

西藏东巧—北拉地区班公湖—怒江洋俯冲闭合及 对南羌塘盆地演化的制约

张建勇^{1,2,3}, 许强^{4,5}, 曹雨⁴, 熊绍云^{1,2,3}, 刘思琪^{1,2,3}, 谈轩宇⁶, 谭秀成^{4,5}

1 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室; 3 中国石油杭州地质研究院;
4 西南石油大学地球科学与技术学院; 5 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学分室;
6 中国石化重庆页岩气有限公司

摘要 应用地层对比、砂岩岩相学和碎屑锆石 U-Pb 年代学的方法,重建东巧—北拉地区物源转换和班公湖—怒江洋多期次俯冲及微陆块的拼合过程。研究表明:东卡错微陆块南侧的中下侏罗统希湖群下段表现为上三叠统确哈拉群的再旋回沉积,而北侧上段则开始出现来自羌塘地区的物质。这标志着北侧早侏罗世俯冲的东巧分支洋盆消亡,东卡错微陆块在中侏罗世与羌塘地块拼合开始形成初始周缘前陆盆地。接奴群的物源完全来自南羌塘地区,表明周缘前陆盆地在微陆块南侧北拉洋俯冲挤压下持续发育。晚侏罗世—早白垩世 (147~141 Ma) 拉萨地块和羌塘地块东西向全面碰撞,至早白垩世晚期 (约 120 Ma) 南侧的分支洋盆北拉洋消亡代表碰撞结束。南羌塘地区受班公湖—怒江洋俯冲作用控制在早侏罗世发育由弧前—岩浆弧—弧后盆地组成的“一隆两坳”古地貌,并沉积了曲色组页岩和布曲组石灰岩。微陆块碰撞导致南羌塘盆地的隆起和海平面的下降,形成夏里组含膏质泥岩的潮坪相沉积。随着拉萨地块和羌塘地块的全面碰撞,南羌塘盆地从弧相关盆地卷入前陆盆地褶皱冲断带中,发生差异埋藏和隆升剥蚀。晚侏罗世—早白垩世,南羌塘盆地曲色组烃源岩和布曲组石灰岩在构造挤压作用下发生快速埋藏,进入生油和白云石化阶段,成为南羌塘盆地最重要的成藏期。

关键词 班公湖—怒江缝合带; 锆石 U-Pb 定年; 俯冲闭合过程; 物源转换; 南羌塘盆地

中图分类号: TE121.2 **文献标识码**: A

引用: 张建勇, 许强, 曹雨, 等. 西藏东巧—北拉地区班公湖—怒江洋俯冲闭合及对南羌塘盆地演化的制约[J]. 海相油气地质, 2024, 29(1): 1-16.

ZHANG Jianyong, XU Qiang, CAO Yu, et al. The subduction and closure of Bangong Lake-Nujiang Ocean in the Dongqiao-Beila area, Tibet and its constraints on the evolution of southern Qiangtang Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(1): 1-16.

0 前言

青藏高原由一系列依次拼贴到欧亚大陆的陆块组成^[1]。班公湖—怒江缝合带将拉萨地块和羌塘地块焊接在一起,是青藏高原内部一条极为重要的地质构造分界线,但是对班公湖—怒江洋打开、俯冲和消亡等威尔逊旋回的各个阶段尚未有一致的认识,争议极大。一般认为班公湖—怒江洋是在中晚二叠世打开并在三叠纪形成宽达 5 000 km 的新特提斯洋^[2-4],但是对其俯冲极性存在截然不同

的认识。南羌塘盆地岩浆体系、班公湖—怒江缝合带增生杂岩、物源体系和前陆盆地发育等特征指示班公湖—怒江洋在侏罗纪发生了向北俯冲的过程^[5-6],初始俯冲的时间则存在不同认识 (190 Ma 到 160 Ma)^[7-10]。与此相对应,拉萨地块和羌塘地块的初始碰撞时间为 163 Ma (微陆块碰撞)^[11]到 145 Ma (最终发生碰撞)^[6,12-14]。但也有观点认为拉萨地块北缘和羌塘地块南缘发育的侏罗纪—早白垩世的岩浆岩是班公湖—怒江洋双向俯冲的产物^[15-16],岩浆活动于 120 Ma 停止,代表拉萨地块和羌塘地块的

收稿日期: 2023-12-28; 改回日期: 2024-01-28

本文受中国石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目“羌塘盆地构造沉积演化与基本石油地质条件研究”(编号:2021DJ0801)和自然科学基金项目“林周盆地从海到山:对冈底斯俯冲—碰撞隆升过程的制约”(编号:42272257)、“羌塘盆地侏罗纪成盐环境与盐构造演化及油气赋存效应”(编号:42241202)和“探寻班公湖—怒江洋南向俯冲弧—沟体系中‘缺失’的沉积记录”(编号:42272237)的联合资助

第一作者: 张建勇, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质和碳酸盐岩研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号 中国石油杭州地质研究院; E-mail: zhangjy_hz@petrochina.com.cn

通信作者: 许强, 博士, 研究员, 主要从事大地构造、高原隆升和盆地演化研究。通信地址: 610500 四川省成都市新都区新都大道8号 西南石油大学; E-mail: xuqiang@swpu.edu.cn

最终碰撞^[15,17]。上述争议不仅制约对班公湖—怒江洋演化历史的认识,还直接关系到对羌塘盆地性质及其演化的认识。

位于班公湖—怒江缝合带北侧的羌塘盆地是我国陆上面积最大、勘探程度最低的中生代海相含油气盆地。尽管南羌塘盆地的油气地质调查已经走过了近30年的历程,积累了丰富的资料和认识,但对于羌塘盆地油气资源勘探前景存在2种截然不同的看法。一种观点认为羌塘盆地中生代发生强烈的构造隆升及改造,油气保存不容乐观^[18-19];另一种观点认为羌塘盆地具有良好的生储盖条件、巨大的油气资源潜力和勘探前景^[20-21],即使在后期发生构造改造,但地壳内部的隐伏构造仍然可能保存完整的油气圈闭^[22],特别是在南羌塘盆地昂达尔错—毕洛错一带发现东西长约150 km、南北约宽60 km的大型古油藏^[23-25],显示了南羌塘盆地良好的勘探前景。上述争议的核心在于对“源”的认识:形成南羌塘盆地古油藏带的下侏罗统曲色组富有机质油页岩烃源岩虽然厚度巨大(在毕洛错地区厚约305 m)^[26-27],但是分

布范围不清楚,不确定其生烃量能否支撑规模油气藏的形成。因此,需要进一步明确南羌塘盆地早侏罗世是否发育具有规模烃源岩形成的盆地环境。

厘定班公湖—怒江缝合带内多条蛇绿岩带与“沟—弧—盆”体系的配套关系及其与南羌塘盆地的演化至关重要。位于班公湖—怒江缝合带中段的东巧—北拉地区,蛇绿混杂岩发育,地层出露良好,为确定班公湖—怒江洋的俯冲消减过程及拉萨地块与羌塘地块的碰撞过程提供了重要信息。本文通过厘清东巧—北拉地区中生代地层物源变化,从而限定班公湖—怒江洋的俯冲消减过程和闭合时间,并讨论对南羌塘盆地的油气地质意义。

1 区域地质概况

青藏高原由5条近东西向平行的缝合带将一系列地块拼接而成。位于青藏高原中部的班公湖—怒江缝合带把南羌塘地块和北拉萨地块拼接在一起,是研究特提斯洋构造演化和青藏高原隆升过程的关键构造单元(图1)^[15-16,28-31]。

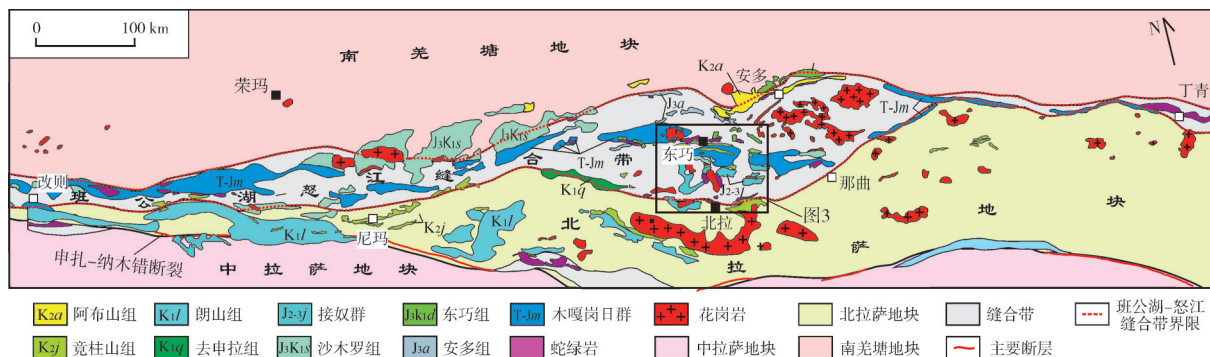


图1 班公湖—怒江缝合带改则—丁青构造格架图(据文献[3]修改)

Fig. 1 Tectonic map showing Bangong Lake–Nujiang suture zone from Gaize to Dingqing (cited from reference [3], modified)

