

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.07.003

班公湖-怒江缝合带上侏罗统一下白垩统沙木罗组沉积构造背景

罗安波¹, 范建军^{1,2*}, 张博川¹, 段梦龙¹LUO Anbo¹, FAN Jianjun^{1,2*}, ZHANG Bochuan¹, DUAN Menglong¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

2. 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室, 吉林 长春 130026

1. College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

2. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Changchun 130026, Jilin, China

摘要:班公湖-怒江洋闭合时限的不确定制约了对青藏高原晚中生代演化及班怒成矿带成矿地球动力学背景的认识。上侏罗统一下白垩统沙木罗组及其与下伏洋壳物质的沉积不整合是解决上述问题的关键。通过整理前人的研究资料,详细地总结了沙木罗组的年代学和沉积学特征,认为上侏罗统一下白垩统沙木罗组可分为下部晚侏罗世—早白垩世晚期(牛津期—阿普特期)的浅海陆棚-斜坡相沉积和上部早白垩世末期(阿尔必期)的河口-滨海相沉积。在此基础上,提出沙木罗组下部及其沉积不整合可能是班公湖-怒江洋北向俯冲时大洋岛弧与南羌塘地体碰撞的沉积响应,而沙木罗组上部形成于班公湖-怒江洋闭合及随后拉萨-羌塘软碰撞的背景。因此,班公湖-怒江洋的中西段应该至早白垩世阿尔必期才闭合。

关键词:青藏高原;班公湖-怒江缝合带;沙木罗组;洋盆闭合

中图分类号:P534.51;P534.52;P539.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)07-1155-14

Luo A B, Fan J J, Zhang B C, Duan M L. Discussion on tectonic setting of Upper Jurassic-Lower Cretaceous Shamuluo Formation along Bangong-Nujiang suture zone. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(7): 1155-1168

Abstract: The uncertainty of closure of the Bangong-Nujiang ocean has restricted the understanding of the late Mesozoic evolution of the Tibetan Plateau and the Metallogenic Geodynamic background of the Bangong-Nujiang metallogenic belt. The sedimentary unconformity between the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Shamuluo Formation and the underlying oceanic crust materials is a key to solve the above problems. In this paper, the chronological and sedimentological characteristics of the Shamuluo Formation are summarized in detail by sorting out the previous research data. Then, we propose that the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Shamuluo Formation can be divided into the Late Jurassic-late Early Cretaceous (Oxfordian-Aptian) shallow marine shelf-slope facies strata and the end of Early Cretaceous (Albian) estuarine-coastal facies strata. On the basis, it is suggested that the lower part and its sedimentary unconformity probably represented arc-arc and arc-continent collisions along the northern margin of the Bangong-Nujiang ocean during the Late Jurassic-Early Cretaceous, while the upper part should be formed in the background of closure of Bangong-Nujiang ocean and subsequent Lhasa-Qiangtang initial soft collision. Therefore, we believe that the middle and western segments of Bangong-Nujiang ocean was not closed until the Albian.

Key words: Tibetan Plateau; Bangong-Nujiang suture zone; Shamuluo Formation; closure of ocean

收稿日期:2021-01-20;修订日期:2021-04-08

资助项目:国家自然科学基金项目《班公湖-怒江缝合带早白垩世洋岛型岩石组合构造属性研究——以仲岗和塔仁本为例》(批准号:41972236)、第二次青藏高原综合科学考察《特提斯大陆增生与第三极形成》(编号:2019QZKK0703)、吉林大学研究生创新基金资助项目《班公湖-怒江洋的闭合记录:热那地区沙木罗组的沉积学证据》(编号:101832020CX215)

作者简介:罗安波(1994-),男,在读博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail:2279687817@qq.com

* 通信作者:范建军(1988-),男,博士,副教授,从事青藏高原大地构造与区域地质研究。E-mail:fanjj03@163.com

在古造山带研究中,大洋岩石圈消亡和陆壳块体碰撞是最令人瞩目的事件之一。因此,确定洋盆闭合与初始碰撞时限成为造山带研究的重点内容^[1-4]。关于如何限定洋盆闭合与初始碰撞的时间,不同学者进行了多方面探讨,但由于造山带的复杂性及在一些方法应用上的误区(例如用磨拉石沉积时代、A型花岗岩形成时代、高压变质峰期年龄等限定碰撞时间,然而这些可能和碰撞事件相关的地质记录也可以在俯冲阶段形成),对于古洋盆闭合和造山带碰撞的时间仍存在争议^[3-4]。

班公湖-怒江缝合带横亘于青藏高原中部,夹持于拉萨地体和南羌塘地体之间(图1)。随着大量专题研究在青藏高原的陆续开展,研究者逐渐认识到班公湖-怒江缝合带不仅是重要的构造界线,也是一条具有经济价值的成矿带^[1,23-24]。然而,由于班公湖-怒江缝合带本身复杂的构造演化历史及高原恶劣的工作条件,该带的许多重要地质问题尚处于争论中,其所代表的班公湖-怒江洋(班公湖-怒江中特提斯洋)的闭合时限成为争论的焦点之一^[1,24]。目前,关于班公湖-怒江洋的闭合时限问题,主要存在2种观点。①自班公湖-怒江缝合带内发现上侏罗统一白垩统沙木罗组 and 东巧组与下伏蛇绿岩和木嘎岗日岩群之间的沉积不整合以来,前人基本认同班公湖-怒江洋在晚侏罗世—早白垩世早期已经消亡,并于早白垩世逐渐进入碰撞造山阶段^[25-27]。依据此观点,班公湖-怒江缝合带及周缘大量早白垩世岩浆岩被解释为班公湖-怒江洋闭合后板片断离的产物^[28-31]或陆陆碰撞导致地壳加厚与拆沉的产物^[32-34];缝合带及周缘早白垩世滨浅海相地层则是在板片断离或地壳拆沉等伸展环境下海侵的沉积响应^[5,15,35],抑或与雅鲁藏布江洋北向俯冲引起的弧后拉张有关^[36]。②随着早白垩世中晚期洋壳记录的发现(图1),如塔仁本洋岛^[37-38]、仲岗洋岛^[39-41]、康穷蛇绿岩^[31]、放射虫硅质岩^[42]等,部分学者提出班公湖-怒江洋至少在早白垩世中晚期仍处于形成和发展阶段,其消亡时间应晚于早白垩世中晚期^[1,22,39,41,43-45]。值得注意的是,后续研究对原来认定的沙木罗组造山不整合的属性提出了质疑。范建军^[1]指出,沙木罗组可能仅是班公湖-怒江洋北侧弧-弧、弧-陆碰撞闭合的沉积响应,不能作为班公湖-怒江洋闭合的标志;Li等^[46]则认为沙木罗组应该是中晚侏罗世班公湖-怒江洋

洋脊俯冲的沉积产物。另外,吴建亮等^[16]和张建珍等^[17]依次在班公湖-怒江缝合带西段的昂龙岗日和热邦地区的沙木罗组内发现了与班公湖-怒江洋俯冲过程密切相关的早白垩世高镁安山岩(141~134 Ma)和高镁流纹质岩石(113 Ma),认为沙木罗组不能作为班公湖-怒江洋闭合的沉积产物。因此,依据班公湖-怒江洋消亡时间晚于早白垩世中晚期的观点,班公湖-怒江缝合带及其周缘大量早白垩世的岩浆岩被解释为班公湖-怒江洋正常俯冲、俯冲板片回返或洋脊俯冲等的岩浆记录^[47-50],而区域上大量的早白垩世滨浅海相地层是班公湖-怒江洋周缘正常沉积的产物^[51]。因此,班公湖-怒江洋闭合时限的不确定制约了对青藏高原晚中生代演化及班怒成矿带成矿地球动力学背景的认识。

沉积岩与沉积建造,特别是沉积岩与下伏洋壳物质(包括蛇绿岩、洋岛、海相复理石等)的沉积不整合接触关系,记录了大洋演化和闭合消亡过程的信息^[1,3]。如前所述,班公湖-怒江洋闭合时限的争议主要集中在早白垩世早期或晚期,因此上侏罗统一白垩统沙木罗组及沉积不整合构造属性的研究成为解决班公湖-怒江洋早白垩世演化争论的关键之一。如果这期晚侏罗世—早白垩世早期的沉积不整合确实代表了造山不整合,那么班公湖-怒江洋在早白垩世早期闭合是可能的;而如果它们不是造山不整合,那么班公湖-怒江洋在早白垩世的构造演化需重新考虑。综上,深入探讨班公湖-怒江缝合带内上侏罗统一白垩统沙木罗组及其角度不整合的沉积构造背景,对于解决班公湖-怒江洋闭合时限的争论十分必要。

1 区域地质概况

青藏高原地处特提斯构造域的东段,是地球上最活跃的构造带之一。自20世纪板块构造理论引入青藏高原研究以来,前人积累的丰硕成果表明现今的青藏高原自北向南存在5条主要的缝合带,包括康西瓦-玛沁-昆仑山缝合带、西金乌兰-金沙江缝合带、龙木错-双湖-澜沧江缝合带、班公湖-怒江缝合带和印度-雅鲁藏布江缝合带。以这些缝合带为界,青藏高原自北向南又划分为松潘-甘孜地体、北羌塘地体、南羌塘地体、拉萨地体和喜马拉雅地体^[5,52-55](图1-b)。

