

引用本文: 马泽良, 何治亮, 罗开平, 等. 青藏高原南羌塘坳陷白垩纪以来的隆升剥蚀历史——来自低温热年代学的约束[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 75–86. DOI: 10.11781/sysydz202401075.

MA Zeliang, HE Zhiliang, LUO Kaiping, et al. Uplifting and exhumation history in Southern Qiangtang Depression of Qinghai–Tibet Plateau since Cretaceous: constrain from low-temperature thermochronology[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 75–86. DOI: 10.11781/sysydz202401075.

青藏高原南羌塘坳陷白垩纪以来的隆升剥蚀历史

——来自低温热年代学的约束

马泽良¹, 何治亮², 罗开平¹, 彭金宁¹, 庄新兵¹, 杨帆¹, 刘栩¹

1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728

摘要: 为了重建青藏高原的形成过程和评价羌塘盆地油气的保存条件, 对南羌塘坳陷隆升剥蚀历史进行了研究。利用锆石和磷灰石(U-Th)/He 和磷灰石裂变径迹技术, 对南羌塘坳陷中部嘎尔敖包地区的侏罗系砂岩样品进行了分析, 数据显示大部分颗粒经历完全退火阶段; 基于实验数据对盆地热史进行反演, 并结合区域低温热年代学研究, 认为南羌塘坳陷共经历了 3 期隆升剥蚀历史, 即早白垩世、古新世—始新世和中新世以来, 分别造成了南羌塘坳陷中部地区 1.7~2.6 km、1.89 km 和 1.13 km 的剥蚀量。热历史结果显示, 早白垩世南羌塘坳陷中部地区首先遭受剥蚀, 随后剥蚀逐渐向南、北两侧传递。南羌塘坳陷第一期冷却历史可能受到羌塘地体和拉萨地体碰撞的影响; 第二期冷却历史可能受到印度—亚洲大陆碰撞的影响; 第三期冷却历史可能与印度—亚洲大陆持续会聚下羌塘盆地发育大量近南北向断层有关。南羌塘坳陷中部地区位于不同构造位置的样品的热历史显示, 其经历了不同的剥蚀过程, 这可能受到印度—亚洲大陆的碰撞和随后持续会聚造成的区域性近南北向断裂差异性活动的影响。基于不同构造位置样品热历史的差异性, 认为区域性南北向断裂开始活动时间为 65~45 Ma。

关键词: 锆石和磷灰石(U-Th)/He; 磷灰石裂变径迹; 低温热年代学; 隆升剥蚀历史; 构造演化; 南羌塘坳陷; 羌塘盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sysydz202401075

Uplifting and exhumation history in Southern Qiangtang Depression of Qinghai–Tibet Plateau since Cretaceous: constrain from low-temperature thermochronology

MA Zeliang¹, HE Zhiliang², LUO Kaiping¹, PENG Jinning¹, ZHUANG Xinbing¹, YANG Fan¹, LIU Xu¹

1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. SINOPEC, Beijing 100728, China

Abstract: The uplifting and exhumation history of the Southern Qiangtang Depression was studied for reconstructing the evolution of the Qinghai–Tibet Plateau and evaluating the oil–gas preservation conditions in the Qiangtang Basin. Samples of Jurassic sandstone from Gaeraobao area in the center of Southern Qiangtang Depression were analyzed using zircon and apatite (U–Th)/He and apatite fission track (AFT) techniques, and the data showed that most grains experienced a full annealing phase. Based on the inversion of the thermal history of the basin from the experimental data and combined with the study of regional low temperature thermochronology, it is believed that the Southern Qiangtang Depression has experienced three major uplifting and exhumation episodes: the Early Cretaceous, the Paleocene–Eocene and since the Miocene, and experienced exhumations of 1.7–2.6 km, 1.89 km, and 1.13 km, respectively in the center of Southern Qiangtang Depression. And the thermal history showed that the center of Southern Qiangtang Depression suffered exhumation first in the Early Cretaceous, and then the denudation gradually spread to the north and south. The three episodes correspond to the collision between Qiangtang and Lhasa terranes, the collision between

收稿日期 (Received): 2023–07–28; 修订日期 (Revised): 2023–12–01; 出版日期 (Published): 2024–01–28。

作者简介: 马泽良 (1991—), 男, 博士, 助理研究员, 从事构造地质学研究。E-mail: mazl56340.syky@sinopec.com。

通信作者: 罗开平 (1964—), 男, 博士, 研究员, 从事油气地质综合研究。E-mail: luokp.syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目 (P21086–6, P22198) 资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY–NC–ND license.

Indian and Asian plates and the movement of N-S strike fault under the continuous convergence of the Indian and Asian continents, respectively. The thermal history of samples at different tectonic locations in the Southern Qiangtang Depression showed that they have undergone different exhumation processes, which may have been controlled by the different activity of regional N-S faults caused by the collision between Indian and Asian plates and its subsequent continued convergence. Based on the differences of thermal histories of the samples at different tectonic locations, it suggested that the regional N-S faults activated since 65–45 Ma.

Key words: zircon and apatite (U-Th)/He; apatite fission track; low-temperature thermochronology; uplifting and exhumation history; tectonic evolution; Southern Qiangtang Depression; Qiangtang Basin

羌塘地体作为青藏高原重要的组成部分之一,其形成过程一直是全球研究的热点^[1-4]。受古一新特提斯洋演化的影响,羌塘地体在多期板块会聚碰撞过程中经历了复杂的构造变形和隆升剥蚀事件^[2,5-8]。前人对羌塘地体隆升剥蚀历史开展了大量的研究,利用³⁹Ar/⁴⁰Ar、(U-Th)/He 和裂变径迹技术,认为北羌塘地体主要经历了 4 期冷却剥蚀历史,时间分别为 110~70、60~30、25~20、10~7 Ma^[1,6,9-10],最主要的冷却阶段发生在 26~23 Ma 期间^[10],并且北羌塘地体显示出自南向北开始遭受剥蚀的时间逐渐变年轻的趋势^[3]。羌塘地体东部的花岗岩记录了较老的冷却历史(165~150 Ma)^[11]。近东西展布的中央隆起带东西存在不同的冷却剥蚀历史,西部经历了 150~130、110~70、55~40 Ma 3 期冷却阶段;东部经历了 120~110 Ma 和 55~38 Ma 2 期冷却过程^[2,8]。南羌塘地体的低温热年代学揭示,其具有 2 期冷却历史,即 110~70 Ma 和 55~35 Ma^[1,9,12-18]。南羌塘地体作为羌塘地体重要的组成部分,对其隆升剥蚀历史的研究,有助于我们重建羌塘盆地构造演化和青藏高原形成过程。

前人已对羌塘盆地的隆升剥蚀历史进行了大量研究,但对南羌塘坳陷隆升剥蚀历史和机制的研究仍存在不足之处,对其数据的系统性、差异性研究和断层对剥蚀过程影响的研究仍然较为缺乏,因此本文收集整理了前人在南羌塘坳陷发表的数据,并利用磷灰石裂变径迹、锆石和磷灰石(U-Th)/He 技术,对南羌塘坳陷的隆升剥蚀历史开展研究,系统分析南羌塘坳陷南北向剥蚀过程的差异性,通过综合不同封闭温度体系的技术,来较为精确地限定南羌塘坳陷的隆升剥蚀过程^[19-20]。

1 地质背景

羌塘地体位于青藏高原腹地,南北宽约 500~600 km,东西长约 1 200 km,面积约 22×10⁴ km²,是青藏高原最大的中生代海相盆地,其北临松潘—甘孜地体、南临拉萨地体,被夹持在北部的金沙江缝合带和南部的班公湖—怒江缝合带之间。羌塘地