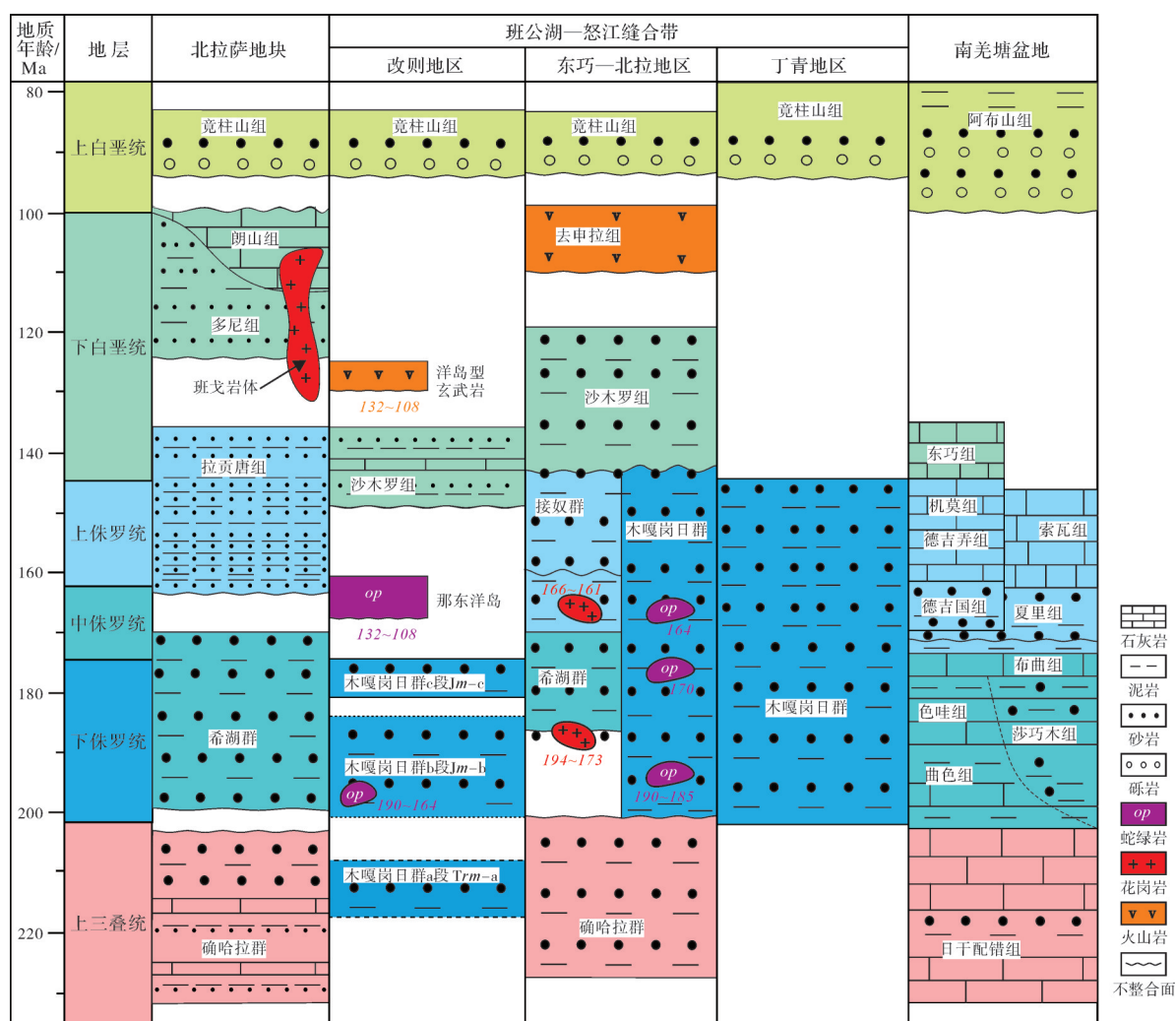
1.1 南羌塘盆地

南羌塘盆地位于班公湖—怒江缝合带和龙木错—双湖缝合带之间。变质岩岩基和地震反射剖面特征均反映羌塘地块存在双层结构的太古宙变质岩基底和统一的莫霍面^[32-34],浅层构造和深层构造具有明显的构造分层特征^[22,34]。上地壳发生强烈的冲断作用,形成了近东西向平行的褶皱冲断带^[35-36]。

南羌塘盆地发育完整的中生代沉积序列,包括侏罗系曲色组、色哇组、夏里组和索瓦组等活动大陆边缘沉积,并与下伏晚三叠世被动大陆边缘日干

配错组海相石灰岩整合接触(图2)。上白垩统阿布山组磨拉石不整合覆盖其上,表明晚白垩世时期南羌塘盆地已隆升成陆。

南羌塘盆地南缘从侏罗纪以来发育了连续的岩浆活动。安多地块183~171 Ma的花岗岩类被认为是班公湖—怒江洋向北俯冲形成的陆缘弧^[8,37]。南羌塘盆地西部的晚侏罗世岩浆弧和康琼、热那错地区的约169~150 Ma的花岗岩类是班公湖—怒江洋向北俯冲的产物^[38]。早白垩世岩浆岩以改则多不杂地区钙碱性花岗岩类和闪长岩最为典型,年龄约为125~100 Ma,一般被认为是拉萨地块与羌塘地块在碰撞过程中产生的^[15]。



注：岩体旁侧标注的斜体数字为该岩体的地质年龄，单位：Ma。

图2 南羌塘盆地、班公湖—怒江缝合带、北拉萨地块综合地层格架图 (据文献[3,12–13]修改)

Fig. 2 Stratigraphic correlation in the Bangong Lake–Nujiang suture zone, southern Qiangtang Basin and northern Lhasa terrane (cited from reference [3,12–13], modified)

1.2 班公湖—怒江缝合带

班公湖—怒江缝合带代表了拉萨地块和羌塘地块之间的特提斯洋的遗迹^[3,6]。中生代地层主要由上三叠统确哈拉群、木嘎岗日群增生杂岩、侏罗系深水沉积(希湖群、接奴群)、上侏罗统一下白垩统沙木罗组、下白垩统去申拉组和上白垩统竟柱山组组成(图2)。其中木嘎岗日群杂岩与中生代地层呈构造接触,被认为是与班公湖—怒江洋俯冲相关的增生杂岩,初始沉积时代为早侏罗世;上覆上侏罗统一下白垩统巫嘎组和沙木罗组为一套碎屑岩,巫嘎组和沙木罗组为同期异相沉积^[7],物源主要来自北侧的羌塘地块,分别是增生杂岩形成之前的前陆盆地沉积和之上的斜坡盆地沉积^[12]。但在东

巧—北拉地区,等时地层希湖群上段和接奴群被白垩统沙木罗组不整合覆盖。木嘎岗日群增生杂岩中发育蛇绿岩和碱性玄武岩,如洞错洋中脊型蛇绿岩(184~164 Ma)^[39]、东巧—北拉地区蛇绿岩(190 Ma)^[15,39–40]、安多地块蛇绿岩(183.4±2.5 Ma)^[40](图2)。东卡错微陆块发育的晚侏罗世岩浆作用集中在166~160Ma,可能是俯冲沉积物交代地幔楔部分熔融的产物^[17,41]。

1.3 拉萨地块

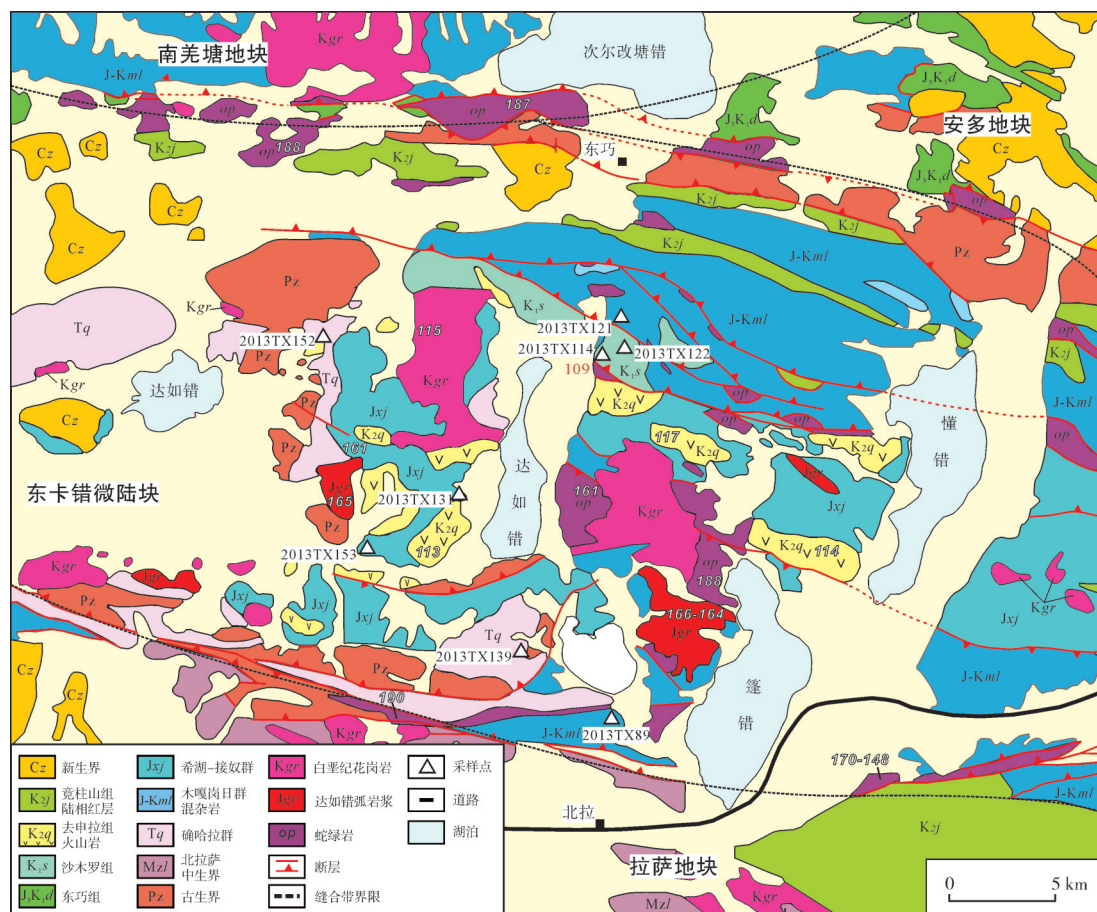
拉萨地块被分为南、中、北3块:或分别被洛巴堆—米拉山断层和狮泉河—纳木错断裂带分隔;或因南、北拉萨的新生地壳与中拉萨的古老结晶基底特征的不同所区分^[42–43]。

北拉萨地块主要沉积中生代地层。最老地层为上三叠统确哈拉群,中下侏罗统希湖群和拉贡唐组碎屑岩不整合覆盖其上^[13,44]。下白垩统多尼组 and 上白垩统竟柱山组磨拉石以角度不整合方式覆盖其上^[45] (图2)。拉萨地块北部已发现的岩浆岩集中在下白垩统,包括阿瓮错岩基、班戈岩基以及去申拉组和多尼组中的火山岩,年龄范围约为134~104 Ma,峰值大约为110 Ma^[17,41]。早白垩世岩浆岩中还发现了如双峰式火山岩(110 Ma)的复杂岩石类型,并显示出与碰撞相关的特征^[46]。根据早白垩世岩浆岩锆石的同位素特征和地层特征

判断北拉萨地块为新生地壳^[47]。

1.4 东卡错微陆块

东卡错微陆块位于班公湖—怒江缝合带中段东巧—北拉地区,安多地块的西侧,其北部和南部分别与南羌塘地块和拉萨地块通过东巧蛇绿岩带和北拉蛇绿岩带接触(图3)。2条蛇绿岩带之间的古生代地层指示陆块的存在及其北部与南部两侧分别发育2个中生代洋盆^[3],本文分别称之为东巧洋和北拉洋。该地层系统与拉萨地块类似,指示其可能起源于拉萨地块。



注: 岩体色块上标注的数字为该岩体的地质年龄, 单位: Ma; 采样点旁侧标注字符(如2013TX89)为样品编号。

图3 东巧—北拉地区地质图

Fig. 3 Geologic map of the Dongqiao-Beila area

东卡错微陆块出露7套中生代地层(图2),它们之间呈构造叠置关系。其中包括上三叠统确哈拉群石英砂岩、岩屑砂岩,中下侏罗统希湖群和中上侏罗统接奴群与之不整合接触,主要由页岩夹砂岩透镜体、砂岩、砾岩和火山碎屑岩组成。木嘎岗日群主体为侏罗纪时期的增生杂岩,主要由混杂岩组成,包括

岩屑砂岩、粉砂岩、杂砂岩等岩石。上侏罗统一下白垩统沙木罗组砂岩、硅质页岩、碳质板岩等不整合覆盖其上。下白垩统去申拉组不整合覆盖在下伏地层之上,主要是一套火山岩、火山碎屑岩、火山凝灰岩构成的地层。上白垩统竟柱山组,与下伏地层呈不整合接触,主要由砾岩、砂岩、泥岩组成。

