

班公湖-怒江缝合带洞错混杂岩物质组成、时代及其意义

范建军¹, 李才¹, 王明¹, 解超明¹, 彭头平², 刘海永³

FAN Jianjun¹, LI Cai¹, WANG Ming¹, XIE Chaoming¹, PENG Touping², LIU Haiyong³

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

2. 福建省地质调查研究院, 福建 福州 350011;

3. 西藏自治区地质调查院, 西藏 拉萨 850000

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

2. Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350011, Fujian, China;

3. Tibet Institute of Geological Survey, Lhasa 850000, Tibet, China

摘要:班公湖-怒江缝合带中段洞错混杂岩保存了完整的与大洋演化相关的混杂岩系,包括蛇绿岩岩块、洋岛残片,以及复理石岩片、大陆边缘沉积等沉积岩块体,是恢复和反演班公湖-怒江洋演化的理想地区。在综述前人研究的基础上,结合近年来的研究成果,归纳和总结洞错混杂岩的物质组成和时代,初步阐述洞错混杂岩对班公湖-怒江洋演化的指示意义。结果表明,洞错混杂岩中无论是蛇绿岩残块、洋岛残片还是次深海-深海复理石岩片等,均是不同时代多期次构造混杂的混杂体。最早的年龄记录可追溯至晚二叠世末期,最晚可延至早白垩世中晚期,是班公湖-怒江洋晚二叠世末期—早白垩世中晚期连续演化的记录。洞错混杂岩早白垩世中晚期大陆边缘沉积与蛇绿岩等的不整合仅是弧前楔顶盆地沉积的产物,不能约束班公湖-怒江洋的最终消亡。

关键词:青藏高原;班公湖-怒江缝合带;洞错混杂岩

中图分类号:P58;P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)08-1417-11

Fan J J, Li C, Wang M, Xie C M, Peng T P, Liu H Y. Material composition, age and significance of the Dong Co Melange in the Bangong Co-Nujiang suture zone. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(8):1417-1427

Abstract: The Dong Co Melange, which contains various Ophiolitic blocks, ocean island fragments, flysch deposits, and continental marginal sediments, is an ideal object for restoring the evolution of the Bangong Co-Nujiang Ocean. In this paper, the authors present a detailed review and in-depth analysis of previous studies about the Dong Co Melange with the purpose of clarifying the material composition and age of the Dong Co Melange and discussing the significance of the Dong Co Melange. The authors hold that the ophiolitic blocks, ocean island fragments and flysch deposits in the Dong Co Melange are all multi-stage tectonic mélangé, with their earliest age probably being the latest Late Permian and the latest age being the Early Cretaceous, indicating that the Bangong Co-Nujiang Ocean was continuous from the latest Late Permian to Early Cretaceous. The unconformity between the Early Cretaceous continental marginal sediments and the flysch deposits in the Dong Co Melange is only a record of fore-arc basin located on the accretion wedge.

Key words: Tibetan Plateau; Bangong Co-Nujiang suture zone; Dong Co Melange

收稿日期:2018-03-14;修订日期:2018-06-29

资助项目:国家自然科学基金项目《班公湖-怒江洋早白垩世演化:来自复理石沉积的制约》(批准号:41702227)、《青藏高原羌塘南部埃迪卡拉纪地层研究》(批准号:41602230)、博士后创新人才支持计划项目《班公湖-怒江缝合带洞错混杂岩的时代及成因机制探讨》(编号:BX201600061)和中国地质调查局项目《班公湖-怒江成矿带铜多金属矿资源基地调查》(编号:DD20160026)、《冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查》(编号:DD20160015)

作者简介: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

班公湖-怒江缝合带近东西向展布于青藏高原中部,是国内外长期关注的特提斯构造域的重要地段^[1-3]。近年来的国土资源大调查项目和科学研究发现,班公湖-怒江缝合带不仅是一条重要的构造界线,也是一条重要的成矿带^[4-6],对它的深入研究,不但可以为恢复和反演特提斯构造域的演化提供重要依据,还可以寻找更多储备矿产,服务国民经济。尽管自20世纪80年代以来,前人对该条缝合带做了大量研究^[1-22],但由于缝合带复杂的构造演化历史及藏北高原恶劣的气候和交通条件,有关班公湖-怒江缝合带的许多关键地质问题尚处于争论中,尤其是其所代表洋盆的演化历程,包括洋盆的性质、打开时限、俯冲极性、消亡过程等问题争论较大。

恢复和反演班公湖-怒江洋的演化历程,缝合带内混杂岩的研究是重点。洞错混杂岩位于班公湖-怒江缝合带中段洞错-扎西错布一带(图1),东西长超过140km,南北最宽处超过20km,是班公湖-怒江缝合带中段出露规模最大的混杂岩之一,

也是目前班公湖-怒江缝合带研究程度较高的混杂岩之一。洞错混杂岩内保存了完整的、与班公湖-怒江洋演化相关的混杂岩系,包括蛇绿岩岩块、洋岛残片、次深海-深海复理石沉积建造、硅质岩、大陆边缘沉积、盖层沉积等沉积岩块体(图1),是恢复和反演班公湖-怒江洋演化的理想地区。依据少量早侏罗世同位素测年和侏罗纪生物化石资料,前人认为洞错混杂岩主体形成于侏罗纪^[25-26]。然而近年来,随着研究程度的不断提高和关键地质问题研究的不断深入,在洞错混杂岩内相继厘定出一系列新的不同时代的蛇绿岩岩块、洋岛残片、复理石沉积、火山岩、变质岩等。这些新的地质体的陆续发现,对解决班公湖-怒江洋的洋盆性质,恢复其构造演化等关键问题具有重要的指示意义。本文在综述前人研究成果的基础上,结合笔者近年来的研究成果,归纳和总结洞错混杂岩的物质组成及形成时代,初步阐述和分析洞错混杂岩对于班公湖-怒江洋演化的制约和指示意义。