体被近东西向展布的龙木措—双湖缝合带分为北羌塘地体和南羌塘地体^[5,21-24],南羌塘坳陷位于南羌塘地体之上(图 1)。

南羌塘地体基底岩石为前奥陶纪的低级变质岩系,被奥陶纪—侏罗纪地层覆盖^[25],其内石炭纪冰川—海洋沉积物中见大量亲冈瓦纳大陆的冷水动物群化石^[26-27]。三叠系—下白垩统海相地层在南羌塘地体广泛出露,沉积厚度大于 5 000 m;上白垩统阿布山组由红色山间磨拉石组成,与下伏上白垩统海相地层和上侏罗统海相地层呈角度不整合接触。南羌塘地体新生界主要发育始新统一渐新统康托组和中新统喷呐湖组,康托组与下伏上白垩统阿布山组和上覆的喷呐湖组皆呈角度不整合接触^[28-30]。

南羌塘地体发育大规模的近东西向展布的逆冲推覆构造,即赛布错—扎加藏布逆冲推覆构造带(SZT)和多玛—其香错逆冲推覆构造带(DST)^[5,28,31-34],使得南羌塘地体老地层逆冲到新地层之上,并发育大量的飞来峰,这些逆冲断层的发育时间被限定为晚白垩世—古新世^[28,33-35];南羌塘地体内部发育大量近南北展布的裂谷^[36-38],这些断层的活动时间为自约 15 Ma 以来^[5,24,31,39]。

2 样品信息和测试方法

本次研究在南羌塘坳陷中部毕洛错—昂达而错古油藏带内的嘎尔敖包地区,共采集了 2 个中侏罗统色哇组砂岩样品。样品位于近东西展布的向南逆冲的断裂带内,样品 M21-3 位于北东—南西走向断层下盘并距离断层较远;M21-6 位于断层面上盘并靠近北东—南西向断层(图 2),并分别对这 2 个砂岩样品进行锆石和磷灰石(U-Th)/He、磷灰石裂变径迹测试,具体测试方法原理见参考文献[19-20,40-42]。

3 测试结果

3.1 锆石和磷灰石(U-Th)/He 结果

我们从每个样品中挑选出了 4 个晶型完好、无

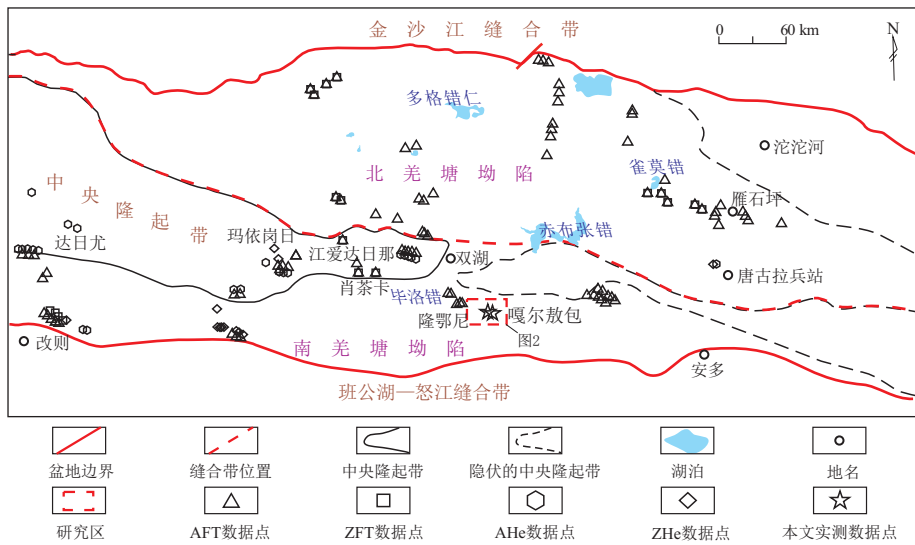


图 1 羌塘盆地构造单元划分及低温数据点位分布

据参考文献[7] 修编。

AFT. 磷灰石裂变径迹; ZFT. 锆石裂变径迹; ZHe. 锆石(U-Th)/He, 数据来自参考文献[1,6,8-9,12,16]。

Fig.1 Tectonic units of Qiangtang Basin and locations of low-temperature thermochronology data points

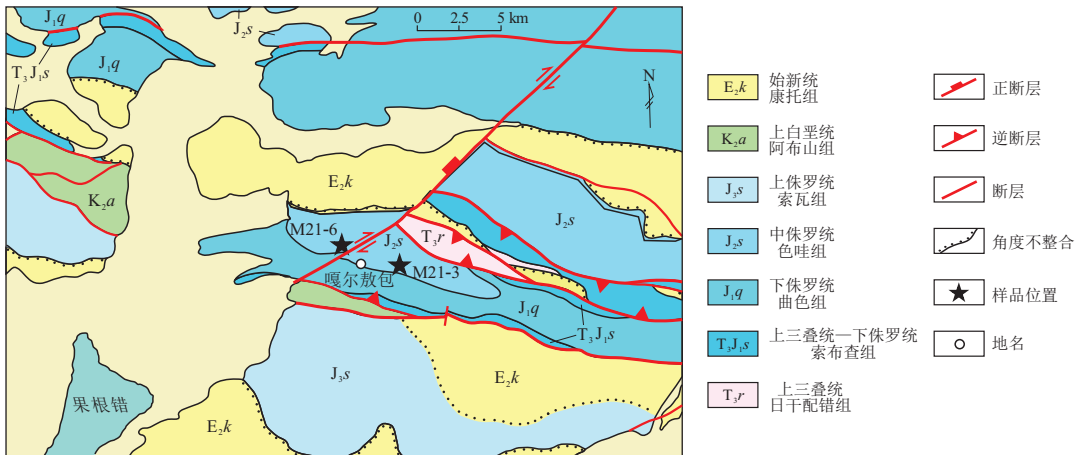


图 2 羌塘盆地南羌塘坳陷嘎尔敖包地区简要地质图及样品位置

图 2 平面位置见图 1 的红色虚线框。

Fig.2 Brief geological map and sampling locations of Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

裂隙、无包裹体的锆石颗粒进行 AHe 和 ZHe 年龄分析。样品 M21-3 共得到 4 个 AHe 年龄,分别为(67.0±1.8)、(76.9±2.1)、(107.7±3.2)、(174.8±5.0) Ma; 样品 M21-6 共得到 4 个 AHe 年龄,分别为(54.2±1.0)、(57.2±1.1)、(61.1±1.4)、(74.8±2.8) Ma(表 1)。样品 M21-3 共得到 4 个 ZHe 年龄,分别为(47.4±0.7)、(129.8±2.2)、(133±2.2)、(168.6±2.9) Ma; 样品 M21-6 共得到 4 个 ZHe 年龄,分别为(125.9±2.1)、(132.2±2.5)、(143.3±2.2)、(149.9±2.5) Ma(表 2)。

所有的锆石和磷灰石颗粒的[eU]值较低,锆石颗粒小于 400×10⁻⁶,磷灰石颗粒小于 70×10⁻⁶。样品 M21-3 的 ZHe 年龄 47.4 Ma 明显小于其 AHe

年龄,这与实际样品冷却过程不符,而 ZHe 年龄 168.6 Ma 和 AHe 年龄 174.8 Ma 与样品沉积年龄一致;ZHe 年龄存在较大误差,这可能是受到锆石颗粒同位素分布不均匀、辐射损伤、颗粒的大小、含 He 的流体包裹体的影响。样品 M21-3 和 M21-6 的 ZHe 年龄相当,但是位于断层下盘的 M21-3 的 AHe 整体年龄要大于位于断层上盘的 M21-6 的 AHe 年龄。

3.2 磷灰石裂变径迹结果

从这些样品中我们共得到 2 个 AFT 数据,其中样品 M21-3 的混合年龄为(126.1±11) Ma,中心年龄为(133.8±7.4) Ma;样品 M21-6 的混合年龄为(105.6±3.7) Ma,中心年龄为(109.4±4.0) Ma(表 3)。

表 1 羌塘盆地南羌塘坳陷噶尔敖包地区砂岩样品磷灰石 (U-Th)/He (AHe) 结果
Table 1 Apatite (U-Th)/He data of sandstone samples
from Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

