

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.02002

## 古岛弧地体的俯冲是南羌塘增生杂岩形成的重要机制:来自日湾茶卡洋岛的证据

李 典<sup>1</sup>, 王根厚<sup>2</sup>, 刘正勇<sup>3</sup>, 刘佳琪<sup>4</sup>, 李 超<sup>5</sup>,  
刘 函<sup>6</sup>, 唐 宇<sup>2</sup>, 冯翼鹏<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地质资源与地质工程博士后科研流动站, 四川 成都 610059; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 4. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司研究院库尔勒分院, 新疆 库尔勒 841000; 5. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 6. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

**摘要:**洋内岛弧及微陆块的俯冲增生是形成增生杂岩的重要机制。本文通过对南羌塘地区日湾茶卡组进行野外实测地质剖面,开展沉积特征、古生物化石、碎屑组分模式、碎屑锆石测年等研究,发现:(1)日湾茶卡为近源沉积,最年轻碎屑锆石年龄峰值为325~375 Ma,但在龙木错-双湖古特提斯大洋周边陆块均未发现源区,其真正物源应为其下伏的望果山组火山岩;(2)日湾茶卡组内珊瑚化石丰度虽然高,但分异度非常低,其沉积位置应是一个相对突出的孤立位置。根据日湾茶卡组下伏望果山组火山岩所具有的洋内岛弧地球化学特征,并与同期SSZ型蛇绿岩组成的类似洋内俯冲的大地构造体系对比,本文认为日湾茶卡组与其下伏的望果山组火山岩共同组成了泥盆纪—石炭纪由洋内俯冲形成的古岛弧地体。根据碎屑锆石分布型式的相似性,本文进一步认为猫儿山地区部分南羌塘增生杂岩的源岩为日湾茶卡组。因此,日湾茶卡洋岛应曾经历过俯冲增生作用:浅部发生前端“刮削作用”形成冈玛错地区有变形但无变质的日湾茶卡组及望果山组,俯冲到深部的日湾茶卡组则发生高压变质作用并在后期折返至增生杂岩的浅部层次。因此,本文认为在南羌塘增生杂岩的形成过程中,日湾茶卡古岛弧地体的俯冲与增生也起到了重要的作用。

**关 键 词:**日湾茶卡组;洋内岛弧地体;南羌塘增生杂岩;碎屑锆石

**中图分类号:**P548;P588.14

**文献标识码:**A

增生杂岩是大洋岩石圈向大陆板块发生的缓慢而复杂的俯冲、碰撞过程中,发生前端逆冲岩片叠置(Ujiiie, 1997)、深部构造侵蚀(Cloos and Shreve, 1988)、底垫作用(Kimura et al., 1996, 2007)等复杂构造变形作用形成的一套由不同大地构造相物质组成的复杂地质单元(李继亮, 2004;袁四化等, 2009)。增生杂岩基质常由强烈变形的海沟复理石、远洋-半远洋沉积岩和被动大陆边缘的浊积岩,以及通过构造剪切碾磨作用从岩块之上

改造而形成的构造岩及蚀变岩等组成,岩块则不仅包含不同类型的蛇绿岩(王根厚等, 2009),也会出现从深部折返的低温高压变质岩,并可能包括洋内岛弧和微陆块残片(潘桂棠等, 2004, 2008)。对增生杂岩组成单元形成演化过程的精细研究,有助于深刻理解造山带发生的“俯冲-增生造山作用”。

随着近年来构造-变质解析(Liang et al., 2012, 2017; Li et al., 2020)、同碰撞岩浆岩(Zhang et al., 2011)和弧前沉积盆地(Liang et al., 2020)的系

收稿日期:2021-01-13;改回日期:2021-02-03

作者简介:李典,博士研究生,从事构造地质研究工作。E-mail:304118152@qq.com

通讯作者:王根厚,教授,从事构造地质研究工作。E-mail:wgh@cugb.edu.cn

资助项目:南羌塘中生代盆地的基底构造属性及变质变形作用研究(编号:1212011221115)

统研究,藏北羌塘中部变质岩带被归属为印支期俯冲作用形成的造山带增生杂岩(王根厚等,2009),其形成演化经历了吉特提斯洋俯冲、折返、碰撞及后期改造的多期复杂构造变形(Liang et al., 2012, 2017; Wang et al., 2018)。然而,作为造山带形成重要机制的洋内古岛弧地体的俯冲增生作用,迄今为止还未在南羌塘增生杂岩中存在研究和报道。本文通过对改则县冈玛错地区日湾茶卡组开展古生物和碎屑锆石研究,并结合前人的地球化学和碎屑锆石研究,认为日湾茶卡组和下伏望果山组为吉特提斯洋内古岛弧地体,猫儿山地区部分增生杂岩即是该古岛弧地体俯冲增生的产物。本文的研究不仅为羌塘中部存在“原位”龙木错–双湖吉特提斯大洋(李才,1987)提供了重要证据,更有助于加深对南羌塘增生杂岩形成过程(王根厚等,2009)的理解。

## 1 区域地质背景

青藏高原由显生宙期间增生到欧亚大陆南缘的地体或微陆块组成,从北向南,分别是昆仑地体、松潘–甘孜地体、羌塘地体和拉萨地体(图1a, Sengör, 1990; Kapp et al., 2003; Zhang et al., 2004)。羌塘地体与松潘–甘孜地体由金沙江吉特提斯缝合带分隔,羌塘地体与拉萨地体则被班公湖–怒江缝合带分隔(图1a, Sengör, 1990; Kapp et al., 2003; Zhang et al., 2004; 李才等,2009)。羌塘地体内部可能存在龙木错–双湖缝合带而进一步可分为北羌塘和南羌塘(李才,1987; Zhai et al., 2011; Zhao et al., 2014, 2015)。龙木错–双湖缝合带南侧大面积分布的上石炭统下二叠统碎屑岩内,含冷水型生物群并夹有冰海杂砾岩,具有冈瓦纳大陆亲缘性(梁定益等,1983; 李才等,2006; Zhang et al., 2013; Fan et al., 2015)。北羌塘地体晚古生代地层内则被认为连续分布暖水生物群(陈寿铭等,2006; 程立人等,2006; 李才,2008; 武桂春等,2009)。此外,在龙木错–双湖缝合带以南,出露具有“基质–岩块”结构的南羌塘增生杂岩,主要由镁铁质岩石(Zhai et al., 2013, 2016; Wu et al., 2017)、浅变质沉积岩(Zhao et al., 2014, 2015; Liang et al., 2017)以及蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩组成(Kapp et al., 2000; Li et al., 2006; Zhang et al., 2006, 2010; Pullen et al., 2011; Zhai et al., 2011; Pullen and Kapp, 2014)。

增生杂岩内浅变质沉积岩与广泛分布于南羌塘的上石炭统下二叠统碎屑岩具有相似的碎屑锆石年龄谱,因而也具有冈瓦纳亲缘性(Pullen et al., 2008; Zhu et al., 2011; Fan et al., 2016; Li et al., 2019)。然而,猫儿山附近经历了高压变质作用的碎屑岩的锆石年龄谱则与具冈瓦纳亲缘性的岩石具有较大的差别(Pullen et al., 2008; Zhang et al., 2017)。因此,猫儿山变质碎屑岩的物源对认识南羌塘增生杂岩的成因显然具有重大的意义。然而,对其物源的解释却存在两种迥然不同的观点。Pullen et al. (2008)研究了吉特提斯洋周缘地体内碎屑锆石,均未发现相关的碎屑锆石来源,因此认为猫儿山区域的变质碎屑岩的物源只能来自吉特提斯洋内古岛弧地体。然而,相应的大洋则被认为是金沙江吉特提斯洋。Zhang et al. (2017)发现猫儿山变碎屑岩与日湾茶卡组内碎屑岩类似,根据日湾茶卡组内发育的暖水生物化石,认为日湾茶卡组为北羌塘陆缘沉积(Liu et al., 2017; 彭虎等,2014)。因此,前者认为猫儿山地区部分增生杂岩为金沙江吉特提斯洋内古岛弧地体南向俯冲形成,并经历了“底垫作用”;后者则认为龙木错–双湖吉特提斯洋的原位北向俯冲通过“构造侵蚀”作用将上覆北羌塘板片的部分被动陆缘地层加入到了增生杂岩中。解决上述问题的关键在于确定日湾茶卡组源区大地构造环境。因此,本文拟通过日湾茶卡组内灰岩珊瑚化石和碎屑锆石深入研究其源区大地构造环境,来深入理解南羌塘增生杂岩的形成过程。

## 2 日湾茶卡地区地质特征

日湾茶卡地区主要出露日湾茶卡组及望果山组,并被花岗岩侵入(Wu et al., 2016)以及被白垩纪–古近纪红层角度不整合覆盖(Li et al., 2020),日湾茶卡组与下伏增生杂岩呈构造接触关系(图1b)。

望果山组主要以火山岩为主,含有玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹英安岩和火山碎屑岩,其地球化学特征与俯冲相关的火山岩相似(刘函等,2015; Dan et al., 2019)。望果山组总体被日湾茶卡组所分隔为东西两段,二者总体呈整合接触关系(图2, Liu et al., 2017),部分地段呈现断层接触关系(Dan et al., 2018)。望果山组火山岩西段形成于约358~350 Ma(江庆源等,2014; Jiang et al.,