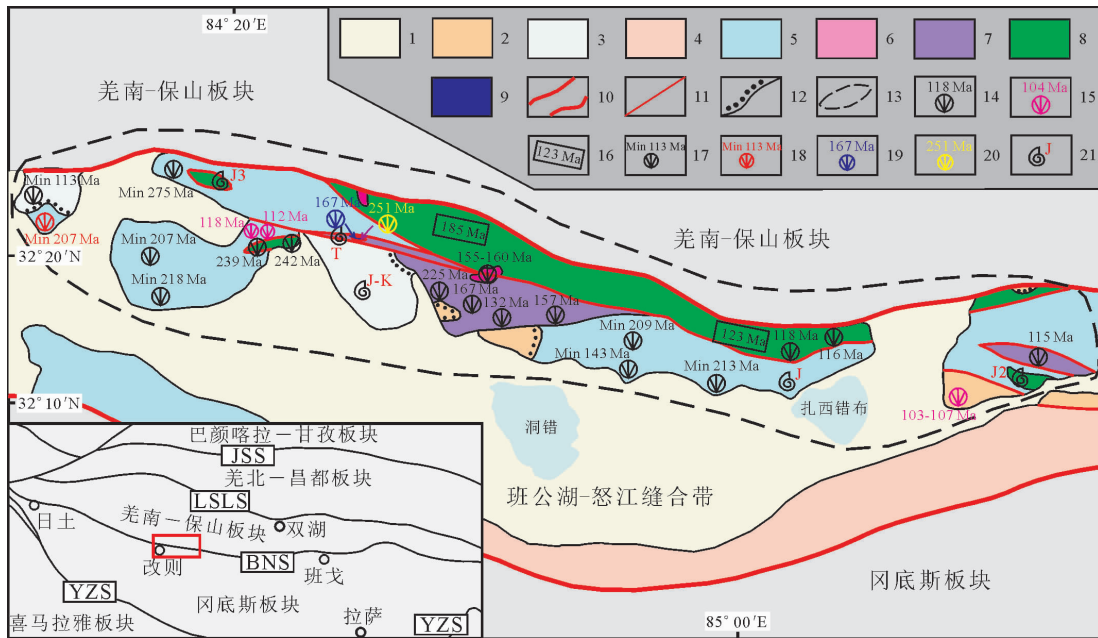


图1 藏北改则洞错地区地质简图

Fig. 1 Geological map of the Dong Co area, Gerze County, Northern Tibet

- 1—第四系沉积;2—早白垩世陆相沉积;3—早白垩世大陆边缘沉积;4—时代未定的大陆边缘沉积(晚三叠世或早白垩世?);5—复理石岩片;6—岩浆岩;7—蛇绿岩;8—洋岛残片;9—榴辉岩;
- 10—班公湖-怒江缝合带主干断裂;11—缝合带内主干断裂;12—角度不整合;13—洞错混杂岩范围;
- 14—蛇绿岩和洋岛残片中的岩浆岩锆石U-Pb测年;15—地层中火山岩夹层锆石U-Pb测年;16—Ar-Ar年龄;
- 17—已发表碎屑锆石最小锆石U-Pb年龄^[23-24];18—待发表碎屑锆石最小锆石U-Pb年龄;19—洞错榴辉岩变质年龄;
- 20—洞错榴辉岩原岩年龄;21—地层中的生物化石;JSS—金沙江缝合带;LSLS—龙木错-双湖-澜沧江缝合带;
- BNS—班公湖-怒江缝合带;YZS—雅鲁藏布江缝合带

1 洞错混杂岩的物质组成及时代

现有的大量研究表明,洞错混杂岩由一系列不同时代、不同物质组成和不同来源的块状和基质混杂堆积组成。这些块体和基质可进一步划分为蛇绿岩岩块、洋岛残片、次深海-深海复理石残片、时代待定的大陆边缘沉积、早白垩世中晚期大陆边缘沉积、早白垩世末期盖层沉积等不同端元(图 1)。此外,还发育岩浆岩侵入体、榴辉岩等低温高压变质岩等。本文从洋岛残片、蛇绿岩、沉积岩、岩浆岩、榴辉岩 5 个角度详细论述洞错混杂岩的物质组成、特征和时代。

1.1 洋岛残片

近年来,洞错混杂岩内洋岛残片的识别和研究成为本地区,乃至整个班公湖-怒江缝合带研究的热点之一。洞错混杂岩中的洋岛残片规模巨大(图 1、图版 I-a),最早是由西藏地质调查院在开展 1:25 万改则县幅区域地质调查时厘定的,并将其命名为仲岗洋岛^[26]。仲岗洋岛呈近东西向出露于班公湖-怒江缝合带中段查挪嘎布、扎弄、仲岗色阿日和尼布一带,东西长超过 80km,南北最宽处约 10km,是班公湖-怒江缝合带上已报道面积最大的一套洋岛残片。洞错混杂岩仲岗洋岛自厘定以来,备受关注。虽然有的学者质疑其归属于古洋岛残片,认为这些洋岛玄武岩(OIB)型岩浆岩是班公湖-怒江洋闭合后板片断离形成板片窗,富集地幔上涌形成的^[3,23]。然而,笔者认为这种解释是值得商榷的。如果仲岗洋岛残片形成于碰撞后的板片断离环境,为什么这些洋岛残片,包括区域上已知的洋岛残片均出露于缝合带中,而在缝合带两侧的板块上均没有出露呢?以上解释主要依据这些洋岛残片中岩浆岩的地球化学特征,忽略了与之伴生的岩石组合。仲岗洋岛残片保存了较完整的岩浆岩基底(包括辉石岩、辉长岩、玄武岩等)与远洋沉积物盖层(包括塌积砾岩、灰岩、硅质岩等)组成的洋岛型双层结构(图版 I-b),与现今大洋洋岛岩石组合可以完全对比,因此将其归属于古洋岛残片较合理^[15-16]。在仲岗洋岛的各岩石端元中,塌积砾岩具有最直接的沉积环境指示意义,因为这类砾岩砾石和基质成分非常简单,除玄武岩便是灰岩,没有陆源碎屑组分,且砾石分选性和磨圆度均较差,说明其形成于远离大陆边缘,物源区只有灰岩和玄武岩的大洋洋岛周围快

速堆积的环境。详细的地球化学研究表明,无论是仲岗洋岛的玄武岩,还是辉石岩和辉长岩,均为典型的 OIB 型玄武岩^[15],进一步从地球化学角度证实了其古洋岛残片。依据仲岗洋岛的野外产状、地质特征及区域对比,前人把仲岗洋岛的时代暂归为中晚侏罗世^[26]。近年来,笔者在仲岗洋岛玄武岩中获得 118Ma 的最小锆石 U-Pb 年龄,在与仲岗洋岛玄武岩同源的 OIB 型辉长岩中获得了 116Ma 的锆石 U-Pb 谐和年龄^[15,30];Zhang 等^[31]在仲岗洋岛角闪辉长岩中获得 185Ma 的长石 Ar-Ar 法年龄,在仲岗洋岛玄武岩中获得了 123Ma 的长石 Ar-Ar 法年龄;付佳俊等^[32]在仲岗洋岛玄武安山岩中获得 124Ma 的锆石 U-Pb 谐和年龄。此外,陈志^[33]在仲岗洋岛尼布地区采获了较多的晚侏罗世水螅、六射珊瑚等生物化石。