样品编号	$^4\text{He}/\text{ncc}$	质量/ mg	$F_T^{1)}$	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	Th/U	$[\text{eU}]^{2)}/$ 10^{-6}	校正年龄/ Ma	误差/ Ma	颗粒长度/ μm	颗粒半径/ μm
M21-3-1A	0.017	0.000 8	0.45	7.6	74.8	9.78	25.2	67.0	1.8	106.6	61.2
M21-3-2A	0.023	0.000 7	0.44	14.9	67.7	4.54	30.8	76.9	2.1	94.4	59.8
M21-3-3A	0.033	0.000 8	0.46	6.6	53.2	8.04	19.1	174.8	5.0	94.2	64.5
M21-3-4A	0.018	0.000 7	0.40	2.0	71.6	35.63	18.8	107.7	3.2	80.0	64.3
M21-6-1A	0.047	0.001 8	0.57	5.2	242.2	46.69	62.1	61.1	1.4	126.0	80.5
M21-6-2A	0.035	0.001 6	0.55	13.6	168.6	12.42	53.2	54.2	1.0	123.3	79.0
M21-6-3A	0.024	0.001 7	0.56	10.3	101.6	9.84	34.2	57.2	1.1	141.0	76.9
M21-6-4A	0.061	0.001 9	0.60	36.5	109.3	3.00	62.2	74.8	2.8	128.6	84.8

1) α 粒子射出校正系数^[44];

2) 有效铀含量^[45]。

表 2 羌塘盆地南羌塘坳陷噶尔敖包地区砂岩样品锆石 (U-Th)/He (ZHe) 结果
Table 2 Zircon (U-Th)/He data of sandstone samples
from Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

样品编号	$^4\text{He}/\text{ncc}$	质量/ mg	F_T	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	Th/U	$[\text{eU}]/$ 10^{-6}	校正年龄/ Ma	误差/ Ma	颗粒长度/ μm	颗粒半径/ μm
M21-3-1Z	0.271	0.003 7	0.71	290.5	334.0	1.15	369.0	47.4	0.7	137.4	75.1
M21-3-2Z	0.385	0.002 1	0.67	142.5	61.3	0.43	156.9	168.6	2.9	118.2	61.6
M21-3-3Z	0.393	0.001 9	0.67	196.8	24.8	0.13	202.7	133.0	2.2	95.0	64.5
M21-3-4Z	0.594	0.001 6	0.65	309.2	69.9	0.23	325.6	129.8	2.2	97.4	59.5
M21-6-1Z	0.260	0.001 9	0.67	134.1	28.7	0.21	140.8	125.9	2.1	93.8	65.7
M21-6-2Z	0.565	0.001 5	0.63	232.1	182.1	0.78	274.9	149.9	2.5	97.2	56.7
M21-6-3Z	0.496	0.001 5	0.64	256.9	58.9	0.23	270.7	132.2	2.5	100.7	56.3
M21-6-4Z	0.480	0.001 4	0.63	215.9	129.5	0.60	246.3	143.3	2.2	89.7	57.9

表 3 羌塘盆地南羌塘坳陷噶尔敖包地区砂岩样品磷灰石裂变径迹 (AFT) 结果
Table 3 Apatite fission track (AFT) data of sandstone samples
from Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

样品编号	样品信息				平均径迹长度/ μm		数量	平均 Dpar 值 ³⁾ / μm 均值(范围)
	位置	地层信息	经纬度 ($^{\circ}\text{N}/^{\circ}\text{E}$)	海拔 /m	未校正 ¹⁾	校正 ²⁾		
M21-3	噶尔敖包	色哇组	$32^{\circ}28'58.521''/$ $89^{\circ}20'11.614''$	4 770	10.10 ± 2.29	11.67 ± 2.05	7	2.38(1.33~3.64)
M21-6	噶尔敖包	色哇组	$32^{\circ}29'23.043''/$ $89^{\circ}17'54.216''$	4 742	11.27 ± 1.97	12.8 ± 1.37	101	2.38(1.83~3.10)

年龄结果

样品编号	自发径迹			混合 ^{238}U ⁴⁾ / 10^{-6}	混合年龄/ Ma	$p(\chi^2)^{5)}$	误差/ %	中心年龄/ Ma
	颗粒数	径迹数	密度/ 10^6 cm^{-2}					
M21-3	41	357	1.198 0	18.7 ± 0.86	126.1 ± 11	0.58	6.8	133.8 ± 7.4
M21-6	42	1 202	0.961 3	17.94 ± 0.84	105.6 ± 3.7	0.21	12.0	109.4 ± 4.0

1) 未经 c 轴投影校正的平均径迹长度;

2) 经 c 轴投影校正后的平均径迹长度^[46];

3) 与抛光面相交的径迹的最大直径;

4) 各晶粒中混合铀的含量;

5) $p(\chi^2)$ 为卡方检验的值^[43]。

2 个样品的磷灰石裂变径迹年龄的卡方检验大于 5%, 即 $p(\chi^2) > 5\%$ (图 3), 磷灰石裂变径迹年龄比地层沉积年龄和 ZHe 年龄小, 且大于 AHe 年龄, 显示这 2 个样品均经历了完全退火。位于断层下盘的样品 M21-3 的 AFT 年龄大于位于断层上盘的

样品 M21-6, 2 个样品的径迹数均大于 100。

3.3 热史模拟结果

结合前人地层年代学工作和本文的 ZHe、AHe 和 AFT 数据, 利用软件 HeFTy 对南羌塘坳陷噶尔敖包地区获得的数据进行热历史反演模拟^[47], 本

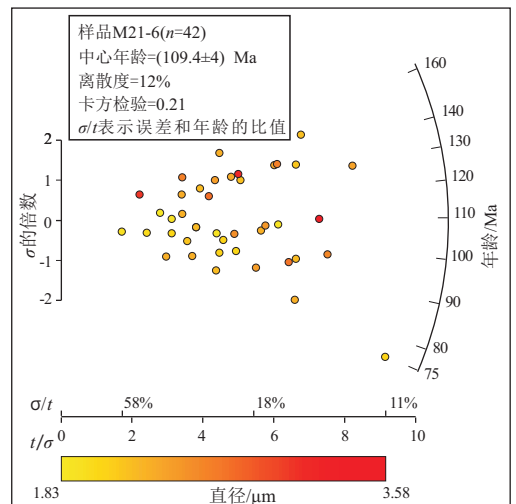
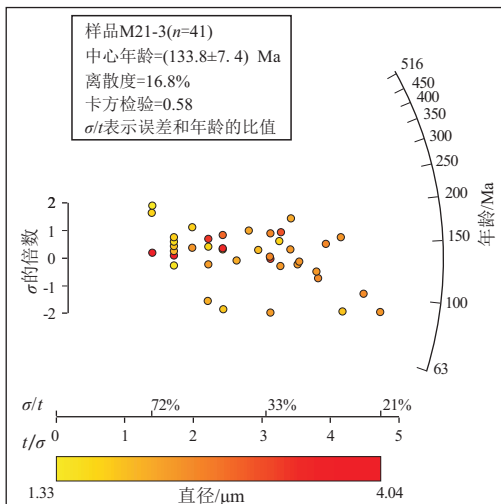


图 3 羌塘盆地南羌塘坳陷噶尔敖包地区磷灰石裂变径迹的卡方检验^[43]

Fig.3 Chi-square test of apatite fission track of Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

文主要采用以下 3 个限制条件:(1)利用前人碎屑锆石 U-Pb 年龄和古生物,将该区色哇组沉积年龄限定为 175~160 Ma^[6,48-49]; (2)地层开始沉积时的平均温度为 $(10 \pm 5)^\circ\text{C}$; (3)现今羌塘盆地地表的平均温度为 $(0 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。我们采用多重动力学退火模型(the multi-kinetic annealing model)对 AFT 进行模拟^[47],使用 Dpar 值作为动力学参数。