青藏高原中部的班公湖-怒江缝合带是班公湖-

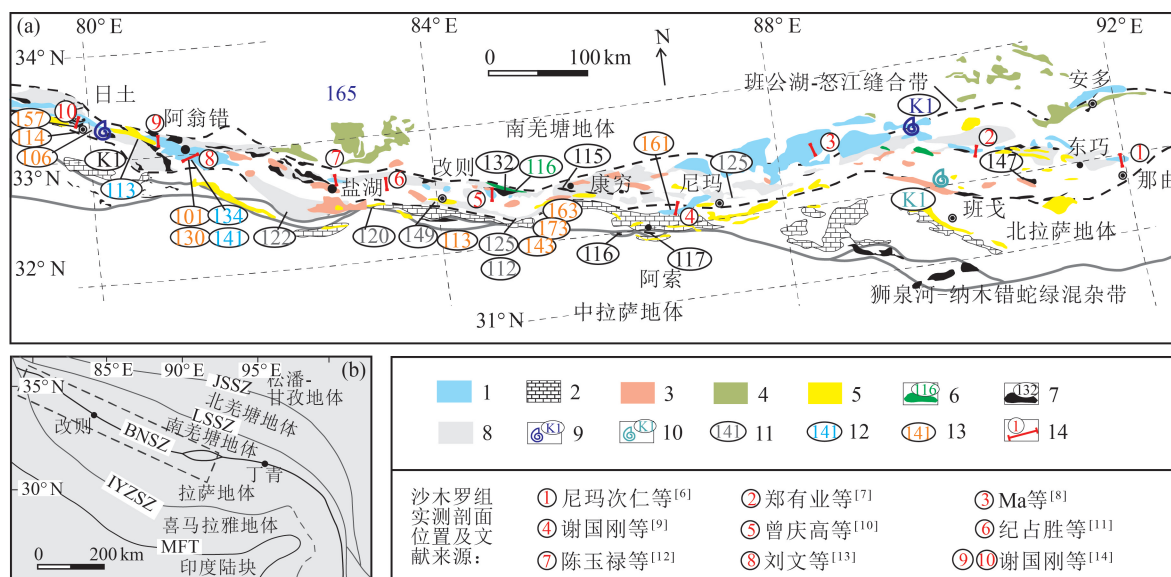


图 1 班公湖-怒江缝合带中西段及周围晚侏罗世—早白垩世地质简图(a)与青藏高原大地构造

单元图(b)(a、b底图据参考文献[5],沙木罗组据参考文献[8,13,15-20];木嘎岗日岩群、放射虫硅质岩和蛇绿岩数据据参考文献[21-22])

Fig. 1 Simplified geological map mainly showing the distinct age information distribution of Late Jurassic–Early Cretaceous geological units along the central and western Bangong–Nujiang suture zone and adjacent areas(a), and tectonic framework of the Tibetan Plateau(b)
1—上侏罗统—下白垩统沙木罗组(J_3K_1s); 2—下白垩统郎山组(K_1l); 3—下白垩统去申拉组(K_1q); 4—上白垩统阿布山组(K_2a); 5—上白垩统竟柱山组(K_2j); 6—白垩纪洋岛型岩石组合及其年龄; 7—白垩纪蛇绿岩及其年龄; 8—木嘎岗日岩群; 9—硅质岩采样点及其时代; 10—木嘎岗日岩群化石采样点及其时代; 11—木嘎岗日岩群最年轻碎屑锆石年龄; 12—沙木罗组火山岩夹层锆石年龄; 13—沙木罗组最年轻碎屑锆石年龄; 14—沙木罗组剖面实测位置及编号

怒江洋闭合后的遗迹,该带在中国境内西起班公湖,向东经改则、东巧、丁青和嘉玉桥,然后向南折向马来西亚,长度超过 2000 km^[53-55]。班公湖-怒江缝合带主要由规模和时代不一的蛇绿岩残片、洋岛残块、硅质岩岩片、次深海-深海复理石及微小陆块(如聂荣、嘉玉桥等)等组成^[1,5,55](图 1-a)。其中代表性的蛇绿岩有班公湖蛇绿岩、洞错蛇绿岩、东巧蛇绿岩和安多蛇绿岩,主体形成于侏罗纪^[55-57];局部为早白垩世,如康穷蛇绿岩^[21]。洋岛型岩石组合以早白垩世中晚期塔仁本洋岛^[37-39]和仲岗洋岛^[39-41]、晚三叠世孤峰洋岛^[58]、中三叠世那热洋岛^[59]等为代表。缝合带中出露的放射虫硅质岩最老为早三叠世^[60],最年轻的延续至晚白垩世早期^[42]。作为洋壳的上覆岩系,次深海-深海相复理石在班公湖-怒江缝合带中作为蛇绿岩、洋岛等构造残片的基质广泛出露,并被命名为木嘎岗日岩群(图 1-a)。早期工作中,前人依据木嘎岗日岩群内的古生物化石,认为其沉积时代主体是晚三叠世—

晚侏罗世^[6-7,9-10,12,14,61-62]。近年,改则地区木嘎岗日岩群的大量碎屑锆石 U-Pb 测年数据则显示了晚三叠世^[15,19,63]和晚侏罗世—早白垩世^[15,22]的年龄信息。最近,笔者团队的一些测年数据表明,木嘎岗日岩群的时代应该延续到早白垩世阿普特期^[64]。

此外,班公湖-怒江缝合带内不同程度地断续分布多套晚中生代地层(图 1、图 2)。其中,上侏罗统一下白垩统沙木罗组主体是一套中、薄层状碎屑岩夹碳酸盐岩的滨浅海相地层,呈孤岛状出露在班公湖-怒江缝合带中西段,普遍与缝合带内的蛇绿岩或复理石呈角度不整合接触关系^[25-27]。早白垩世末期,缝合带内的地层以去申拉组为代表,岩石组合以火山岩和红褐色砂岩、砾岩等陆相沉积为主^[11,65-67]。晚白垩世地层以广泛分布于南羌塘地体南缘的阿布山组和拉萨地体中北部的竟柱山组陆相磨拉石为代表,二者被普遍认为是班公湖-怒江洋闭合后拉萨-羌塘碰撞带强烈造山隆升的沉积响应^[5,55,60,67]。

在岩浆作用方面,班公湖-怒江缝合带及周缘发育大量与班公湖-怒江洋演化相关的晚侏罗世—早白垩世岩浆岩和内生金属矿床^[5, 23-24, 45, 47-50]。然而,由于班公湖-怒江洋闭合时限不确定,前人对这些岩浆活动的地球动力学背景及相关成矿机制的认识存在极大的分歧。

2 沙木罗组沉积特征

班公湖-怒江缝合带的晚中生代沉积记录除作为构造混杂岩带基质的木嘎岗日岩群外,晚侏罗世—早白垩世地层主要包括沙木罗组和东巧组。前人研究指出,东巧组和沙木罗组为同时异相沉积^[26];为方便讨论,本文将它们统称为沙木罗组。沙木罗组由西藏地矿局区调队^①于革吉县盐湖区沙木罗创名,原指出露于阿翁—盐湖一带岩性为富含化石未变质的浅海相碳酸盐岩和碎屑岩的上侏罗统。自创名后,《西藏自治区区域地质志》^[61]沿用此名,含义与原始定义大体相当。夏代祥等^[68]则将其定

义为:平行不整合伏于朗山组灰岩之下的一套灰白色石英砂岩、含砾粗砂岩、粉砂岩夹钙质页岩、生物碎屑灰岩的地层,下未见底,厚度逾 340 m;时代为晚侏罗世牛津期—基末里期。2013 年的《青藏高原及邻区地质图说明书(1:150 万)》将沙木罗组重新定义为班公湖-怒江缝合带内角度不整合于木嘎岗日岩群和东巧蛇绿岩之上的一套晚侏罗世—早白垩世地层,岩性以石英砂岩、含砾粗砂岩、粉砂岩夹钙质页岩、生物碎屑灰岩等为主^[67]。

2.1 岩石组合与沉积时代

为全面了解班公湖-怒江缝合带中西段各地区沙木罗组的沉积学特征,笔者对区域上相关的地质调查资料进行了广泛搜集,并从中筛选了 10 条较典型的沙木罗组剖面重新整理(图 1、图 3)。下面自东向西对这些地区的沙木罗组进行详细介绍。