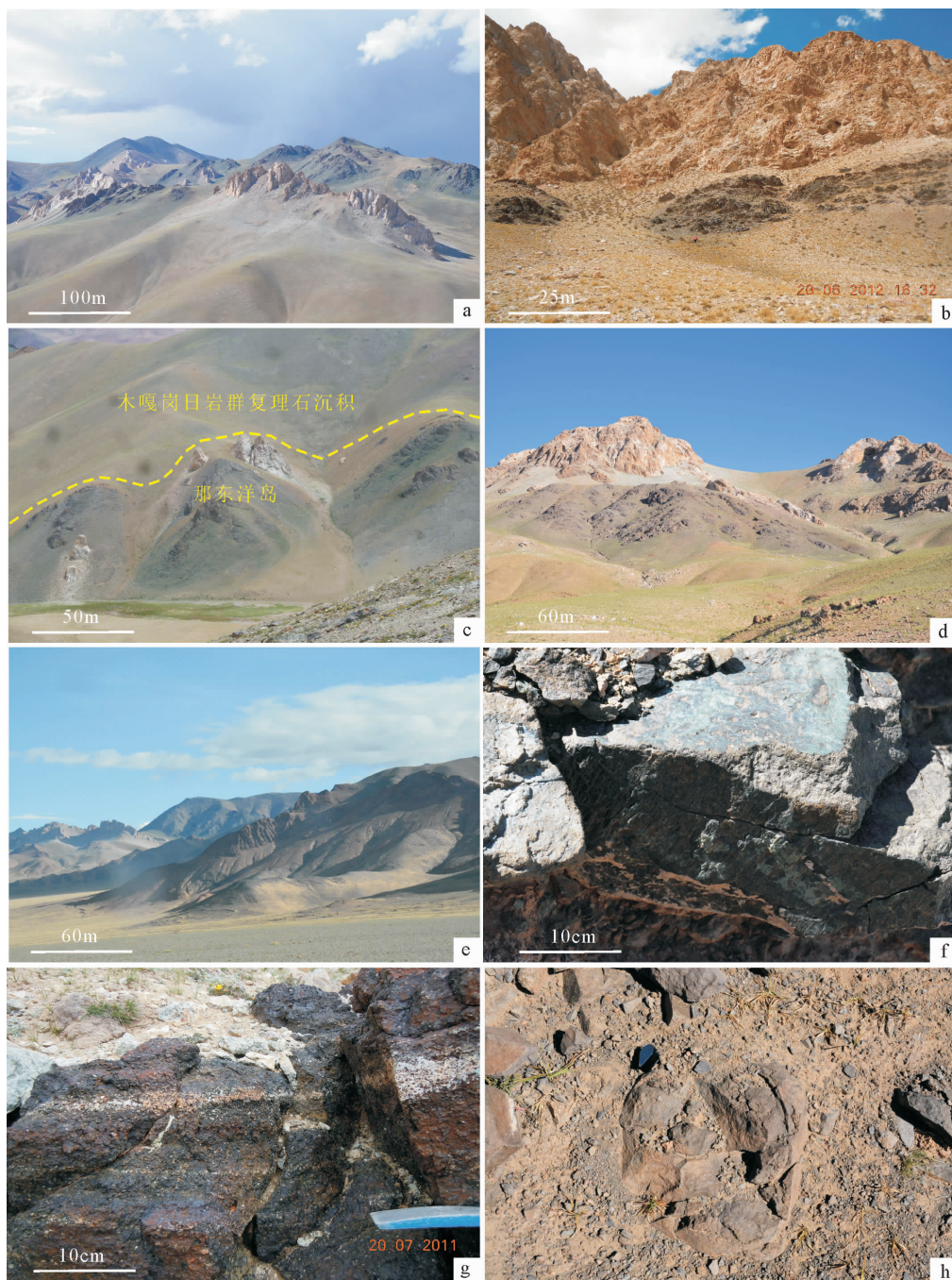
2014 年,笔者所在团队在洞错混杂岩西段开展 1:5 万区域地质调查时,新厘定出一套与木嘎岗日岩群复理石沉积建造整合的洋岛残片,并将其命名为那东洋岛^[34](图版 I-c)。那东洋岛内的岩浆岩锆石测年和生物化石指示其形成于中侏罗世。同时,在洞错混杂岩西段扎嘎尔木一带,成都理工大学在开展 1:5 万区域地质调查时,也新厘定出一套洋岛残片(图版 I-d);笔者详细的研究结果显示,扎嘎尔木一带的洋岛残片由 OIB 型玄武岩、塌积砾岩、灰岩和 OIB 型玄武岩结晶分异形成的响岩等单元组成,与现今发育在巨厚大洋岩石圈上的洋岛岩石组合相似(如大西洋的 Brava 洋岛)^[35]。通过对响岩详细的锆石 U-Pb 测年分析,获得了 239Ma 和 242Ma 的谐和年龄,指示了扎嘎尔木一带的洋岛残片形成于中三叠世^[28]。

由以上分析可知,洞错混杂岩内的洋岛残片至少包含中三叠世、早侏罗世、中侏罗世、早白垩世等多期年龄信息,这些不同时期的洋岛残片均呈孤立的块体产出,各个块体之间呈断层接触。因此,推测洞错混杂岩内的洋岛残片不应归属于单个古洋岛,而应是不同时期、不同古洋岛相继俯冲、消减和就位后的残片。

1.2 蛇绿岩

洞错混杂岩内的蛇绿岩主要包括西段的洞错蛇绿岩和东段的康穷蛇绿岩两部分。西段的洞错蛇绿岩主要出露于西藏改则县洞错以北,去申拉以南,总体走向北西西,东西延长约 50km,西段最宽处

图版 I Plate I



a.洞错混杂岩内洋岛残片的远景照片^[16];b.洞错混杂岩早白垩世洋岛残片^[16];
c.洞错混杂岩内中侏罗世洋岛残片^[27];d.洞错混杂岩内中三叠世洋岛残片^[28];e.洞错蛇绿岩远景照片;
f.蛇绿岩中变质橄榄岩^[16];g.蛇绿岩中堆晶辉长岩^[29];h.蛇绿岩中枕状玄武岩^[16]