样品进行模拟时,我们以 ZHe 的封闭温度 200~130 °C 和 AHe 的封闭温度 75~40 °C 及年龄的 3 倍误差来进行时间—温度条件的限定,其中样品 M21-3 共有 2 个 ZHe 年龄和 3 个 AHe 年龄。由于其单颗粒的 ZHe 年龄结合 3 倍误差后年龄范围接近,因此来自 ZHe 年龄的时间限定范围均为 140~120 Ma; 3 个单颗粒的 AHe 年龄(67.0 Ma \pm 1.8 Ma, 76.9 Ma \pm 2.1 Ma 和 107.7 Ma \pm 3.2 Ma)中 2 个较小的年龄较为接近。同时样品 M21-3 和 M21-6 距离较近且位于同一近东西展布的逆冲岩席之上,样品 M21-6 的 4 个 AHe 年龄(54.2 Ma \pm 1.0 Ma、57.2 Ma \pm 1.1 Ma、61.1 Ma \pm 1.4 Ma 和 74.8 Ma \pm 2.8 Ma)与样品 M21-3 的 2 个较小年龄较为接近,结合南羌塘构造演化事件认为样品 M21-3 的 2 个较小的 AHe 年龄更为符合实际的热史演化过程。因此,我们选取 AHe 年龄 67.0 Ma 及其 3 倍误差的年龄限定范围 75~60 Ma,来进行热历史反演(图 4)。

样品 M21-6 共有 4 个 ZHe 年龄和 4 个 AHe 年龄(表 2、3),由于其 ZHe 和 AHe 年龄结合 3 倍误差后年龄范围接近,因此将来自 ZHe 年龄的时间限定范围均为 150~120 Ma,来自 AHe 年龄的时间限定范围均为 75~50 Ma(图 4)。

图 4a 模拟结果显示,样品 M21-3 在 (140 ± 5)

Ma 时达到了最大埋藏深度,且在 135~120 Ma 期间发生快速冷却事件,随后经历了较长时间的埋藏,并在 65~45 Ma 期间再次发生快速冷却事件。图 4b 模拟结果显示,样品 M21-6 在 (140 ± 5) Ma 时达到了最大埋藏深度,在 140~130 Ma 期间发生快速冷却事件,随后经历了较长时间缓慢冷却事件,在自约 20 Ma 以来发生了第二次快速冷却事件。

4 讨论

4.1 南羌塘坳陷剥蚀/冷却历史

低温热年代学技术(锆石裂变径迹、ZHe、AFT 和 AHe)常用来对盆地的埋藏—剥蚀历史进行研究^[20,40-41],本文同时采用了 ZHe、AFT 和 AHe 技术的热历史模拟结果,能够较为精确地揭示南羌塘坳陷中部地区自 200 °C 以来的热历史。同时,本次研究收集了南羌塘坳陷已经发表的低温热年代学数据,包括锆石裂变径迹年龄(ZFT)9 个、ZHe 年龄 11 个、AFT 年龄 47 个和 AHe 年龄 12 个,并将其按纬度—年龄进行投图分析(图 5),这些数据排除了来自南羌塘坳陷北缘岩浆岩的数据。

由图 5 可知,南羌塘坳陷内 ZFT 年龄分布在 70~100 Ma,最大年龄位于南羌塘坳陷中部;ZHe 年龄分布在 87~140 Ma,并且具有明显的自中部向南、北年龄变年轻的趋势;AFT 年龄分布范围较广,从 20 Ma 到 130 Ma,同一地区具有不同的 AFT 年龄,这是受到了同一地区来自不同时代地层开始遭受剥蚀的时间差异所造成的,AFT 年龄显示其自南羌塘坳陷中部向南、北同样具有变年轻的趋势;AHe 年龄分布范围为 40~100 Ma,最大的年龄位

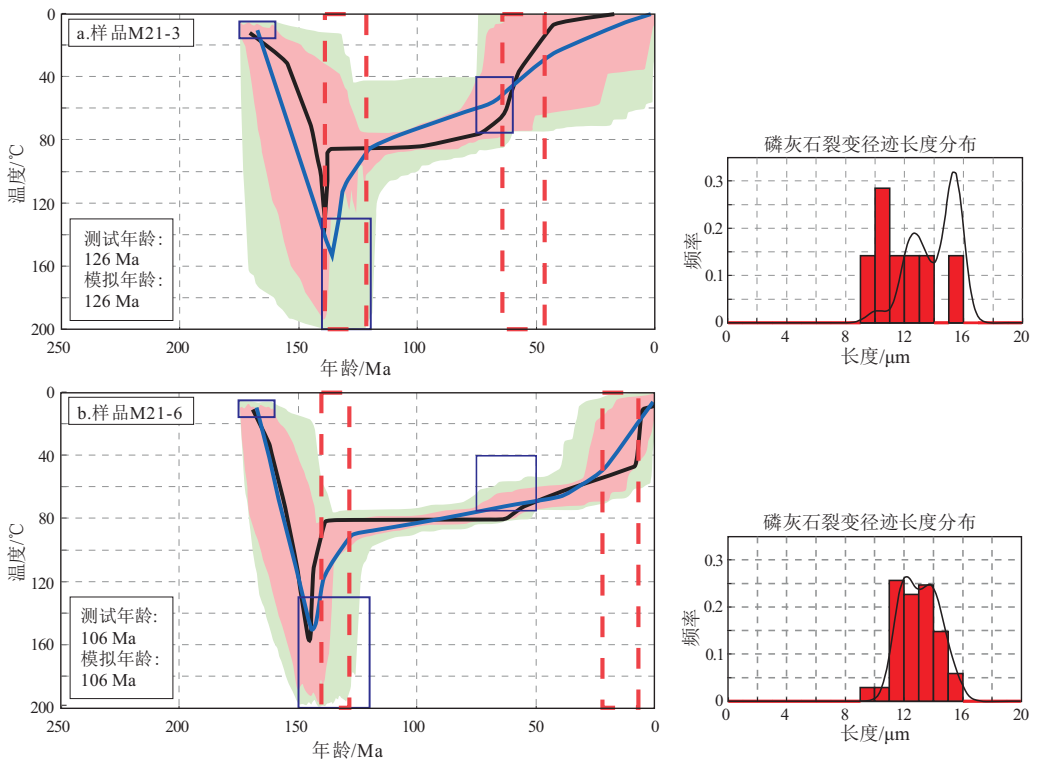


图 4 羌塘盆地南羌塘坳陷噶尔敖包地区热历史模拟

蓝色框为时间—温度限定框；“好的”结果(拟合度大于 0.55)用粉红色区域表示；“可接受的”结果(拟合度大于 0.05)用绿色区域表示；蓝色粗线代表所有结果的加权平均；黑色粗线代表最佳拟合曲线；红色虚线框代表冷却开始或冷却加速事件。

Fig.4 Thermal history simulation in Gaeraobao area in Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

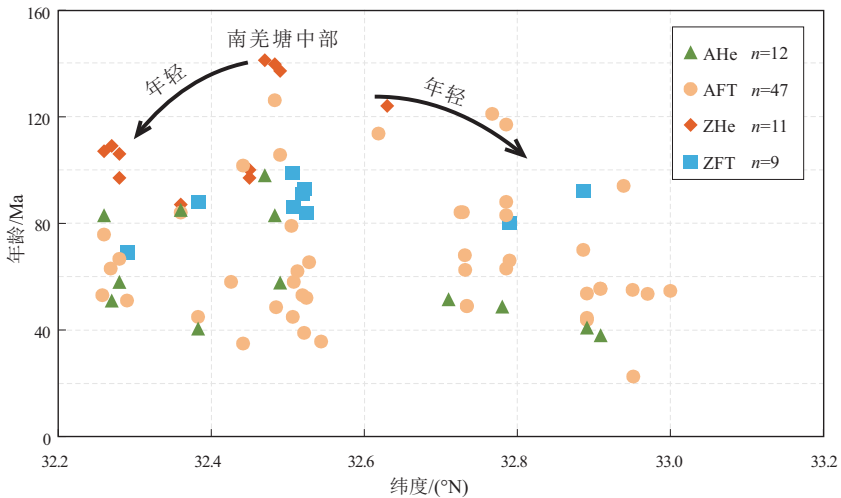


图 5 羌塘盆地南羌塘坳陷低温热年代学数据—纬度投影图

数据来自参考文献[1,6,8-9,12,16]及本文。

ZFT. 锆石裂变径迹年龄; ZHe. 锆石(U-Th)/He 年龄; AFT. 磷灰石裂变径迹年龄; AHe. 磷灰石(U-Th)/He 年龄; n. 年龄数据量。

