中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 5 期: 848 ~ 863
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

藏东南郎杰学群是印度大陆北缘原地沉积而非外来地体——来自同时代浅海相曲龙贡巴组沉积物源的证据

孟中玓[1,2], 王建刚[1*], 纪伟强[1], 张豪[1,2], 吴福元[1], Eduardo GARZANTI[3]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. Department of Earth and Environmental Sciences, Università di Milano-Bicocca, Milano 20126, Italy
* 通讯作者, E-mail: wangjiangang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期: 2018-08-06; 收修改稿日期: 2018-09-30; 接受日期: 2018-12-04; 网络版发表日期: 2019-01-24
国家自然科学基金项目(批准号: 41672109)和中国科学院青年创新促进会项目资助

摘要 郎杰学群是西藏特提斯喜马拉雅东段一个特殊的地质体. 它在构造位置上属于特提斯喜马拉雅(北带), 但却与典型的特提斯喜马拉雅岩石存在显著的物源差异. 由于郎杰学群与其他特提斯喜马拉雅地层均为断层接触关系, 关于它的大地构造属性和沉积模式一直存在争议. 部分学者认为郎杰学群最初沉积于印度北缘, 属于特提斯喜马拉雅沉积体系的一部分; 而另一部分研究者认为它是一个独立的地质体, 在印度-亚洲大陆汇聚过程中拼贴至印度北缘. 本次工作对特提斯喜马拉雅南带(浅海相)与郎杰学群同时代的地层开展了详细的沉积学和物源区研究工作, 拟通过物源特征对比限定郎杰学群的古地理归属. 研究发现, 特提斯喜马拉雅南带曲龙贡巴组存在晚古生代-早中生代的特征碎屑锆石U-Pb年龄峰(约400~200Ma), 而且砂岩中含有丰富的酸性火山岩岩屑(10~30%)和少量斜长石(1~6%), 这些物源特征与郎杰学群一致. 由于曲龙贡巴组确定属于特提斯喜马拉雅地体, 它与郎杰学群一致的物源特征证实后者亦为印度大陆边缘原地沉积, 并非外来地质体. 由于印度北缘缺乏晚古生代-早中生代的岩浆活动, 郎杰学群、曲龙贡巴组的火山岩岩屑和晚古生代-早中生代碎屑锆石可能来自于冈瓦纳大陆东南缘与古太平洋俯冲有关的岩浆弧. 曲龙贡巴组沉积于晚三叠世早期土隆群泻湖相灰岩之上, 又迅速被三叠纪末期德日荣组滨岸相石英砂岩所覆盖. 曲龙贡巴组、郎杰学群及相关沉积体系在晚三叠世中期短暂的出现明显受区域构造作用控制, 冈瓦纳大陆北缘晚三叠世的裂解事件很可能是其主要控制因素.

关键词 特提斯喜马拉雅, 物源分析, 郎杰学群, 碎屑锆石年代学, 构造属性, 晚三叠世, 古地理

中文引用格式: 孟中玓, 王建刚, 纪伟强, 张豪, 吴福元, Garzanti E. 2019. 藏东南郎杰学群是印度大陆北缘原地沉积而非外来地体——来自同时代浅海相曲龙贡巴组沉积物源的证据. 中国科学: 地球科学, 49: 848–863, doi: 10.1360/N072018-00218
英文引用格式: Meng Z, Wang J, Ji W, Zhang H, Wu F, Garzanti E. 2019. The Langjiexue Group is an *in situ* sedimentary sequence rather than an exotic block: Constraints from coeval Upper Triassic strata of the Tethys Himalaya (Qulonggongba Formation). Science China Earth Sciences, 62: 783–797, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9314-9

© 2019 《中国科学》杂志社

1　引言

在新生代早期发生碰撞之前，印度大陆与亚洲大陆之间发育广阔的大洋，称为新特提斯洋. 对于新特提斯洋内是否存在独立的地体或岛弧，一直存在不同的观点(例如，Aitchison等，2000；Li等，2010；van Hinsbergen等，2012；Hébert等，2012). 由于这一问题不仅涉及新特提斯的演化，而且对于构建印度-亚洲大陆汇聚和碰撞模型也十分重要，因此受到地质学家们长期而广泛的关注和讨论(e.g., Hu等，2016).