东卡错微陆块岩浆作用强烈,主要发育2期岩浆活动。晚侏罗世侵位到混杂岩中的花岗岩和接奴群中的火山岩夹层,年龄范围为165~163 Ma,具有典型高镁安山岩的地球化学特征,被认为是班公湖—怒江洋俯冲消减的产物^[5,17,40~41]。下白垩统去申拉组火山岩和下白垩统安山岩(地质年龄为118~110 Ma)具有埃达克岩的地球化学性质,可能来自加厚陆壳的部分熔融^[17,48]。东巧微陆块构造活动强烈,主要发育了北拉—觉翁断裂、马前乡—蓬错断裂、爬错—机部乡断裂和东巧区断裂等4条断裂带,均呈近东西向在蛇绿岩发育地区展布延伸。

2 野外采样和实验方法

本文研究区位于班公湖—怒江缝合带的中段东巧—北拉地区,自南向北共采集8块样品(采样位置见图3):确哈拉群砂岩2块(2013TX139和2013TX152),希湖群砂岩2块(2013TX89和2013TX153),接奴群砂岩2块(2013TX131和2013TX121),沙木罗组砂岩1块(2013TX122),去申拉组火山岩1块(2013TX114)。

在详细的野外观察基础上,开展砂岩岩相学分析和锆石激光剥蚀—电感耦合等离子体质谱分析。砂岩碎屑颗粒统计分析采用Gazzi-Dickinson碎屑统计法^[49],本文主要统计了石英(Qt)、长石(F)、岩屑(L),石英(Qt)细分为单晶石英(Qm)和多晶石英(Qp),长石颗粒和岩屑未进行细分。石英颗粒总和为 $Qt = Qm + Qp$,岩屑颗粒总和为 $Lt = L + Qp$ 。

对上述8个样品在西南石油大学同位素年代学

实验室开展锆石U—Pb年代学分析。分析仪器采用美国NW193nm激光剥蚀系统与Agilent7800质谱仪联机。锆石PLE和91500作为测年外标。采用Iolite4程序处理锆石原始数据,获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 三组同位素的比值以及Th/U值。最优年龄的选取按以下标准进行:若 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 体系的年龄大于1 000 Ma,则取 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 体系的年龄作为最优年龄结果;若 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 体系的年龄小于1 000 Ma,则取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 体系的年龄作为最优年龄结果^[50]。锆石U—Pb相对年龄概率分布图和U—Pb年龄谐和图采用IsoplotR在线绘制^[51]。

3 实验结果

3.1 砂岩岩相学实验结果

共对7件样品进行了岩相学分析。这些样品以石英岩屑砂岩为主(图4a),表现出多岩屑、少长石,石英含量中等偏少,碎屑颗粒磨圆度呈次棱—次圆状的特征(图4a)。其中确哈拉群2件样品(2013TX139和2013TX152)在岩石成分上有一定差别,2013TX139样品的单晶石英与多晶石英含量几乎一致,而2013TX152样品的单晶石英含量明显高于多晶石英。

统计结果显示在 $Qm-F-Lt$ 图(图4b)中,所有样品的长石含量都少于10%,落在再旋回造山带范围内,其中,确哈拉群和希湖群碎屑颗粒落在岩屑质再旋回造山带,而接奴群和沙木罗组则主要落在过渡型再旋回造山带区间;在 $Qt-F-L$ 图(图4c)中,前者主要落在未切割弧区间内,后者主要落在再旋回造山带内^[52]。

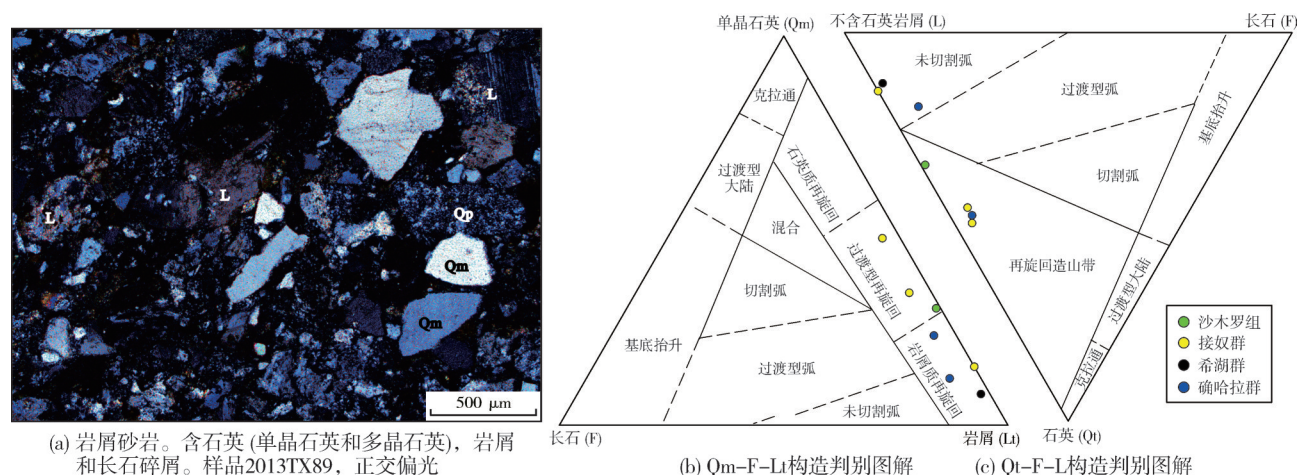


图4 东巧—北拉地区砂岩样品碎屑成分和构造背景判别(底图据文献^[49])

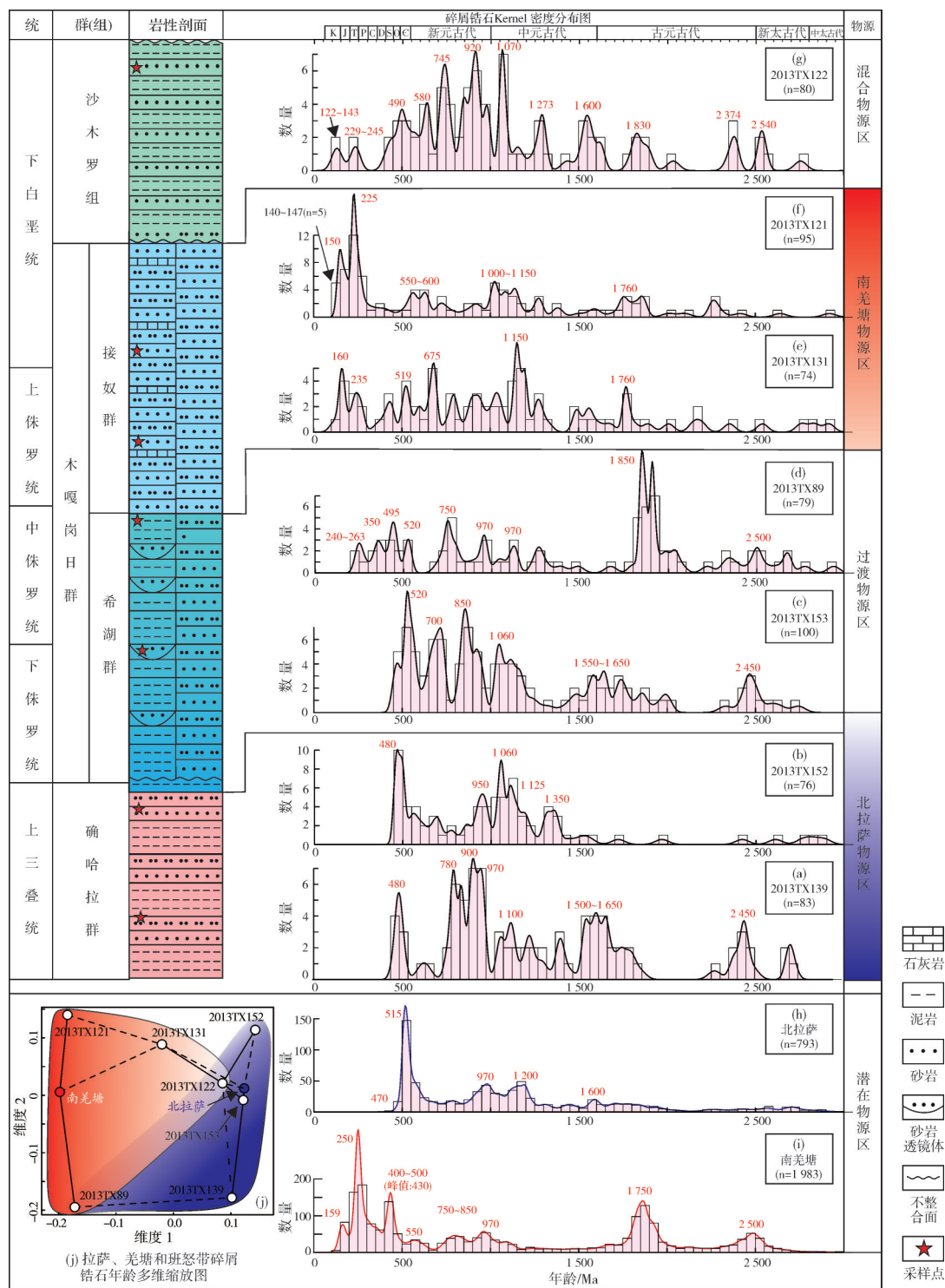
Fig. 4 Clastic constituents of the sandstone and identification of tectonic backgrounds in the Dongqiao-Beila area(base map cited from reference^[49])

3.2 碎屑锆石U-Pb测年结果

3.2.1 确哈拉群

样品 2013TX139 和 2013TX152 分别获得 83 个

和 76 个谐和年龄,大多数锆石具有岩浆成因的 Th/U 值 (0.1~2.62),年龄分布范围为 3 216~457 Ma。数据显示存在古元古代、新元古代和寒武纪年龄峰值,最小年龄值集中于早奥陶世(图 5a)。样品 2013TX152



注: 岩性剖面上的五角星表示右侧锆石的采样位置; 北拉萨地块数据来自文献[51,53~55], 南羌塘地块数据来自文献[6,11,37,51,56]。

图 5 东巧—北拉地区地层格架和碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄概率分布

Fig. 5 Stratigraphic framework and Kernel density distributions of detrital zircon U-Pb ages of sandstone samples in the Dongqiao-Beila area

缺少新元古代 780 Ma 峰值年龄 (图 5b)。

3.2.2 希湖群

希湖群 2 个样品具有显著不同的年龄特征。采自北拉地区的样品 2013TX153 共获得有效谐和年龄 100 组, Th/U 值范围为 0.1~1.75。该样品锆石年龄分布范围为 2 743~458 Ma, 分布特征与上三叠统确哈拉群锆石年龄一致 (图 5c)。而采自东巧地区的样品 2013TX89 出现晚古生代 (350 Ma) 和中生代的年龄 (263~240 Ma) (图 5d)。

3.2.3 接奴群

接奴群 2 个样品具有相似的锆石年龄谱。微陆块北侧样品 2013TX131 和南侧样品 2013TX121 分别获得 74 组和 95 组有效谐和年龄, 大多数 Th/U 值范围为 0.1~3.33, 显示岩浆成因锆石特征。2013TX131 样品锆石年龄分布范围为 2 918~152 Ma, 除出现古元古代、中元古代、新元古代、寒武纪的年龄外, 还