Fig.5 Low-temperature thermochronological data vs. latitude projection of Southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin

于南羌塘坳陷中部地区。由上可知,南羌塘坳陷较老的低温热年代学年龄均分布在中部地区,且具有向南和向北变年轻的趋势(图 5),南羌塘坳陷中部地区记录了最早的隆升剥蚀事件,随后南、北部地区才逐渐遭受剥蚀。

我们同样收集并修订了南羌塘坳陷内已发表

的热历史曲线图(图 6),由于南羌塘坳陷整体近东西向展布,其主要受到南北向挤压应力的影响而发生构造变形和隆升剥蚀。为了进一步探究南羌塘坳陷南北向隆升剥蚀历史的差异性,将所收集到的热历史曲线图按照南部、中部及北部分别进行投影(图 6),结合区域构造事件和热历史拐点位置,认

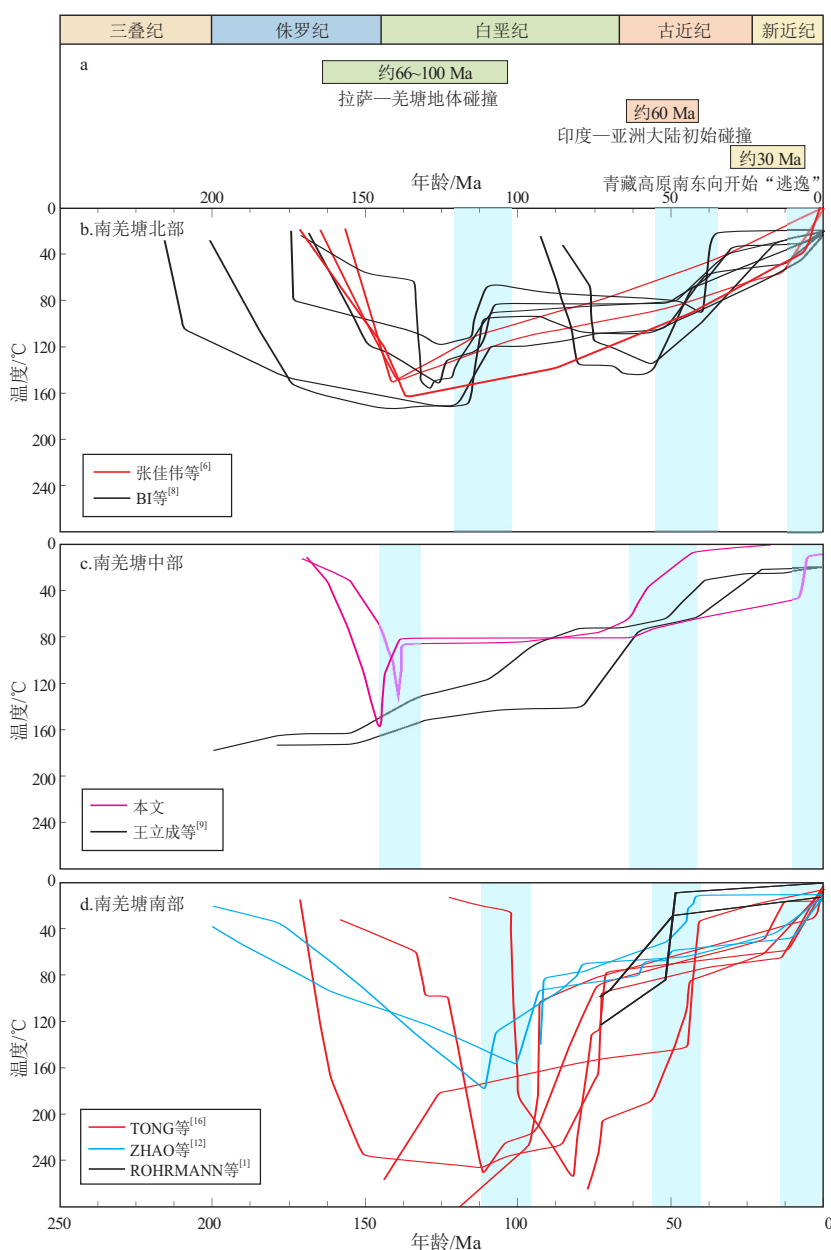


图 6 羌塘盆地南羌塘坳陷早白垩世以来的隆升剥蚀历史

a. 青藏高原主要的地质事件时间点(拉萨—羌塘碰撞时间引自文献[50],印度—亚洲大陆碰撞时间引自文献[51],青藏高原南东向逃逸时间引自文献[52]);b-d. 南羌塘坳陷热历史曲线图。

图中不同颜色曲线代表来自不同文献中的热历史;蓝色柱子代表冷却开始或冷却加速事件。

Fig.6 Uplifting and exhumation history of southern Qiangtang Depression, Qiangtang Basin since Early Cretaceous

为南羌塘坳陷共经历了早白垩世、古新世—始新世和中新世以来 3 期的隆升剥蚀过程。

(1) 早白垩世剥蚀/冷却历史(140~100 Ma)。这一期隆升剥蚀事件在整个南羌塘坳陷均发生,中部地区记录了早白垩世早期的隆升剥蚀事件(图 6c),而南、北部地区记录了早白垩世晚期的隆升剥蚀事件(图 6a,b),中部地区开始遭受剥蚀的时间早于南部和北部地区。南羌塘坳陷中部嘎尔敖包地区样品 M21-3 和 M21-6 的热历史,记录了这一期的隆升剥蚀历史(图 4),在早白垩世早期的冷

却事件中,样品 M21-3 在 20 Ma 期间迅速从约 130 °C 降至约 85 °C,冷却速率约为 2.25 °C/Ma;样品 M21-6 从约 150 °C 降至约 80 °C,冷却速率约为 3.5 °C/Ma。由于南羌塘坳陷的古地温梯度为 26.5 °C/km^[22],我们估算南羌塘坳陷中部地区侏罗系在早白垩世期间的剥蚀量约为 1.7~2.6 km。

(2) 古新世—始新世剥蚀/冷却历史(65~45 Ma)。这一期隆升剥蚀事件在整个南羌塘坳陷基本同时发生(图 6)。位于南羌塘坳陷中部嘎尔敖包地区的样品 M21-3 的模拟结果记录了这一期

的冷却事件(图 4a)。其在 20 Ma 期间从约 70 °C 降至约 20 °C,冷却速率约为 2.5 °C/Ma,南羌塘拗陷的古地温梯度为 26.5 °C/km^[22],中部地区侏罗系在这一期冷却事件中的剥蚀量约为 1.89 km。

(3) 中新世以来剥蚀/冷却历史(20 Ma 以来)。这一期的隆升剥蚀事件在整个南羌塘拗陷基本同时发生(图 6)。位于南羌塘拗陷中部嘎尔敖包的样品 M21-6 在这一时期剥蚀速率较大,样品 M21-3 中剥蚀速率较小。M21-6 的模拟结果显示,在 30~13 Ma 期间,其从 50 °C 降至 20 °C,冷却速率为 1.76 °C/Ma;结合其古地温梯度 26.5 °C/km^[22],我们估算南羌塘拗陷中部地区侏罗系这一期剥蚀量约为 1.13 km。

羌塘地体位于青藏高原腹地,其主要由南羌塘地体和北羌塘地体组成,南羌塘拗陷位于南羌塘地体之上,其剥蚀/冷却过程受到了北部北羌塘地体、南部拉萨地体及印度大陆的会聚—碰撞—俯冲的影响。由上文可知,南羌塘拗陷早白垩世以来共发生 3 期隆升剥蚀事件。