在藏南喜马拉雅东段，出露一套特殊的浊积岩地层(张朝凯等，2014；Zhang等，2015)——上三叠统郎杰学群. 这套地层的特殊性在于, 其在构造位置上属于特提斯喜马拉雅(印度大陆北缘)，但却具有不同于特提斯喜马拉雅的沉积特征. 这些差异包括: (1) 根据郎杰学群砂岩底部槽模测得的古水流方向大体为南西方向(李祥辉等，2003a；徐文礼等，2011；Wang等，2016)，而特提斯喜马拉雅碎屑岩常显示由南向北垂直于印度北缘的搬运方向(e.g., Hu等，2010)；(2) 郎杰学群砂岩中含有5~20%火山岩岩屑和少量斜长石，碎屑组分、重矿物组合以及全岩地球化学成分指示造山带来源，而大部分喜马拉雅地层源自稳定的印度“克拉通内部”(李祥辉等，2003b，2004，2011；曾庆高等，2009；徐文礼等，2011；Zhang等，2017)；(3) 全岩Nd同位素分析表明，郎杰学群($\varepsilon_{Nd}(t)$值为−7~−3)较特提斯喜马拉雅地层($\varepsilon_{Nd}(t)$值为−15左右)具有更亏损的同位素组成，指示新生地壳碎屑物质的输入(Dai等，2008)；(4) 郎杰学群具有晚古生代-早中生代的碎屑锆石年龄(约400~200Ma，大部分集中在280~220Ma，峰值约为245Ma；Aikman等，2008；Li等，2010；Cai等，2016；Wang等，2016；Cao等，2018；Fang等，2018)，而这组年龄在其他喜马拉雅地层中并没有出现. 这组锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值集中在−5~10(Li等，2010；Li等，2016；Wang等，2016)；(5) 郎杰学群中含有较多的铬尖晶石，它们具有较低的Al_2O_3(5~30%)和TiO_2(0~2%)含量(Li等，2016)，指示岛弧玄武岩或地幔橄榄岩源区(据Kamenetsky等，2001).

自Aikman等(2008)报道郎杰学群具有特殊的约400~200Ma的碎屑锆石年龄以来，不同学者对郎杰学群开展了大量的研究工作. 基于其独特的沉积物源特征，地质学家们提出了多种构造-古地理模型来解释其成因(见Wang等，2016总结；Cao等，2018；Ao等，2018). 然而，由于印度大陆本身缺乏约400~200Ma的岩浆活动，对于郎杰学群的碎屑物质来源和沉积过程一直没有统一的认识. 在这些争论中，一个核心的问题是“郎杰学群为原地沉积还是外来增生地体?”. 一部分研究者认为，郎杰学群最初就沉积于印度北缘，其物源区为冈瓦纳大陆本身(Cai等，2016；Li等，2016；Wang等，2016；Cao等，2018；Fang等，2018). 而另一部分学者认为，郎杰学群最初沉积于拉萨地体或大洋岛弧的弧前位置，在印度-亚洲大陆汇聚过程中拼贴至印度北缘(Li等，2010，2014；Ao等，2018). 由于郎杰学群和其他特提斯喜马拉雅地层之间均为断层接触，二者之间缺乏直接的沉积接触关系，也缺乏缝合线存在的证据. 因此, 争论一直持续.

本次工作我们跳出郎杰学群本身，转而对特提斯喜马拉雅南带(印度大陆北缘浅水沉积区)同时代的地层开展研究工作, 拟通过物源特征对比, 探讨二者之间的沉积成因联系并进一步约束郎杰学群的沉积古地理位置. 研究工作发现特提斯喜马拉雅南带曲龙贡巴组和北带郎杰学群具有相同的物源特征，这直接证明后者为印度大陆北缘原地沉积. 另外，我们还对郎杰学有关沉积体系的物源区以及晚三叠世特提斯喜马拉雅古地理进行了进一步探讨.