出现大量晚三叠世和侏罗纪的锆石年龄 (图 5e)。2013TX121 样品出现早白垩世年龄峰值 (140±2 Ma、141±2 Ma 和 144±2 Ma, 图 5f), 组成的最年轻的峰值年龄为 144±2 Ma (图 6a)。这组最年轻的年龄与缝合带西段改则地区和东段丁青地区的沙木罗组沉积时代一致^[6,13]。

3.2.4 沙木罗组

样品 2013TX122 共获得有效谐和年龄 80 组, Th/U 值显示岩浆成因锆石特征。该样品锆石年龄分布范围为 3 101~122 Ma, 存在古元古代、中元古代、新元古代、寒武纪、晚三叠世和早白垩世 (143~122 Ma) 等年龄峰值 (图 5g)。最年轻的锆石年龄进一步约束沙木罗组沉积时代为早白垩世晚期 (图 6b), 稍晚于缝合带北侧西段改则地区和东段丁青地区的沙木罗组沉积时代^[6,13], 但与南羌塘地块和东巧地区的白垩纪岩浆弧的时代一致^[38,41]。

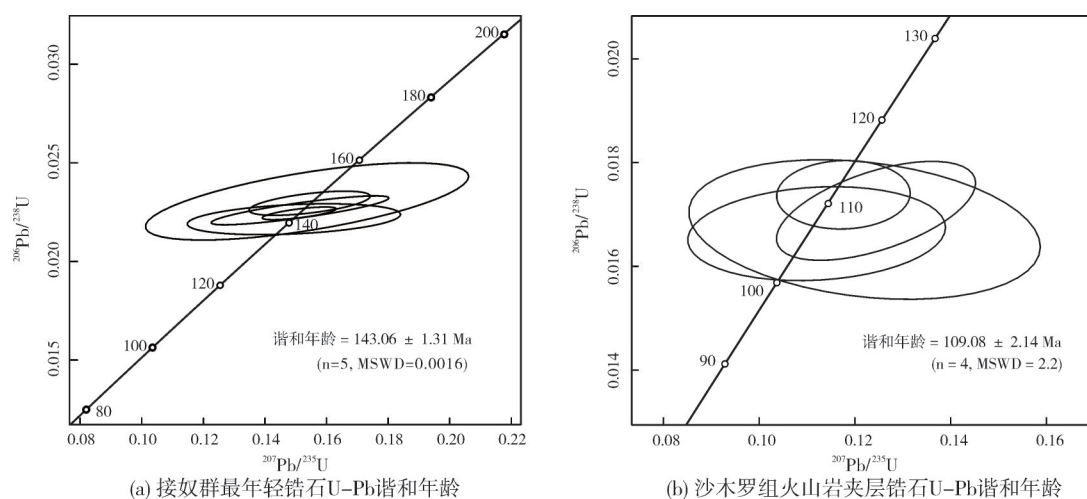


图 6 东巧地区接奴群上部 and 沙木罗组锆石 U-Pb 谐和年龄

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia ages of the youngest cluster of Jienu Group and volcanic rocks of Shamu Luo Formation in the Dongqiao area

3.2.5 去申拉组

东巧地区下白垩统去申拉组火山岩夹层样品 2013TX114, 共测试了 11 个测点获得 8 个 2 组谐和年龄。锆石 Th/U 值的范围为 0.64~2.62, 体现了岩浆成因的锆石特征。一组年龄较老, 为 333~324 Ma (n=2), 代表了古老基底的继承性锆石; 年轻的一组年龄值介于 111~106 Ma (n=4), 谐和年龄为 109.1±2.1 Ma (图 6b)。这与前人报道的东巧地区高钾玄武岩和粗安岩时代一致^[17]。

总之, 东巧—北拉地区晚三叠世至早白垩世地层碎屑锆石 U-Pb 年龄既具有相似性, 又具有明显

的差异性。不同地层单元所有样品的锆石 U-Pb 年龄均包含了古元古代、新元古代和古生代的年龄峰值, 主要的峰值集中在新元古代 (1 100~900 Ma) 和早古生代 (510~440 Ma) 两期。中生代锆石开始出现于希湖群上段, 大量出现在接奴群和沙木罗组的碎屑砂岩中 (图 5)。

4 讨论

4.1 物源分析

碎屑锆石可以在一定程度上限定沉积时盆地的构造背景^[57]。被动大陆边缘盆地地层的物源主

要来自内部克拉通的剥蚀和沉积,因而其锆石年龄分散,且最年轻的锆石年龄一般比地层时代要老;而汇聚板块边缘盆地沉积物以活动大陆边缘岛弧快速剥蚀为主,因而锆石年龄值相对集中,且最年轻的锆石年龄能代表适时的岩浆活动和地层沉积时代(时滞性小)^[58]。

地质历史上发生了多期的超大陆裂解-聚合事件。在印度、喜马拉雅、拉萨、羌塘、华南等基梅里地块的基底或者后期再旋回沉积地层中保留了大量古元古代和新元古代的超大陆事件信息^[51,54,59]。安多地块、八宿微陆块等夹于班公湖—怒江缝合带的微陆块也具有同时期的岩浆和变质事件^[8,60]。寒武纪—奥陶纪,泛非造山运动导致新一期的威尔逊超大陆旋回,非洲和南美洲组成的西冈瓦纳大陆与印度、羌塘、拉萨、华南、澳大利亚和南极洲组成的东冈瓦纳沿东非造山带和空噶造山带合并成统一的冈瓦纳大陆^[59,61-62],从而在拉萨和羌塘地块及其微陆块上广泛保存了该期构造事件的信息(图5h, 5i)。

上三叠统确哈拉群分布于拉萨地块北部,为碳酸盐台地—半深海斜坡环境^[13],沉积时班公湖—怒江洋自晚二叠世打开后刚裂解为成熟洋盆^[2-3,6],难以接受来自大洋北侧羌塘地块的沉积物质。确哈拉群锆石1 800 Ma和2 500 Ma峰值不显著(图5a, 5b),这与拉萨地块锆石年龄分布相似(图5h)^[50]。不仅如此,丁青地区确哈拉群存在晚三叠世锆石年龄,可能与冈底斯岩浆弧相关^[13],因而确哈拉群具有来自拉萨地块的单一物源区。希湖群下部砂岩样品2013TX153的碎屑锆石U—Pb年龄,最年轻的峰值为520 Ma,具有与确哈拉群一致的分布特征,表明他们的同源性高度一致(图5a, 5b, 5j)。二者在Qm—F—Lt和Qt—F—L图解上都落在岩屑质再旋回造山带(图4)。

希湖群砂岩样品2013TX89具有与2013TX153显著不同的锆石年龄分布特征(图5c, 5d)。该样品不仅有与南羌塘盆地一致的古元古代峰值年龄(约1 850 Ma),而且还出现了260~240 Ma相对年轻的锆石年龄。尽管羌塘中央隆起在晚三叠世发生强烈的变质作用和岩浆作用^[63-64],但是南羌塘盆地侏罗纪地层大量出现300~200 Ma峰值的年龄^[11],表明龙木措—双湖洋在闭合前发育了岩浆弧^[65]。南羌塘盆地的岩浆作用则更晚,最早的变质作用和岩浆侵入仅见于安多地块,发生在190~180 Ma^[6,37]。拉萨

地块南部冈底斯岩浆弧在245 Ma已开始形成^[66],但北拉地区希湖群却缺乏这一岩浆事件的年龄记录。这与丁青地区拉萨地块北缘的希湖群出现早白垩世年龄不同^[13],表明北拉地区已与拉萨地块分开,并不在冈底斯的物源供给范围。因此东巧—北拉地块北侧的希湖群物源来自于羌塘中央隆起,而南侧物质则来源于东巧—北拉地块下伏确哈拉群再循环(图5c, 5d, 5j)。

希湖群上覆接奴群的中生代锆石年龄增大,出现晚三叠世(235 Ma或225 Ma)、中侏罗世(160 Ma)和晚侏罗世(150 Ma)3个年龄峰值。对比南羌塘地区和北拉萨侏罗纪前的源区锆石特征(图5h, 5i),结合羌塘盆地中生代以来的岩浆发育历史^[37-38,64]和侏罗纪锆石年龄特征^[11,67],推断这些锆石很可能来自羌塘中央隆起龙木措—双湖缝合带和与南羌塘班公湖—怒江洋俯冲相关的岩浆弧。碎屑成分和锆石亲缘性图解显示,相对于下伏的希湖群,接奴群石英含量显著增加,落在过渡型再旋回造山带区间内(图4c),且与羌塘地区亲缘性高(图5j),同样反映了南羌塘的岛弧岩浆和羌塘中央隆起的持续快速剥蚀为东巧—北拉地区接奴群提供物源。

沙木罗组样品2013TX122碎屑锆石年龄(n=80)峰值既具有太古宙—元古宙的多个峰值年龄,又具有古生代490 Ma、中生代245~229 Ma和中生代143~122 Ma的年龄。与拉萨北缘和南羌塘地区锆石相比(图5h, 5i),新太古代(2 540 Ma)和古元古代(1 750 Ma)的年龄为南羌塘的优势峰值,而1 070 Ma和920 Ma的格林威尔事件更多出现在拉萨地块^[54]。寒武纪—奥陶纪的年龄代表的泛非事件在拉萨和羌塘均表现突出。中晚三叠世的年龄(245~229 Ma)和早白垩世的年龄(143 Ma和122 Ma)分别与羌塘中央隆起和南羌塘岛弧密切相关^[37-38,64]。仅有的一个样品落在再旋回造山带中(图4c),进一步排除了来自冈底斯岩浆弧的可能。因此,沙木罗组的砂岩碎屑成分主要来自南羌塘地块和中央隆起,少量来自北拉萨地块的碎屑混入其中(图5i, 5j)。