早白垩世,南羌塘拗陷经历了一期快速的冷却事件,这一期剥蚀/冷却事件与拉萨地体和羌塘地体碰撞时间,即晚侏罗世—早白垩世^[23,53-57]较为一致。结合南羌塘拗陷内下白垩统的缺失,上白垩统阿布山组与下伏的上侏罗统索瓦组之间的角度不整合接触关系,我们推测早白垩世这一期剥蚀/冷却事件主要受到晚侏罗世—早白垩世拉萨地体与羌塘地体碰撞的影响(图 6c)。这一期隆升剥蚀事件在南羌塘拗陷南北向上存在差异,其中部地区首先在早白垩世早期遭受剥蚀,随后南、北地区才在早白垩世晚期开始遭受剥蚀。拉萨地体和羌塘地体的碰撞使得南羌塘地体发生强烈的地壳缩短和构造隆升,形成一系列轴向近东西的褶皱^[28,58],南羌塘拗陷中部地区首先响应南北向挤压作用而发生快速构造隆升,使得中部地区在早白垩世早期首先遭受剥蚀,随着拉萨地体和羌塘地体持续的碰撞,剥蚀中心逐渐向南、北传递,使得南羌塘拗陷南部和北部地区在早白垩世晚期遭受剥蚀(图 6c)。这一期构造事件也使得南羌塘拗陷隆升出露地表,促使了南羌塘地体海相地层向陆相地层的转变^[8,35,48,59-62]。

古新世—始新世的剥蚀/冷却事件与印度大陆和拉萨地体碰撞的时间一致^[23,51,63],且这一期剥蚀事件在整个南羌塘拗陷基本同时发生(图 6c)。上白垩统阿布山组与上覆地层康托组间呈角度不整合接触关系。印度大陆和拉萨地体的碰撞导致了

南羌塘拗陷形成大量的近东西展布且向南逆冲的推覆构造^[5,32,35,64],这些逆冲推覆构造使得羌塘盆地南北向缩短达 40%~50%^[31-33,35,48,65-66]。这一期剥蚀/冷却事件被南羌塘拗陷中部地区的样品 M21-3 的热历史所记录,样品 M21-3 和 M21-6 经历了不同冷却速率的热历史,这 2 件样品采自断层的不同构造位置,且 M21-6 距离近北东—南西向断层较近,这反映南羌塘拗陷的冷却/剥蚀历史除受大地构造演化的限制外,还可能受到局部构造变形的影响。

中新世以来,这一期剥蚀/冷却事件在整体南羌塘拗陷广泛存在,羌塘盆地受到印度板块持续向北俯冲作用的影响,使得古近系康托组受到南北向挤压而发生变形,并与上覆的新近系喷纳湖组呈角度不整合接触关系。南羌塘拗陷发育大量的近南北向的伸展构造,同时盆地边界走滑断层启动^[5,67-68]。位于南羌塘拗陷中部地区不同构造位置的样品记录了不同的剥蚀/冷却过程(图 2 和图 4),位于断层上盘的样品 M21-6 经历了较快的冷却过程,样品 M21-3 在这一时期的冷却速率较慢。中新世以来,这一期冷却事件在不同构造位置的表现不同,同一地层在不同构造位置经历了不同的冷却过程,表明其受到了局部构造变形的影响。

4.2 南羌塘拗陷主要断裂活动时间

南羌塘拗陷由一系列近东西向展布的逆冲推覆构造^[32-33]和近南北向展布的断裂组成^[5]。前人通过卷入地层、断层带⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄和中侏罗世—早白垩世花岗岩的剥蚀时间,认为这些大规模的东西向逆冲推覆构造形成于晚白垩世^[28,31];另一种观点基于大规模的飞来峰和地层交切关系,认为这些逆冲断层的活动时间始于晚白垩世,在新生代早期(55~40 Ma)大规模发育^[32-33,35,65-66]。

由上文可知,整个南羌塘拗陷均记录了古新世—始新世(65~45 Ma)快速剥蚀事件(图 6),这一期的剥蚀/冷却事件主要受到印度大陆和亚洲大陆碰撞远程效应的影响。这一时期南羌塘拗陷发育大量的近东西展布的逆冲断裂,这些断裂使得南羌塘地体发生隆升,遭受剥蚀,并在上白垩统阿布山组和始新统一渐新统康托组之间形成了角度不整合面,因此我们推测南羌塘拗陷近东西向的逆冲推覆构造的活动时间与隆升剥蚀时间一致,为古新世—始新世。值得注意的是,位于南羌塘拗陷中部地区同一近东西展布的逆冲岩席之上的 2 个样品(M21-6 和 M21-3)在这一时期具有截然不同的冷却过程。根据这 2 件样品距离北东—南西向断层

距离的不同,我们推测这可能是受到了近北东—南西向断层的影响。由于所处构造位置和距离断层距离的不同,造成在剥蚀/冷却过程上的巨大差异。由 ZHe、AFT 和 AHe 年龄可知,样品 M21-3 均大于样品 M21-6,由此可知,断层下盘较早遭受剥蚀作用。同时热史模拟结果显示,断层下盘经历了古新世—始新世(65~45 Ma)快速剥蚀作用(图 4a),而同一时间断层上盘处于缓慢剥蚀状态。因此我们推测嘎尔敖包地区近北东—南西向的断层与近东西向逆冲断层同时发育,且具有走滑兼正断层的性质,北东—南西向断层作为近东西展布的逆冲断层的调节断层而存在,其在古新世—始新世的活动造成了断层上盘和下盘经历了不同速率的剥蚀作用。

南羌塘坳陷中新世以来发生了快速的剥蚀事件(图 6),而这一时期位于中部地区的样品 M21-3 记录了缓慢剥蚀的历史。中新世以来,羌塘盆地受到印度大陆持续向北俯冲远程效应的影响而发育大量的近南北向裂谷,南羌塘坳陷中部嘎尔敖包地区近北东—南西向断层受到这个构造运动的影响而再次活化。断层上盘的样品 M21-6 距离北东—南西向断层较近,受到北东—南西向断层再次活化的影响更大,使得其经历了中新世以来较快的冷却事件;而样品 M21-3 距离北东—南西向断层较远,受其影响较小,与区域上其他地区一样处于缓慢剥蚀/冷却状态。因此,我们推测南羌塘地体广泛发育的近南北向正断层活动时间为中新世以来。

4.3 盆地隆升剥蚀过程与油气保存的关系

南羌塘坳陷分布着近东西展布的大型古油藏带——毕洛错—昂达而错古油藏带,前人对其的研究认为其在中侏罗世末期—晚侏罗世末期(150~140 Ma)和中新世(约 20 Ma)发生过 2 次大规模的油气聚集和成藏^[69]。本文样品采自毕洛错—昂达而错古油藏带内的嘎尔敖包地区,其真实反映了古油藏带的剥蚀/冷却历史。

第一期早白垩世剥蚀/冷却事件晚于南羌塘坳陷毕洛错—昂达而错古油藏的中侏罗世末期—晚侏罗世末期的油气聚集和成藏,同时这一期冷却/剥蚀事件使得盆地侏罗系剥蚀了 1.7~2.6 km,并伴随着南羌塘坳陷近东西向大规模隔挡式褶皱的发育,这些褶皱变形与盆地主力烃源岩油气生成和运聚时空配置关系良好,为油气提供了有利圈闭构造^[58,69]。

第二期古新世—始新世剥蚀/冷却事件使得该地区地层剥蚀了 1.89 km,这一期的冷却事件与印

度大陆和拉萨地体的碰撞时间相一致。印度大陆和拉萨地体碰撞的远程效应,使得这一时期南羌塘地体上形成了近东西向大规模向南逆冲的推覆构造,且伴随着近北东—南西向走滑断层的发育,这一期构造运动产生的逆冲断层并伴随着隆升剥蚀事件,对早期形成油气保存的影响可能较大。

第三期剥蚀/冷却事件发生在中新世以来(约 20 Ma 以来),与南羌塘坳陷第二次油气聚集和成藏时间基本同期。这一期剥蚀/冷却事件在南羌塘坳陷广泛存在,且以较缓慢的剥蚀速率进行剥蚀,同时羌塘盆地由于受到印度大陆持续的向北俯冲,发育大量的近南北向的正断层^[5,37-38],使得先期发育的北东—南西向走滑断层再次活化,在靠近这些断层的地区遭受较快的剥蚀,剥蚀量也大于远离断层的区域。这一期剥蚀/冷却事件在区域上冷却速率较缓慢,且剥蚀量较小,其对南羌塘坳陷油气聚集和成藏的影响较为有限,而南北向正断层和再活化的走滑断层的发育范围和强度是影响油气保存的关键因素。

