏.此外,银根组岩性主要以白云质泥岩为主,且沉积范围较广,形成了良好的区域性盖层.

研究区不同层位烃源岩热演化程度存在一定的差别,哈日凹陷苏二段上部与银根组烃源岩厚度大,有机质丰度高,但其热演化程度较低,处于未成熟到早成熟生烃阶段,油气生成量有限,烃源岩产生的油气尚未达到排烃门限,存在于烃源岩内部,可形成非常规油气资源.巴音戈壁组一段和二段烃源岩在凹陷中心达到了高成熟—生湿气阶段,烃源岩有机质丰度相对较高,生烃量可观,油气生成后排出,并沿断裂或裂缝运移,在合适的岩性或构造圈闭聚集成藏,常规资源潜力也较为可观.巴北凹陷烃源岩相对哈日凹陷发育较差,仅巴音戈壁组二段存在一定厚度的生油岩段,其热演化程度相对较高.

综上所述,苏红图坳陷西部中生代具有一定的油气资源前景,在油气勘探开发过程中,哈日凹陷应以常规性油气藏与非常规油气藏共同开发为主,巴北凹陷应选择构造有利部位,以常规性油气藏开发为主.

5 结论

(1) 烃源岩热演化程度表明:银根组热演化程度不高,处于未成熟—低成熟阶段;苏红图组底部 R_o 分布在 0.6%~1.2%,已经达到成熟生烃阶段;巴音戈壁组底部 R_o 普遍大于 0.9%,在哈日凹陷、巴北凹陷及乌兰凹陷主要沉积中心,热演化程度普遍大于 1.1%,处于高成熟—热裂解生湿气阶段.

(2) 苏红图坳陷西部不同凹陷早白垩世以来具有相似的沉积—沉降过程,由早白垩世初始断陷发育转变到晚白垩世长期的热沉降,依据埋藏史模型及沉积速率的变化过程,将研究区中生代构造演化过程分为 4 个沉降阶段及 4 次剥蚀改造阶段.

(3) 研究区现今地温梯度为 34 °C/km,恢复晚白垩世地温梯度约为 40.6~46.7 °C/km.地温梯度

从巴音戈壁组沉积期(135~110 Ma)的 40~42 °C/km 增加到苏红图沉积时期(110~103 Ma)的 46~50 °C/km;银根组沉积期(100~95 Ma),地温梯度达到最大,为 48~53 °C/km;从乌兰苏海组沉积开始到现今,地温梯度先增大到 40~46 °C/km(92~80 Ma),后逐渐降低为 34 °C/km(80~0 Ma).

(4) 研究区早白垩世以来较高的地温场对油气生成、成藏起着重要的控制作用,烃源岩均在乌兰苏海组沉积末期达到最大热演化阶段.哈日凹陷苏二段上部与银根组进入生烃门限时间较晚,成熟度偏低,油气生成量有限,以非常规油气资源为主;巴音戈壁组烃源岩有机质丰度和成熟度相对较高,生烃量可观,易形成较好的构造性油气藏.巴北凹陷烃源岩相对哈日凹陷发育较差,仅巴音戈壁组二段存在一定厚度的生油岩段,热演化程度相对较高.

References

- Bai, X. Y., He, Y. H., Ren, L. Y., et al., 2017. Tectonics and Evolution of the West Suhongtu Depression in Yingen-Ejinaqi Basin. *Journal of Yanan University (Natural Science Edition)*, 36(2): 57–61 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. G., Zhang, Y. M., Cui, Y. Q., et al., 2017. The Inversion Structures and Their Genetic Mechanisms of Bayindulan Sag, Erlian Basin. *Earth Science*, 42(4): 559–569 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.044>
- Chen, Z. J., Ren, L. Y., Liu, H. C., et al., 2016. Application of Geophysical Method to Prediction and Evaluation of Hydrocarbon Source Rocks in Hari Depression. *Petroleum Geology and Engineering*, 30(6): 30–35 (in Chinese with English abstract).
- Cui, J. P., Ren, Z. L., Xiao, H., et al., 2007. Study on Temperature Distribution and Controlling Factors in the Hailaer Basin. *Chinese Journal of Geology*, 42(4): 656–665 (in Chinese with English abstract).
- Fu, X. F., Li, Z. Y., Lu, S. F., et al., 2004. The Study and Application on Using DT Data to Calculate the Eroded Strata. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 23(1): 9–11 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. B., Wang, J. Y., Zhang, R. Y., 1999. Estimation of the Amount of Uplift and Erosion across an Unconformity Using Vitrinite Reflectance Data. *Petroleum Exploration and Development*, 26(4): 42–45 (in Chinese with English abstract).
- Kosakowski, P., Wróbel, M., Krzywiec, P., 2013. Modelling