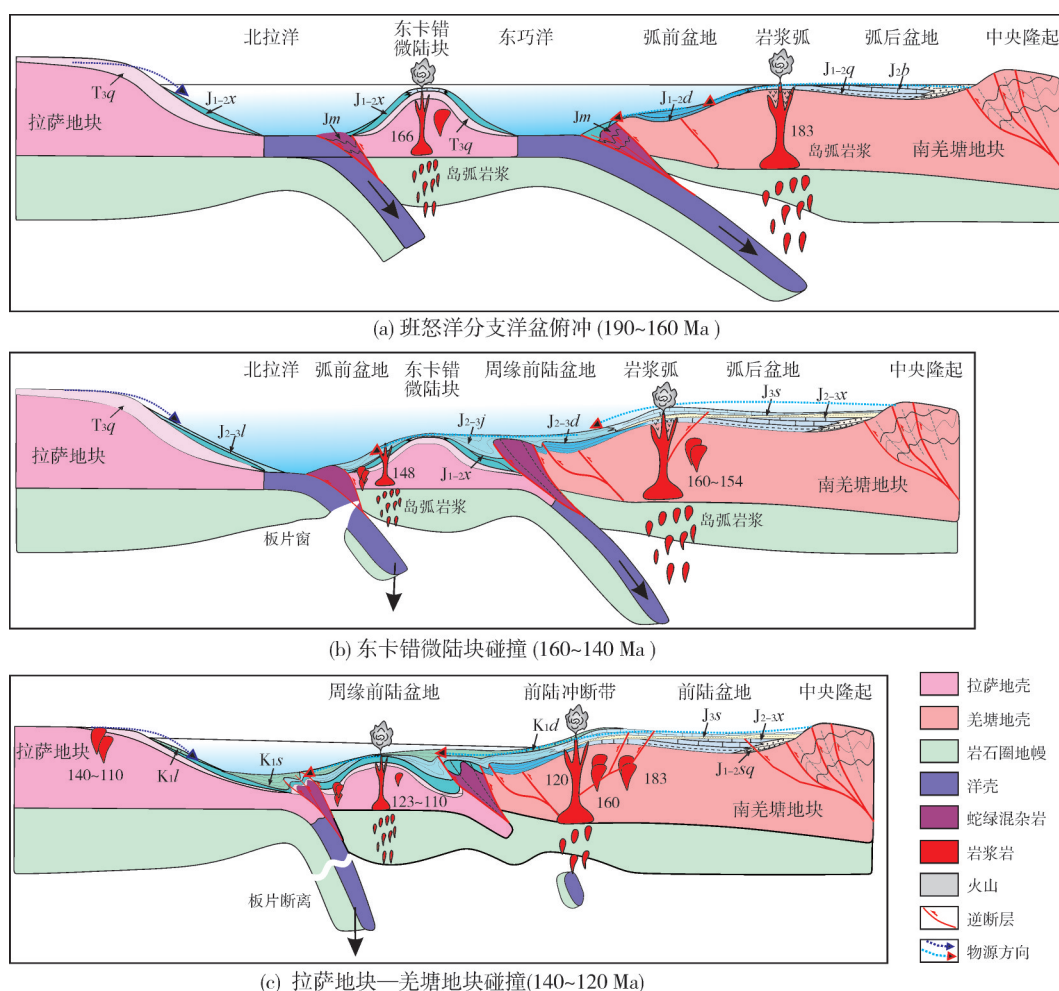
4.2 东巧—北拉地区班公湖—怒江洋的俯冲闭合过程

拉萨和羌塘地区的古生物和碎屑锆石亲缘性、古地磁证据,以及前人关于班公湖—怒江洋在中二叠世开始打开的认识表明^[2,4],晚三叠世拉萨和羌塘

纬度相差 40° ，说明班公湖—怒江洋已发育为宽度超过 5 000 km 的成熟大洋^[3]。东卡错微陆块和拉萨北部确哈拉群碎屑锆石年龄分布与拉萨地块古生代地层一致^[50]，反映了确哈拉群沉积期东拉错微陆块仍与拉萨地块拼合。早侏罗世早期，随着安多地块北部的安多洋俯冲消减，南羌塘地块南缘开始发育木嘎岗日群混杂岩，具有南羌塘属性的安多地块与南羌塘地块再次碰撞拼合^[8-9]，同时位于东卡错微陆块和南羌塘地块之间的班公湖—怒江洋分支洋盆东巧洋开始俯冲，在安多地块上发育早侏罗世的岩浆作用^[9,37]。尽管在羌塘地块其他地方尚未发现同时期的火山岩，但毕洛错地区的下侏罗统曲色组和色哇组出现的最年轻的锆石年龄为 183 Ma^[68]，反映了南羌塘地块也同时存在班公湖—怒江洋俯冲形成的岩浆弧（图 7a）。与此同时拉萨地块北部和东卡

错微陆块均沉积滨海—斜坡相的希湖群碎屑岩，古生物化石组合指示其时代为早中侏罗世。中下侏罗统希湖群与下伏的确哈拉群呈不整合接触关系，希湖群底部发育一套近 10 m 的底砾岩，砾石的成分与确哈拉群岩石组分基本一致。希湖群主要由碳质泥页岩夹透镜状砂岩、粉细砂岩组成，局部发育有半深水浊积岩，整体为一套滨浅海相沉积。希湖群是被动大陆边缘沉积^[69]，还是周缘前陆盆地，亦或是木嘎岗日群增生杂岩的一部分^[15]，其构造背景争议巨大。

希湖群在不同地区具有显著不同的锆石年龄。东卡错微陆块北拉地区的希湖群与下伏确哈拉群锆石年龄高度一致，反映其沉积物直接来自近原地的地层剥蚀；而北侧东巧地区的希湖群上段出现 270~240 Ma 的二叠纪—三叠纪的锆石，且年龄分布特征与木嘎岗日群混杂岩特征一致，反映了羌塘地



注：图中数字代表岩浆岩年龄，单位：Ma，来自文献[15,17,38,41]；地层符号：Ts 确哈拉群，J_{1-2x} 希湖群，J_{2-3j} 接奴群，J_{2-3l} 拉贡唐组，K_{1d} 朗山组，J_{1-2d} 德吉国组，J_{2-3d} 德吉弄组，J_{1-3q} 曲色组，J_{1-3s} 莎巧木组，J_{2b} 布曲组，J_{2-3x} 夏里组，J_{2-3s} 索瓦组，J_{2-3j} 接奴群，J_{2m} 木嘎岗日群，J_{2kd} 东巧组，K_{2s} 沙木罗组。

图 7 东巧—北拉地区班公湖—怒江洋俯冲闭合过程

Fig. 7 Subduction and closure processes of the Mesozoic Bangong Lake–Nujiang Ocean in the Dongqiao–Beila area

块的碎屑物质来源^[6]。拉萨地块北缘沉积的希湖群与下伏确哈拉群呈角度不整合关系,且岩石组分均以单晶石英为主,长石含量很少,反映了与拉萨地块相关的克拉通被动陆块边缘沉积^[13],这进一步说明东卡错微陆块在早侏罗世从拉萨地块北侧裂解出来,在其南侧形成局限的北拉洋。北侧在希湖群沉积晚期(中侏罗世)可能与羌塘地块已经拼贴在一起,发育南羌塘初始前陆盆地沉积(图7a, 7b)。

中晚侏罗世羌塘地块南缘广泛发育东西向年龄为170~150 Ma的岩浆作用,其地球化学性质具有高分异的I型花岗岩和锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 的特征,反映了与俯冲相关的大陆边缘弧的特征^[37,53]。隆升的大陆边缘弧的剥蚀物质被输送到东卡错微陆块,导致接奴群出现160~150 Ma峰值年龄,最年轻的年龄为147~140 Ma。因此从希湖群上部开始出现南羌塘地块物质到接奴群更年轻的物质的出现,揭示了东卡错微陆块在中侏罗世与南羌塘地块发生碰撞后,晚侏罗世—早白垩世周缘前陆盆地持续发育。这一构造和沉积转变同样在改则地区的巫嘎组得到复现。南羌塘盆地在166 Ma发生显著的构造—沉积事件,发育毕洛错组(夏里组)与下伏布曲组之间的构造角度不整合和沉积环境从碳酸盐台地转变为海陆过渡,这可能与东卡错微陆块的碰撞直接相关。在东卡错微陆块上同期形成170~160 Ma的高镁安山岩和岩浆岩体是由俯冲沉积物熔融产生的熔体与地幔橄榄岩发生交代作用的产物,反映了位于东卡错微陆块南侧的北拉洋在碰撞作用下开始向北俯冲消减导致发生地幔交代作用^[40]。

综合生物地层和碎屑锆石年代学特征,班公湖—怒江洋西段改则地区的不整合于木嘎岗日群之上的沙木罗组的沉积时代被确定为晚侏罗世—早白垩世。锆石年龄缺乏拉萨地块特有的格林威尔期年龄,表明其沉积物完全来自于北侧的羌塘地区。东卡错地区沙木罗组同样不整合在接奴群和木嘎岗日群混杂岩上。与改则地区不同,东卡错地区沙木罗组锆石年龄出现多个年龄峰值,表现来自拉萨和羌塘地区混源的特征。结合与北拉洋俯冲相关的岩浆从正常的大洋俯冲到板片断离的特征转变^[41],判断拉萨地块和羌塘地块已经完全拼贴在一起,班公湖—怒江洋壳岩石圈完全俯冲到东卡错微陆块和羌塘地块之下。最年轻的碎屑锆石年龄(143~122 Ma)限定拉萨地块和羌塘地块最终碰撞

发生在早白垩世,且比东西两侧的班公湖—怒江洋的主洋盆要晚约20 Ma。

4.3 班公湖—怒江洋演化对南羌塘盆地油气地质条件的制约

南羌塘盆地中生代以来显著受到位于其南侧的班公湖—怒江洋演化的控制。随着班公湖—怒江洋的俯冲、消减和闭合,南羌塘盆地自晚三叠世到早白垩世,经历了由被动大陆边缘到活动大陆边缘,再到碰撞隆升成陆的转换过程。晚二叠世班公湖—怒江洋从冈瓦纳大陆裂解开始形成,并在晚三叠世发展为成熟的大洋,羌塘地块南缘发展成为被动大陆边缘。南羌塘地块北侧的龙木措—双湖洋在晚三叠世俯冲消减到北羌塘地块之下,羌塘中部发育增生造山并在增生楔前的南羌塘地块上发育周缘前陆盆地系统^[65]。随着羌塘地块发生构造伸展作用,南羌塘北部和北羌塘普遍发育那底岗日火山岩^[10]。构造伸展结束后,晚三叠世末期羌塘地块广泛遭受剥蚀,发育构造角度不整合面^[70],仅在南羌塘北缘发育冲积扇砂砾岩,南羌塘南缘广泛发育了浅海陆棚相日干配错组泥晶灰岩。因此晚三叠世南羌塘盆地发育前陆盆地和浅海台盆的复合盆地系统。

晚三叠世末期—早侏罗世,班公湖—怒江洋从伸展扩张向俯冲消减转换,南羌塘地块构造属性发生重大转换,从被动大陆边缘转变为活动大陆边缘(图8)。南羌塘地块南缘早侏罗世开始发育的增生杂岩指示南羌塘盆地已由被动大陆边缘转换为活动大陆边缘。陆缘弧发育较为局限,安多地块此时发育大量的190~180 Ma岩浆和变质作用,是碰撞拼贴后安多地块南侧的班公湖—怒江洋持续向安多及南羌塘地块下俯冲的产物(图8)。南羌塘地块西部岩浆不发育,虽然仅在毕洛错地区曲色组底部发现一套厚约30 m的玄武安山岩,但南羌塘地块侏罗系曲色组、色哇组和毕洛错组(夏里组)和班公湖—怒江洋的木嘎岗日群混杂岩均存在183 Ma的碎屑锆石年龄^[6,11],反映了南羌塘地块确实存在一个消失了的侏罗纪早期岩浆弧。因此本文倾向于将南羌塘地区北部大陆弧(毕洛错)与班公湖—怒江洋向北俯冲的增生杂岩之间解释为弧前盆地,毕洛错以北到中央隆起带为弧后盆地,从而构成南羌塘侏罗纪向班公湖—怒江洋倾斜的“一隆两坳”的盆地格局(图8)。