5 结论

(1)南羌塘坳陷共经历 3 期隆升剥蚀历史,即早白垩世、古新世—始新世和中新世以来,早白垩世南羌塘坳陷中部地区最早遭受剥蚀,随后剥蚀作用向南、北两侧传递。

(2)南羌塘坳陷近东西向展布的逆冲断层活动时间为古新世—始新世(65~45 Ma),北东—南西向走滑断层作为调节断层与近东西展布的断层同时开始活动。北东—南西向走滑断层受印度—亚洲大陆持续碰撞的影响,在中新世以来(约 20 Ma 以来)再次活动。

(3)南羌塘坳陷第一期隆升剥蚀事件(早白垩世)晚于毕洛错—昂达而错地区的中侏罗世末期—晚侏罗世末期的油气聚集和成藏;第三期隆升剥蚀事件(中新世以来)与毕洛错—昂达而错地区的第二期的油气聚集和成藏事件基本同期。

致谢:本文研究过程中受到中国地质调查局成都地质调查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,与南京大学李广伟教授和太原理工大学毕文军老师的交流和讨论受益匪浅,编辑和审稿专家提出了宝贵意见,在此一并感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

马泽良、何治亮和罗开平参与论文写作和修改;彭金宁、庄新兵参与实验设计;杨帆和刘栩参与了图件绘制。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The manuscript was drafted and revised by MA Zeliang, HE Zhiliang and LUO Kaiping. The experiment was designed by PENG Jinning and ZHUANG Xinbing. The figures were drawn by YANG Fan and LIU Xu. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] ROHRMANN A, KAPP P, CARRAPA B, et al. Thermochronologic evidence for plateau formation in central Tibet by 45 Ma[J]. *Geology*, 2012, 40(2): 187-190.
- [2] ZHAO Zhongbao, BONS P D, STÜBNER K, et al. Early Cretaceous exhumation of the Qiangtang Terrane during collision with the Lhasa Terrane, central Tibet[J]. *Terra Nova*, 2017, 29(6): 382-391.
- [3] BI Wenjun, LI Yalin, KAMP P J J, et al. Cretaceous-Cenozoic cooling history of the Qiangtang Terrane and implications for central Tibet formation[J]. *GSA Bulletin*, 2023, 135(5/6): 1587-1601.
- [4] DING L, KAPP P, CAI F L, et al. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 652-667.
- [5] LI Yalin, WANG Chengshan, DAI Jingen, et al. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 143: 36-61.
- [6] 张佳伟. 西藏中生代羌塘及马乡-林周盆地形成演化与剥露过程[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
ZHANG Jiawei. Evolution and exhumation of the Mesozoic Qiangtang and Maqu-Linzhou basins, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [7] 钱信禹. 北羌塘盆地与中央隆起带晚三叠世以来剥露历史的低温热年代学约束[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
QIAN Xinyu. Low-temperature thermochronological constraints on the exhumation history of the North Qiangtang Basin and the central uplift since the Late Triassic[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [8] BI W J, HAN Z P, LI Y L, et al. Deformation and cooling history of the Central Qiangtang Terrane, Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2020, 63(15): 1821-1837.
- [9] 王立成, 魏玉帅. 西藏羌塘盆地白垩纪中期构造事件的磷灰石裂变径迹证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1039-1047.
WANG Licheng, WEI Yushuai. Apatite fission track thermochronology evidence for the Mid-Cretaceous tectonic event in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 1039-1047.
- [10] REN Zhanli, CUI Junping, LIU Chiyang, et al. Apatite fission track evidence of uplift cooling in the Qiangtang Basin and constraints on the Tibetan Plateau uplift[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2015, 89(2): 467-484.
- [11] WANG Yu, ZHANG Xuemin, SUN Lixin, et al. Cooling history and tectonic exhumation stages of the south-central Tibetan Plateau (China): constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29(2/3): 266-282.
- [12] ZHAO Z B, BONS P D, LI C, et al. The Cretaceous crustal shortening and thickening of the South Qiangtang Terrane and implications for proto-Tibetan Plateau formation[J]. *Gondwana Research*, 2020, 78: 141-155.
- [13] 于俊秋, 吴珍汉, 赵珍, 等. 藏北改则康托盆地逆冲推覆构造磷灰石裂变径迹年代学制约[J]. *地质通报*, 2018, 37(6): 987-995.
YU Junqiu, WU Zhenhan, ZHAO Zhen, et al. Apatite fission track constraint on thrust faults in Kangtuo Basin, northern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(6): 987-995.
- [14] LI Chao, ZHAO Zhongbao, LU Haijian, et al. Late Mesozoic-Cenozoic multistage exhumation of the central Bangong-Nujiang Suture, central Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2022, 827: 229268.
- [15] XUE Weiwei, NAJMAN Y N, HU Xiumian, et al. Late Cretaceous to Late Eocene exhumation in the Nima area, central Tibet: implications for development of low relief topography of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2022, 41: e2021TC006989.
- [16] TONG Kui, LI Zhiwu, ZHU Lidong, et al. Thermochronology constraints on the Cretaceous-Cenozoic thermo-tectonic evolution in the Gaize region, central-western Tibetan Plateau: implications for the westward extension of the proto-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 240: 105419.
- [17] YANG Huanhuan, TANG Juxing, SONG Yang, et al. Thermal study of the Duolong ore district in Tibet: implications for the uplift history of the Qiangtang Terrane[J]. *International Geology Review*, 2021, 63(6): 735-747.
- [18] ZHANG Jiawei, LI Yalin, XU Ming, et al. New apatite fission track evidence from the northern Qiangtang terrane reveal two-phase evolution of central Tibet[J]. *Terra Nova*, 2021, 33(1): 95-108.
- [19] GLEADOW A J W, DUDDY I R. A natural long-term track annealing experiment for apatite[J]. *Nuclear Tracks*, 1981, 5(1/2): 169-174.
- [20] REINERS P W. Zircon (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 58(1): 151-179.
- [21] 付修根. 北羌塘中生代沉积盆地演化及油气地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
FU Xiugen. A dissertation submitted to Chinese academy of geological sciences for degree of doctor of philosophy[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2008.
- [22] 王剑, 丁俊, 王成善, 等. 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, 2009.
WANG Jian, DING Jun, WANG Chengshan, et al. Investigation and evaluation of strategic oil and gas resources in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geology Press, 2009.
- [23] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sci-*