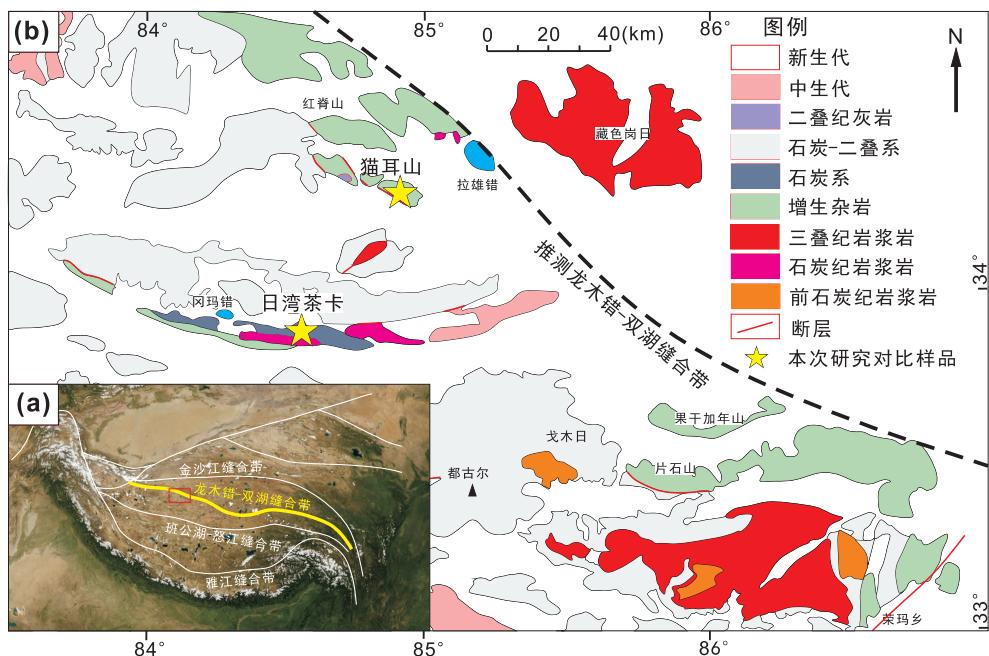


图1 日湾茶卡 - 猫儿山地区区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Riwanchaka- Maoershan area

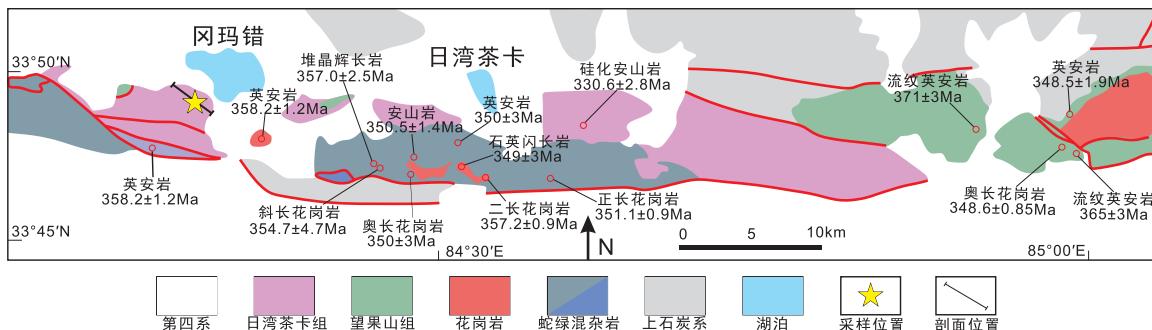


图2 冈玛错 - 日湾茶卡地区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Gangma Co-Riwanchaka area

2015; Dan et al., 2018), 并与蛇绿岩呈断层接触关系。蛇绿岩形成时代为早石炭世(约 357 ~ 345 Ma), 具有 SSZ 型蛇绿岩的地球化学特征(Zhai et al., 2013)。望果山组东段形成于约 351 ~ 346 Ma (Jiang et al., 2015) 以及约 372 ~ 370 Ma (Wang et al., 2017)。望果山组火山岩与同时代蛇绿岩被认为组成了弧前蛇绿岩和火山岩的洋内俯冲体系(Liu et al., 2018; Dan et al., 2019)。在日湾茶卡以西约 2.5 km 存在一套约 353 Ma 的花岗质侵入岩。冈玛错南东侧也存在一套碱性长石花岗岩, 形成时代约为 360 Ma, 具有 A 型花岗岩的特征(Zhai et al., 2018)。

日湾茶卡组主要由未变质的富含生物化石的灰岩及碎屑岩组成。灰岩内古生物类型主要为暖水型, 被解释为具有扬子亲缘性(Liu et al., 2017)。

## 2.1 地层与沉积特征

本次在冈玛错南西缘日湾茶卡组开展了实测剖面(图 3)。剖面地理坐标:E84°20'27.45", N33°49'56.69", 长度 49.9 米, 逐层采取岩石样品 210 件, 古生物化石 52 件。剖面上层理产状稳定, 倾向为 313°, 倾角为 32°。未见顶和底, 剖面描述如下。

(未见顶)

19. 主体为灰白色中厚层生物碎屑泥晶灰岩生物碎屑主要为棘皮动物和四射珊瑚, 偶见少量腕足类, 顶部为薄层黄色砂岩。 1.6 m
18. 灰白色厚层海百合灰岩、海百合茎含量大于 50%, 长度约 2cm 至 20 cm 不等, 保存较为完整。 1.1 m
17. 灰色中厚层生物碎屑灰岩, 生物碎屑主要为四射珊瑚、其次为腕足类。产四射珊瑚: *Dibunophyllum* sp. indet., *Clisiophyllum* cf. *subimbricatum* Thomson, *Clisiophyllum* sp. indet., *Kueichouphyllum* sine nse Yu。 2.8 m

表1 日湾茶卡地区岩浆岩时代

Table 1 The ages of the igneous rocks in Riwanchaka area

序号	岩性	年龄(Ma)	测年方法	样品位置	作者
1	流纹英安岩	371 ± 3	SIMS	冈玛错	Dan, 2018
2	流纹英安岩	365 ± 3	SIMS	冈玛错	Dan, 2018
3	碱长花岗岩	359 ± 3	SIMS	冈玛错	Dan, 2018
4	英安岩	350 ± 3	SIMS	日湾茶卡	Dan, 2019
5	石英闪长岩	349 ± 3	SIMS	日湾茶卡	Dan, 2019
6	奥长花岗岩	350 ± 3	SIMS	日湾茶卡	Dan, 2019
7	安山岩	350.5 ± 1.4	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Jiang, 2015
8	英安岩	348.5 ± 1.9	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Jiang, 2015
9	安山岩	348.6 ± 0.85	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Jiang, 2015
10	二长花岗岩	357.2 ± 0.9	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Liu, 2018
11	正长花岗岩	351.1 ± 0.9	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Liu, 2018
12	花岗闪长岩	357.4 ± 1.0	LA-ICP-MS	日湾茶卡	Liu, 2018
13	堆晶辉长岩	357.0 ± 2.5	SHRIMP	冈玛错	Zhai, 2013
14	斜长花岗岩	356.1 ± 3.0	SHRIMP	冈玛错	Zhai, 2013
15	斜长花岗岩	354.7 ± 4.7	SHRIMP	冈玛错	Zhai, 2013
16	堆晶辉长岩	345.4 ± 4.6	SHRIMP	冈玛错	Zhai, 2013
17	安山岩	350.5 ± 1.4	LA-ICP-MS	冈玛错	江庆源, 2014
18	英安岩	358.2 ± 1.2	LA-ICP-MS	冈玛错	江庆源, 2014
19	硅化安山岩	330.6 ± 2.8	LA-ICP-MS	日湾茶卡	刘函, 2015

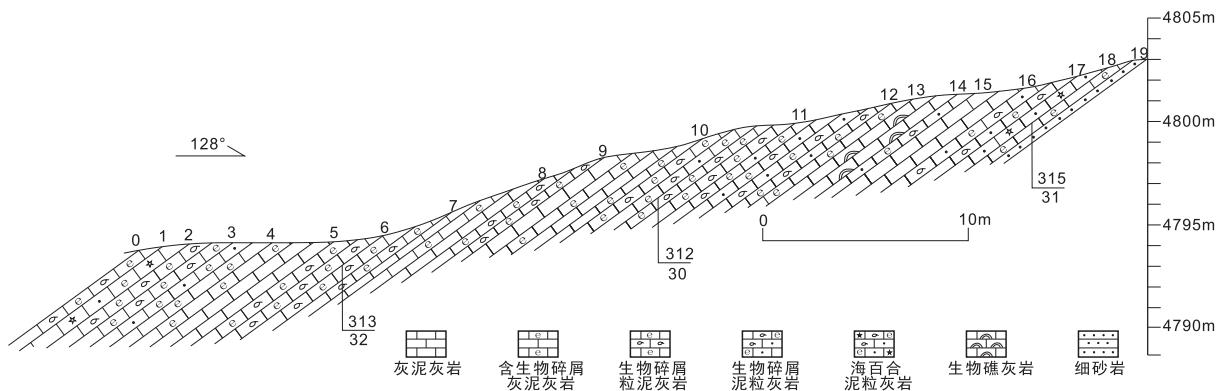


图3 西藏冈玛错地区日湾茶卡组实测地质剖面图

Fig. 3 Measured geological profile of the Riwanchaka Formation in Gangma Co, Tibet