约5km。洞错蛇绿岩是班公湖-怒江缝合带中段出露规模较大、岩石组合最齐全的蛇绿岩块体之一(图版 I -e),其形态不规则,整体呈透镜体状以断

层形式夹持于次深海-深海复理石沉积建造和洋岛残片中^[26,36](图1)。通过前人详细的地质调查和专题研究^[8,25-26,36-39],初步明确洞错蛇绿岩的岩石组合非

常齐全,其底部至顶部依次由地幔橄榄岩(Oph1;图版 I-f)、镁铁-超镁铁质堆晶岩(Oph2)、基性岩墙(Oph3)、枕状熔岩(Oph4;图版 I-h)和硅质岩(Oph5)五部分组成,可恢复的洋壳总厚度大于5km^[36]。

普遍认为,洞错蛇绿岩形成于侏罗纪^[25-26],主要依据有3点:①洞错蛇绿岩被早白垩世末期去申拉组(K_{1q})角度不整合覆盖;②在洞错蛇绿岩的层状堆晶辉长岩中获得 Sm-Nb 法同位素年龄为 191±22Ma,时代为早侏罗世,对同一件样品进行 K-Ar 法测定,获得 2 个年龄分别为 140±4.07Ma 和 152.30±3.60Ma,时代为晚侏罗世—早白垩世;③洞错一带少量硅质岩中的放射虫时代为侏罗纪。

近年来,鲍佩声等^[36]在洞错蛇绿岩橄榄辉长岩中获 132Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 谐和年龄,在玄武岩中获 137Ma 和 141Ma 的全岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄,时代均为早白垩世;Wang 等^[39]在洞错蛇绿岩堆晶岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄 164Ma,时代为中侏罗世。武勇等^[40]在洞错蛇绿岩辉长岩中获得 225Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄,时代为晚三叠世。陈志^[33]在洞错以北的才隆拉地区灰岩块体中采集了较多的三叠纪牙形石化石,并将其解释为仲岗洋岛中的生物化石。然而,笔者详细的对比发现,这些含三叠纪牙形石化石的灰岩块体,全部出露于洞错蛇绿岩内,且其围岩均为洞错蛇绿岩的变质橄榄岩。根据大洋板块地层理论,在蛇绿岩形成的洋中脊环境,也有灰岩的沉积,并在后续的俯冲增生和造山过程中,保存于缝合带内。因此,笔者推测,洞错以北才隆拉地区的灰岩块体应属于洞错蛇绿岩的组成部分,其内三叠纪牙形石化石,可能反映了洞错蛇绿岩的年龄信息。

洞错混杂岩西段的康穷蛇绿岩由项目团队在开展西藏 1:5 万达查沟等 4 幅区域地质调查时厘定,其位于尼玛县中仓乡以北 40km 处的康穷、坦纠下玛拉、鲁堆和夹柱一带,东西延长十余千米,南北最宽处约 4km,总出露面积约 30km²。康穷蛇绿岩主要岩石端元包括变质橄榄岩(Oph1)、堆晶岩(Oph2;图版 I-g)、基性岩墙(Oph3)、基性熔岩(Oph4)、少量斜长花岗岩等,与现今大洋岩石圈的岩石组合可以对比,岩石组合证明,康穷蛇绿岩是班公湖-怒江洋的古大洋残片。关于康穷蛇绿岩的时代,锆石 U-Pb 年龄集中在中侏罗世和早白垩世 2 期^[29]。

由以上分析可以得出,洞错混杂岩内的蛇绿岩残块,与洋岛残片一样,包含晚三叠世、早侏罗世、中侏罗世、晚侏罗世、早白垩世等多期年龄。因此,笔者推测,洞错混杂岩内的蛇绿岩也可能是多期次俯冲就位的混杂体。由于现有研究较零星,洞错混杂岩内是否有更古老的蛇绿岩的出露,还有待进一步研究。