如剖面 1 所示(图 3),那曲地区沙木罗组的岩性主要为浅灰色中—薄层状隐晶灰岩和青灰色薄层状生物碎屑灰岩,出露不全,未见顶底。1:25 万那

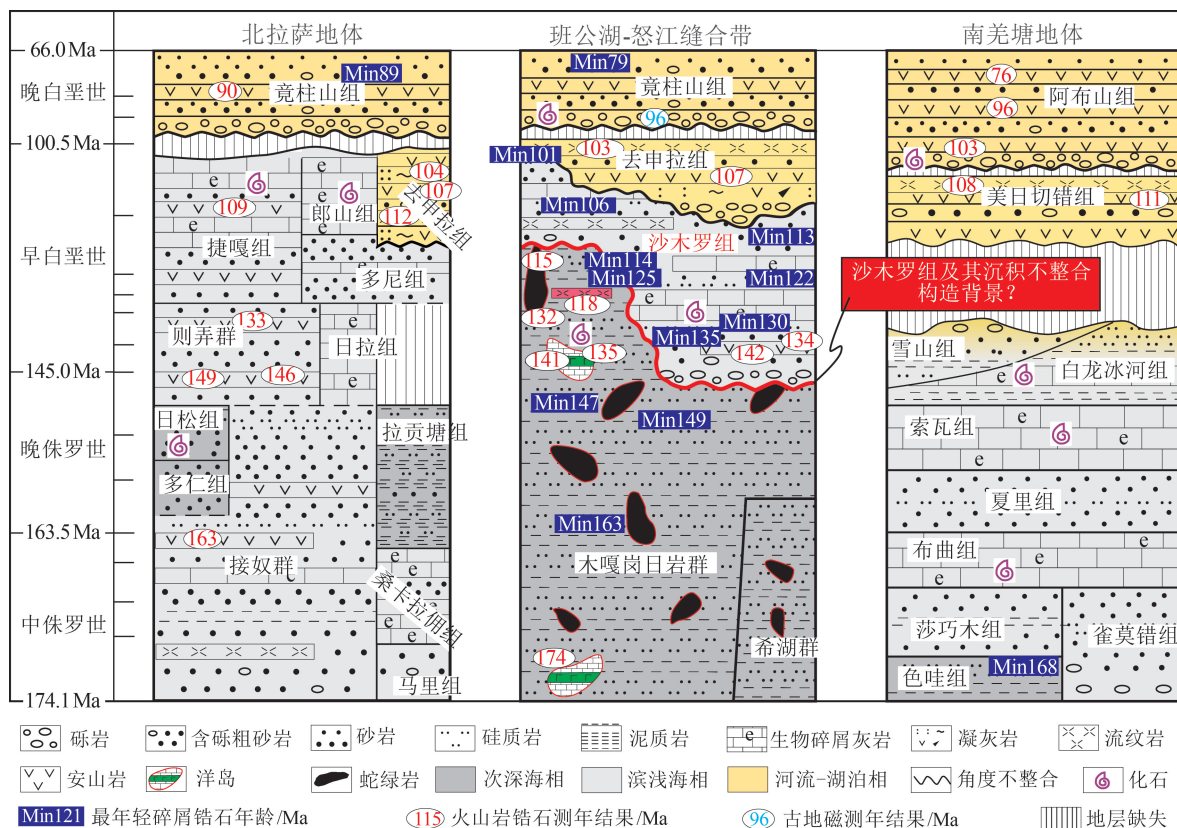


图 2 拉萨-羌塘碰撞带中侏罗世—晚白垩世构造地层综合柱状图(据参考文献[1,5]修改)

Fig. 2 Generalized tectonostratigraphic columns for the Lhasa-Qiangtang collision zone showing the Middle Jurassic-Late Cretaceous lithostratigraphical units and their relations

曲幅在该组内获 *Cladocoropsis* sp., *Inozoans*, *Stromatopora*, *Actinostromarianina* sp. 等海绵类化石, 鉴定时代为晚侏罗世—早白垩世^[6]。

在 1:25 万兹格塘错幅区域地质调查报告中^[7], 安多县东巧西下白垩统东巧组剖面记录了东巧组的岩石组合及其与下伏东巧蛇绿岩的角度不整合接触关系。如剖面 2(图 3)所示, 东巧组下部主要由复成分砾岩、含砾长石岩屑砂岩、粉砂岩夹紫红色泥质粉砂岩组成, 呈向上变细的正粒序特征, 反映了河湖相或海陆过渡相的沉积环境。东巧组上部为暗灰色、灰黄色厚层块状生物碎屑灰岩与泥晶灰岩。生物碎屑主要有海绵、腕足、螺、棘皮等, 泥晶灰岩中可见陆源砂屑, 具台地碳酸盐相沉积特征。在沉积时代上, 东巧组上段所含化石主要为珊瑚和海绵: *Actostroma* sp., *Epistromatopora* sp., *Milleporidum* (?) sp., *Calamophyllia* sp., *Stylina* sp., *ptychochaetetes* (*Varioparietes*) sp., *Chaetetes* sp. No., *Gen et* sp. Nov., *Thecosmilia* sp. 等。上述化石组合中的珊瑚 *Stylina* sp. 在冈底斯-察隅地层区下白垩统东巧组下段与东巧组上段广泛出现, *Thecosmilia* sp. 可见于欧洲阿普特中晚期—阿尔必期。上述生物组合大体上反映了东巧组上段沉积于早白垩世阿普特期—阿尔必期, 鉴于东巧地区蛇绿岩的最年轻时代在晚侏罗世末期(147 Ma; 图 1), 东巧组下段的沉积时代应在早白垩世的早—中期, 即贝里阿斯期—阿普特期。

在尼玛县东北部纳江错地区, Ma 等^[8]对沙木罗组的研究表明, 该区沙木罗组厚度大于 399 m, 主要岩性为中薄层细粒砂岩与粉砂岩/页岩或灰岩互层(剖面 3, 图 3)。一些泥质岩具有生物扰动构造, 而另一些发育波纹层理。薄层细砂岩夹层中沉积构造稀少, 只有罕见的波纹层理, 而中层状砂岩中偶见平行层理。大多数砂岩层呈板状, 横向连续性好。另外, 可见贝壳层、鲕粒灰岩或生物碎屑粒状灰岩、泥粒灰岩等, 其与底部普遍呈突变接触。其中, 泥质岩可解释为在生物扰动较重的海底分流间湾和河口坝前缘, 或低能前三角洲的悬浮物沉积。而细砂岩和粉砂岩可能沉积于堤坝或海底河口坝。一些特殊沉积如贝壳层、鲕粒灰岩、泥粒灰岩等, 表明环境容易受到风暴的影响, 也使得这些地层中含有大量各种生物碎屑和硅质碎屑。因此, 纳江错剖面的沙木罗组可解释为一个混合的硅质碎屑—碳酸

盐沉积体系, 可能形成于三角洲前缘的浅海陆棚环境。对于沉积时代, 地层中花岗斑岩脉的锆石 U-Pb 定年结果(151 ± 2 Ma) 与生物地层学资料表明, 这套沙木罗组沉积于晚侏罗世牛津期—基末里期。

在尼玛县城附近的卡色拉地区^[9], 沙木罗组未见底, 上部被古近纪美苏组角度不整合覆盖(剖面 4, 图 3), 主体为一套由粗、细碎屑岩组成的滨海相地层, 出露厚度大于 1248 m。岩性常见中层状中细粒含泥砾岩屑砂岩、中层状细粒岩屑砂岩与薄层状千枚状板岩互层; 局部可见紫红色中层状含粉砂质泥岩。岩石中常发育粒序层理、交错层理、平行层理等。这些特征较综合地反映了三角洲平原—滨海相的高能动荡的环境。剖面上采集到的圆笠虫 *Mesorbitolina* 属反映的地质时代为早白垩世阿普特期—阿尔必期; 在微古植物组合中, 裸子植物占优势, 不仅有银杏、苏铁类单沟花粉, 还有具气囊类花粉; 蕨类孢子较少, 主要是海金沙科, 重要的是孢粉组合中产有特提斯地区仅分布于早白垩世的 *Dicheiropollm*。因此, 卡色拉地区的这套沙木罗组可能沉积在早白垩世贝利阿斯期—早白垩世阿尔必期。

在改则县洞错一带, 如剖面 5 所示(图 3), 沙木罗组出露有限, 未见顶底, 地层岩石组合以中、薄层状钙质石英砂岩、钙屑砂岩为主, 夹含生屑铁质钙质粉砂岩, 深灰色钙质板岩, 灰色中厚层状砾岩; 其基本层序组合为: I 由 3 m 厚(单层厚 1~2 m)的中厚层状砾岩与 2 m 厚(单层厚 0.5~1 m)的中层状中、细粒钙质石英砂岩组成; II 由 1 m 厚(单层厚 10~20 cm)的中薄层状中、细粒钙质石英砂岩与 0.5 m 厚(单层厚 0.2~0.5 cm)的钙质板岩组合; III 由 1 m 厚(单层厚 10~20 cm)的中薄层状中、细粒钙质石英砂岩, 0.5 m 厚(单层厚 10 cm)的薄层状含生屑铁质钙质粉砂岩与 0.5 m 厚(单层厚 0.2~0.5 cm)的钙质板岩组成。沉积构造以粒序层理、砂纹层理、块状层理为主。此外, 西藏自治区地质调查院采获化石坛螺未定种 *Ampullina* sp., 瘤结螺未定种 *Tylostoma* sp., 海蛾螺未定种 *Nerinea* sp., 以及超微化石 *Lotharingius contractus* Bown and Cooper, 1989, *Cyclagelosphaera magerelii* Noel, 1965, 时代为中侏罗世—早白垩世^[10]。