16. 灰黑色中薄层灰泥灰岩,局部可见极少量生物碎屑。 4.2 m  
 15. 灰黑色含生物碎屑灰岩,可见少量生物碎屑,较为破碎。 2.4 m  
 14. 灰黑色厚层生物礁灰岩,造礁生物为四射珊瑚,四射珊瑚主要为单体珊瑚,直径大于5 cm,长度5~15 cm。 1.1 m  
 13. 灰色厚层生物碎屑灰岩,生物碎屑主要为四射珊瑚、海百合茎,其次为腕足类、介形虫等,生物碎屑整体保存较为完整,局部可见生物潜穴构造。产四射珊瑚: *Arachnolasma chabugense* Fan, *Arachnolasma* sp. indet., *Clisiophyllum* cf. *subimbricatum* Thomson, *Slimoniphyllum* cf. *retiforme* Fan et S. J. Chen。 3.2 m  
 12. 灰黑色中薄层泥晶灰岩、砂屑灰岩,未见生物碎屑。 2.2 m  
 11. 灰白色厚层生物碎屑灰岩,生物碎屑主要有海百合茎、珊瑚、腕足类,次要生物为介形虫,局部夹有砂屑、砾屑灰岩。产四射珊瑚:
- Kueichouphyllum heishihkuanense Yu, Kueichouphyllum sinense Yu, Diph yphyllum gerzeense Fan, Dibunophyllum cf. Turbinatum M. Coy, Clisiophyllum sp. indet., Neoclisiophyllum jamdaense Fan, Axophyllum jamdaense Fan。 6.0 m  
 10. 灰黑色厚层含生物碎屑灰岩,层厚较大。 5.3 m  
 9. 砂屑、砾屑灰岩与生物碎屑灰岩互层。 2.1 m  
 8. 薄层灰黑色灰泥灰岩,偶见少量生物碎屑。 1.9 m  
 7. 灰黑色生物碎屑亮晶灰岩,生物碎屑含量较高,可见大量海百合茎和四射珊瑚,化石保存完整。 1.7 m  
 6. 薄层砂屑-砾屑泥晶灰岩与生物碎屑泥晶灰岩互层。 4.2 m  
 5. 灰色薄层生物碎屑灰岩,夹有薄层土黄色薄层粉砂岩,生物碎屑含量较多,主要为海百合茎和四射珊瑚。 2.7 m

4. 含生物碎屑灰岩,生物碎屑含量较少,偶见双壳类。 2.3 m  
 3. 下部为中厚层生物碎屑泥晶灰岩,生物碎屑主要为海百合,其次为珊瑚、腕足类,偶见介形虫,生物保存较为完整;上部为灰黑色—黑色薄层砾屑灰岩,为次棱角状—圆状。 2.5 m  
 2. 灰白色—灰色,海百合生物碎屑泥晶灰岩,生物碎屑为海百合茎,宽约1cm,长度2~10cm,横切面可见海百合圆形轴腔。 1.1 m  
 1. 灰白色—灰黑色,中厚层—厚层生物碎屑泥晶灰岩夹有灰黑色薄层泥晶灰岩,生物碎屑主要为棘皮动物、四射珊瑚、偶见腕足类、介形虫,四射珊瑚化石保存完整,多数为单体珊瑚,少数组块状或丛状复体珊瑚。 1.5 m

(底被第四系覆盖)

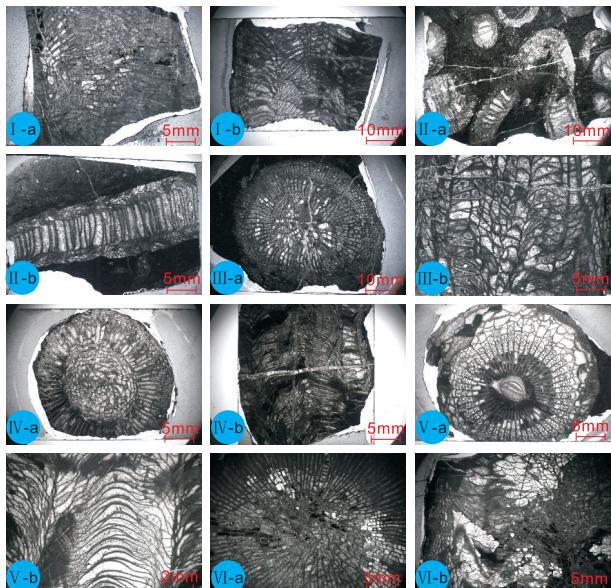


图4 珊瑚化石镜下照片

- I—*Clisiophyllum* sp. indet., a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-1;  
 II—*Diphyphyllum gerzeense* Fan, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-2;  
 III—*Kueichouphyllum heishihkyuanense* Yu, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-4; IV—*Neoclisiophyllum jamdaense* Fan, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-8; V—*Axophyllum jamdaense* Fan, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-10; VI—*Kueichouphyllum sinense* Yu, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-11

Fig. 4 Photomicrographs of the coral fossils

## 2.2 古生物化石

本次研究选取了保存较为完整的38件化石样品,在北京大学地空学院制作薄片114张,由中国地质大学(北京)王训练教授进行鉴定。根据鉴定结果,共有8属10种。四射珊瑚具体属种如下: *Arachnolasma aichiapinense* Fan, *Arachnolasma chabugense* Fan, *Axophyllum jamdaense* Fan, *Clisiophyllum cf. subimbricatum* Thomson, *Dibunophyllum cf. Turbinatum* M. Coy, *Diphyphyllum gerzeense* Fan, *Kueichouphyllum heishihkyuanense* Yu,

*Kueichouphyllum sinense* Yu, *Neoclisiophyllum jamdaense* Fan, *Slimoniphyllum cf. retiforme* Fan et S. J. Chen,其中,*Arachnolasma*(中国似棚珊瑚)和*Kueichouphyllum*(中国贵州珊瑚)占绝对优势(图4,图5)。

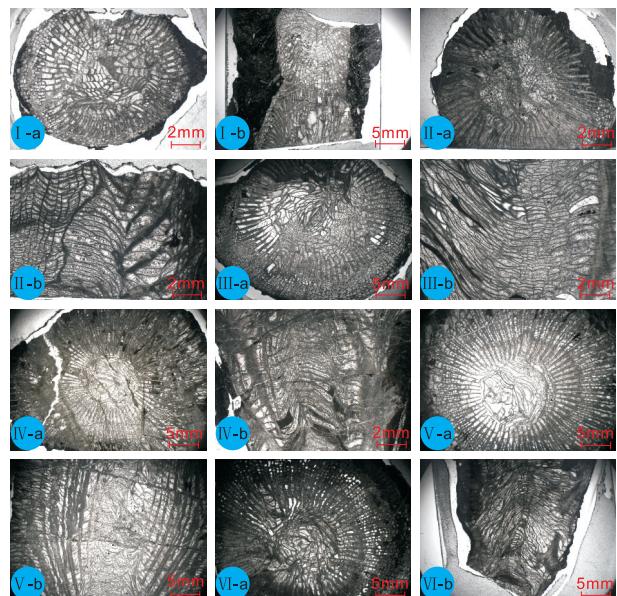


图5 珊瑚化石镜下照片

- I—*Dibunophyllum cf. Turbinatum* M. Coy, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-12; II—*Arachnolasma chabugense* Fan, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-13; III—*Clisiophyllum cf. subimbricatum* Thomson, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-15; IV—*Arachnolasma aichiapinense* Fan, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-16; V—*Slimoniphyllum cf. retiforme* Fan et S. J. Chen, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-17; VI—*Clisiophyllum cf. subimbricatum* Thomson, a—横切面, b—纵切面, 标本号: HS-19

Fig. 5 Photomicrographs of the coral fossils

## 2.3 剖面相序结构

本次研究采用Dunham (1962)的分类方式对日湾茶卡组碳酸盐岩石类型进行划分,共划分出10种主要岩石类型:灰泥灰岩、含生物碎屑灰泥灰岩、生物碎屑粒泥灰岩-I、生物碎屑粒泥灰岩-II、生物碎屑泥粒灰岩、内碎屑泥粒灰岩、海百合泥粒灰岩、生物碎屑颗粒灰岩、内碎屑颗粒灰岩、生物礁灰岩。基于Wilson (2012)建立的标准微相模式,通过分析岩石特征、岩性组合及相关沉积构造,将日湾茶卡组划分为局限台地相、开阔台地相和台地边缘浅滩相,其中局限台地相继续划分为半局限台地亚相,开阔台地相则继续划分为台内浅滩亚相、台内洼地亚相、台内点礁亚相(图6)。