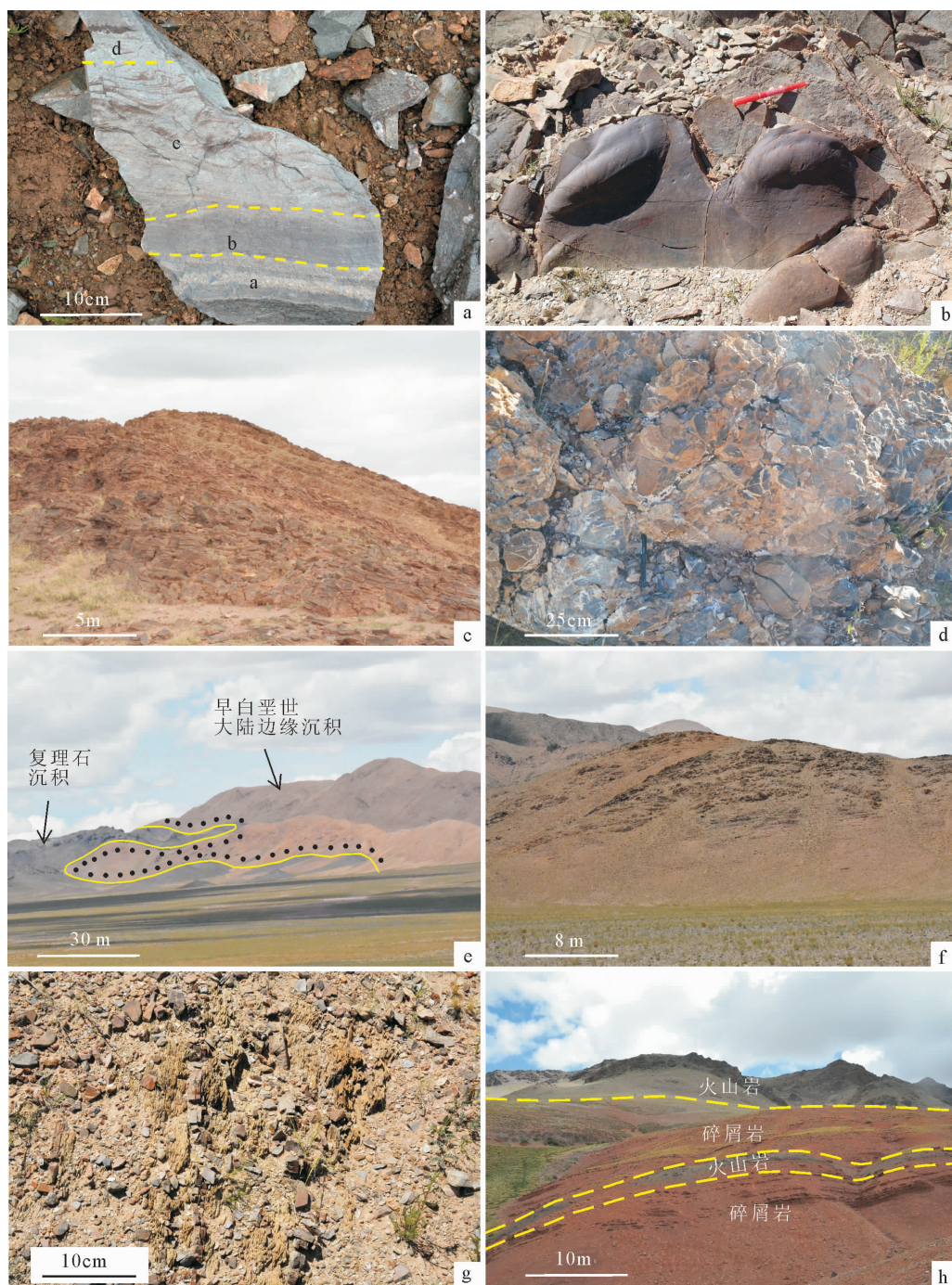
1.3 沉积岩

洞错混杂岩内沉积地层分布较多,岩性较复杂,前人已将它们划归为木嘎岗日岩群、沙木罗组、去申拉组等^[26]。依据时代、沉积环境、构造背景等,笔者将洞错混杂岩内的沉积岩进一步划分为早白垩世陆相沉积、早白垩世大陆边缘沉积、时代未定的大陆边缘沉积(晚三叠世或晚侏罗世—早白垩世?)和复理石岩片四部分。

洞错混杂岩中的复理石岩片主体以砂页岩岩石组合为主,保存了较完整的鲍马层序 a、b、c、d(图版 II-a)和底面印模构造(图版 II-b),是洞错混杂岩蛇绿岩、洋岛等块体的直接基底^[26,41]。但关于洞错混杂岩复理石岩片的时代,争议较大。依据少量侏罗纪化石和区域对比,前人将其归为侏罗纪^[26]。近年来,随着大比例尺区域地质调查及专题研究的不断深入,关于洞错混杂岩复理石岩片的研究成果较多。大量碎屑锆石定年结果表明,洞错混杂岩复理石岩片的时代最老可能追溯到晚三叠世^[42-43]。最近,Fan 等^[44]在洞错混杂岩中部扎嘎尔木一带的复理石岩片中新发现火山岩夹层,对其进行详细的测年分析,获得早白垩世(112~118Ma)的年龄信息,表明洞错混杂岩中复理石岩片的时代可能延续到早白垩世中晚期。详细的地球化学和同位素研究表明,洞错混杂岩早白垩世复理石岩片中的火山岩夹层为双峰式火山岩,包含大洋中脊型玄武岩(MORB)和钙碱性 A 型流纹岩,是班公湖-怒江洋早白垩世洋脊俯冲的产物^[44]。基于以上分析,笔者推测,洞错混杂岩内的复理石岩片可能为班公湖-怒江洋演化过程中不同时代复理石沉积建造混杂堆积的产物,其时代跨度至少为晚三叠世—早白垩世中晚期。

洞错混杂岩内大陆边缘沉积分布较广泛,主要集中于 3 个区域,其中洞错以南的大陆边缘沉积以砂板岩为主,夹灰岩、硅质岩、砾岩等。至于该部分大陆边缘沉积的时代,目前争议较大,主要有 2 种观点:晚三叠世^[26]和晚侏罗世—早白垩世^[45]。

图版 II Plate II



a.复理石岩片中的鲍马层序^[41];b.复理石岩组中的重荷模构造;c.早白垩世大陆边缘沉积中的砂质灰岩;
 d.早白垩世大陆边缘沉积中的砾岩;e.早白垩世大陆边缘沉积与复理石岩片的角度不整合接触;
 f.早白垩世大陆边缘沉积中的碎屑岩远景照片;g.早白垩世大陆边缘沉积中的薄层砂页岩互层;
 h.早白垩世陆相沉积远景照片^[46]

洞错混杂岩中部的大陆边缘沉积角度不整合于洞错蛇绿岩之上(图1),其主体由碎屑岩-碳酸盐

岩构成的沉积旋回构成,岩石组合为生物灰岩、生物礁灰岩与页岩、钙质砂岩、粉砂岩,局部表现为巨

厚的砂质灰岩(图版 II-c),灰岩中的生物类别以珊瑚为主,见腹足类和双壳类。岩石组合与生物特征反映了浅海沉积环境,为浅海陆棚沉积与碳酸盐岩滩,短时发育生物礁^[33]。该部分大陆边缘沉积局部岩石组合以页岩、粉砂岩、砂岩夹透镜状砾岩为主,宏观上砾岩层向上增多、加厚,部分区域见火山岩夹层。在砂岩、粉砂岩中发育变形层理和包卷层理,递变层理多见,代表了斜坡环境复理石沉积^[33]。砾岩夹层和砾岩透镜体的底部发育冲刷面,砾石具有向上变细的特征,其中砾石成分单一,为深灰色泥晶灰岩(图版 II-d)。内部多有槽状交错层理发育,为水下扇(海底扇)内水下河道沉积^[33]。洞错混杂岩最西侧的大陆边缘沉积角度不整合于复理石岩片之上(图 1、图版 II-e),以浅黄色、浅灰色中层、中薄层状钙质石英砂岩、钙质砂岩为主(图版 II-f),夹含生屑铁质钙质砂岩、灰色钙质泥岩、灰色厚层状砾岩、灰色砂质灰岩等^[46],局部见薄层钙质砂岩与页岩互层现象(图版 II-g),以及粒序层理、砂纹层理、小型交错层理等层理现象,主体反映滨海-浅海沉积环境。基于晚侏罗世-早白垩世的生物化石^[26]和 133~113Ma 的砂岩碎屑锆石最小年龄^[24],笔者将以上 2 个地区大陆边缘沉积的时代归为早白垩世中晚期。

洞错混杂岩早白垩世陆相地层分布较零星,其主体为安山岩、流纹岩等火山岩,少量为玄武岩等基性岩,局部夹红层碎屑岩沉积^[47-48](图版 II-h),其中,红层碎屑岩沉积多以粉砂岩和砂岩为主,见少量含砾砂岩,发育平行层理、斜层理等层理构造,指示陆相湖泊相沉积。前人已对洞错混杂岩陆相地层中的火山岩进行了大量的锆石 U-Pb 测年,测年结果集中在 103~107Ma^[47-50],指示其主体形成于早白垩世末期阿尔必期。