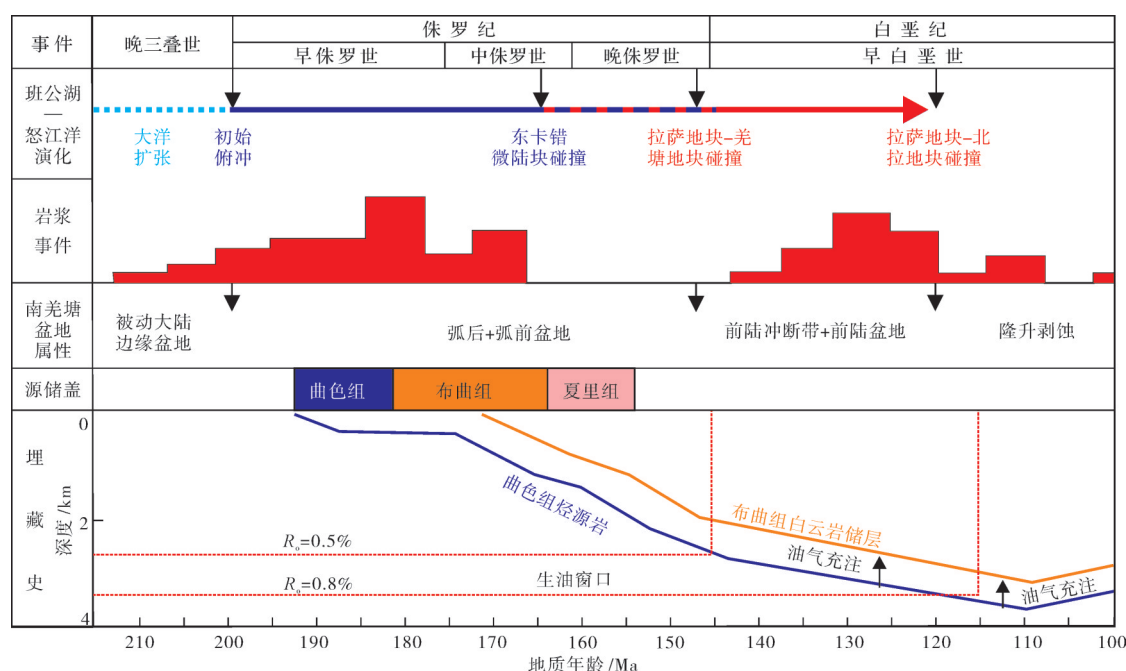


图8 班公湖—怒江洋演化和南羌塘盆地埋藏演化过程(岩浆岩数据来自文献[37])

Fig. 8 Correlations of the development and burial of the southern Qiangtang Basin and the evolution of the MesoTethyan Bangong Lake–Nujiang Ocean (magmatic rock data cited from reference [37])

在增生杂岩—弧前盆地—弧后盆地体系下,南羌塘岩石圈仰冲挠曲,相对海平面上升,弧前盆地发育深水陆棚相泥岩和石灰岩沉积。弧后盆地由于岩浆弧的隆起初始发育三角洲、潟湖,沉积体系从靠近中央隆起带的以碎屑岩为主向毕洛错地区的膏岩、泥页岩(曲色组)转变^[71]。菊石化石组合、碎屑锆石年龄和碳同位素组成负偏等特征反映了毕洛错地区曲色组的时代为早侏罗世^[24,68],沉积环境为频繁缺氧的还原环境,且位于造山带前缘浅海、三角洲,为低等生物繁盛创造了有利条件^[72-73]。因而早侏罗世南羌塘盆地发育了优质的烃源岩,毕洛错地区纹层状富含有机质泥页岩厚50~75 m, TOC平均值为8.34%,氯仿沥青“A”含量平均值为0.66%, R_o 介于0.9%~1.3%,达到优质烃源岩标准^[27];此外安多地块北部114道班附近的侏罗系也发育优质烃源岩^[73]。因此,从盆地发育背景上分析,南羌塘盆地存在弧后盆地广泛发育优质烃源岩的构造和沉积条件。

随着班公湖—怒江缝合带的持续俯冲消减,弧后盆地持续发育,发生差异沉降,南羌塘地区开阔台地范围进一步扩大,进入稳定的弧后坳陷盆地沉降阶段,并通过中央隆起的海水通道进入北羌塘坳陷盆地,弧前仍然沉积陆棚—深海体系。整个羌塘盆地沉积统一的布曲组石灰岩,南羌塘地区的布曲

组发育碳酸盐台地以富含鲕粒、砂砾屑和生物碎屑的颗粒灰岩为特征的高能浅滩沉积^[71]。纵向上沉积组合的变化代表了布曲组沉积早期海平面上升、沉积相带发生退积,晚期海平面下降、沉积相带向南迁移^[74]。

布曲组沉积结束后,随着东卡错微陆块拼贴在南羌塘地块东侧南缘,班公湖—怒江洋东段的那曲洋闭合,南羌塘盆地西段的班公湖—怒江洋仍为俯冲消减阶段,发育大规模的年龄为170~160 Ma的岩浆弧,同期的岩浆弧在东卡错微陆块上仍然发育,表明其南侧的北拉洋与班公湖—怒江洋主洋盆一起在发生向北的俯冲作用^[6,15]。因此南羌塘东侧盆地局部进入初始碰撞挤压阶段^[11],海平面快速下降,在炎热干旱的环境下沉积了夏里组潮坪相含膏质碎屑岩^[75],成为南羌塘盆地最重要的区域性盖层。布曲组在此构造挤压背景下快速埋藏,发生埋藏白云石化作用,形成真正意义上的有效储层(图8)。

随着东卡错微陆块的拼贴,羌塘盆地南缘持续发育160~150 Ma的班公湖—怒江洋俯冲形成成熟的陆缘弧,但盆地内部进入短暂的平静期,相对海平面再次上升,在羌塘盆地西部沉积索瓦组石灰岩。晚侏罗世—早白垩世早期,班公湖—怒江洋同时发生消亡。随着中段东巧—北拉地区的北拉洋

盆也在早白垩世晚期消亡,标志着班公湖—怒江洋最终消亡。南羌塘盆地在此构造背景下从弧相关的盆地系统转变为前陆褶皱冲断—前陆盆地系统,导致南羌塘盆地广泛发生挤压抬升剥蚀和挤压变形^[21,76]。碰撞导致的构造差异沉降,使得曲色组烃源岩在晚侏罗世—早白垩世进入成熟—高成熟阶段,油气大量生成;布曲组石灰岩发生白云石化,从而形成有利的优质储层;强烈的挤压作用为油气充注提供了动力条件,并形成有效圈闭,使得生成的油气能够被有效保存起来。白云岩包裹体记录了130 Ma和120 Ma至少2次油气充注事件和2次调整事件,揭示晚侏罗世—早白垩世为南羌塘盆地最重要的成藏期(图8)。

5 结 论

通过班公湖—怒江缝合带中段东巧—北拉地区构造填图和物源分析,恢复了班公湖—怒江缝合带分支洋盆俯冲消减过程及南羌塘盆地的构造—沉积响应。位于拉萨地块和羌塘地块之间的东巧—北拉地区由北侧东巧蛇绿混杂带和南侧的北拉蛇绿混杂带及夹于其间的东卡错微陆块组成,三者为自北向南逐渐变年轻的构造叠置关系。

(1)确定中生代东巧—北拉地区物源的显著变化。晚三叠世确哈拉群物源来自拉萨地块,中下侏罗统希湖群物源与其具有显著的差异;北拉地区希湖群物源与确哈拉群相似,东巧地区希湖群上段出现来自羌塘地块的物源。中上侏罗统接奴群的物源主要来自羌塘地块,而上覆沙木罗组的物源为拉萨地块和羌塘地块的混合型。

(2)建立了东巧—北拉地区班公湖—怒江洋的俯冲消减模式。晚三叠世,班公湖—怒江洋为成熟的扩张洋盆,早侏罗世班公湖—怒江洋开始向羌塘地块下俯冲,与安多地块拼贴后,东巧洋开始俯冲,东卡错微陆块从北拉萨地块裂解,并形成北拉洋。中侏罗世,东巧洋俯冲消减,东卡错微陆块与南羌塘地块碰撞,并在东卡错微陆块上发育周缘前陆盆地,北拉洋开始俯冲。晚侏罗世—早白垩世,随着拉萨地块—羌塘地块碰撞,班公湖—怒江洋主洋盆地消减。早白垩世中晚期,中段北拉洋消减,拉萨地块与东卡错微陆块再次拼合。

(3)厘定了南羌塘盆地中生代构造属性变化。晚三叠世南羌塘盆地为北侧的前陆盆地和南侧被动大陆边缘盆地组成的复合盆地;早侏罗世随着班

公湖—怒江洋俯冲,南羌塘盆地转变为北侧的弧后盆地与南侧的弧前盆地组成的复合盆地,并在初始海泛期沉积曲色组优质烃源岩,持续沉降发育布曲组生物碎屑灰岩。中侏罗世,东卡错微陆块的拼贴导致南羌塘盆地发生构造隆升和差异埋藏,沉积区域性夏里组含膏质泥岩。晚侏罗世—早白垩世,班公湖—怒江缝合带全面开始初始碰撞,南羌塘盆地结束海相沉积开始隆升成陆,其南缘卷入周缘前陆盆地的冲断带中发生强烈变形,导致烃源岩成熟和白云岩的形成,是南羌塘盆地最重要的成藏期。随着早白垩世北拉洋的最终拼合,羌塘盆地进入强烈隆升剥蚀阶段。

参 考 文 献

- [1] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627–1674.
WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. Acta petrologica sinica, 2020, 36(6): 1627–1674.
- [2] 张以春, 张予杰, 袁东勋, 等. 班公湖—怒江洋打开时间的地层古生物约束[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 3083–3096.
ZHANG Yichun, ZHANG Yujie, YUAN Dongxun, et al. Stratigraphic and paleontological constraints on the opening time of the Bangong–Nujiang Ocean [J]. Acta petrologica sinica, 2019, 35(10): 3083–3096.
- [3] HU Xiumian, MA Anlin, XUE Weiwei, et al. Exploring a lost ocean in the Tibetan Plateau: birth, growth, and demise of the Bangong–Nujiang Ocean [J]. Earth–science reviews, 2022, 229: 104031.
- [4] FAN Jianjun, NIU Yaoling, LUO Anbo, et al. Timing of the Mesozoic–Tethys ocean opening: evidence from permian sedimentary provenance changes in the South Qiangtang terrane, Tibetan Plateau [J]. Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology, 2021, 567: 110265.
- [5] ZENG Yunchuan, CHEN Jianlin, XU Jifeng, et al. Sediment melting during subduction initiation: geochronological and geochemical evidence from the Darutso high–Mg andesites within ophiolite melange, central Tibet [J]. Geochemistry geophysics geosystems, 2016, 17(12): 4859–4877.
- [6] LI Shun, YIN Changqing, GUILMETTE C, et al. Birth and demise of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean: a review from the Gerze area of central Tibet [J]. Earth–science reviews, 2019, 198: 102907.
- [7] LI Shun, DING Lin, GUILMETTE C, et al. The subduction–accretion history of the Bangong–Nujiang Ocean: constraints from provenance and geochronology of the Mesozoic strata near Gaize, central Tibet [J]. Tectonophysics, 2017, 702: 42–60.
- [8] GUYNN J H, KAPP P, PULLEN A, et al. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet [J]. Geology, 2006, 34(6): 505–508.
- [9] ZHANG Xiaoran, SHI Rendeng, HUANG Qishuai, et al. Early