根据碳酸盐微相在剖面上的垂向变化,日湾茶卡组的沉积过程共经历了2次大的海进-海退旋回,

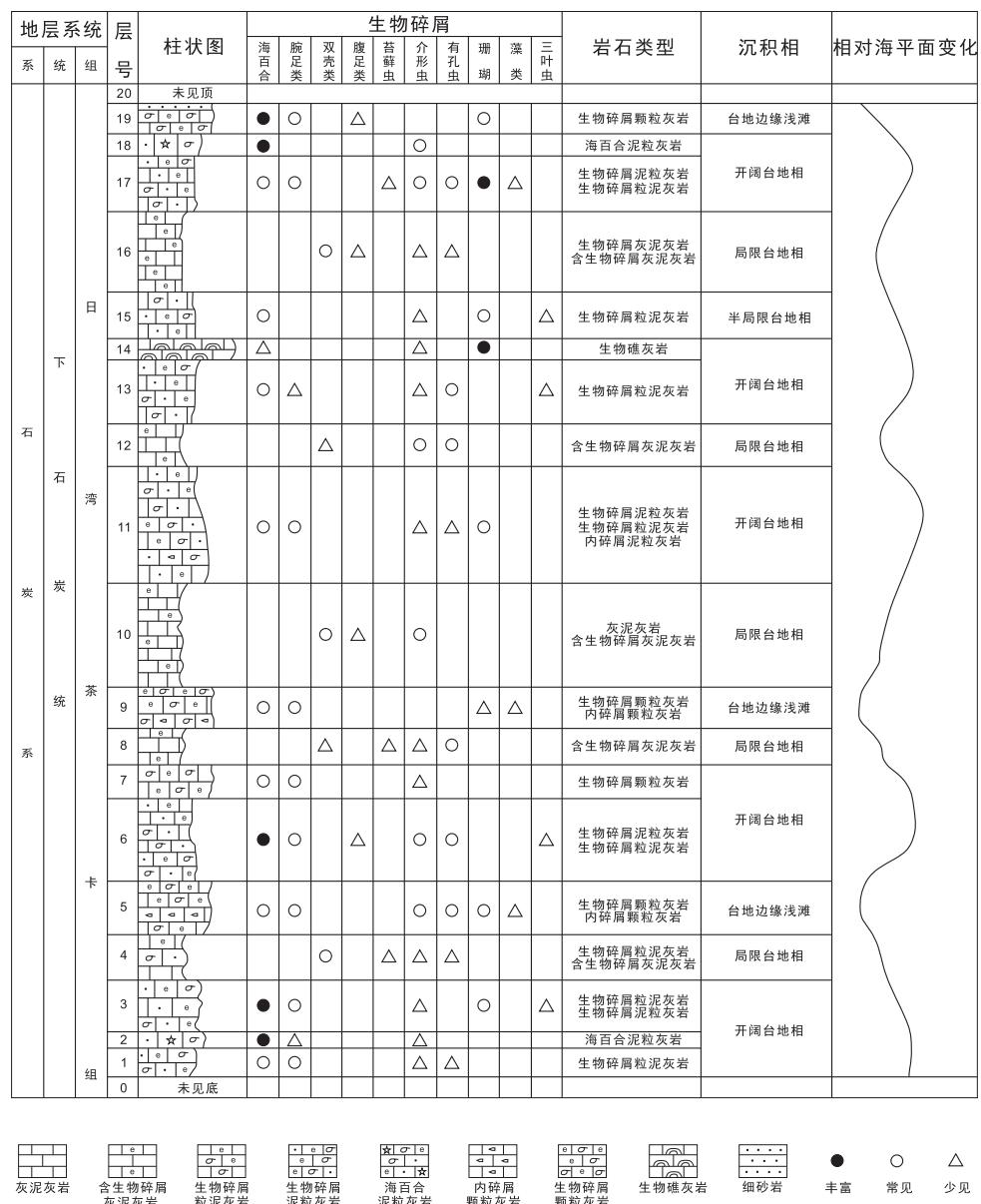


图 6 日湾茶卡组柱状图  
Fig. 6 Column of the Riwanchaka Formation

期间还存在一些小规模的海平面升降。第一个旋回发育于剖面下部,纵向上表现为局限台地相—台地边缘浅滩相—开阔台地相的叠置序列,海水表现为先变浅再变深的特征。旋回底部以含生物碎屑灰泥灰岩为主。由于水循环受到局限,故生物碎屑丰度和分异度都降低。随后海平面再次降低,碳酸盐岩沉积受到浪的反复冲刷,形成生物碎屑滩。随着海平面的上升,再次表现为水动能中等的开阔台地相。第二个旋回发育于剖面中部,与第一旋回类似,沉积相上表现为局限台地相—台地边缘浅滩相—局限台地相—开阔台地相,反映了海平面先下

降再升高的过程。剖面上部则主要为一些规模较小的海平面的波动,纵向上表现为局限台地相—开阔台地相—半局限台地相—局限台地相—开阔台地相—台地边缘浅滩相。沉积相在开阔台地相和局限台地相之间不断变化,说明此时的海水较为动荡。剖面整体变现为海侵的相序结构。

### 3 碎屑组分含量统计和 Dickinson 图解

本次研究选取了未变质的 5 件粉砂岩利用 Gazzi-Dickinson 的点计数法开展碎屑组分含量统计。首先在显微镜下仔细观察,了解薄片中所含矿

物种种类，并选出颗粒直径大于  $62.5 \mu\text{m}$  的岩屑和矿物晶体进行数量统计。每张薄片统计的碎屑数量都超过了 300 颗，具有统计意义。

根据镜下观察，5 件长石岩屑砂岩样品分选性均较差，碎屑组分主要包括石英（32%），长石（29%）和岩屑（39%）。石英主要为单晶石英以及少量多晶石英，长石则存在碱性长石和斜长石两种类型，岩屑主要为中基性火山岩屑，少量的沉积岩屑、变质岩屑以及变质沉积岩屑。支撑类型为颗粒支撑，钙质胶结物及粘土质杂基断续充填于颗粒间（图 7）。

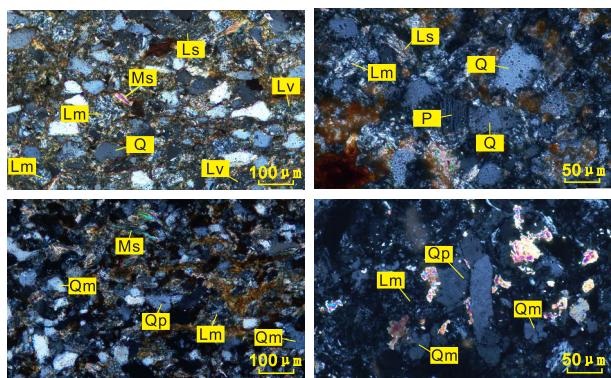


图 7 日湾茶卡组砂岩镜下特征

Fig. 7 Photomicrographs of sandstones from the Riwanchaka Formation

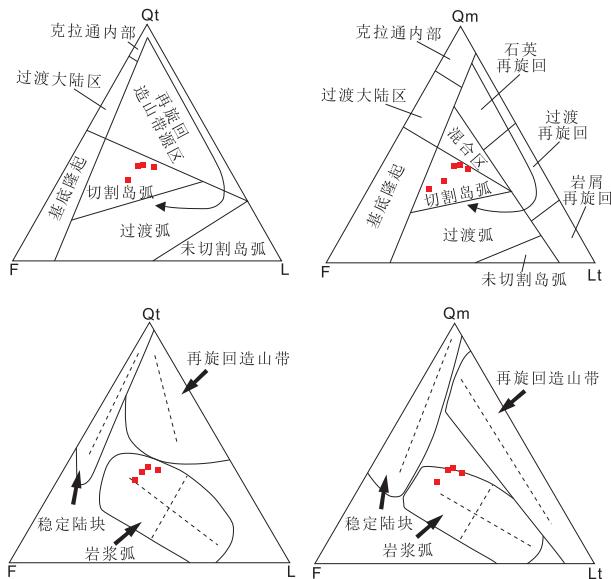


图 8 日湾茶卡组砂岩 Dickinson 三角图解

Fig. 8 Dickinson ternary diagrams for the sandstone from the Riwanchaka Formation

本文通过研究日湾茶卡组长石岩屑砂岩的碎屑模式组分，从而推测其物源区的大地构造环境。

根据 QtFL、QmFLt 三角图解 (Dickinson et al., 1983)，日湾茶卡组物源成分全部投影在切割岛弧物源区。根据 QtFL、QmFLt 三角图解 (Dickinson, 1985)，样品全部落在了岩浆弧物源区（图 8）。