2　地质背景

古近纪早期印度-亚洲大陆碰撞和之后的喜马拉雅造山作用奠定了藏南现今的构造格局(Hu等，2015；图1a). 由蛇绿岩和混杂岩构成的雅鲁藏布缝合带代表了印度和亚洲大陆碰撞的界线(Allègre等，1984；Cai等，2012；An等，2017；Wang等，2017). 在缝合带北侧, 发育冈底斯岩浆弧(Ji等，2009；Zhu等，2011a；Hou等，2015)和日喀则弧前盆地(Dürr，1996；Wang等，2012；An等，2014；Orme和Laskowski，2016)，分别为新特提斯洋壳向亚洲大陆之下俯冲的岩浆和沉积记录. 缝合带南侧为特提斯喜马拉雅，保存着印度被动大陆边缘下古生界-古近系的沉积地层(Jadoul等，1998；Garzanti，1999；Hu等，2012). 根据沉积环境和岩石组合的差异, 特提斯喜马拉雅大致以吉隆-康马逆冲断裂为界, 进一步划分为南北两个亚带(Ratschbacher等，1994). 特提斯喜马拉雅北带以大陆斜坡-盆地相深海浊积岩、泥质岩和硅

质岩为特征(Li等, 2005; Hu等, 2008; Wang等, 2011), 而特提斯喜马拉雅南带主要发育浅海碳酸盐岩和三角洲-陆棚相碎屑岩(Willems等, 1996; Jadoul等, 1998; Garzanti等, 1998; Hu等, 2012). 特提斯喜马拉雅之南出露由中高级变质岩组成的高喜马拉雅, 代表在喜马拉雅造山过程中楔出的印度中下地壳物质(LeFort, 1996; Carosi等, 2018). 二者之间发育藏南拆离系. 高喜马拉雅南侧为低喜马拉雅, 发育前寒武系-古近系印度表壳未变质或浅变质沉积岩系, 更南侧为次喜马拉雅新近系与造山作用有关的前陆盆地碎屑沉积(Najman, 2006; Yin, 2006).

郎杰学群分布于喜马拉雅东段、雅鲁藏布缝合带南侧(图1a), 主要为一套砂泥岩互层的浊积岩地层. 在构造位置上, 它属于特提斯喜马拉雅北带. 在喜马拉雅造山过程中, 郎杰学群遭受了强烈的构造变形, 同时, 部分岩石经历了中低级的变质作用(Wang等, 2016). 根据地层中发现的少量菊石和双壳化石, 郎杰学群的时代被限定为晚三叠世Carnian-Norian期(西藏自治区地质矿产局, 1993; 西藏自治区地质调查院, 2007). 值得注意的是, 郎杰学群被大量的早白垩世基性岩脉侵入(Wang等, 2016; Ao等, 2018). 这些岩脉被认为是措美-Bunbury大火成岩省的组成部分, 与早白垩世东冈瓦纳大陆的裂解有关(Zhu等, 2009a). 本次工作所研究的地层剖面位于聂拉木-定日一带, 在构造位置上属于特提斯喜马拉雅南带(图1a). 研究涉及的地层包括土隆群顶部、曲龙贡巴组和德日荣组(图1).