纪占胜等^[11]对物玛乡北部的晚侏罗世—早白垩世地层开展了重点研究, 将原来认为的早二叠世

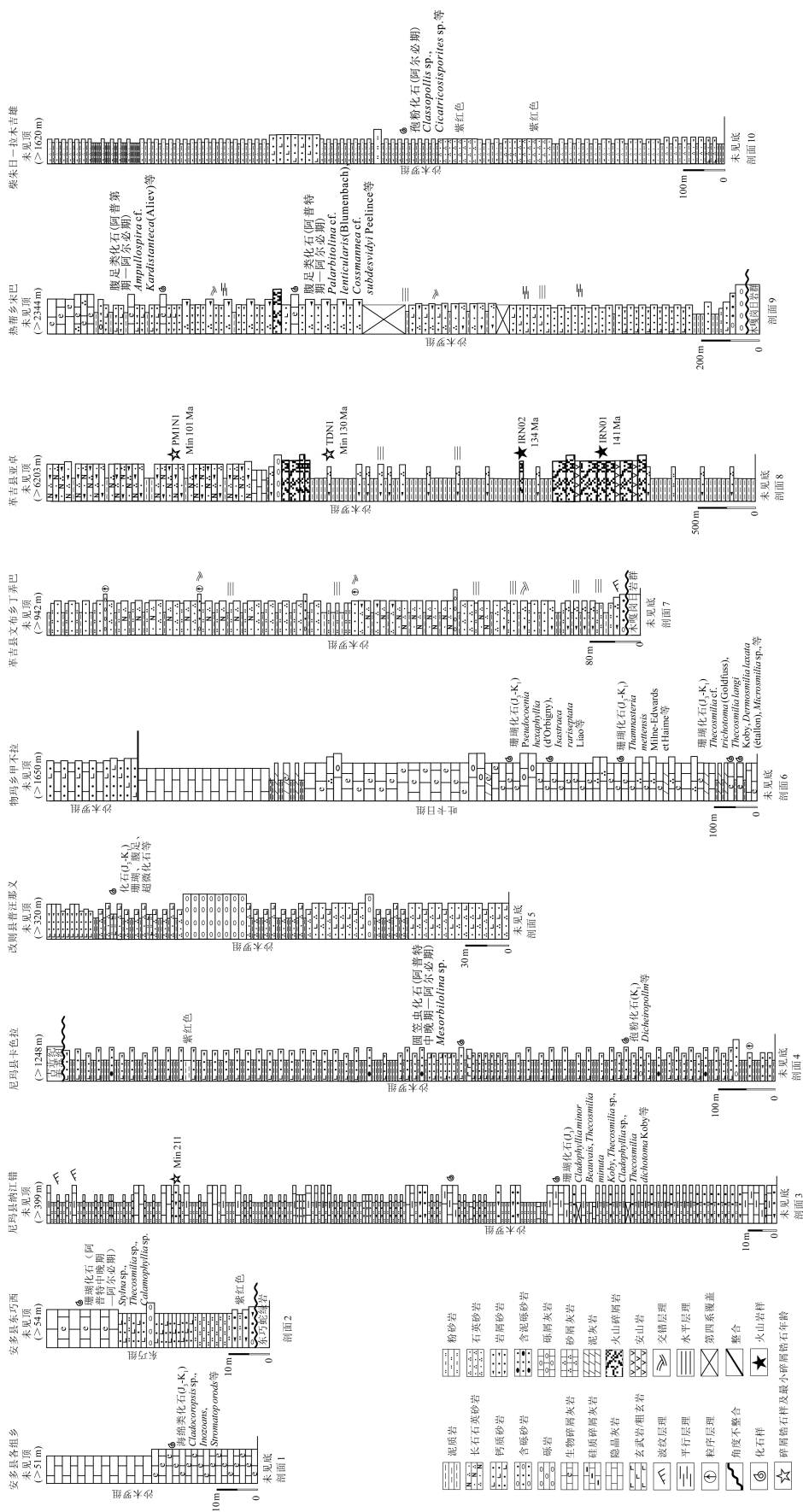


图3 班公湖-怒江缝合带中西段沙木罗组区域地层对比图 (剖面位置见图1)
Fig. 3 Stratigraphic columns showing the Shunluo Formation along the central and western Bangong-Nuijiang suture zone

下拉组修订为晚侏罗世牛津期—基末里期的吐卡日组,并新建萨波直不勒组,将班公湖-怒江地层区西段的上侏罗统自下而上修订为萨波直不勒组、吐卡日组和沙木罗组。如图 3 中的剖面 6 所示,吐卡日组整体以一套浅海碳酸盐台地相的灰色中厚层状生物碎屑灰岩、砂屑灰岩为主,局部夹灰黑色薄层含生屑的泥灰岩与钙质泥岩,厚度大于 1459 m。吐卡日组内保存着大量的珊瑚化石,其中很多属种的延续时代为晚侏罗世牛津期—基末里期。沙木罗组整合覆盖在吐卡日组之上,下部为黄褐色中厚层状钙质粗砂岩,上部为砂岩和灰岩的互层,未见顶,出露厚度大于 200 m。研究认为,沙木罗组形成于晚侏罗世晚期浅海碳酸盐台地相沉积向滨浅海碎屑相沉积过渡的海退过程。吐卡日组—沙木罗组的宏观岩性转化规律是碳酸盐岩逐渐减少、碎屑岩逐渐增多,也就是从吐卡日组的大段灰岩到沙木罗组下部的碎屑岩与灰岩互层再到沙木罗组上部的碎屑岩夹少量灰岩的一个岩相逐渐转换的地层序列,因此沙木罗组在理论上应该是一个沉积相自下而上逐渐变浅的序列^[11]。

1:25 万玛曲革吉县文布乡丁弄巴剖面显示^[12],沙木罗组总体为一套灰白色石英砂岩、紫红色、灰绿色岩屑砂岩、粉砂岩、泥岩为主的粗、细碎屑岩组合,厚度大于 942 m,角度不整合于木嘎岗日岩群之上,未见顶(剖面 7,图 3)。可见向上变细的基本层序,底部见细砾岩、含砾粗砂岩,角度不整合于木嘎岗日岩群之上。沙木罗组沉积构造主要为沙纹交错层理,有时可见斜层理或楔状层理,表现为一套滨海—浅海环境萎缩性盆地沉积。剖面上沙木罗组化石稀少,年代地层单位根据前人资料和区域岩石地层对比确定为上侏罗统一下白垩统。

近期,吴建亮等^[16]和刘文等^[13]对西藏革吉地区的沙木罗组进行了详细的沉积学、碎屑锆石年代学和火山岩年代学研究,如剖面 8(图 3)所示,区内沙木罗组主要分两段:下段整体为一套深灰色、灰色泥岩夹青灰色中、薄层状岩屑石英砂岩的岩性组合,局部发育灰色安山质火山碎屑岩夹层,具类复理石建造,整体上代表斜坡相的深水沉积环境。下段中的火山岩年龄为 141 Ma 和 134 Ma,且最小碎屑锆石年龄为 130 Ma,指示下段沉积时代为早白垩世贝利阿斯期—巴雷姆期。沙木罗组上段为青灰色中、薄层状长石岩屑杂砂岩夹深灰色泥岩、灰黑

色微晶灰岩的岩性组合,底部发育一套灰色和杂色砾岩,总体上具分选性差、快速堆积的特点,代表河口—滨海河口—滨海相的浅水沉积环境;其砂岩最小碎屑锆石年龄为 101 Ma,表明沙木罗组上段的时代已经延续到早白垩世阿尔必期。

1:25 万日土幅^[14]根据宋巴剖面 and 柴朱日—拉木吉雄 2 条沙木罗组地层剖面,将该套地层划出上、下段。下段以条纹条带钙质岩屑砂岩为特色,上段以生物碎屑灰岩为主,夹少量碎屑岩。如宋巴剖面所示(剖面 9,图 3),其下部为复成分砾岩、砂砾岩、钙质砂岩、凝灰质砂岩夹泥岩、粉砂岩等,局部夹灰岩、火山岩等;上部为厚层状、块状生屑微晶砂屑灰岩、泥晶灰岩等。在灰岩、泥岩内产早白垩世阿普特期—阿尔必期的腹足类和圆笠虫类化石,该古生物化石年龄与张建珍等^[17]在该地区报道的高镁流纹岩夹层时代(114 Ma),共同指示热邦地区沙木罗组的沉积时代从晚侏罗世延续到早白垩世末期。如柴朱日—拉木吉雄剖面(剖面 10,图 3)所示,班公湖地区沙木罗组仅见下段,基本为一套砂板岩组合,有时夹厚层状不等粒白云质钙质岩屑砂岩、紫红色石英砂岩、黑色千枚状板岩,含炭千枚状板岩中含较丰富的孢粉,指示地层时代可能为早白垩世阿尔必期^[14]。

综上,根据区域上沙木罗组地层剖面的综合对比,通过分析其岩石组合、沉积构造及其年代学信息等,可以获得以下 3 点重要认识:①班公湖-怒江缝合带中西段有多处报道沙木罗组早白垩世末期的年代学信息,其中不乏碎屑锆石和火山岩夹层的精确锆石 U-Pb 同位素测年数据,说明沙木罗组的沉积时代已经延续到早白垩世末期(图 3、图 4);②依据沉积时代和岩性的不同,沙木罗组可以简单划分为两部分,以革吉县亚卓剖面较典型(图 3):下部主要是一套晚侏罗世—早白垩世晚期(牛津期—阿普特期)的浅海陆棚—斜坡相地层,以类复理石沉积、大套灰岩或碎屑岩夹灰岩为主要岩石组合,局部为粗、细碎屑岩,含丰富的晚侏罗世—早白垩世化石;上部则为一套早白垩世末期(阿尔必期)河口—滨海相的浅水沉积,大体为中厚层粗、细碎屑岩夹泥质岩或粉砂岩,常见红层;③沙木罗组存在从下部浅海陆棚—斜坡相到上部河口—滨海相的沉积相变过程,指示区域上早白垩世晚期到末期的一次海退事件。