由以上分析可知,洞错混杂岩内的沉积岩类型复杂,不但包括晚三叠世、侏罗纪、早白垩世中晚期等不同时期复理石岩片的混杂堆积,还包含早白垩世中晚期大陆边缘的滨浅海-次深海沉积,以及早白垩世末期陆相沉积。

1.4 岩浆岩

洞错混杂岩内岩浆岩较少,仅在中部有少量出露,笔者将其称为洞错花岗岩。洞错花岗岩以岩株形式侵入于洞错蛇绿岩变质橄榄岩中,地球化学特征显示其为 I 型大陆弧型花岗岩^[51]。阴极发光图像

显示,洞错花岗岩的锆石除少部分为原生锆石外,其余大部分为继承锆石,比例高达 70% 以上。洞错花岗岩原生锆石获得了 155~160Ma 之间的 5 个谐和年龄,指示其形成于晚侏罗世早期。洞错花岗岩继承锆石多呈椭圆形, Th/U 值和年龄变化均较大,类似于沉积岩碎屑锆石。为进一步探讨这些继承锆石的来源,笔者将洞错花岗岩 85 个继承锆石年龄做成谱系图,并与区域测年结果进行广泛对比发现,洞错花岗岩继承锆石年龄谱系图与洞错混杂岩内的复理石碎屑岩锆石谱系图可以完全对比^[51]。洞错花岗岩直接侵入于洞错蛇绿岩等增生楔中,而增生楔的组成部分除少量蛇绿岩和洋岛残片外,主要是次深海-深海复理石沉积。因此,笔者推测,洞错花岗岩的继承锆石来源于增生楔中的复理石沉积,换言之,在洞错花岗岩的形成过程中,有大量来自于增生楔的沉积物参与其中。

现有研究表明,在大洋板块与大陆板块缓慢而复杂的俯冲、碰撞过程中,仰冲板块前端因刮削作用、底侵作用、前端剥蚀作用等,使洋壳物质(包括蛇绿岩、洋岛和复理石沉积)在海沟内壁发生增生,增生楔逐渐形成和增长,具体表现为随着俯冲过程的持续,海沟逐渐向洋一侧后退,大陆弧逐渐向洋一侧迁移。洞错花岗岩是大陆弧型花岗岩。一般而言,大陆弧型岩浆岩多产于俯冲带的后方,与俯冲带前缘形成的增生楔有一定距离。但洞错花岗岩直接侵入于洞错混杂岩等增生楔中,说明在晚侏罗世,班公湖-怒江洋北侧的增生楔已经增长到足够的规模和宽度,否则,大陆弧型花岗岩不可能侵位到增生楔中。笔者推测,由于班公湖-怒江洋的北向俯冲,羌南-保山板块发生了大规模的陆壳增生,至晚侏罗世早期,班公湖-怒江洋北侧已形成完整的、规模巨大的大陆增生楔,新的岩浆弧已经前进至原先形成的增生楔之上,造就了晚侏罗世早期的大陆弧型花岗岩侵入于洞错蛇绿岩的现象。结合区域上大面积存在的中晚侏罗世弧型岩浆,笔者推测,班公湖-怒江洋至少在中侏罗世之前已经俯冲消减,至晚侏罗世早期,大洋北侧已经发生大规模的俯冲增生^[51]。

1.5 榴辉岩

洞错混杂岩内的榴辉岩,最早由成都理工大学在该地区开展 1:5 万区域地质调查过程中发现。而后众多学者对其开展了深入研究^[52-54]。研究结果表

明,洞错混杂岩内的榴辉岩原岩为OIB型玄武岩和MORB型玄武岩,时代集中在晚二叠世末期—早三叠世,变质时代为中侏罗世。

2 洞错混杂岩早白垩世大陆边缘沉积与洋壳物质之间不整合的性质:大洋闭合?

通常认为,造山带中沉积岩与洋壳物质的沉积不整合代表了古大洋的终止,是洋盆闭合消亡的直接证据。前已叙及,洞错混杂岩内早白垩世大陆边缘沉积或角度不整合于蛇绿岩之上,或角度不整合于复理石岩片之上。前人普遍认为,这期不整合归属于区域上晚侏罗世—早白垩世沙木罗组等与洋壳物质的不整合,并认为它们标志着班公湖—怒江洋的最终消亡。但笔者对这种划分方案提出质疑。传统认为,沙木罗组是以砂岩、粉砂岩、灰岩等为主的一套滨浅海相沉积^[55-56]。由以上对洞错混杂岩大陆边缘沉积的分析,笔者归纳为2点:①洞错混杂岩内的大陆边缘沉积主体反映滨浅海—半深海的沉积环境,不同于典型沙木罗组的滨浅海相沉积环境;②洞错混杂岩大陆边缘沉积时代为早白垩世中晚期,与区域上典型沙木罗组晚侏罗世—早白垩世早期的时代不同。详细的沉积环境、砂岩地球化学和砂岩碎屑锆石对比分析表明,洞错混杂岩早白垩世中晚期大陆边缘沉积及其与下伏洋壳物质等的不整合可能为弧前楔顶盆地沉积的产物,它们与本地区的晚三叠世—早白垩世中晚期次深海—深海复理石沉积等一起构成班公湖—怒江洋早白垩世弧前楔顶盆地、增生楔、大洋深海盆地等活动大陆边缘沉积体系(范建军等,待发表)。

3 洞错混杂岩对班公湖—怒江洋演化的指示和制约意义

由于班公湖—怒江缝合带本身复杂的构造演化历史和藏北高原恶劣的交通和气候条件,使有关该缝合带的许多重要地质问题尚处于争论中,尤其是关于该缝合带所代表的洋盆性质、演化历史等认识分歧较大。有学者提出,班公湖—怒江洋是从古生代—中生代连续演化的大洋,代表了青藏高原古特提斯洋的主洋盆^[1,7,57-59]。有学者认为,班公湖—怒江洋主体演化始于中生代,其最早可能打开于晚二

叠世,最终闭合于白垩纪。在这种模型下,班公湖—怒江洋可能代表了新特提斯洋的北部分支洋盆^[15,19,60-63],或者代表了中特提斯洋^[64-67]。也有学者得出,班公湖—怒江洋仅是一个存在时间不超过100Ma的短命洋盆,其演化历程可能为晚三叠世—晚侏罗世^[14,68-69]。甚至有的学者提出,班公湖—怒江洋不是严格意义的大洋,而是由一系列不连通的小洋盆组成^[70-71]。