## 4 碎屑锆石测年

### 4.1 测试方法

本次在日湾茶卡组碎屑岩夹层内采集了 1 件样品开展碎屑锆石测年。锆石的分选在河北省区域地质调查局(廊坊)研究所完成，并在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成阴极发光(CL)照相，以评价和观察锆石内部结构。利用阴极发光照片、透反射照片，选择表面干净、透明度高、包裹体和裂隙较少的锆石，并避开包裹体和裂隙在锆石边部环带区域选取了测试点。碎屑锆石的 U-Pb 同位素年龄测定在中国地质大学(北京)矿物激光微探针分析实验室(Milma 实验室)进行，采用 Laser Ablation Multicollector 电感耦合等离子体质谱法 (LA-MC-ICP-MS) 和 Agilent 7900 ICP-MS 耦合 NewWave 193 UC ArF 准分子激光系统，波长为 193 nm，光点直径为  $35 \mu\text{m}$ 。U-Th-Pb 浓度使用 91100 标准锆石进行校准 (Wiedenbeck et al., 2004)，每 10 颗锆石测定两次。测定元素组成的标准则采用 NIST610，实验设备通过标准锆石 GJ-1 (Jackson et al., 2004) 和 Plesovice (Sláma et al., 2008) 在分析测试期间进行监测。锆石稀土元素测试同时进行。测试数据由 ICPMSData 进行处理 (Liu et al., 2008)。同位素比值和年龄误差采用  $\pm 1\sigma$ 。普通 Pb 校正 (Andersen, 2002) 通过 Excel 程序进行。年龄大于 1000 Ma 的碎屑锆石，由于含有较大量放射性成因 Pb，因此采用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄。小于 1000 Ma 的碎屑锆石，由于放射性成因 Pb 含量较低且普通 Pb 校正具有一定的不确定性，因而采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄，同时排除不和谐度大于 10%，年龄误差  $1\sigma$  大于 3% 的测试数据。

### 4.2 碎屑锆石年龄谱

锆石的 CL 图像显示，碎屑锆石的形态大小变化较大，粒径在  $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ，长宽比为 1:1 或 1:2。位于  $300 \sim 500 \text{ Ma}$  范围的锆石棱角明显，磨圆度较差。大部分的锆石拥有清晰的岩浆振荡环带，Th/U 比值变化范围在  $0.1 \sim 1.6$ ，显示典型的岩浆锆石特征。碎屑锆石稀土元素总量变化较大，总量为  $80 \sim 5455 \times 10^{-6}$ ，同时可见年龄不同的碎屑锆石稀土元

素配分曲线的特征大体相似,总体呈现 LREE 相对亏损,HREE 相对富集,具有显著的 Ce 正异常和 Eu 负异常,曲线向左倾斜,也表现出明显的岩浆锆石特征。本次共测试了 145 颗锆石,最突出年龄峰值均出现在 375~325 Ma 区域,少数位于 1750~1650 Ma 范围内(图 9)。

## 5 讨论

### 5.1 日湾茶卡组沉积时代

本次研究在日湾茶卡组内获取的四射珊瑚中,*Arachnolasma aichiapinense* Fan, *Arachnolasma chabugense* Fan, *Arachnolasma* sp. indet., *Kueichouphyllum heishihkyuanense* Yu, *Kueichouphyllum sinense* Yu 占绝对优势, *Axophyllum jamdaense* Fan, *Clisiophyllum* cf. *Subimbricatum* Thomson, *Clisiophyllum* sp. indet., *Dibunophyllum* cf. *Turbinatum* M. Coy, *Dibunophyllum* sp. indet., *Diphyphyllum gerzeense* Fan, *Neoclesiophyllum jamdaense* Fan, *Slimoniphyllum* cf. *Retiforme* Fan et S. J. Chen 均为主要分子,可建立 *Arachnolasma-Kueichouphyllum* 组合带,代表着沉积时代为早石炭世晚期维宪期(346.7~330.9 Ma)。

由于碎屑岩最年轻的碎屑锆石年龄可能是由测试误差或者 Pb 丢失引起的,因此我们利用最年轻碎屑锆石群的加权平均年龄来约束砂岩的最大沉积年龄。结果显示,日湾茶卡组最年轻的碎屑锆石群的加权平均年龄为  $337.6 \pm 7.2$  Ma(图 10)。

根据日湾茶卡组灰岩内珊瑚化石及碎屑岩夹层内的碎屑锆石分析结果,我们认为日湾茶卡组沉积时代为早石炭世。这一结论与前人的化石和碎屑锆石结果总体一致。

### 5.2 日湾茶卡组物源与大地构造环境

本次选择龙木错–双湖缝合带周缘地体如北羌塘–昌都地体、南羌塘地体、拉萨地块开展碎屑锆石年龄分布对比来进行区域物源研究(图 11)。拉萨地体内三叠纪之前地层碎屑锆石的主要年龄集中在 550~500 Ma,而 1200~1150 Ma 的年龄峰值则比较微弱。南羌塘地体内三叠纪之前的地层的碎屑锆石最明显的峰值年龄出现在 575~525 Ma 和 1000~950 Ma 区间范围内,以及明显较弱的 2550~2450 Ma 的年龄峰值;昌都地块(北羌塘)内的碎屑锆石具有较为明显的 1075~950 Ma 的年龄峰值,以及次要的 700~600 Ma,1800~1700 Ma 和 2600~2425 Ma 的年龄峰值。日湾茶卡组碎屑锆石

具有 375~325 Ma 和 475~450 Ma 两个峰值。然而,根据上述对比,围绕古特提斯洋的地体内都没有发现 375~325 Ma 的碎屑锆石,因而都不是日湾茶卡组的物源区。

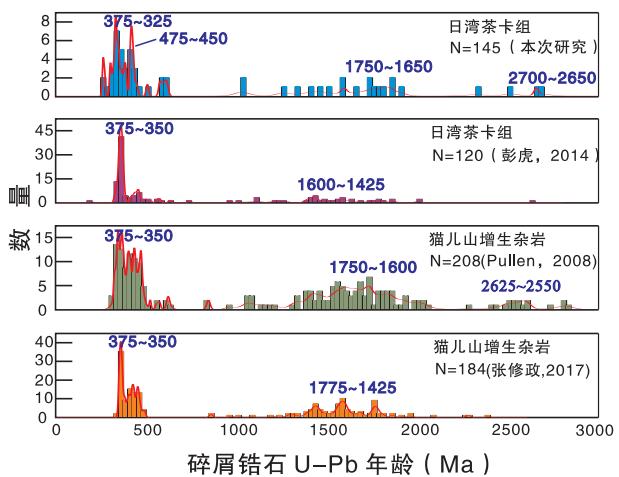


图 9 日湾茶卡组与猫儿山增生杂岩碎屑锆石对比图

Fig. 9 Comparison of detrital zircon U-Pb ages for the Riwan-chake Formation and Maoershan accretion wedge

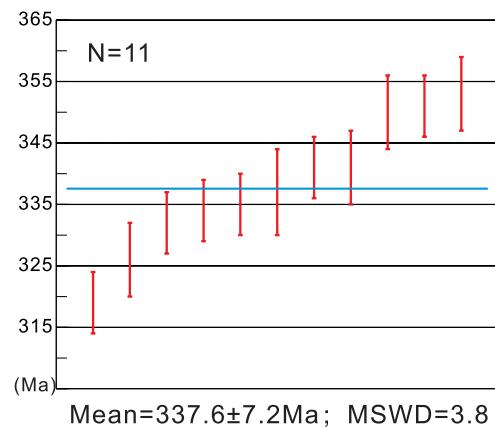


图 10 本文中日湾茶卡组最年轻碎屑锆石群的加权平均年龄

Fig. 10 Weighted average ages of the youngest detrital zircons from Riwanchaka sandstone

因此,本文在羌塘地体内统计了所有的可能岩浆源区,包括羌塘地块的蛇绿岩、基性岩墙和岩浆岩(图 12)。根据统计结果,日湾茶卡地区的望果山组火山岩(371~348 Ma)和蛇绿岩(360~350 Ma)与日湾茶卡组内 375~325 Ma 的碎屑锆石时代接近,应为其物源区。

基于龙木错–双湖古特提斯大洋周边陆块地层内均没有 375~325 Ma 的碎屑锆石以及其真正物源应为与其直接接触的望果山组火山岩和蛇绿岩的

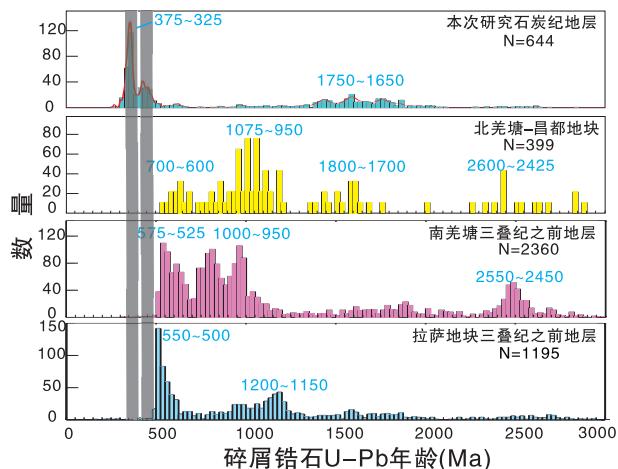


图 11 区域碎屑锆石对比图

Fig. 11 Comparison of detrital zircon U-Pb ages of combined results

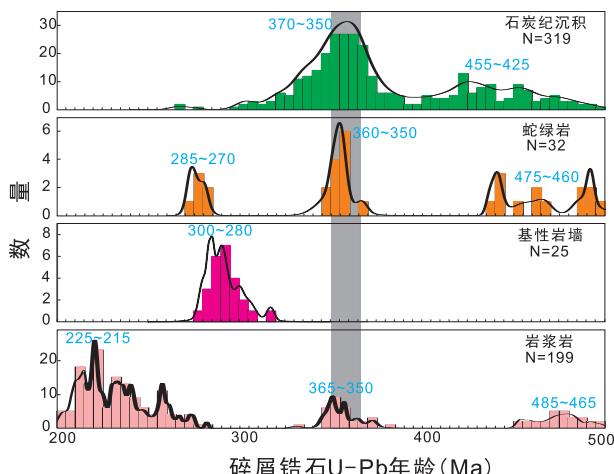


图 12 南羌塘地体内潜在岩浆岩源区对比图

Fig. 12 Comparison of the potential magmatic sources in South Qiangtang

事实,我们推测日湾茶卡组可能形成于洋内古岛弧环境。在这样较为孤立的环境下,日湾茶卡组的碎屑可能大部分均来自于该岛弧的火山岩,这一推测与日湾茶卡组碎屑模式组分显示的源区为岛弧环境相吻合。此外,日湾茶卡组的锆石磨圆度较差,最年轻的锆石群的加权平均年龄与沉积年龄相近,显示日湾茶卡组属近源沉积,也符合洋内岛弧的沉积环境特征。同时,这一结论也与望果山组火山岩表现出洋内岛弧地球化学特征相符合。望果山组与同期的SSZ型蛇绿岩的形成与龙木错-双湖古特提斯洋的洋内俯冲有关(Liu et al., 2018; Dan et al., 2019)。基于上述讨论,我们推测日湾茶卡组和整合于其下的望果山组共同组成了泥盆纪—石炭纪