2.2 碎屑物源特征

在晚侏罗世—早白垩世,南羌塘地体南缘和拉萨地体北部的岩浆活动相对连续^[5, 45, 47-50],有助于分析相邻盆地沉积物的物源和沉积时代^[69-70]。前人对沙木罗组下部砂岩的岩石学分析显示,其岩性主要为岩屑石英砂岩,碎屑成分和含量基本为石英>岩屑>长石;其中石英颗粒主要为单晶石英,岩屑主要由长英质火山碎屑、次级变质碎屑和少量沉积碎屑组成。这些相对贫石英、富岩屑的砂岩指示了岩浆弧和混合物源区的亲缘性^[8, 13, 19]。沙木罗组上段砂岩多为长石岩屑杂砂岩,其碎屑分选性、磨圆度均差;岩石为杂基支撑,碎屑成分以石英、斜长石、正长石为主,推断其源区母岩为花岗岩类岩石^[13]。近年来,众多学者对沙木罗组进行了大量的碎屑锆石年代学分析,如图4所示,区域上沙木罗组砂岩的碎屑锆石年龄普遍具有2.55~2.38 Ga、1.95~1.75 Ga、1000~750 Ma、230~205 Ma和180~145 Ma的年龄群,这些特征年龄群与南羌塘地体的碎屑锆石年龄频谱有极大的相似性。拉萨地体的年龄频谱特征是1200~1000 Ma和310~290 Ma 2个年龄群^[29],但是沙木罗组没有显示出这2个特征年龄群,指示沙木罗组内缺乏来自拉萨地体的碎屑组分。另外,不少沙木罗组样品具有160 Ma的年龄峰值,与南羌塘地体晚侏罗世弧岩浆作用一致,而这一期岩浆活动在拉萨地体没有明显记录^[24, 48](图4)。因此,南羌塘地体是沙木罗组的重要沉积物源区;反之,沙木罗组中缺乏明显的拉萨地体碎屑组分^[8, 13, 15, 18-20]。

综合整理这些数据发现,虽然区域上不同沙木罗组样品中的碎屑锆石年龄分布范围大体相似,均显示出南羌塘地体的亲缘性,但在古生代—中生代的碎屑锆石年龄群分布上,沙木罗组下部和上部之间存在明显差异。如图4所示,沙木罗组下部含有较丰富的470~205 Ma的碎屑锆石,而上部470~205 Ma的碎屑锆石记录稀少,这样明显不同的碎屑锆石分布特征,可能指示在早白垩世末期沙木罗组的沉积物源区已经出现了明显的变化,这样的沉积物源转变也与沙木罗组存在从下部浅海陆棚—斜坡相到上部河口—滨海相的沉积相变过程相互印证,这些沉积转变共同指示了某个发生在早白垩世中—晚期的重要地质事件。

3 沙木罗组沉积不整合特征

自1:25万区域地质填图工作开展以来,部分

单位和学者对东巧及班戈一带的沙木罗组与下伏洋壳物质的沉积不整合进行了详细的剖面测制和岩石学研究,并指出两者间的角度不整合接触关系为确定班公湖—怒江洋的闭合时代提供了确切的沉积学依据^[6-7, 26]。同时,在班公湖—怒江缝合带西段的盐湖乡—阿翁错一带又陆续报道了沙木罗组与木嘎岗日岩群之间的沉积不整合接触^[12, 14, 27]。至于班公湖—怒江缝合带中部班戈以西,盐湖乡以东的大片区域,虽然分布较多通过区域对比所划分的沙木罗组^[9-10, 71],但目前在这些区域均未发现典型的沙木罗组与木嘎岗日岩群或蛇绿岩之间的沉积不整合接触记录。反之,纪占胜等^[11]在物玛乡北部晚侏罗世—早白垩世地层的研究明确指出,沙木罗组整合覆盖在晚侏罗世牛津期—基末里期的吐卡日组之上。另外,物玛乡一带上侏罗统浅海相地层与木嘎岗日岩群间的沉积不整合形成于中侏罗世末期,意味着中侏罗世末期木嘎岗日岩群沉积之后,经历了一次强烈的构造抬升运动,形成木嘎岗日岩群顶部的角度不整合面,随后开始海侵,在不整合面上沉积了萨波直不勒组浅海相的碎屑岩地层,此后海侵逐渐加强,随即形成吐卡日组大套碳酸盐岩沉积^[11]。

综上,班公湖—怒江缝合带上侏罗统一下白垩统沙木罗组与下伏地质体并非都是沉积不整合接触关系,还存在整合接触;且该沉积不整合的出露范围有限,主要分布在缝合带东部的班戈县一带及西部的革吉县地区(图3)。

4 沙木罗组及其沉积不整合构造背景

长期以来,前人大多认同上侏罗统一下白垩统沙木罗组与下伏木嘎岗日岩群和蛇绿岩等洋壳物质间的沉积不整合形成于拉萨—羌塘碰撞的构造背景,是班公湖—怒江洋闭合消亡最直接的沉积学证据^[6-7, 9-10, 12, 14-15, 26-27]。然而,最近的研究成果大都质疑这一沉积学证据,指出沙木罗组沉积于班公湖—怒江洋持续北向俯冲造成的弧—陆碰撞或洋脊俯冲的地球动力学背景,认为班公湖—怒江洋至少在早白垩世早期尚未闭合^[1, 13, 17, 22]。本文在搜集和整理前人研究资料的基础上,初步总结了区域上沙木罗组的沉积学特征,并结合区域上早白垩世的岩浆活动特征,认为上侏罗统一下白垩统沙木罗组既不是班公湖—怒江洋盆闭合后的造山沉积响应,也不是

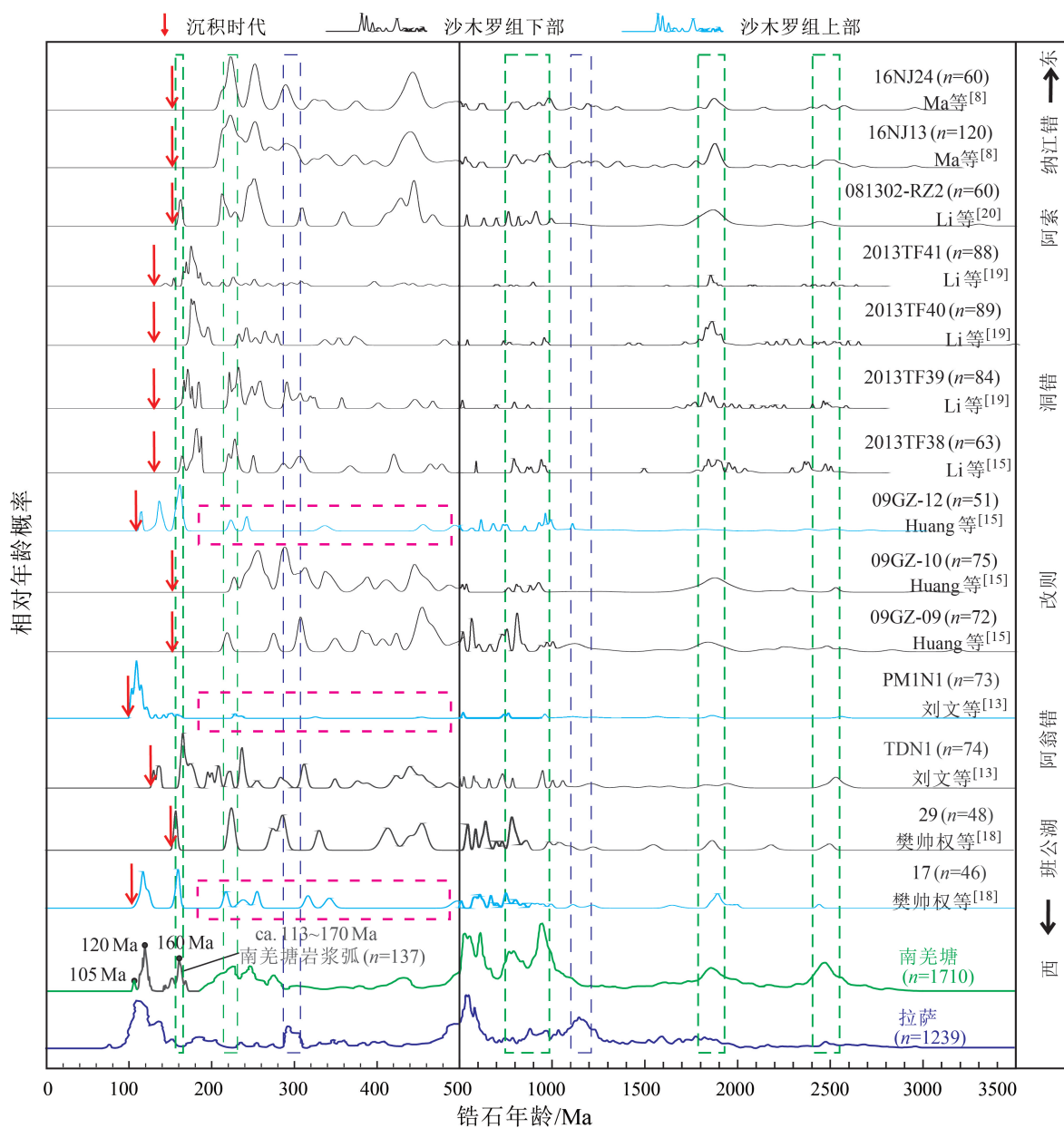


图 4 沙木罗组^[8, 13, 15, 18-20]与拉萨地体、南羌塘地体及南羌塘晚中生代岩浆弧^[19]锆石年龄谱系对比图

Fig. 4 Comparison of U-Pb age probability density plots between Shamuluo Formation, Lhasa and Southern Qiangtang terrane, and the Southern Qiangtang magmatic arc