- jurassic high-pressure metamorphism of the Amdo terrane, Tibet: constraints from zircon U-Pb geochronology of mafic granulites[J]. *Gondwana research*, 2014, 26(3): 975-985.
- [10] WANG Jian, FU Xiugen, WEI Hengye, et al. Late triassic basin inversion of the Qiangtang Basin in northern Tibet: implications for the closure of the Paleo-Tethys and expansion of the Neo-Tethys [J]. *Journal of Asian earth sciences*, 2022, 227: 105119.
- [11] 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.
- [12] LI Shun, GUILMETTE C, DING Lin, et al. Provenance of mesozoic clastic rocks within the Bangong-Nujiang suture zone, central Tibet: implications for the age of the initial Lhasa-Qiangtang collision [J]. *Journal of Asian earth sciences*, 2017, 147: 469-484.
- [13] CHEN Yaofei, DING Lin, LI Zhenyu, et al. Provenance analysis of Cretaceous peripheral foreland basin in central Tibet: implications to precise timing on the initial Lhasa-Qiangtang collision[J]. *Tectonophysics*, 2020, 775: 228311.
- [14] FAN Jianjun, NIU Yaoling, LIU Yiming, et al. Timing of closure of the Meso-Tethys Ocean: constraints from remnants of a 141-135 Ma ocean island within the Bangong-Nujiang Suture Zone, Tibetan Plateau [J]. *GSA bulletin*, 2021, 133(9/10): 1875-1889.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] LI Shimin, WANG Qing, ZHU Dicheng, et al. One or two early Cretaceous arc systems in the Lhasa terrane, southern Tibet [J]. *Journal of geophysical research: solid Earth*, 2018, 123(5): 3391-3413.
- [18] 王岫岩, 云金表, 罗笃清, 等. 西藏羌塘盆地动力学演化与油气前景探讨[J]. *石油学报*, 1999, 20(3): 38-42.
WANG Xiuyan, YUN Jinbiao, LUO Duqing, et al. Discussion on geodynamic evolution and oil-gas prospect of Qiangtang Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 1999, 20(3): 38-42.
- [19] 许岩, 郭巍, 刘立, 等. 藏北羌塘盆地与西亚特提斯盆地构造比较及其油气远景[J]. *地质通报*, 2005, 24(6): 564-569.
XU Yan, GUO Wei, LIU Li, et al. Comparison of structure between the Qiangtang Basin, northern Tibet, China, and the Tethyan basin, western Asia, and their petroleum prospect evaluation [J]. *Geological bulletin of China*, 2005, 24(6): 564-569.
- [20] 王剑, 付修根, 沈利军, 等. 论羌塘盆地油气勘探前景[J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1091-1113.
WANG Jian, FU Xiugen, SHEN Lijun, et al. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet)[J]. *Geological review*, 2020, 66(5): 1091-1113.
- [21] 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): 1-15.
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): 1-15.
- [22] 吴珍汉, 赵珍, 叶培盛, 等. 青藏高原中部色林错—伦坡拉逆冲推覆构造系统[J]. *地球学报*, 2016, 37(4): 441-448.
WU Zhenhan, ZHAO Zhen, YE Peisheng, et al. The Siling Co-Lunpola thrust systems in the central Tibetan Plateau [J]. *Acta geoscientica sinica*, 2016, 37(4): 441-448.
- [23] 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.
- [24] 伊海生, 夏国清. 羌塘盆地优质烃源岩和白云岩储油层的层位与分布[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(3): 455-464.
YI Haisheng, XIA Guoqing. Stratigraphic position of high-quality source rocks and distribution of oil-bearing dolomites in the Qiangtang Basin [J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2022, 42(3): 455-464.
- [25] 夏国清, 季长军, 杨伟, 等. 南羌塘坳陷中侏罗统布曲组油藏带流体包裹体特征与油气充注历史[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1247-1255.
XIA Guoqing, JI Changjun, YANG Wei, et al. Fluid inclusions characteristics and hydrocarbon charging history of oil reservoir belt in the Mid-Jurassic Buqu Formation, Southern Qiangtang Depression [J]. *Acta petrolei sinica*, 2016, 37(10): 1247-1255.
- [26] 杨易卓, 黄志龙, 赵珍, 等. 羌塘盆地毕洛错地区古油藏地球化学特征与油源对比[J]. *地球科学*, 2022, 47(5): 1834-1848.
YANG Yizhuo, HUANG Zhilong, ZHAO Zhen, et al. Geochemical characteristics and oil source correlation of paleo-reservoirs in Biluocuo area, Qiangtang Basin [J]. *Earth science-Journal of China University of Geosciences*, 2022, 47(5): 1834-1848.
- [27] 沈安江, 付小东, 张建勇, 等. 羌塘盆地上三叠统一侏罗统海相页岩油特征及发现意义[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 962-974.
SHEN Anjiang, FU Xiaodong, ZHANG Jianyong, et al. Characteristics and discovery significance of the Upper Triassic-Lower Jurassic marine shale oil in Qiangtang Basin, NW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2023, 50(5): 962-974.
- [28] DING Lin, KAPP P, CAI Fulong, et al. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift [J]. *Nature reviews earth & environment*, 2022, 3(10): 652-667.
- [29] XU Qiang, DING Lin, HETZEL R, et al. Low elevation of the northern Lhasa terrane in the Eocene: implications for relief development in South Tibet [J]. *Terra nova*, 2015, 27(6): 458-466.
- [30] XIONG Zhongyu, LIU Xiaohui, DING Lin, et al. The rise and demise of the Paleogene Central Tibetan Valley [J]. *Science advances*, 2022, 8(6): eabj0944.
- [31] 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.
- [32] 黄继钧. 羌塘盆地基底构造特征[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 333-337.
HUANG Jijun. Structural characteristics of the basement of the Qiangtang Basin [J]. *Acta geologica sinica*, 2001, 75(3): 333-337.
- [33] 王国芝, 王成善. 西藏羌塘基底变质岩系的解体和时代厘定[J]. *中国科学: D辑 地球科学*, 2001(增刊1): 77-82.
WANG Guozhi, WANG Chengshan. Disintegration and age determination of basement metamorphic rocks series in Qiangtang, Tibet [J]. *Science in China(series D)*, 2001(S1): 77-82.
- [34] 何登发, 王成善, 管树巍, 等. 分层滑脱: 羌塘盆地构造研究的新概念[J]. *地质科学*, 2023, 58(1): 1-17.
HE Dengfa, WANG Chengshan, GUAN Shuwei, et al. Stratified detachment deformation: new concept for studies on the tectonics of Qiangtang Basin [J]. *Chinese journal of geology*, 2023, 58(1): 1-17.
- [35] GAO Rui, WANG Haiyan, YIN An, et al. Tectonic development of the northeastern Tibetan Plateau as constrained by high-resolution deep seismic-reflection data [J]. *Lithosphere*, 2013, 5(6): 555-574.
- [36] 卢占武, 高锐, 李永铁, 等. 青藏高原羌塘盆地基底结构与南北向变化: 基于一条 270 km 反射地震剖面的认识[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3319-3327.
LU Zhanwu, GAO Rui, LI Yongtie, et al. Structure of basement and its N-S direction transformation in Qiangtang Basin in Tibet: discovered by a 270 km seismic reflection profile [J]. *Acta petrologica sinica*, 2011, 27(11): 3319-3327.
- [37] 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.
- [38] LI Jinxiang, QIN Kezhang, LI Guangming, et al. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic intermediate-felsic intrusions in central Tibet: petrogenetic and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2014, 198/199: 77-91.
- [39] WANG Baodi, WANG Liquan, CHUNG S L, et al. Evolution of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: insights from the geochronology and geochemistry of mafic rocks within ophiolites [J]. *Lithos*, 2015, 245: 18-33.
- [40] 李小波, 王保弟, 刘函, 等. 西藏达如错地区晚侏罗世高镁安山岩: 班公湖-怒江洋壳俯冲消减的证据[J]. *地质通报*, 2015, 34(2): 251-261.
LI Xiaobo, WANG Baodi, LIU Han, et al. The Late Jurassic high-Mg andesites in the Daru Tso area, Tibet: evidence for the subduction of the Bangong Co-Nujiang river oceanic lithosphere [J]. *Geological bulletin of China*, 2015, 34(2): 251-261.
- [41] LI Shimin, WANG Qing, ZHU Dicheng, et al. Reconciling orogenic drivers for the evolution of the Bangong-Nujiang Tethys during Middle-Late Jurassic [J]. *Tectonics*, 2020, 39(2): e2019TC005951.
- [42] HOU Zengqian, DUAN Lianfeng, LU Yongjun, et al. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Economic geology*, 2015, 110(6): 1541-1575.
- [43] ZHU Dicheng, WANG Qing, WEINBERG R F, et al. Interplay between oceanic subduction and continental collision in building continental crust [J]. *Nature communications*, 2022, 13(1): 7141.
- [44] 尼玛次仁, 谢尧武. 藏北那曲地区中三叠世地层的新发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(12): 1141-1149.
Nimaciren, XIE Yaowu. Discovery of Middle Triassic strata in the Nagqu area, northern Tibet, China, and its geological implications [J]. *Geological bulletin of China*, 2005, 24(12): 1141-1149.
- [45] ZHANG Qinghai, DING Lin, CAI Fulong, et al. Early Cretaceous Gangdese retroarc foreland basin evolution in the Selin Co Basin, central Tibet: evidence from sedimentology and detrital zircon geochronology [J]. *Geological Society, London*, 2011, 353: 27-44.
- [46] SUI Qinglin, WANG Qing, ZHU Dicheng, et al. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa terrane, Tibet: implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent-continent collision zone [J]. *Lithos*, 2013, 168/169: 144-159.
- [47] ZHU Dicheng, ZHAO Zhidan, NIU Yaoling, et al. The Lhasa terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. *Earth and planetary science letters*, 2011, 301(1/2): 241-255.
- [48] LUO Anbo, FAN Jianjun, ZHANG Bochuan, et al. Cretaceous uplift history of the Tibetan Plateau: insights from the transition of marine to terrestrial facies in central Tibet [J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2022, 601: 111103.
- [49] 何杰, 王华, GARZANTI E. 砂岩(砂)的岩相分析和分类标准[J]. *地球科学*, 2020, 45(6): 2186-2198.
HE Jie, WANG Hua, GARZANTI E. Petrographic analysis and classification of sand and sandstone [J]. *Earth science*, 2020, 45(6): 2186-2198.
- [50] GEHRELS G, KAPP P, DECELLES P, et al. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen [J]. *Tectonics*, 2011, 30(5). doi: 10.1029/2011TC002868.
- [51] VERMEESCH P. Isoplot R: a free and open toolbox for geochronology [J]. *Geoscience frontiers*, 2018, 9(5): 1479-1493.
- [52] DICKINSON W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985: 333-361.
- [53] LI Guangwei, SANDIFORD M, LIU Xiaohan, et al. Provenance of Late Triassic sediments in central Lhasa terrane, Tibet and its implication [J]. *Gondwana research*, 2014, 25(4): 1680-1689.
- [54] ZHU Dicheng, ZHAO Zhidan, NIU Yaoling, et al. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia [J]. *Geology*, 2011, 39(8): 727-730.
- [55] LEIER A L, KAPP P, GEHRELS G E, et al. Detrital zircon