3 地层与沉积环境

本次工作对特提斯喜马拉雅南带上三叠统的描述和沉积环境解释主要基于三条实测剖面, 分别为聂拉木地区的土隆剖面和定日地区的切村剖面、加吾拉剖面(图1b). 其中, 土隆剖面出露最为完整, 地层界线最清晰, 为主干剖面(图2和3a), 而定日地区的晚三叠世

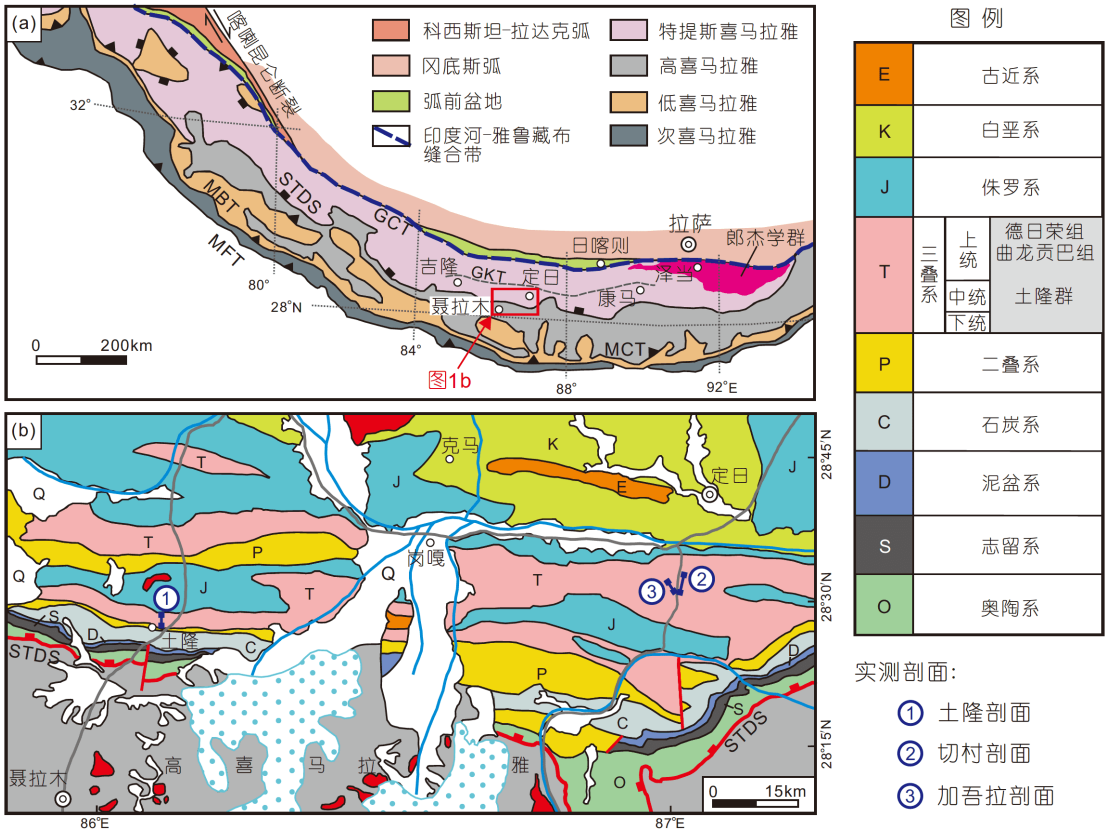


图 1　研究区地质图

(a) 藏南喜马拉雅造山带构造分带图(修改自Yin, 2006). GCT, 大反向逆冲断裂; STDS, 藏南拆离系; MCT, 主中央逆冲断裂; MBT, 主边界逆冲断裂; MFT, 主前缘逆冲断裂; GKT, 吉隆-康马逆冲断裂. (b) 聂拉木-定日地区地质图(据1:150万地质图修改)