- Hydrocarbon Generation in the Palaeozoic and Mesozoic Successions in SE Poland and West Ukraine. *Journal of Petroleum Geology*, 36 (2): 139—161. <https://doi.org/10.1111/jpg.12548>
- Liu, C. Y., Lin, C. S., Wu, M. B., et al., 2006. Tectonic Evolution and Petroleum Prospects of the Mesozoic in Yingen-Ejinaqi Basin, Inner Mongolia. *Geology in China*, 33 (6): 1328—1335 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. M., Ye, J. R., Cao, Q., et al., 2017. Preliminary Prediction and Evaluation of Source Rocks in the Lunpola Basin, Tibet, China. *Earth Science*, 42 (4): 601—612 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.047>
- Lu, J. C., Zhang, H. A., Niu, Y. Z., et al., 2017. Carboniferous-Permian Petroleum Conditions and Exploration Breakthrough in the Yingen-Ejin Basin in Inner Mongolia. *Geology in China*, 44 (1): 13—32 (in Chinese with English abstract).
- Niu, Z. C., Liu, G. D., Cao, Z., et al., 2016. Reservoir Characteristics and Hydrocarbon Accumulation in Chagan Sag, Yingen-Ejinaqi Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 38 (1): 32—39 (in Chinese with English abstract).
- Opera, A., Alizadeh, B., Sarafdokht, H., et al., 2013. Burial History Reconstruction and Thermal Maturity Modeling for the Middle Cretaceous-Early Miocene Petroleum System, Southern Dezful Embayment, SW Iran. *International Journal of Coal Geology*, 120 (6): 1—14. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.08.008>
- Qiu, N. S., 2005. Methods of Thermal History Reconstruction of Sedimentary Basins and Their Application in Oil and Gas Exploration. *Marine Origin Petroleum Geology*, 10 (2): 45—51 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Zuo, Y. H., Chang, J., et al., 2014. Geothermal Evidence of Meso-Cenozoic Lithosphere Thinning in the Jiyang Sub-Basin, Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26 (3—4): 1079—1092. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.08.011>
- Qiu, N. S., Zuo, Y. H., Zhou, X. H., et al., 2010. Geothermal Regime of the Bohai Offshore Area, Bohai Bay Basin, North China. *Energy Exploration & Exploitation*, 28 (5): 327—350. <https://doi.org/10.1260/0144-5987.28.5.327>
- Ren, Z. L., 2000. Comparison of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins, North China. *Oil & Gas Geology*, 21 (1): 33—37 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Cui, J. P., Guo, K., et al., 2015. Fission-Track Analysis of Uplift Times and Processes of the Weibei Uplift in the Ordos Basin. *Chinese Science Bulletin*, 60 (14): 1298—1309 (in Chinese).
- Ren, Z. L., Liu, C. Y., Zhang, X. H., et al., 2000. Recovery and Comparative Research of Thermal History on Jiuquan Basin Group. *Chinese Journal of Geophysics*, 43 (5): 635—645 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Cui, J. P., Li, J. B., et al., 2014a. Tectonic-Thermal History Reconstruction of Ordovician in the Weibei Uplift of Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 88 (11): 2044—2056 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Tian, T., Li, J. B., et al., 2014b. Review on Methods of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins and Thermal Evolution History Reconstruction of Superimposed Basins. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36 (3): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Z. L., Zhang, S., Gao, S. L., et al., 2006. Research on Region of Maturation Anomaly and Formation Time in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80 (5): 62—72 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., McDonough, W. F., O'Connell, R. J., 1998. Thermal Structure, Thickness and Composition of Continental Lithosphere. *Chemical Geology*, 145 (3—4): 395—411. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(97\)00151-4](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(97)00151-4)
- Sahu, H. S., Raab, M. J., Kohn, B. P., et al., 2013. Thermal History of the Krishna-Godavari Basin, India: Constraints from Apatite Fission Track Thermochronology and Organic Maturity Data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73 (8): 1—20. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.04.028>
- Sclater, J. G., Christie, P. A. F., 1980. Continental Stretching: An Explanation of the Post-Mid-Cretaceous Subsidence of the Central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85 (B7): 3711—3739. <https://doi.org/10.1029/jb085ib07p03711>
- Tian, T., Ren, Z. L., Wu, X. Q., et al., 2015. The Paleogeothermal Field and Hydrocarbon Accumulation Period in Sartai Depression, Yabrai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33 (4): 836—844 (in Chinese with English abstract).
- Tong, Y. M., Song, L. J., Zeng, S. J., et al., 2005. A New Method by Vitritine Reflectance to Estimate Thickness of Eroded Strata. *Journal of Palaeogeography*, 7 (3): 417—424 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Z., Chen, Z. J., Ren, L. Y., et al., 2016. U-Pb Age of Zircon and Its Geological Significance in Suhongtu Depression, Yingen-Ejinaqi Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34 (5): 853—867 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W., Qiu, N. S., Wang, Y., et al., 2016. Evolution of Meso-Cenozoic Lithospheric Thermal-Rheological Structure in the Jiyang Sub-Basin, Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton. *International Journal of Earth Sciences*,