- geochronology of Carboniferous–Cretaceous strata in the Lhasa terrane, Southern Tibet [J]. *Basin research*, 2007, 19(3): 361–378.
- [56] PULLEN A, KAPP P, GEHRELS G E, et al. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo–Tethys Ocean [J]. *Geology*, 2008, 36(5): 351–354.
- [57] CAWOOD P A, HAWKESWORTH C J, DHUIME B. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875–878.
- [58] BARHAM M, KIRKLAND C L, HANDOKO A D. Understanding ancient tectonic settings through detrital zircon analysis [J]. *Earth and planetary science letters*, 2022, 583: 117425.
- [59] CAWOOD P A, ZHAO Guochun, YAO Jinling, et al. Reconstructing South China in phanerozoic and precambrian supercontinents [J]. *Earth–science reviews*, 2018, 186: 173–194.
- [60] 尹峥, 丁林, 李金祥, 等. 班公湖—怒江缝合带东段八宿地区古生代地层碎屑锆石 U–Pb 年龄: 物源分析及构造意义 [J]. *地质科学*, 2023, 58(3): 945–964.
- YIN Zheng, DING Lin, LI Jinxiang, et al. Detrital zircon U–Pb ages from Paleozoic strata in the eastern Bangong Lake–Nujiang suture zone, Basu area: provenance analysis and tectonic affinity [J]. *Chinese journal of geology*, 2023, 58(3): 945–964.
- [61] LI Sanzhong, ZHAO Shujuan, LIU Xin, et al. Closure of the Proto–Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia [J]. *Earth–science reviews*, 2018, 186: 37–75.
- [62] TANG Hao, XU Qiang, LI Shuangjian, et al. The Ordovician retroarc foreland basin on the Yangtze block linked to the final assemblage of Gondwana [J]. *Lithosphere*, 2022: 8698933.
- [63] LI Shan, CHUNG Sunlin, HOU Zengqian, et al. Early Mesozoic magmatism within the Tibetan Plateau: implications for the Paleo–Tethyan tectonic evolution and continental amalgamation [J]. *Tectonics*, 2019, 38(10): 3505–3543.
- [64] ZHAI Qingguo, JAHN B M, SU Li, et al. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: zircon U–Pb ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characteristics, and tectonic implications [J]. *Journal of Asian earth sciences*, 2013, 63: 162–178.
- [65] 王根厚, 李典, 梁晓. 南羌塘印支期增生造山带组成、结构及演化 [J]. *地学前缘*, 2023, 30(3): 242–261.
- WANG Genhou, LI Dian, LIANG Xiao. Structure, composition and evolution of the Indosinian South Qiangtang accretionary complex [J]. *Earth science frontiers*, 2023, 30(3): 242–261.
- [66] ZHU Dicheng, WANG Qing, WEINBERG R F, et al. Continental crustal growth processes recorded in the Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Annual review of Earth and planetary sciences*, 2023, 51: 155–188.
- [67] MA Anlin, HU Xiumian, GARZANTI E, et al. Paleogeographic and tectonic evolution of Mesozoic Qiangtang Basins (Tibet) [J]. *Tectonophysics*, 2023, 826: 229957.
- [68] FU Xiugen, WANG Jian, FENG Xinglei, et al. Early Jurassic carbon–isotope excursion in the Qiangtang Basin (Tibet), the eastern Tethys: implications for the Toarcian oceanic anoxic event [J]. *Chemical geology*, 2016, 442: 62–72.
- [69] 周亚龙, 张树林. 西藏比如盆地中新生代构造演化 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2009, 29(3): 95–100.
- ZHOU Yalong, ZHANG Shulin. Tectonic evolution of the Biru Basin in Xizang during the Mesozoic–Cenozoic [J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2009, 29(3): 95–100.
- [70] 陈文西, 王剑, 汪正江, 等. 藏北羌塘盆地菊花山地区晚三叠世古岩溶不整合面的发现及其意义 [J]. *地质论评*, 2007, 53(5): 699–703.
- CHEN Wenxi, WANG Jian, WANG Zhengjiang, et al. Discovery and significance of paleokarst unconformity between the Xiaochaka Formation and the Nadigangri Formation in Juhuaashan region, Qiangtang Basin, northern Xizang (Tibet) [J]. *Geological review*, 2007, 53(5): 699–703.
- [71] 段志明, 钟成全, 朱华平, 等. 南羌塘盆地羌资–2 井中侏罗统色哇组和布曲组沉积特征 [J]. *中国地质*, 2009, 36(2): 355–365.
- DUAN Zhiming, ZHONG Chengquan, ZHU Huaping, et al. Sedimentary characteristics of Middle Jurassic Sewa and Buqu Formations from Qiangzi Well–2, southern Qiangtang Basin, Tibet [J]. *Geology in China*, 2009, 36(2): 355–365.
- [72] 付修根, 王剑, 曾玉红, 等. 羌塘中生代盆地大洋缺氧事件及全球对比 [J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1130–1142.
- FU Xiugen, WANG Jian, ZENG Yuhong, et al. Oceanic anoxic events in the Mesozoic Qiangtang Basin and global comparison [J]. *Geological review*, 2020, 66(5): 1130–1142.
- [73] 李高杰, 夏国清, 伊海生, 等. 西藏南羌塘坳陷泥质烃源岩评价及有利生烃区预测 [J]. *地质论评*, 2020, 66(5): 1241–1260.
- LI Gaojie, XIA Guoqing, YI Haisheng, et al. Characteristics of the Mesozoic marine argillaceous source rocks and prediction of favorable hydrocarbon generation area in South Qiangtang Depression, Xizang (Tibet) [J]. *Geological review*, 2020, 66(5): 1241–1260.
- [74] 夏国清, 伊海生, 李高杰, 等. 南羌塘坳陷布曲组油藏带特征及空间演化规律 [J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 90–96.
- XIA Guoqing, YI Haisheng, LI Gaojie, et al. Characteristics and evolution of oil reservoir zones of Buqu Formation in the southern Qiangtang Depression [J]. *Lithologic reservoirs*, 2017, 29(1): 90–96.
- [75] 曾永耀, 何沛锋, 赵涛, 等. 羌塘盆地晚侏罗世夏里组磁学参数指示的沉积环境及其成盐意义 [J]. *地质学报*, 2018, 92(3): 618–628.
- ZENG Yongyao, HE Peifeng, ZHAO Tao, et al. Magnetic parameters of the Late Jurassic Xiali Formation, Qiangtang Basin: implications for sedimentary environment and salt formation [J]. *Acta geologica sinica*, 2018, 92(3): 618–628.
- [76] 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.

The subduction and closure of Bangong Lake–Nujiang Ocean in the Dongqiao–Beila area, Tibet and its constraints on the evolution of southern Qiangtang Basin

ZHANG Jianyong^{1,2,3}, XU Qiang^{4,5}, CAO Yu⁴, XIONG Shaoyun^{1,2,3},

LIU Sijie^{1,2,3}, TAN Xuanyu⁶, TAN Xiucheng^{4,5}

1. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC;
3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 4. School of Earth Science and Technology,
Southwest Petroleum University; 5. Southwest Petroleum University Division of Key Laboratory
of Carbonate Reservoir, CNPC; 6. Sinopec Chongqing Shale Gas Co., Ltd

Abstract: The Bangong Lake–Nujiang suture zone is an extreme important tectonic boundary in the Tibetan Plateau which is not only closely related to evolution of the Tethyan tectonic domain, but also directly controls the formation and inversion of the Mesozoic southern Qiangtang oil and gas-bearing basin. Based on stratigraphic correlation, sandstone petrography analysis and detrital zircon U–Pb dating, this paper reconstructs provenance changes in the Dongqiao–Beila area and reveals multi-stage subduction processes and microblock amalgamations in the central Bangong Lake–Nujiang Ocean (BNO). The BNO branch (Amdo Ocean) at Dongqiao–Beila area began to subduct in the Early Jurassic, resulting in amalgamation of the Amdo block to the southern Qiangtang terrane and rifting the Dongkaco microblock away from the northern Lhasa terrane and formed two new BNO branches of the Dongqiao Ocean to the north and Beila Ocean to the south. The lower Xihu Group close to the Beila suture in the south of the Dongkaco microblock shows recycle deposits from the underlying Upper Triassic Quehala Group, while the upper Xihu Group close to the Dongqiao suture in the north of the Dongkaco microblock began to receive detritus from the southern Qiangtang terrane, indicating the Dongqiao Ocean demised and the Dongkaco microblock has amalgamated on the southern margin of the Qiangtang terrane with a peripheral foreland basin developed during the Middle Jurassic. Subsequent subduction of the Beila Ocean drove the Dongkaco microblock continuing to converge with south Qiangtang terrane in the Middle Jurassic and promote abundant materials from the south Qiangtang terrane transporting into the Middle–Upper Jurassic Jienu Group in the foreland basin on the Dongkaco microblock. Wide collision between the Qiangtang and Lhasa terrane occurred during the latest Jurassic and Early Cretaceous (147–141 Ma) and continued during Aptian (ca. 120 Ma) until the Beila Ocean finally dimed at Dongqiao–Beila Area.

In response to multi-stage northward subductions of the BNO, the south Qiangtang Basin changed from passive continental margin to active continental margin during earliest Jurassic and developed arc-related basin system of east–west extending back-arc basin, volcanic arc and fore arc basin from north to south. The Lower Jurassic Quse black shale and overlying Buqu bioclastic limestone deposited in the back-arc basin. Continuous convergence and microblock collision contributed to rapid regression and uplift of the south Qiangtang basin, resulting in the deposition of tidal Xiali Formation with gypsum and mudstone during the Middle Jurassic. As the result of collision between the Lhasa and Qiangtang terrane in the Early Cretaceous, the south Qiangtang Basin evolved in fold thrust belt of the peripheral foreland basin and resulted in differential burial and denudation of the Jurassic successions. During the Late Jurassic–Early Cretaceous, the Quse black shale and Buqu bioclastic limestone were correspondingly buried rapidly due to the tectonic compression and entered the stage of oil generation and dolomitization, making it become the most important accumulation period in the south Qiangtang Basin.

Key words: Bangong Lake–Nujiang suture zone; zircon U–Pb dating; the process of subduction and closure; provenance change; southern Qiangtang Basin

ZHANG Jianyong, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in petroleum geology and geology of carbonate reservoirs. Add: No. 920 Xixi Rd., Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: zhangjy_hz@petrochina.com.cn

XU Qiang, Corresponding author: PhD, Professorate Researcher, mainly engaged in research on geotectonics, plateau uplift and basin evolution. Add: No. 8 Xindu Avenue, Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China. E-mail: xuqiang@swpu.edu.cn