的古特提斯洋内古岛弧地体。值得注意的是,日湾茶卡组内的次要峰值(475~450 Ma)被解释为该洋内岛弧增生到北羌塘后接受的北羌塘碎屑锆石供应(Dan et al., 2018),然而北羌塘-昌都地区并未记录到该期碎屑锆石,因此我们推测该古岛弧内早期由洋内俯冲形成的岩浆岩可能已被剥蚀。

前人根据日湾茶卡组内暖水生物化石认为其属于扬子陆块。然而,根据本次研究,日湾茶卡组内珊瑚化石虽然丰度较高,但是分异度相当低,表现为52件四射珊瑚化石,只鉴定出8属10种。因此日湾茶卡组沉积位置应处于一个相对突出的孤立位置,与外界环境的连通不畅导致了物种繁衍的分异度降低。这与上述讨论的洋内古岛弧地体的结论也是吻合的。

### 5.3 古特提斯岛弧地体俯冲与增生

增生杂岩内部物质的组成与来源是理解增生杂岩形成过程的关键。大量的碎屑锆石研究表明,大部分南羌塘增生杂岩的源岩均具有冈瓦纳亲缘性,具有丰富的1000~500 Ma的碎屑锆石(Pullen et al., 2008; Zhu et al., 2011; Fan et al., 2016; Li et al., 2019)。这可能是具冈瓦纳亲缘性的南羌塘被动陆缘俯冲导致的(Li et al., 2019),或者是龙木错-双湖大洋岩石圈南向俯冲过程中对南羌塘被动陆缘的构造侵蚀导致的(Li et al., 2020)。然而,猫儿山增生杂岩内亦存在经历了深部俯冲过程的石英云母片岩和变质砂岩,具有明显不同的碎屑锆石分布型式:明显的375~350 Ma的最年轻碎屑锆石峰值,并缺乏500~1000 Ma的碎屑锆石(图9, Pullen et al., 2008; Zhang et al., 2017)。由于金沙江古特提斯洋周边陆块均未发现这样的碎屑锆石分布型式,因此Pullen推测这些变质碎屑岩为金沙江古特提斯洋内古岛弧地体俯冲的产物(Pullen et al., 2008)。然而,金沙江古特提斯缝合带从未发现该套古岛弧地体的存在。相反,本次在冈玛错地区发现的由日湾茶卡组和下伏望果山组组成的泥盆纪—石炭纪洋内古岛弧地体,才应是上述增生杂岩的源区。

位于羌塘中部的南羌塘增生杂岩这套变质杂岩具有洋壳俯冲的构造混杂岩性质,学界在这一点上基本已达成了共识(Kapp et al., 2000; Liang et al., 2012, 2017)。然而关于该套杂岩的成因,中外学者则具有针锋相对的观点。基于增生杂岩与上覆晚古生代地层之间的低角度正断层,Kapp等提出

该杂岩形成于北侧金沙江大洋岩石圈的南向俯冲,并“底垫”于羌塘地体之下,随后在晚三叠世以变质核杂岩的几何形式在羌塘地体中部折返剥露(Kapp et al., 2000; Pullen et al., 2011)。李才(1987)则基于蛇绿岩和古生物分带认为羌塘中部存在原位的龙木错-双湖大洋。有学者进一步提出,龙木错-双湖古特提斯大洋岩石圈向北的俯冲,形成了南羌塘增生杂岩。若该套杂岩确如Kapp等所描述的形成于金沙江大洋岩石圈的南向俯冲,则随后的“底垫”过程会使整套杂岩普遍发生高压变质作用(Zhao et al., 2015; Li et al., 2020)。然而,本次所发现的部分增生杂岩的源岩为日湾茶卡组,后者并未发生变质作用(Liu et al., 2017)。因此,Kapp等所提出的金沙江洋南向俯冲的羌中杂岩成因模式与本文所发现的地质事实不符。日湾茶卡组和望果山组组成的古岛弧的深俯冲和增生过程,更应该发育在龙木错-双湖古特提斯大洋岩石圈的原位俯冲过程中。

此外,Zhang et al. (2017)认为猫儿山地区的部分增生杂岩是北羌塘被动陆缘地层被“构造侵蚀”进入俯冲通道而形成。然而,本次研究认为日湾茶卡组应属洋岛环境,而不是北羌塘被动陆缘。原因

如下:(1) 日湾茶卡组灰岩内暖水生物化石分异度较差,因而更可能处于相对孤立的洋岛环境;(2) 北羌塘-昌都地体内同时代地层内未发现日湾茶卡组所特有的丰富的375~325 Ma的碎屑锆石;(3) 日湾茶卡组与整合于其下的望果山组火山岩组成了岛弧岩石组合特征,且望果山组火山岩具有洋内岛弧的地球化学特征,并可能与同时代的SSZ型蛇绿岩组成洋内俯冲体系(Liu et al., 2018; Dan et al., 2019)。因此,本文推测,猫儿山地区的上述增生杂岩是日湾茶卡洋内岛弧俯冲增生的结果。

俯冲过程在浅部常常体现为刮削作用,深部则为俯冲剪切和底垫作用(Cowan and Silling, 1978; Moore and Byrne, 1987; Cloos and Shreve, 1996; Hashimoto and Kimura, 1999; Meneghini et al., 2009)。控制二者比例的重要因素是俯冲物质的体积:若俯冲物质体积较小,则主要发生深部俯冲剪切和底垫作用;若俯冲物质体积较大,则可能在浅部发育褶皱-逆冲断层等浅部层次的构造,而在深部形成遭受了深部层次的剪切作用的底垫构造(Cowan and Silling, 1978; Cowan, 1985; Cloos and Shreve, 1988; Kimura et al., 1996, 2007, 2010, 2012)。日湾茶卡组和望果山组组成的古岛弧应具有较大的

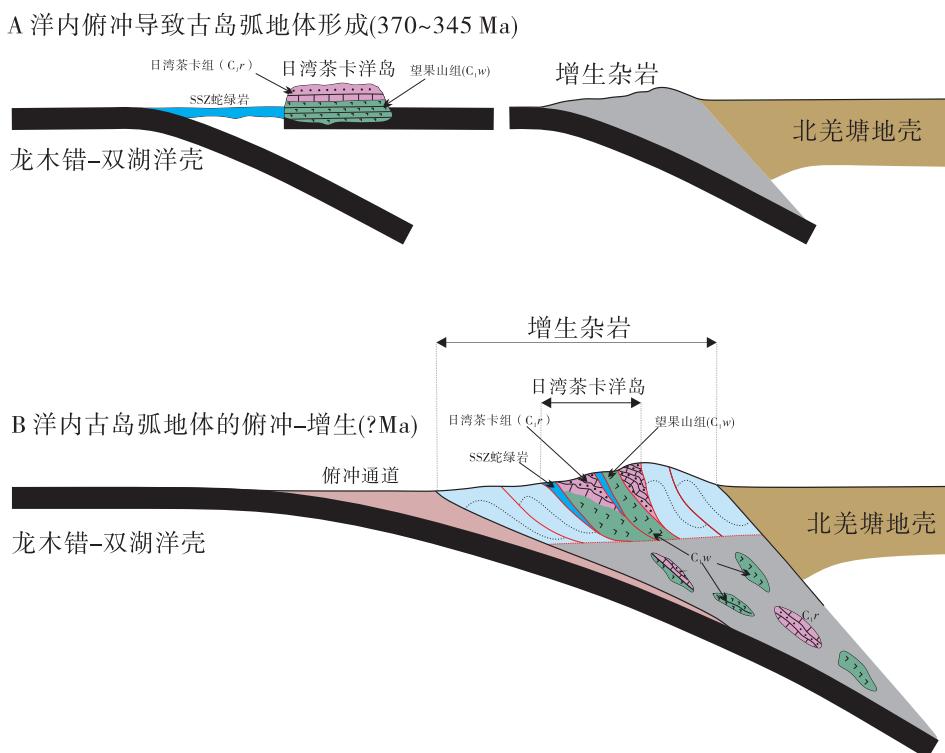


图13 日湾茶卡洋内古岛弧的形成与俯冲-增生过程

Fig. 13 Formation and subduction-accretion process of the Riwanchaka intra-oceanic arc terrane