- 107(1): 153–166. <https://doi.org/10.1007/s00531-016-1360-x>
- Yang, P., Ren, Z. L., Xia, B., et al., 2017. The Lower Cretaceous Source Rocks Geochemical Characteristics and Thermal Evolution History in the Hari Sag, Yin'e Basin. *Petroleum Science and Technology*, 35(12): 1304–1313. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1327969>
- Zhao, C. C., Liu, H. C., Ren, L. Y., et al., 2017. Geological Environment and Prospective Significance of Cretaceous Gas Reservoir in Well YHC-1 of Yin'e Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(3): 439–451 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. Y., Liu, C. Y., Ren, Z. L., 1990. Geology of Petroliferous Basins and Their Systematic Engineering in Research. *Oil & Gas Geology*, 11(1): 108–113 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, F. P., Zhong, J. H., Wang, Y., et al., 2014. Geochemistry Characteristics and Origin of Early Cretaceous Volcanic Rocks in Suhongtu Depression, Inner Mongolia, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 34(1): 107–116 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L., Zheng, J. Y., Lei, D. W., et al., 2007. Recovery of Eroded Thickness of the Jurassic of Chemo Palaeouplift in Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 243–252 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, Y. H., Qiu, N. S., Deng, Y. X., et al., 2013. Terrestrial Heat Flow in the Chagan Sag, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(9): 3038–3050 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, Y. H., Qiu, N. S., Hao, Q. Q., et al., 2015. Geothermal Regime and Source Rock Thermal Evolution in the Chagan Sag, Inner Mongolia, Northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 59: 245–267. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.09.001>
- Zuo, Y. H., Song, R. C., Li, Z. X., et al., 2017. Lower Cretaceous Source Rock Evaluation and Thermal Maturity Evolution of the Chagan Depression, Inner Mongolia, Northern China. *Energy Exploration & Exploitation*, 35(4): 482–503. <https://doi.org/10.1177/0144598717694809>
- Zuo, Y. H., Wang, C. C., Tang, S. L., et al., 2016. Mesozoic and Cenozoic Thermal History and Source Rock Thermal Evolution of the Baiyinchagan Sag, Erlian Basin, Northern China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139: 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.12.025>
- 图勘陷西区构造特征与演化. 延安大学学报: 自然科学版, 36(2): 57–61.
- 陈树光, 张以明, 崔永谦, 等, 2017. 二连盆地巴音都兰凹陷反转构造及成因机制. *地球科学*, 42(4): 559–569. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.044>
- 陈治军, 任来义, 刘护创, 等, 2016. 地球物理方法在哈日凹陷烃源岩预测和评价中的应用. *石油地质与工程*, 30(6): 30–35.
- 崔军平, 任战利, 肖晖, 等, 2007. 海拉尔盆地地温分布及控制因素研究. *地质科学*, 42(4): 656–665.
- 付晓飞, 李兆影, 卢双舫, 等, 2004. 利用声波时差资料恢复补蚀量方法研究与应用. *大庆石油地质与开发*, 23(1): 9–11.
- 胡圣标, 汪集斌, 张容燕, 1999. 利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度. *石油勘探与开发*, 26(4): 42–45.
- 刘春燕, 林畅松, 吴茂炳, 等, 2006. 银根—额济纳旗中生代盆地构造演化及油气勘探前景. *中国地质*, 33(6): 1328–1335.
- 刘一茗, 叶加仁, 曹强, 等, 2017. 西藏伦坡拉盆地古近系牛堡组烃源岩预测与评价. *地球科学*, 42(4): 601–612. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.047>
- 卢进才, 张洪安, 牛亚卓, 等, 2017. 内蒙古西部银额盆地石炭系—二叠系油气地质条件与勘探发现. *中国地质*, 44(1): 13–32.
- 牛子铖, 柳广弟, 曹喆, 等, 2016. 银额盆地查干凹陷油藏特征及油气成藏过程. *石油实验地质*, 38(1): 32–39.
- 邱楠生, 2005. 沉积盆地热历史恢复方法及其在油气勘探中的应用. *海相油气地质*, 10(2): 45–51.
- 任战利, 2000. 中国北方沉积盆地热演化史的对比. *石油与天然气地质*, 21(1): 33–37.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析. *科学通报*, 60(14): 1298–1309.
- 任战利, 刘池阳, 张小会, 等, 2000. 酒泉盆地群热演化史恢复及其对比研究. *地球物理学报*, 43(5): 635–645.
- 任战利, 崔军平, 李进步, 等, 2014a. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造—热演化史恢复. *地质学报*, 88(11): 2044–2056.
- 任战利, 田涛, 李进步, 等, 2014b. 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. *地球科学与环境学报*, 36(3): 1–20.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区及形成时期探讨. *地质学报*, 80(5): 62–72.
- 田涛, 任战利, 吴晓青, 等, 2015. 雅布赖盆地萨尔台凹陷古地温场与油气成藏期次. *沉积学报*, 33(4): 836–844.
- 佟彦明, 宋立军, 曾少军, 等, 2005. 利用镜质体反射率恢复地层剥蚀厚度的新方法. *古地理学报*, 7(3): 417–424.
- 王香增, 陈治军, 任来义, 等, 2016. 银根—额济纳旗盆地苏红