以上关于班公湖—怒江洋的争论,很多答案可以从洞错混杂岩中找到。洞错混杂岩包含了晚二叠世末期—早三叠世和中三叠世的洋盆信息,那么班公湖—怒江洋中段的打开时限应该在晚二叠世末期之前。至于其初始打开时限究竟是石炭纪—二叠纪^[1,7,57-59,72],还是晚二叠世^[15,61,73],有待进一步研究。洞错混杂岩蛇绿岩和洋岛残片众多,时代从晚二叠世末期—早白垩世中晚期较连续,证实了班公湖—怒江洋至少是从晚二叠世末期—早白垩世连续演化的大洋。洞错混杂岩内早白垩世大陆边缘沉积与洋壳物质的不整合,是早白垩世中晚期弧前楔顶盆地沉积的产物,这也为区域上晚侏罗世—早白垩世沙木罗组与洋壳物质的不整合构造属性的研究提供了思考:这期不整合究竟能否代表班公湖—怒江洋的最终消亡?它们形成于什么构造背景?有没有可能也是形成于弧前楔顶盆地环境?

综上所述,依据洞错混杂岩内的物质组成及时代信息,笔者可以大致归纳出班公湖—怒江洋晚二叠世末期—早白垩世的演化历程,其模型可简述如下:至少在晚二叠世末期—早三叠世,班公湖—怒江洋中段已经打开,至早中三叠世,班公湖—怒江洋已演化为成熟的大洋,期间发育洞错混杂岩扎嘎尔木一带的中三叠世洋岛。晚三叠世—早侏罗世,班公湖—怒江洋继续扩张,混杂岩内晚三叠世—早侏罗世的蛇绿岩、晚三叠世—早侏罗世的复理石沉积及区域上晚三叠世的孤峰洋岛^[73]是该时期演化的产物。中侏罗世及以前,班公湖—怒江洋已经开始俯冲消减,并发生大规模的俯冲增生,形成缝合带两侧的中晚侏罗世的岩浆岩及缝合带内部的洞错花岗岩等。至早白垩世,班公湖—怒江洋并未闭合,因为该时期与大洋演化相关的蛇绿岩(包括洞错蛇绿岩、康穷蛇绿岩等)、洋岛(如仲岗洋岛、塔仁本洋岛)、复理石(洞错混杂岩早白垩世的复理石沉积)及俯冲相关的火山岩(如洞错混杂岩早白垩世复理

石沉积中与洋脊俯冲相关的双峰式火山岩),以及区域上与大洋俯冲相关的岩浆岩等还是大量存在的。至晚白垩世,班公湖-怒江洋最终消亡并碰撞造山,形成了区域上阿布山组、竟柱山组等磨拉石沉积。