- ences, 2000, 28: 211–280.
- [24] KAPP P, DECELLES P G. Mesozoic–Cenozoic geological evolution of the Himalayan – Tibetan orogen and working tectonic hypotheses [J]. *American Journal of Science*, 2019, 319 (3): 159–254.
- [25] ZHAO Zhongbao, BONS P D, WANG Genhou, et al. Origin and pre-Cenozoic evolution of the south Qiangtang basement, central Tibet [J]. *Tectonophysics*, 2014, 623: 52–66.
- [26] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录 [J]. *地质通报*, 2007, 26(1): 13–21.
- LI Cai, ZHAI Qingguo, DONG Yongsheng, et al. Lungmu Co-Shanghu plate suture in the Qinghai–Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(1): 13–21.
- [27] LI Cai, ZHAI Qingguo, DONG Yongsheng, et al. High-pressure eclogite-blueschist metamorphic belt and closure of paleo-Tethys Ocean in central Qiangtang, Qinghai–Tibet Plateau [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2): 209–218.
- [28] KAPP P, YIN A, HARRISON T M, et al. Cretaceous–Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet [J]. *GSA Bulletin*, 2005, 117(7/8): 865–878.
- [29] DING Lin, SPICER R A, YANG Jian, et al. Quantifying the rise of the Himalaya orogen and implications for the South Asian monsoon [J]. *Geology*, 2017, 45(3): 215–218.
- [30] 赵珍, 吴珍汉, 杨易卓, 等. 羌塘中部陆相红层时代的 U–Pb 年龄约束 [J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1155–1171.
- ZHAO Zhen, WU Zhenhan, YANG Yizhuo, et al. Establishing the chronostratigraphic framework of the continental red beds in central Qiangtang Basin: constrained by zircon U–Pb ages [J]. *Geological Review*, 2020, 66(5): 1155–1171.
- [31] KAPP P, MURPHY M A, YIN An, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet [J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 1029.
- [32] 吴珍汉, 叶培盛, 胡道功, 等. 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*, 2011, 30(7): 1009–1016.
- WU Zhenhan, YE Peisheng, HU Daogong, et al. Paleogene thrust system in southern Qiangtang Basin, central Tibetan Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(7): 1009–1016.
- [33] WU Zhenhan, YE Peisheng, BAROSH P J, et al. Early Cenozoic mega thrusting in the Qiangtang block of the northern Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86(4): 799–809.
- [34] 毕文军, 张佳伟, 李亚林, 等. 西藏中部羌塘地体白垩纪以来隆升剥蚀过程 [J]. *地学前缘*, 2023, 30(2): 18–34.
- BI Wenjun, ZHANG Jiawei, LI Yalin, et al. The uplift and exhumation processes in the Qiangtang terrane of central Tibet since the Cretaceous [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 18–34.
- [35] 赵珍, 陆露, 吴珍汉. 羌塘盆地中央隆起带的抬升演化: 构造—热年代学约束 [J]. *地学前缘*, 2019, 26(2): 249–263.
- ZHAO Zhen, LU Lu, WU Zhenhan. Uplifting evolution of the Central Uplift Belt, Qiangtang: constraints from tectono–thermochronology [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(2): 249–263.
- [36] YIN An. Mode of Cenozoic east–west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B9): 21745–21759.
- [37] HAN Shuai, LI Haibing, PAN Jiawei, et al. Co-seismic surface ruptures in Qiangtang Terrane: insight into Late Cenozoic deformation of central Tibet [J]. *Tectonophysics*, 2018, 750: 359–378.
- [38] 李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等. 大陆构造变形与地震活动: 以青藏高原为例 [J]. *地质学报*, 2021, 95(1): 194–213.
- LI Haibing, PAN Jiawei, SUN Zhiming, et al. Continental tectonic deformation and seismic activity: a case study from the Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 194–213.
- [39] TAPPONNIER P, XU Zhiqin, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 2001, 294(5547): 1671–1677.
- [40] BERNET M, GARVER J I. Fission-track analysis of detrital zircon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 58(1): 205–237.
- [41] 李广伟. 构造地貌与低温热年代学若干问题探讨 [J]. *地质学报*, 2021, 95(1): 214–226.
- LI Guangwei. A brief review of key issues in tectonic geomorphology and low temperature thermochronology applications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 214–226.
- [42] 常健, 邱楠生. 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*, 2017, 24(3): 79–93.
- CHANG Jian, QIU Nansheng. Apatite low-temperature thermochronometry and applications to Tarim Basin in the northwestern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 79–93.
- [43] VERMEESCH P. RadialPlotter: a Java application for fission track, luminescence and other radial plots [J]. *Radiation Measurements*, 2009, 44(4): 409–410.
- [44] FARLEY K A, WOLF R A, SILVER L T. The effects of long alpha-stopping distances on (U–Th)/He ages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(21): 4223–4229.
- [45] FLOWERS R M, KETCHAM R A, SHUSTER D L, et al. Apatite (U–Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(8): 2347–2365.
- [46] GALBRAITH R F. On statistical models for fission track counts [J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1981, 13(6): 471–478.
- [47] KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al. Improved modeling of fission-track annealing in apatite [J]. *American Mineralogist*, 2007, 92(5/6): 799–810.
- [48] 王剑, 谭富文, 王小龙, 等. 藏北羌塘盆地早侏罗世—中侏罗世早期沉积构造特征 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 198–205.
- WANG Jian, TAN Fuwen, WANG Xiaolong, et al. The sedimentary and tectonic characteristics of Qiangtang Basin in the Early Jurassic in northern Xizang (Tibet) [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 198–205.
- [49] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区岩石地层 [M]. 北京: 中

- 国地质大学出版社,1997:195-197.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. Stratigraphy (lithostratic) of Xizang autonomous region [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1997:195-197.
- [50] MA Anlin, HU Xiumian, GARZANTI E, et al. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang Basin: implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(7): 4790-4813.
- [51] HU Xiumian, GARZANTI E, MOORE T, et al. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59 ± 1 Ma) [J]. *Geology*, 2015, 43(10): 859-862.
- [52] 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3157-3170.
- XU Zhiqin, LI Haibing, TANG Zhemin, et al. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3157-3170.
- [53] KAPP P, DECELLES P G, GEHRELS G E, et al. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(7/8): 917-933.
- [54] PAN G T, WANG L Q, LI R S, et al. Tectonic evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011.
- [55] ZHU Dicheng, LI Shimin, CAWOOD P A, et al. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction [J]. *Lithos*, 2016, 245: 7-17.
- [56] CHEN Weiwei, ZHANG Shihong, DING Jikai, et al. Combined paleomagnetic and geochronological study on Cretaceous strata of the Qiangtang terrane, central Tibet [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 373-389.
- [57] LIU Deliang, SHI Rendeng, DING Lin, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopic compositions of Mesozoic granitoids in southern Qiangtang, Tibet: implications for the subduction of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean [J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 157-172.
- [58] 李亚林, 王成善, 黄继钧. 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*, 2008, 29(3): 283-289.
- LI Yalin, WANG Chengshan, HUANG Jijun. Deformation characteristics and finalizing age of the folds in the Qiangtang Basin and their relations to oil and gas accumulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(3): 283-289.
- [59] DECELLES P G, KAPP P, DING L, et al. Late Cretaceous to Middle Tertiary basin evolution in the central Tibetan Plateau: changing environments in response to tectonic partitioning, aridification, and regional elevation gain [J]. *GSA Bulletin*, 2007, 119(5/6): 654-680.
- [60] SUN Gaoyuan, HU Xiumian, SINCLAIR H D, et al. Late Cretaceous evolution of the Coqen Basin (Lhasa Terrane) and implications for early topographic growth on the Tibetan Plateau [J]. *GSA Bulletin*, 2015, 127(7/8): 1001-1020.
- [61] WANG Jiangang, HU Xiumian, GARZANTI E, et al. Early Cretaceous topographic growth of the Lhasaplano, Tibetan Plateau: constraints from the Damxung Conglomerate [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(7): 5748-5765.
- [62] LIU Deliang, SHI Rendeng, DING Lin, et al. Late Cretaceous transition from subduction to collision along the Bangong-Nujiang Tethys: new volcanic constraints from central Tibet [J]. *Lithos*, 2018, 296-299: 452-470.
- [63] WANG Chengshan, DAI Jingen, ZHAO Xixi, et al. Outward-growth of the Tibetan Plateau during the Cenozoic: a review [J]. *Tectonophysics*, 2014, 621: 1-43.
- [64] 吴珍汉, 高锐, 卢占武, 等. 羌塘盆地结构构造与油气勘探方向 [J]. *地质学报*, 2014, 88(6): 1130-1144.
- WU Zhenhan, GAO Rui, LU Zhanwu, et al. Structures of the Qiangtang Basin and its significance to oil-gas exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1130-1144.
- [65] LI Yalin, WANG Chengshan, ZHAO Xixi, et al. Cenozoic thrust system, basin evolution, and uplift of the Tanggula Range in the Tuotuohe region, central Tibet [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 482-492.
- [66] 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 等. 羌塘盆地隆鄂尼-昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升 [J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 615-627.
- WU Zhenhan, LIU Zhiwei, ZHAO Zhen, et al. Thrust and uplift of the Lung'erni-Angdarco paleo-oil reservoirs in the Qiangtang Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(4): 615-627.
- [67] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Active tectonics of Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83(B11): 5361-5375.
- [68] COLEMAN M, HODGES K. Evidence for Tibetan Plateau Uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension [J]. *Nature*, 1995, 374(6517): 49-52.
- [69] 王成善, 伊海生, 刘池洋, 等. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 139-143.
- WANG Chengshan, YI Haisheng, LIU Chiyang, et al. Discovery of paleo-oil-reservoir in Qiangtang Basin in Tibet and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 139-143.

(编辑 徐文明)