附中文参考文献

白晓寅, 贺永红, 任来义, 等, 2017. 银根—额济纳旗盆地苏红

图坳陷 H 井锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义.沉积学报,34(5):853-867.

赵春晨,刘护创,任来义,等,2017.银额盆地 YHC1 井白垩系气藏形成的地质环境及其远景意义.天然气地球科学,28(3):439-451.

赵重远,刘池洋,任战利,1990.含油气盆地地质学及其研究中的系统工程.石油与天然气地质,11(1):108-113.

钟福平,钟建华,王毅,等,2014.银根-额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩地球化学特征与成因.矿物学报,34(1):107-116.

周路,郑金云,雷德文,等,2007.准噶尔盆地车莫古隆起侏罗系剥蚀厚度恢复.古地理学报,9(3):243-252.

左银辉,邱楠生,邓已寻,等,2013.查干凹陷大地热流.地球物理学报,56(9):3038-3050.

《地球科学》

2018 年 7 月 第 43 卷 第 7 期 要目预告

粤西云开地区中奥陶世双壳类动物群的发现及其意义初探	牛志军等
大别山皇城山银矿区及外围陈棚组火山岩 U-Pb 年代学、地球化学和成矿构造背景	朱 江等
南秦岭北缘浙川地区泥盆纪地层的物源及构造背景	徐大良等
武当隆起西段牌楼新元古代 A ₁ 型花岗岩的发现及其地质意义	张维峰等
云开地块印支期变质-深熔作用:混合岩、片麻岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据	柯贤忠等
云开地区早古生代宁潭片麻状花岗质岩体锆石 U-Pb 定年、岩石成因及构造背景	夏金龙等
扬子北缘大洪山地区早古生代基性岩脉的厘定及其地质意义	陈 超等
湘桂边界越城岭岩基北部印支期花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征	程顺波等