致谢:野外工作得到河海大学吴浩博士、中国海洋大学刘一鸣博士、中国地质大学(北京)许伟博士、吉林大学张天羽博士、南京大学李兴奎博士等的帮助和支持,审稿专家对本文提出了建设性的修改意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]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.
- [2]Shi R D, Griffin W L, Reilly S Y, et al. Melt/mantle mixing products podiform chromite deposits in ophiolites: Implication of Re-Os systematics in the Dongqiao Neo-tethyan ophiolite northern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 194-206.
- [3]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: 7-17.
- [4]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.
- [5]Geng Q R, Zhang Z, Peng Z M, et al. Jurassic-Cretaceous granitoids and related tectono-metallogensis in the Zapug-Duobuza arc, western Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 77: 163-175.
- [6]Li G M, Qin K Z, Li J X, et al. Cretaceous magmatism and metallogeny in the Bangong-Nujiang metallogenic belt, central Tibet: Evidence from petrogeochemistry, zircon U-Pb ages, and Hf-O isotopic compositions[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 110-127.
- [7]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.
- [8]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.
- [9]Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 2000, 28: 211-280.
- [10]Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 1984, 307: 17-22.
- [11]Dewey J F, Shackelton R M, Chang C, et al. The tectonic evolution of the Tibetan plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1988, A327: 379-413.
- [12]Coulon C, Maluski H, Bollinger C, et al. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79: 281-302.
- [13]Kapp P, Yin A, Harrison T M, et al. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. *GSA Bulletin*, 2005, 117: 865-878.
- [14]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: 917-932.
- [15]Fan J J, Li C, Xie C M, et al. Petrology, geochemistry, and geochronology of the Zhonggang ocean island, northern Tibet: implications for the evolution of the Bangongco-Nujiang oceanic arm of Neo-Tethys[J]. *International Geology Review*, 2014, 56: 1504-1520.
- [16]Fan J J, Li C, Wang M, et al. Reconstructing in space and time the closure of the middle and western segments of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean in the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 107: 231-249.
- [17]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.
- [18]Li Y L, He J, Wang C S, et al. Cretaceous volcanic rocks in south Qiangtang Terrane: Products of northward subduction of the Bangong-Nujiang Ocean?[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 104: 69-83.
- [19]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.
- [20]Volkmer J E, Kapp P, Horton B K, et al. Northern Lhasa thrust belt of central Tibet: evidence of Cretaceous-early Cenozoic shortening within a passive roof thrust system?[J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 2014, 507: 59-70.
- [21]Hao L L, Wang Q, Wyman D A, et al. Underplating of basaltic magmas and crustal growth in a continental arc: Evidence from Late Mesozoic intermediate-felsic intrusive rocks in southern Qiangtang, central Tibet[J]. *Lithos*, 2016, 245: 223-242.
- [22]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.
- [23]Li S, Guilmette C, Ding L, 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.
- [24]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*, 2017, 59: 166-184.
- [25]邱瑞照,周肃,邓晋福,等.西藏班公湖-怒江带西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定:兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代[J]. *中国地质*, 2004, 31(3): 262-268.
- [26]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.
- [27]Fan J J, Li C, Xu J X, et al. Petrology, geochemistry, and geological significance of the Nadong ocean island, Banggongco–Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *International Geology Review*, 2014, 56: 915–928.
- [28]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(5): 1755–1775.
- [29]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, 57:2028–2043.
- [30]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, 655:27–41.
- [31]Zhang K J, Xia B, Zhang Y X, et al. Central Tibetan Meso–Tethyan oceanic plateau[J]. *Lithos*, 2014, 210/211:278–288.
- [32]付佳俊, 丁林, 许强, 等. 西藏改则洞错地区白垩纪火山岩锆石 U–Pb 年代学、Hf 同位素组成及对班公湖–怒江洋俯冲闭合的制约[J]. *地质科学*, 2015, 50(1):182–202.
- [33]陈志. 西藏改则地区仲岗洋岛火山–沉积序列与地球化学特征[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2016.
- [34]徐建鑫, 李才, 范建军, 等. 藏北班公湖–怒江板块缝合带内的侏罗纪洋岛型岩石组合——来自岩石学及地球化学的证据[J]. *地质通报*, 2014, 33(11):1793–1803.
- [35]Mourão C, Mata J, Doucelance R, et al. Quaternary extrusive calcicarbonate volcanism on Brava Island (Cape Verde): A nephelinite–carbonate immiscibility product[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, 56:59–74.
- [36]鲍佩声, 肖序常, 苏犁, 等. 西藏洞错蛇绿岩的构造环境: 岩石学、地球化学和年代学制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(3): 298–307.
- [37]张玉修. 班公湖–怒江缝合带中西段构造演化[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2007.
- [38]李建峰, 夏斌, 王冉, 等. 洞错地幔橄榄岩、均质辉长岩矿物化学特征及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(2):308–319.
- [39]Wang B D, Wang L Q, 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*, 2016, 245:18–33.
- [40]武勇. 西藏洞错蛇绿岩成因及构造环境研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2016.
- [41]Fan J J, Li C, Liu Y M, et al. Age and nature of the late Early Cretaceous Zhaga Formation, northern Tibet: constraints on when the Bangong–Nujiang Neo–Tethys Ocean closed[J]. *International Geology Review*, 2015, 57:342–353.
- [42]Zeng M, Zhang X, Cao H, et al. Late Triassic initial subduction of the Bangong–Nujiang Ocean beneath Qiangtang revealed: stratigraphic and geochronological evidence from Gaize, Tibet[J]. *Basin Research*, 2016, 28:147–157.
- [43]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.
- [44]Fan J J, Li C, Sun Z M, et al. Early Cretaceous MORB–type basalt and A–type rhyolite in northern Tibet: Evidence for ridge subduction in the Bangong–Nujiang Tethyan Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154:187–201.
- [45]Li S, Guilmette C, Ding L, et al. Provenance of Mesozoic clastic rocks within the Bangong–Nujiang suturezone, central Tibet: Implications for the age of the initial Lhasa–Qiangtang collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 147:469–484.
- [46]邓金火, 袁振国, 余江, 等. 班公湖–怒江结合带西段底砾岩的新发现及地质意义[J]. *地质论评*, 2017, 63(2):302–310.
- [47]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.
- [48]吴浩, 李才, 胡培远, 等. 藏北班公湖–怒江缝合带早白垩世双峰式火山岩的确定及其地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(11): 1804–1814.
- [49]Wu H, Li C, Xu M J, et al. Early Cretaceous adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane Tibet: implications for slab roll–back and subsequent slab break–off of the lithosphere of the Bangong–Nujiang Ocean[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97(1):51–66.
- [50]Chen W W, Zhang S H, Ding J K, et al. Combined paleomagnetic and geochronological study on Cretaceous strata of the Qiangtang terrane, central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41:373–389.
- [51]Fan J J, Li C, Wu H, et al. Late Jurassic adakitic granodiorite in the Dong Co area, northern Tibet: Implications for subduction of the Bangong–Nujiang oceanic lithosphere and related accretion of the Southern Qiangtang terrane[J]. *Tectonophysics*, 2016, 691:345–361.
- [52]王保弟, 王立全, 许继峰, 等. 班公湖–怒江结合带洞错地区舍拉玛高压麻粒岩的发现机器地质意义[J]. *地质通报*, 2015, 34(9): 1605–1616.
- [53]Zhang Y X, Li Z W, Zhu L D, et al. Newly discovered eclogites from the Bangong Meso–Tethyan suture zone (Gaize, central Tibet, western China): mineralogy, geochemistry, geochronology, and tectonic implications[J]. *International Geology Review*, 2015, 58:1–14.
- [54]Zhang X Z, Wang Q, Dong Y S, et al. High pressure granulite–facies overprinting during the exhumation of eclogites in the Bangong–Nujiang suture zone, central Tibet: link to flat–slab subduction[J]. *Tectonics*, 2018, doi: 10.1002/2017TC004774.
- [55]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):193–194.
- [56]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.

- [57] 王建平. 西藏东部特提斯地质[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [58] Pan G T, Wang L Q, Li R S, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 3-14.
- [59] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1429-1454.
- [60] Smith A B, Xu J T. Paleontology of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud The Geological Evolution of Tibet[M]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, 1988: 53-106.
- [61] 任纪舜, 肖黎薇. 1:25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱[J]. *地质通报*, 2003, 23(1): 1-11.
- [62] 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.
- [63] 黄启帅, 史仁灯, 丁炳华, 等. 班公湖 MOR 型蛇绿岩 Re-Os 同位素特征对班公湖-怒江特提斯洋裂解时间的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(4): 465-478.
- [64] 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.
- [65] Zhou M F, Malpas J, Robinson P T, et al. The dynamothermal aureole of the Dongqiao ophiolite (northern Tibet) [J]. *Canada Journal of Earth Sciences*, 1997, 34: 59-65.
- [66] 雍永源, 贾宝江. 板块剪式汇聚加地体拼贴——中特提斯洋消亡的新模式[J]. *沉积与特提斯地质*, 2000, 20(1): 85-89.
- [67] Wang W L, Aitchison J C, Lo C H, et al. Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic mélanges along Bangong-Nujiang suture, central Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33: 122-138.
- [68] 夏斌, 徐力峰, 韦振权, 等. 西藏东巧蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 528-531.
- [69] 曲晓明, 辛洪波, 赵元艺, 等. 西藏班公湖中特提斯洋盆的打开时间: 镁铁质蛇绿岩地球化学与锆石 U-Pb LAICPMS 定年结果[J]. *地学前缘*, 2010, 17(3): 53-63.
- [70] 卢书炜, 任建德, 杜凤军, 等. 从尼玛地区地质新资料看中特提斯洋的构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(3): 35-39.
- [71] 赵文津, 刘葵, 蒋忠惕, 等. 西藏班公湖-怒江缝合带——深部地球物理结构给出的启示[J]. *地质通报*, 2004, 23(7): 623-635.
- [72] 王玉净, 王建平, 刘彦明, 等. 西藏丁青蛇绿岩特征、时代及其地质意义[J]. *微体古生物学报*, 2002, 19(4): 417-420.
- [73] 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.