单一的洋板片俯冲背景下的活动大陆边缘沉积,而应该是班公湖-怒江洋由俯冲到碰撞的沉积记录。

首先,沉积盆地碎屑锆石年龄模式与盆地中的整体碎屑沉积物一样,受构造环境的控制。汇聚板块边缘含有岩浆锆石的盆地,大量年龄接近沉积时代的碎屑锆石的聚集直接反映了岩浆活动频繁的背景(例如弧前、海沟和汇聚板块边缘的弧后盆地)。较老的碎屑锆石则反映了盆地分布区下伏基

底的历史,这些古老的锆石可能在伸展带和大陆碰撞带的碎屑锆石记录中占主导地位,部分原因是当时产生的岩浆体积和锆石数量明显较少^[72]。如图 5 所示,区域上沙木罗组上部 and 下部砂岩的碎屑锆石数据既落入汇聚板块边缘盆地的区域(A),也落入大陆碰撞(B)和伸展背景(C)区域,暗示沙木罗组并非受控于单一的大洋俯冲或陆陆碰撞背景,而可能处于班公湖-怒江洋演化晚期由俯冲到碰撞的动

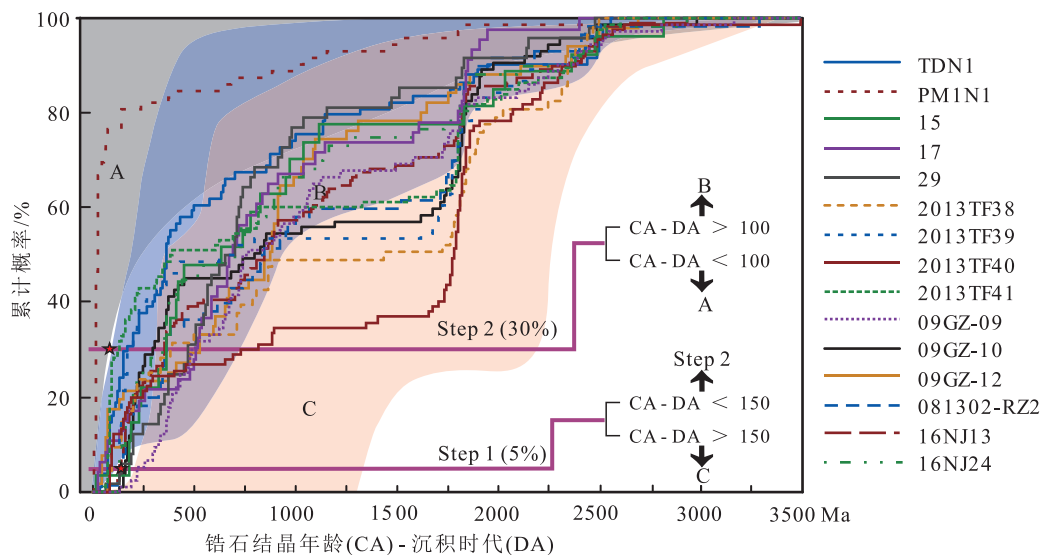


图5 沙木罗组^[8, 13, 15, 18-20]锆石结晶年龄减沉积年龄(CA-DA)累计概率图

(底图汇聚盆地(A)、碰撞盆地(B)和伸展盆地(C)的区域据参考文献[72];在最年轻的5%锆石中,伸展环境下 CA-DA>150 Ma(step 1),在最年轻的30%锆石中,所有会聚环境的 CA-DA<100 Ma(step 2))

Fig. 5 Cumulative probability plots for crystallization age minus deposition age(CA-DA) from the Shamuluo Formation

力学背景。

其次,沉积盆地中的沉积作用可以很好地记录区域上的构造运动^[73]。通过整理区域上沙木罗组的岩石组合、沉积时代、碎屑锆石 U-Pb 年龄数据及其与下伏地质体的沉积接触关系等资料,笔者认为沙木罗组至少记录了2次区域性的构造运动。如前文所述,沙木罗组可分为下部晚侏罗世—早白垩世晚期的浅海陆棚—斜坡相地层和上部早白垩世末期河口—滨海相地层。沙木罗组下部与下伏洋壳物质间的角度不整合即为第一次构造运动的响应,而前人对于沙木罗组的研究也基本聚焦在这一次构造事件上。前已述及,长期以来沙木罗组与木嘎岗日岩群和蛇绿岩间的沉积不整合被认为形成于拉萨—羌塘碰撞的构造背景,但范建军等^[1]对沙木罗组的分布、下伏 SSZ 型蛇绿岩的亲缘性,以及该沉积不整合与岛弧岩浆岩出露的时空关系等进行了讨论,认为上侏罗统—下白垩统沙木罗组与下伏蛇绿岩、复理石等洋壳物质之间的不整合可能仅是晚侏罗世—早白垩世早期班公湖—怒江洋北缘弧—弧、弧—陆闭合碰撞的沉积响应。随着班公湖—怒江缝合带内大量中—晚侏罗世玻安岩、高镁安山岩、钙碱性岩浆岩等资料的报道,许多学者提出班公湖—怒江缝合带内保存了一套相对完整的早—中侏罗世洋

内弧岩石层序,记录了班公湖—怒江洋早—中侏罗世的洋内俯冲事件^[41, 74-77]。该早—中侏罗世洋内弧的存在为晚侏罗世—早白垩世早期班公湖—怒江洋北缘弧—陆碰撞事件的发生提供了可能的条件。另外,如图2所示,连续的海相沉积地层表明,在晚侏罗世—早白垩世,北拉萨地体延续了早—中侏罗世的海相沉积环境;与之相反,北侧的南羌塘地体在晚侏罗世—早白垩世早期则发生了大规模的区域隆升和沉积间断^[1]。根据区域上早—中侏罗世洋内弧岩浆记录(图6-a)和晚侏罗世—早白垩世早期的沉积特征,笔者认为,沙木罗组下部地层及其与洋壳物质之间的沉积不整合是班公湖—怒江洋北缘的岛弧与南羌塘地体碰撞的产物,而非形成于拉萨地体和南羌塘地体碰撞的构造背景。

沙木罗组上部与下部地层之间可见沉积转变现象,包括二者间的沉积相变化和沉积物源区变化。首先,沙木罗组下部的岩性以类复理石沉积、大套灰岩或碎屑岩夹灰岩为主要岩石组合,指示了浅海陆棚—斜坡相的沉积环境。而沙木罗组上部可见陆相红层及大量发育交错层理和平行层理的中厚砂岩,这些特征反映了三角洲平原—滨海相的高能动荡的环境(图3),为一套河口—滨海相地层。由此可知,自早白垩世阿尔必期开始,研究区海水深

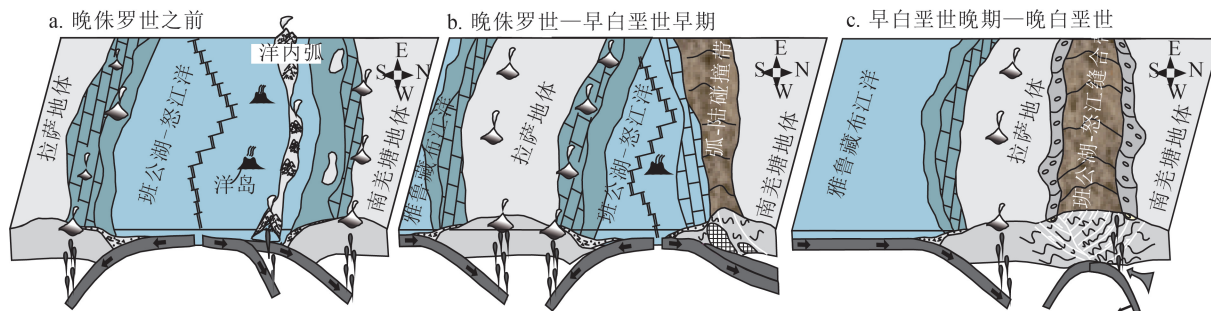
图 6 班公湖-怒江洋西段晚中生代构造演化示意图^[1]

Fig. 6 Schematic models showing the Late Mesozoic tectonic evolution of the western segment of Bangong-Nujiang Ocean

度变浅,海浪等水动力作用更明显。其次,砂岩的碎屑锆石年龄谱系对比分析表明(图 4),沙木罗组下部含有丰富的 470~205 Ma 的碎屑锆石,而上部 470~205 Ma 的碎屑锆石记录稀少,这样明显差异的碎屑锆石谱系特征指示了早白垩世阿尔必期沙木罗组的沉积物源区已经出现改变。笔者认为,这一早白垩世阿尔必期的沉积转变记录即为第二次区域构造事件的沉积响应,且这一次事件最合理的解释是拉萨地体与南羌塘地体的碰撞。前人研究指出,在碰撞挤压环境下,由于差异性隆升形成物源隔离及水系的转变是正常的,导致沉积物源发生变化^[78-79]。更重要的是,在班公湖-怒江缝合带及周缘还分布一套早白垩世末期的火山-沉积地层,即去申拉组(图 2)。前人从去申拉组火山岩中获得的锆石 U-Pb 年龄集中在 100~107 Ma^[65-66],指示去申拉组形成于早白垩世阿尔必期。区域上,虽然去申拉组的岩石组合和沉积环境略有差异,但主体反映陆相河湖相沉积环境,且其与下伏蛇绿岩、洋岛、复理石等洋壳物质之间均为角度不整合接触^[1, 10, 67]。吴浩等^[65]对去申拉组中的火山岩做了大量的地球化学研究,认为它们形成于碰撞环境。而改则县去申拉组火山岩及红层的古地磁分析结果,也支持拉萨地体与南羌塘地体的大规模碰撞发生在早白垩世末期去申拉组沉积之后^[65]。范建军等^[1]进一步指出,去申拉组陆相沉积及其与下伏洋壳物质的不整合代表了班公湖-怒江洋闭合后的第一套陆相盖层和第一套造山不整合。因此,沙木罗组上部地层与去申拉组应该是形成于早白垩世阿尔必期的同时异相沉积,二者均是班公湖-怒江洋闭合及随后拉萨地体与南羌塘地体碰撞的沉积响应(图 6-c)。