体积,因此部分物质俯冲到深部形成猫儿山增生杂岩内的石英云母片岩等变质碎屑岩,浅部则遭受刮削作用形成有变形但未变质的出露于冈玛错-日湾茶卡区域的日湾茶卡组碎屑岩。深部遭受了高压变质的日湾茶卡组则在后期折返至增生杂岩浅部层次(图13, Pullen et al., 2011; Zhang et al., 2017)。

## 6 结论

(1) 日湾茶卡组是近源沉积,龙木错-双湖古特提斯洋周边陆块均不是其源区,其物源为其下伏的望果山组火山岩。日湾茶卡组内珊瑚化石丰富度高,但分异度低,应沉积于远离陆块的孤立位置。因此,日湾茶卡组和下伏望果山组应是泥盆纪—石炭纪时期由龙木错-双湖大洋洋洋内俯冲形成的古岛弧地体。

(2) 猫儿山地区部分经历过深变质的南羌塘增生杂岩具有与日湾茶卡组相似的碎屑锆石分布型式,因此虽然冈玛错地区日湾茶卡组未曾经历深俯冲而变质,但至少有部分日湾茶卡组应曾俯冲到地壳深部。

(3) 日湾茶卡古岛弧地体的俯冲与增生对南羌塘增生杂岩的形成起到了重要的作用。

潘桂棠先生敏锐的科学思想、扎实的地质基础工作,形成了系统的青藏高原大地构造理论,编制完成了系列青藏高原大地构造图件,先生的创新工作对青藏高原区域找矿、油气勘探、重大工程部署等具有划时代意义。我从事西藏科学的研究有幸得到先生的指导与合作,尤其在南羌塘增生造山带研究方面,先生给予大力支持并设立专项。2019年,“西藏南羌塘增生杂岩组成、结构及地质演化”获中国地质调查局地质科技奖一等奖,这是先生的指导成果,在先生80华诞之际,谨以此文聊表谢意!祝先生身体健康!期盼先生指导,在青藏高原基础理论创新方面做出新的贡献。

## 参考文献(References):

- Andersen T, 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$  [J]. Chemical geology, 192(1-2): 59-79.
- Cloos M, Shreve R L, 1988. Subduction-channel model of prism accretion, melange formation, sediment subduction, subduction erosion at convergent plate margins: 1. Background and description [J]. Pure and Applied Geophysics, 128(3-4): 455-500.
- Cloos M, Shreve R L, 1996. Shear-zone thickness and the seismicity of Chilean- and Marianas-type subduction zones [J]. Geology, 24(2): 107-110.
- Cowan D S, 1985. Structural styles in Mesozoic and Cenozoic mélanges in the western Cordillera of North America [J]. GSA Bulletin, 96(4): 451-462.
- Cowan D S, Silling R M, 1978. A dynamic, scaled model of accretion at trenches and its implications for the tectonic evolution of subduction complexes [J]. Journal of Geophysical Research, 83(B11): 5389-5396.
- Dan W, Wang Q, Li X-H, et al, 2019. Low  $\delta^{18}\text{O}$  magmas in the carboniferous intra-oceanic arc, central Tibet: Implications for felsic magma generation and oceanic arc accretion [J]. Lithos, 326-327: 28-38.
- Dan W, Wang Q, Zhang X-Z, et al, 2018. Magmatic record of Late Devonian arc-continent collision in the northern Qiangtang, Tibet: implications for the early evolution of East Paleo-Tethys Ocean [J]. Lithos, 308-309: 104-117.
- Dickinson W R, 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [M]//Zuffa G G. Provenance of Arenites. Dordrecht: Springer. 333-361.
- Dickinson W R, Harbaugh D W, Saller A H, et al, 1983. Detrital modes of upper Paleozoic sandstones derived from Antler Orogen in Nevada: implications for nature of Antler Orogeny [J]. American Journal of Science, 283(6): 481-509.
- Dunham R J, 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional textures [J]. AAPG Bulletin, 1: 108-121.
- Fan J-J, Li C, Wang M, et al, 2015. Features, provenance, and tectonic significance of Carboniferous-Permian glacial marine diamictites in the Southern Qiangtang-Baoshan block, Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 28(4): 1530-1542.
- Fan J-J, Li C, Xie C-M, Liu Y-M, 2016. Depositional environment and provenance of the upper Permian-Lower Triassic Tianquanshan Formation, northern Tibet: implications for the Palaeozoic evolution of the Southern Qiangtang, Lhasa, and Himalayan terranes in the Tibetan Plateau [J]. International Geology Review, 58(2): 228-245.
- Hashimoto Y, Kimura G, 1999. Underplating process from melange formation to duplexing: Example from the Cretaceous Shimanto Belt, Kii Peninsula, southwest Japan [J]. Tectonics, 18(1): 92-107.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al, 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to *in situ* U-Pb zircon geochronology [J]. Chemical geology, 211(1-2): 47-69.
- Jiang Q-Y, Li C, Su L, et al, 2015. Carboniferous arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Lu-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 100: 132-144.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, et al, 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal

- structure of northern Tibet [J]. *Geology*, 28(1): 19–22.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, et al, 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 1043.
- Kimura G, Kitamura Y, Hashimoto Y, et al, 2007. Transition of accretionary wedge structures around the up-dip limit of the seismogenic subduction zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(3–4): 471–484.
- Kimura G, Maruyama S, Isozaki Y, et al, 1996. Well-preserved underplating structure of the jadeitized Franciscan complex, Pacheco Pass, California [J]. *Geology*, 24(1): 75–78.
- Kimura G, Yamaguchi A, Hojo M, et al, 2012. Tectonic mélange as fault rock of subduction plate boundary [J]. *Tectonophysics*, 568–569: 25–38.
- Kimura H, Nashimoto H, Shimizu M, et al, 2010. Microbial methane production in deep aquifer associated with the accretionary prism in Southwest Japan [J]. *The ISME Journal*, 4(4): 531–541.
- Li C, Zhai Q G, Dong Y S, et al, 2006. Discovery of eclogite and its geological significance in Qiangtang area, central Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(9): 1095–1100.
- Li D, Wang G H, Bons P D, et al, 2020. Subduction reversal in a divergent double subduction zone drives the exhumation of southern Qiangtang Blueschist-Bearing Mélange, Central Tibet [J]. *Tectonics*, 39(4): e2019TC006051.
- Li D, Wang G-H, Gao J H, et al, 2019. The continental subduction in the evolution of central qiangtang mélange belt and its tectonic significance [J]. *International Geology Review*, 61(9): 1143–1170.
- Liang X, Sun X H, Wang G H, et al, 2020. Sedimentary evolution and provenance of the late Permian-middle Triassic Raggyorcaka deposits in North Qiangtang (Tibet, Western China): evidence for a forearc basin of the Longmu Co-Shuanghu Tethys Ocean [J]. *Tectonics*, 39(1): e2019TC005589.
- Liang X, Wang G H, Yang B, et al, 2017. Stepwise exhumation of the Triassic Lanling high-pressure metamorphic belt in Central Qiangtang, Tibet: insights from a coupled study of metamorphism, deformation, and geochronology [J]. *Tectonics*, 36(4): 652–670.
- Liang X, Wang G H, Yuan G L, et al, 2012. Structural sequence and geochronology of the Qomo Ri accretionary complex, Central Qiangtang, Tibet: implications for the Late Triassic subduction of the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Gondwana Research*, 22(2): 470–481.
- Liu J-H, Xie C-M, Li C, et al, 2018. Early Carboniferous adakite-like and I-type granites in central Qiangtang, northern Tibet: Implications for intra-oceanic subduction and back-arc basin formation within the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Lithos*, 296–299: 265–280.
- Liu Y M, Xie C M, Li C, et al, 2017. Structure and development of the Changliangshan ductile shear zone, North Tibet: implications for the initial closure of the Paleo-Tethys Ocean in the central Qiangtang region [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 106(8): 2945–2962.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al, 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 257(1–2): 34–43.
- Meneghini F, Marroni M, Moore J C, et al, 2009. The processes of underthrusting and underplating in the geologic record: structural diversity between the Franciscan Complex (California), the Kodiak Complex (Alaska) and the Internal Ligurian Units (Italy) [J]. *Geological Journal*, 44(2): 126–152.
- Moore J C, Byrne T, 1987. Thickening of fault zones: a mechanism of mélange formation in accreting sediments [J]. *Geology*, 15(11): 1040–1043.
- Pullen A, Kapp P, 2014. Mesozoic tectonic history and lithospheric structure of the Qiangtang terrane: insights from the Qiangtang metamorphic belt, central Tibet [J]. *Geological Society of America*, 507: 71–87.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al, 2008. Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean [J]. *Geology*, 36(5): 351–354.
- Pullen A, Kapp P, Gehrels G E, et al, 2011. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variations and implications for crustal structure [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3–4): 585–600.
- Sengör AMC, 1990. A new model for the late Palaeozoic-Mesozoic tectonic evolution of Iran and implications for Oman [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 49(1): 797–831.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, et al., 2008. Plešovice zircon—a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35.
- Ujiie K, 1997. Off-scraping accretionary process under the subduction of young oceanic crust: The Shimanto Belt of Okinawa Island, Ryukyu Arc [J]. *Tectonics*, 16(2): 305–322.
- Wang B D, Wang L Q, Chen J L, et al, 2017. Petrogenesis of Late Devonian-Early Carboniferous volcanic rocks in northern Tibet: New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the Tethyan Ocean [J]. *Gondwana Research*, 41: 142–156.
- Wang Y X, Liang X, Wang G H, et al, 2018. Mayer Kangri metamorphic complexes in Central Qiangtang (Tibet, western China): implications for the Triassic-early Jurassic tectonics associated with the Paleo-Tethys Ocean [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 107(2): 757–776.
- Wiedenbeck M, Hanchar J M, Peck W H, et al., 2004. Further characterisation of the 91500 zircon crystal [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(1): 9–39.
- Wilson J L, 2012. *Carbonate Facies in Geologic History* (M). New York: Springer Science & Business Media.
- Wu H, Li C, Chen J W, et al, 2016. Late Triassic tectonic framework and evolution of Central Qiangtang, Tibet, SW China [J]. *Lithosphere*, 8(2): 141–149.
- Wu Y W, Li C, Xu M J, et al, 2017. Zircon U-Pb age, geochemical data: Constraints on the origin and tectonic evolution of the metamorphic rocks from Longmuco-Shuanghu-Lancang suture zone, Tibet [J]. *Journal of Earth Science*, 28(3): 422–432.
- Zhai Q G, Jahn B-M, Wang J, et al, 2013. The Carboniferous ophiolite