综上,笔者认为,上侏罗统一白垩统沙木罗组是班公湖-怒江洋演化晚期由俯冲至闭合过程的沉积记录。这个观点也得到区域上岩浆活动特征的支持。近年大量的研究表明,南羌塘地体南缘的岩浆弧存在 145~130 Ma 的岩浆间断^[5, 15, 24, 48]。虽然部分学者认为该岩浆间断代表拉萨-羌塘的碰撞^[5, 15],但是这个观点与拉萨地体上 145~130 Ma 强烈的岩浆活动是矛盾的^[47],也不能很好地解释班公湖-怒江缝合带早白垩世晚期洋岛型岩石组合、蛇绿岩及复理石沉积的存在(图 1)。相比之下,班公湖-怒江洋北部的洋内弧与南羌塘地体的碰撞事件只会对原先北向的洋-陆俯冲产生强烈干扰,导致南羌塘地体南侧的陆缘弧存在 145~130 Ma 的岩浆间断(图 6-b),不会对班公湖-怒江洋南向俯冲造成大的影响。在这样的演化过程中,班公湖-怒江洋北侧的洋内弧后盆地与南羌塘地体南缘的活动大陆边缘盆地逐渐叠加成为复合盆地(图 6-a),接受来自洋内弧和早期增生楔及南羌塘地体的陆源碎屑沉积,形成了沙木罗组的下部。接着,班公湖-怒江洋持续的双向俯冲机制加速了其闭合消亡的过程^[1, 5, 24, 35]。进入早白垩世阿尔必期(113~100 Ma),拉萨地体北部和南羌塘地体南部通过“软碰撞”焊接在一起^[1]。在拉萨-羌塘软碰撞的背景下,班公湖-怒江缝合带及周缘在挤压应力场下发生了差异性的隆升。这样的软碰撞模式相比构造强烈的硬碰撞,陆块间增生物质的构造变形和初始隆升程度都较弱。同时,由于处在碰撞的初期,缝合带整体的隆升高度有限,导致海水没有完全退出而留下残余海。因此,由残余海的滨海相环境至陆上河湖相环境,分别沉积了沙木罗组上段和去申拉组 2 套同时异相的地层。另外,根据前人的研究成果,

在软碰撞过程中,随着洋板片回返的持续,缝合带下冷而致密的大洋岩石圈由于重力不稳定性而发生撕裂和拆离,导致地幔物质上涌(图6-c),引发强烈的壳幔相互作用和频繁的岩浆活动^[5, 24, 35, 80]。阿翁错一带沙木罗组中大量108~104 Ma的中基性岩墙^[81~82]与去申拉组中复杂的火山岩组合(包括高分异流纹岩、高镁安山岩、高铝玄武岩、埃达克等),指示早白垩世末期班公湖-怒江缝合带在软碰撞过程中由不同程度地幔贡献导致的岩浆成分多样性特征^[66, 83]。

5 结 论

(1)根据区域上沙木罗组的沉积学和年代学特征,可将沙木罗组划分为下部晚侏罗世—早白垩世晚期(牛津期—阿普特期)的浅海陆棚相-斜坡相地层和上部早白垩世末期(阿尔必期)河口相-滨海相地层。

(2)上侏罗统一白垩统沙木罗组应为班公湖-怒江洋演化晚期由俯冲至闭合过程的沉积记录。其中,沙木罗组下部及其角度不整合是班公湖-怒江洋北向俯冲过程中大洋岛弧与南羌塘地体碰撞的沉积响应;而沙木罗组上部与去申拉组为同时异相沉积地层,均形成于班公湖-怒江洋闭合及随后拉萨-羌塘软碰撞的背景。

致谢:文献资料搜集和整理得到西藏自治区地质调查院刘海永博士等的帮助,审稿专家对本文提出了建设性的修改意见,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 范建军.班公湖-怒江洋中西段晚中生代汇聚消亡时空重建[D].吉林大学博士学位论文,2016.
- [2] 肖文交,敖松坚,杨磊,等.喜马拉雅汇聚带结构-属性解剖及印度-欧亚大陆最终拼贴格局[J].中国科学:地球科学,2017,47(6): 631-656.
- [3] 侯泉林,郭谦谦,方爱民.造山带研究中有关复理石和磨拉石的几个问题[J].岩石学报,2018,34(7): 1885-1896.
- [4] 丁林, Satybaev M A, 蔡福龙, 等.印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程[J].中国科学:地球科学,2017,47(3): 293-309.
- [5] Zhu D C, Li S M, Cawood P A, et al. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. Lithos, 2016, 245(15): 7-17.
- [6] 尼玛次仁, 谢尧武, 沙昭礼, 等.1:25万那曲县幅地质调查报告[M].北京:地质出版社,2010.
- [7] 郑有业, 何建社, 李维军, 等.1:25万兹格塘错幅地质调查报告[M].北

- 京:地质出版社,2010.
- [8] Ma A L, Hu X M, Kapp P, et al. The disappearance of a Late Jurassic remnant sea in the southern Qiangtang Block (Shamuluo Formation, Najiango area): Implications for the tectonic uplift of central Tibet[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 506: 30-47.
- [9] 谢国刚, 邹爱建, 袁建芽, 等.西藏1:25万邦多幅区域地质调查报告[M].北京:地质出版社,2010.
- [10] 曾庆高, 毛国政, 王保弟, 等.1:25万改则县幅等4幅区域地质调查报告[M].北京:地质出版社,2010.
- [11] 纪占胜, 姚建新, 武桂春.西藏改则县物玛乡北部晚侏罗世吐卡日组珊瑚动物群的发现及其地质意义[J].地质通报, 2011, 30(2/3): 418-438.
- [12] 陈玉禄, 张宽忠, 勾永东, 等.1:25万物玛幅等4幅区域地质调查报告[M].北京:地质出版社,2010.
- [13] 刘文, 吴建亮, 雷传扬, 等.西藏革吉地区沙木罗组碎屑锆石年代学研究:物源及其对班公湖-怒江特提斯洋西段闭合时限的制约[J].岩石学报, 2019, 35(6): 1738-1756.
- [14] 谢国刚, 肖志坚, 欧阳克贵, 等.西藏1:25万喀纳幅、日土县幅区域地质调查报告[M].北京:地质出版社,2010.
- [15] Huang T T, Xu J F, Chen J L, et al. Sedimentary record of Jurassic northward subduction of the Bangong-Nujiang ocean: Insights from detrital zircons[J]. International Geology Review, 2016, 59(2): 166-184.
- [16] 吴建亮, 刘文, 尹显科, 等.藏北班公湖-怒江缝合带西段沙木罗组火山岩年代学、Hf同位素及地球化学特征[J].地球科学, 2020, 39: 1-26.
- [17] 张建珍, 高莲凤, 张振国, 等.西藏日土早白垩世高镁流纹质岩石时代、地球化学特征及地质意义[J].地球科学, 2020, 45(8): 2868-2881.
- [18] 樊帅权, 史仁灯, 丁林, 等.碎屑锆石对班公湖地区晚侏罗世—早白垩世沉积物源的制约[J].地质科学, 2011, 46(3): 847-864.
- [19] Li S, Ding L, 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.
- [20] Li C, Wang G H, Zhao Z B, et al. Late Mesozoic tectonic evolution of the central Bangong-Nujiang Suture Zone, central Tibetan Plateau[J]. International Geology Review, 2020, 62(18): 2300-2323.
- [21] Xu W, Xu M J, Wu Y W, et al. Petrology geochemistry and geochronology of boninitic dykes from the Kangqiong ophiolite: implications for the Early Cretaceous evolution of Bangong-Nujiang Neo-Tethys Ocean in Tibet[J]. International Geology Review, 2015, 57(16): 2028-2043.
- [22] 罗安波, 范建军, 王明, 等.班公湖-怒江洋复理石沉积时代:来自改则县亚多村碎屑锆石的制约[J].地球科学, 2019, 44(7): 2426-2444.
- [23] 耿全如, 彭智敏, 张璋, 等.班公湖-怒江成矿带及邻区特提斯演化与成矿地质背景[M].北京:地质出版社,2012.
- [24] Li X K, Chen J, Wang R C, et al. Temporal and spatial variations of Late Mesozoic granitoids in the SW Qiangtang, Tibet: Implications for crustal architecture, Meso-Tethyan evolution and regional mineralization[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 374-396.
- [25] 余光明, 王成善.西藏特提斯沉积地质[M].北京:地质出版

- 社, 1990.
- [26] 陈国荣, 刘鸿飞, 蒋光武, 等. 西藏班公湖-怒江结合带中段沙木罗组的发现[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 193-94.
- [27] 谢冰晶, 程捷, 黄传冠. 班公湖-怒江结合带西段沙木罗组的发现及意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 159-164.
- [28] Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, et al. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. Chemical Geology, 2009, 268(3/4): 298-312.
- [29] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, 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.
- [30] 常青松, 朱弟成, 赵志丹, 等. 西藏羌塘南缘热那错早白垩世流纹岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素及其意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(7): 2034-2044.
- [31] Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, et al. Slab break off triggered ca 113 Ma magmatism around Xainza area of the Lhasa Terrane Tibet[J]. Gondwana Research, 2014, 26(2): 449-463.
- [32] 丁林, 来庆洲. 冈底斯地壳碰撞前增厚及隆升的地质证据: 岛弧拼贴对青藏高原隆升及扩展历史的制约[J]. 科学通报, 2003, 48(8): 836-842.
- [33] Chen S S, Shi R D, Gong X H, et al. A syn-collisional model for Early Cretaceous magmatism in the northern and central Lhasa subterrane[J]. Gondwana Research, 2017, 41: 93-109.
- [34] Hu P Y, Zhai Q G, Jahn B M, et al. Late Early Cretaceous magmatic rocks (118-113 Ma) in the middle segment of the Bangong-Nujiang suture zone, Tibetan Plateau: evidence of lithospheric delamination[J]. Gondwana Research, 2017, 44: 116-138.
- [35] Li X K, Chen J, Wang R C, et al. Early Cretaceous tectonomagmatic evolution and basin development of western Bangong-Nujiang suture: A complete history of soft collision[J]. Lithos, 2019, 360-373.
- [36] Zhang K J, Xia B D, Wang G M, et al. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(9): 1202-1222.
- [37] 王忠恒, 王永胜, 谢元和, 等. 西藏班公湖-怒江缝合带中段塔仁本洋岛型玄武岩的发现及地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(1/2): 155-162.
- [38] 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 青藏高原中部中生代 OIB 型玄武岩的识别: 年代学、地球化学及其构造环境[J]. 地质学报, 2006, 80(9): 1312-1328.
- [39] Zhang K J, Xia B, Zhang Y X, et al. Central Tibetan Meso-Tethyan oceanic plateau[J]. Lithos, 2014, 210/211: 278-288.
- [40] Fan J J, Li C, Xue C M, et al. Petrology geochemistry and geochronology of the Zhonggang ocean island northern Tiber: implications for the evolution of the Bangongco-Nujiang oceanic arm of Neo-Tethys[J]. International Geology Review, 2014, 56(12): 1504-1520.
- [41] Fan J J, Niu Y L, Liu Y M, 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]. Geological Society of America Bulletin, 2021, 133(9/10): 1875-1889.
- [42] 刘庆宏, 肖志坚, 曹圣华, 等. 班公湖-怒江结合带西段多岛弧盆系时空结构初步分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 15-21.
- [43] Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, et al. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan Plateau prior to the Indo-Asian collision[J]. Earth Science Reviews, 2012, 114(3/4): 236-249.
- [44] Fan J J, Li C, Xie C M, et al. The evolution of the Bangong-Nujiang Neo-Tethys ocean: Evidence from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic analyses of Early Cretaceous oceanic islands and ophiolites[J]. Tectonophysics, 2015, 655(1): 27-40.
- [45] Zhang Y X, Li Z W, Yang W G, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous episodic development of the Bangong Meso-Tethyan subduction: Evidence from elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of arc magmatic rocks, Gaize region, central Tibet, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 135: 212-242.
- [46] Li S M, Wang Q, Zhu D C, et al. Reconciling Orogenic Drivers for the Evolution of the Bangong-Nujiang Tethys During Middle-Late Jurassic[J]. Tectonics, 2020, 39: e2019TC005951.
- [47] Cao M J, Qin K Z, Li G M, et al. Tectono-magmatic evolution of Late Jurassic to Early Cretaceous granitoids in the west central Lhasa subterrane, Tibet[J]. Gondwana Research, 2016, 39: 386-400.
- [48] Li J X, Qin K Z, Li G M, 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.
- [49] Wang W, Wang M, Zhai Q G, et al. Transition from oceanic subduction to continental collision recorded in the Bangong-Nujiang suture zone: Insights from Early Cretaceous magmatic rocks in the north-central Tibet[J]. Gondwana Research, 2020, 78: 77-91.
- [50] Xu W, Li C, Wang M, et al. Subduction of a spreading ridge within the Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean: Evidence from Early Cretaceous mafic dykes in the Duolong porphyry Cu-Au deposit, western Tibet[J]. Gondwana Research, 2017, 41: 128-141.
- [51] 范建军, 李才, 王明, 等. 班公湖-怒江缝合带洞错混杂岩物质组成、时代及其意义[J]. 地质通报, 2018, 37(8): 1417-1427.
- [52] Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. Nature, 1984, 307: 17-22.
- [53] 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等. 龙木错-双湖-吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界[J]. 地质前缘, 2006, 13(4): 136-147.
- [54] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [55] 范建军, 李兴奎, 张天羽, 等. 班公湖-怒江洋中西段汇聚消亡时空重建[M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- [56] Girardeau J, Marcoux J, Allegre C J, et al. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo-Cimmerian Dongqiao ophiolite, Bangong-Nujiang suture zone, Tibet[J]. Nature, 1984, 307: 27-31.
- [57] Shi R D, Yang J S, Xu Z Q, et al. The Bangong Lake ophiolite (NW Tibet) and its bearing on the tectonic evolution of the Bangong-Nujiang suture zone[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32: 438-457.

- [58] Fan J J, Li C, Wang M, et al. Remnants of a Late Triassic ocean island in the Gufeng area, northern Tibet: implications for the opening and early evolution of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 135: 35–50.
- [59] Fan J J, Li C, Liu J H, et al. The Middle Triassic evolution of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean: Evidence from analyses of OIB–type basalts and OIB–derived phonolites in northern Tibet[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, 107: 1755–1775.
- [60] 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 521–533.
- [61] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [62] 曹圣华, 肖晓琳, 欧阳克贵. 班公湖–怒江结合带西段侏罗纪木嘎岗日群的重新厘定及意义[J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 559–564.
- [63] 陈顺. 西藏班公湖–怒江带西段改则地区木嘎岗日岩群物质组成及构造意义[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2015.
- [64] Luo A B, Fan J J, Hao Y J, et al. Aptian Flysch in Central Tibet: Constraints on the Timing of Closure of the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean[J]. *Tectonics*, 2020, 39, e2020TC006198.
- [65] 湛微微. 羌塘地块白垩纪火山岩和红层古地磁学和年代学新结构及其大地构造意义[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2014.
- [66] 吴浩, 李才, 胡培远, 等. 西藏尼玛县塔色普勒地区去申拉组火山岩的发现及其地质意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(7): 1014–1026.
- [67] 王立全, 潘桂棠, 丁俊, 等. 青藏高原及邻区地质图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- [68] 夏代祥, 刘世坤. 西藏自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [69] Dickinson W R, Gehrels G E. Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288: 115–125.
- [70] Wu F Y, Ji W Q, Liu C Z, et al. Detrital zircon U–Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore–arc basin: Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2010, 271(1/2): 13–25.
- [71] 王永胜, 张树岐, 谢元和, 等. 1:25 万昂达尔错幅等 4 幅区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- [72] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875–878.
- [73] Najman Y. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary basins[J]. *Earth Science Reviews*, 2006, 74: 1–72.
- [74] Liu D L, Huang Q S, Fan S Q, et al. Subduction of the Bangong–Nujiang Ocean: constraints from granites in the Bangong Co area, Tibet[J]. *Geological Journal*, 2014, 49: 188–206.
- [75] Zeng Y C, Chen J L, Xu J F, 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.
- [76] 范建军, 张博川, 刘海永, 等. 班公湖–怒江洋早—中侏罗世洋内俯冲: 来自洞错蛇绿岩的证据[J]. *岩石学报*, 2019, 35(10): 3048–3064.
- [77] Yan L L, Zhang K J. Infant intra–oceanic arc magmatism due to initial subduction induced by oceanic plateau accretion: A case study of the Bangong Meso–Tethys, central Tibet, western China[J]. *Gondwana Research*, 2020, 79: 110–124.
- [78] 傅烺埔, 胡修棉, Erica M C, 等. 西藏雅鲁藏布缝合带甲查拉组: 晚白垩世新特提斯洋海沟沉积?[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(10): 1275–1292.
- [79] 钱信禹, 戴紧根, 王成善, 等. 藏南柳区砾岩的沉积环境及物源分析: 对雅鲁藏布缝合带古近纪隆升的约束[J]. *岩石学报*, 2015, 31(5): 1313–1326.
- [80] Soesoo A, Bons P D, Gray D R, et al. Divergent double subduction: tectonic and petrologic consequences[J]. *Geology*, 1997, 25: 755–758.
- [81] 吴建亮, 尹显科, 王波, 等. 藏北阿翁错地区中基性脉岩年代学、地球化学特征及其板内伸展构造作用[J]. *中国地质*, 2019, 46(6): 1356–1371.
- [82] 雷传扬, 吴建亮, 尹显科, 等. 班公湖–怒江缝合带西段沙木罗组地层中闪长玢岩脉的发现及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(2): 250–259.
- [83] Luo A B, Fan J J, Sun D Y, et al. Terminal stage of divergent double subduction: Insights from Early Cretaceous magmatic rocks in the Gerze area, central Tibet[J]. *Lithos*, 2022, 420/421: 106713.
- ①西藏区调队. 1:100 万日土幅区域地质调查报告. 1987.