- in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet; SHRIMP U-Pb dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics [J]. *Lithos*, 168–169: 186–199.
- Zhai Q G, Jahn B-M, Wang J, et al, 2016. Oldest Paleo-Tethyan ophiolitic mélange in the Tibetan Plateau [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(3–4): 355–373.
- Zhai Q G, Wang J, Hu P Y, et al, 2018. Late Paleozoic granitoids from central Qiangtang, northern Tibetan plateau: a record of Paleo-Tethys Ocean subduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 167: 139–151.
- Zhai Q G, Zhang R-Y, Jahn B-M, et al, 2011. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: petrology, geochronology and metamorphic *P-T* path [J]. *Lithos*, 125(1–2): 173–189.
- Zhang K J, Tang X-C, Wang Y, et al, 2011. Geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of early Mesozoic bimodal volcanism in northern Tibet, western China: constraints on the exhumation of the central Qiangtang metamorphic belt [J]. *Lithos*, 121(1–4): 167–175.
- Zhang K J, Xia B-D, Wang G-M, et al, 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, tectonic setting of central Tibet, western China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(9): 1202–1222.
- Zhang K-J, Zhang Y-X, Li B, et al, 2006. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an in situ suture zone: evidence from geochemical comparison with the Jinsa suture [J]. *Geology*, 34(6): 493–496.
- Zhang X Z, Dong Y S, Li C, et al, 2010. Identification of the eclogites with different ages and their tectonic significance in central Qiangtang, Tibetan Plateau: constraints from  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1815–1824.
- Zhang X-Z, Dong Y-S, Wang Q, et al, 2017. Metamorphic records for subduction erosion and subsequent underplating processes revealed by garnet-staurolite-muscovite schists in central Qiangtang, Tibet [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(1): 266–279.
- Zhang Y C, Shi G R, Shen S-Z, 2013. A review of Permian stratigraphy, palaeobiogeography and palaeogeography of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Gondwana Research*, 24(1): 55–76.
- Zhao Z B, Bons P D, Wang G H, et al, 2014. Origin and pre-Cenozoic evolution of the south Qiangtang basement, Central Tibet [J]. *Tectonophysics*, 623: 52–66.
- Zhao Z, Bons P D, Wang G, et al, 2015. Tectonic evolution and high-pressure rock exhumation in the Qiangtang terrane, central Tibet [J]. *Solid Earth*, 6(2): 457–473.
- Zhu D-C, Zhao Z-D, Niu Y, et al, 2011. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia [J]. *Geology*, 39(8): 727–730.
- 陈寿铭, 程立人, 张以春, 等, 2006. 西藏羌塘北部地区晚二叠世地层再研究 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(S1): 1–4.
- 程立人, 陈寿铭, 张以春, 等, 2006. 西藏羌北地区石炭纪地层的发现 [J]. *地学前缘*, 13(4): 240–243.
- 江庆源, 李才, 解超明, 等, 2014. 藏北羌塘冈玛错地区望果山组火山岩地球化学特征及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *地质通报*, 33(11): 1702–1714.
- 李才, 1987. 龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界 [J]. *长春地质学院学报*, 17(2): 155–166.
- 李才, 2008. 青藏高原龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带研究二十年 [J]. *地质论评*, 51(1): 105–119.
- 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等, 2006. 龙木错—双湖—吉塘板块缝合带与青藏高原冈瓦纳北界 [J]. *地学前缘*, 13(4): 136–147.
- 李才, 翟刚毅, 王立全, 等, 2009. 认识青藏高原的重要窗口——羌塘地区近年来研究进展评述(代序) [J]. *地质通报*, 28(9): 1169–1177.
- 李继亮, 2004. 增生型造山带的基本特征 [J]. *地质通报*, 23(9–10): 947–951.
- 梁定益, 聂泽同, 郭铁鹰, 等, 1983. 西藏阿里喀喇昆仑南部的冈瓦纳——特提斯相石炭二叠系 [J]. *地球科学(武汉地质学院学报)*(1): 9–27.
- 刘函, 王保弟, 陈莉, 等, 2015. 龙木错—双湖古特提斯洋俯冲记录——羌塘中部日湾茶卡早石炭世岛弧火山岩 [J]. *地质通报*, 34(2–3): 274–282.
- 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等, 2004. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力 [J]. *地质通报*, 23(9–10): 933–939.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2008. 大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志 [J]. *地质通报*, 27(10): 1613–1637.
- 彭虎, 李才, 解超明, 等, 2014. 藏北羌塘中部日湾茶卡组物源——LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及稀土元素特征 [J]. *地质通报*, 33(11): 1715–1727.
- 王根厚, 韩芳林, 杨运军, 李元庆, 崔江利, 2009. 藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义 [J]. *地质通报*, 28(9): 1181–1187.
- 武桂春, 姚建新, 纪占胜, 等, 2009. 西藏北羌塘中部地区晚石炭世的(竹蜓)类动物群 [J]. *地质通报*, 28(9): 1276–1280.
- 袁四化, 潘桂棠, 王立全, 等, 2009. 大陆边缘增生造山作用 [J]. *地学前缘*, 16(3): 31–48.

## Subduction of the Paleozoic intra-oceanic arc terrane as an important mechanism for the formation of the South Qiangtang accretionary complex: evidence from Riwanchaka intra-oceanic arc

LI Dian<sup>1</sup>, WANG Genhou<sup>2</sup>, LIU Zhengyong<sup>3</sup>, LIU Jiaqi<sup>4</sup>, LI Chao<sup>5</sup>, LIU Han<sup>6</sup>, TANG Yu<sup>2</sup>, FENG Yipeng<sup>2</sup>

(1. Postdoctoral Research Station of Geological Resources and Geological Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. China University of Geoscience, Beijing 100083, China; 3. School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Kuerle Branch, BGP INC., China National Petroleum Corporation, Kuerle 841000, Xinjiang, China; 5. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 6. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** Subduction and accretion of intra-oceanic island arc and microcontinent are important mechanisms for the formation of accretionary complex. The present paper deals, on the basis of field measurements of the Riwanchaka Formation in south Qiangtang, with sedimentary facies, fossils, detrital modal analysis and detrital zircon dating. According to regional comparison, we conclude that: (1) the Riwanchaka Formation is not derived from adjacent terranes surrounding Longmu Co-Shuanghu Paleo-Tethys, but from the underlying volcanic rocks of Wangguoshan Formation. (2) Although the coral fossils in the Riwanchaka Formation are abundant, the differentiation is extremely low, suggesting that its depositional position should be a relatively isolated location. In the light of the geochemical signatures of intra-oceanic arc of the Wangguoshan Formation, which should belong to an intra-oceanic system with the SSZ ophiolites with similar age, we suggest that they are originally a Devonian-Carboniferous ancient arc terrane that developed by intra-oceanic subduction. In terms of the similarity of the detrital zircon distribution patterns, we suggest that the part of the South Qiangtang accretionary complex in Maoershan region should be derived from the Riwanchaka Formation. Therefore, the Riwanchaka intra-oceanic arc terrane should have experienced subduction and accretion during the formation of south Qiangtang accretionary complex. The frontal offscraping resulted in the deformation of the Riwanchaka Formation and Wangguoshan Formation in the shallow part of the accretionary wedge. While in the deeper part of it, the Riwanchaka Formation was underthrusted and experienced high-pressure metamorphism, and exhumed by later tectonic process. Therefore, the subduction and accretion of the ancient intra-oceanic arc terrane played an important role in the formation of the accretionary complex.

**Key words:** Riwanchaka Formation; Intra-oceanic arc terrane; south Qiangtang accretionary complex; detrital zircon