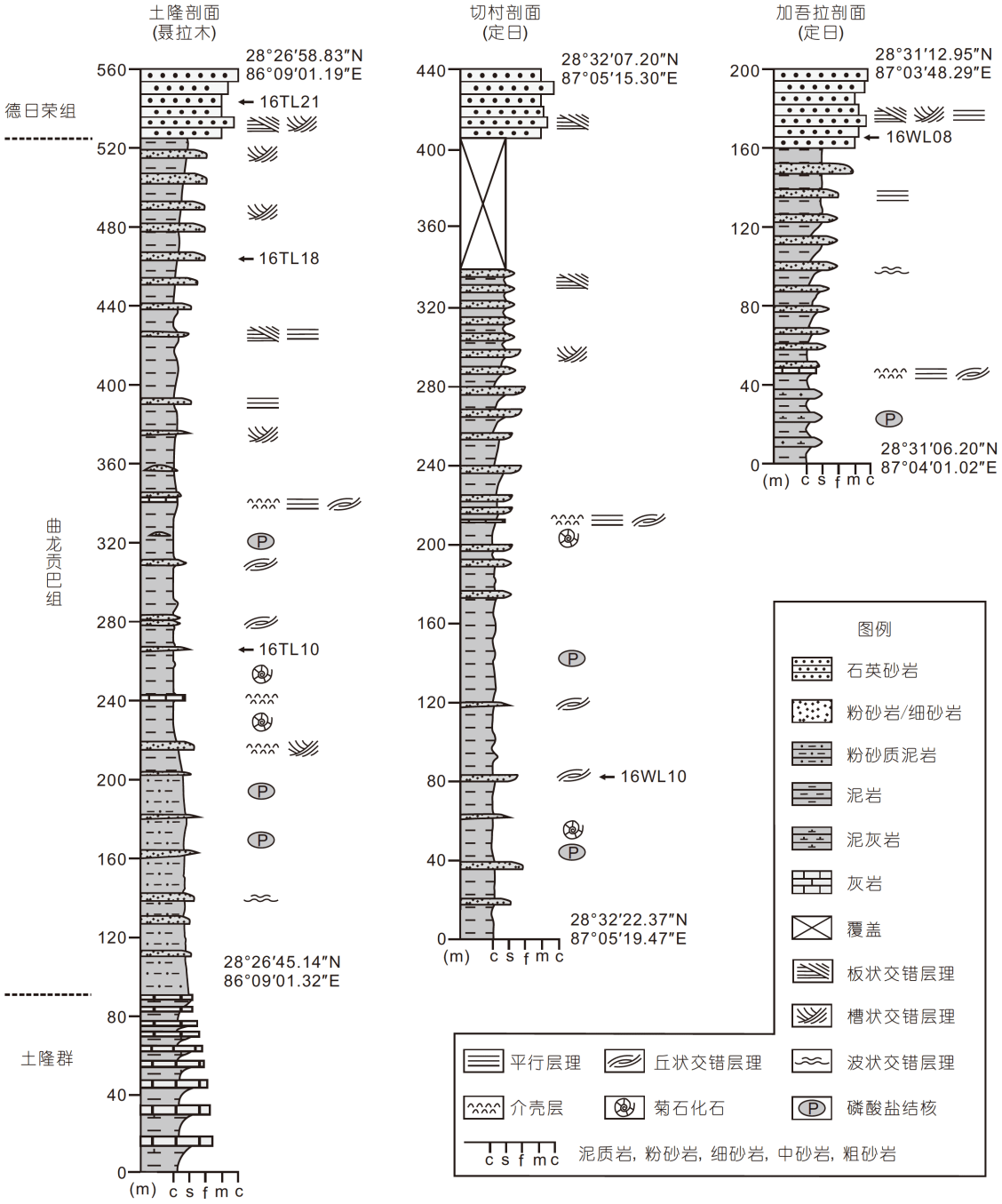


图 2　**聂拉木-定日地区上三叠统综合地层柱状图**

显示剖面起点和终点GPS位置、岩石组合、沉积构造、地层划分和碎屑锆石样品位置

剖面仅出露曲龙贡巴组中上部和德日荣组，作为参考剖面(图2).

3.1　土隆群顶部

土隆群顶部出露互层状的中厚层灰黑色泥灰岩和深灰色粉砂质生物碎屑灰岩(风化为土黄色)(图3b). 灰岩层厚度多为15~60cm, 侧向延伸性好. 岩石中的生物化石主要为双壳、腹足和介形虫, 偶见棘皮类碎片(图4a和4b). 泥灰岩中含少量磷酸岩结核, 见生物潜穴. 泥灰岩和灰岩常为过渡关系，构成多个向上变粗的旋回

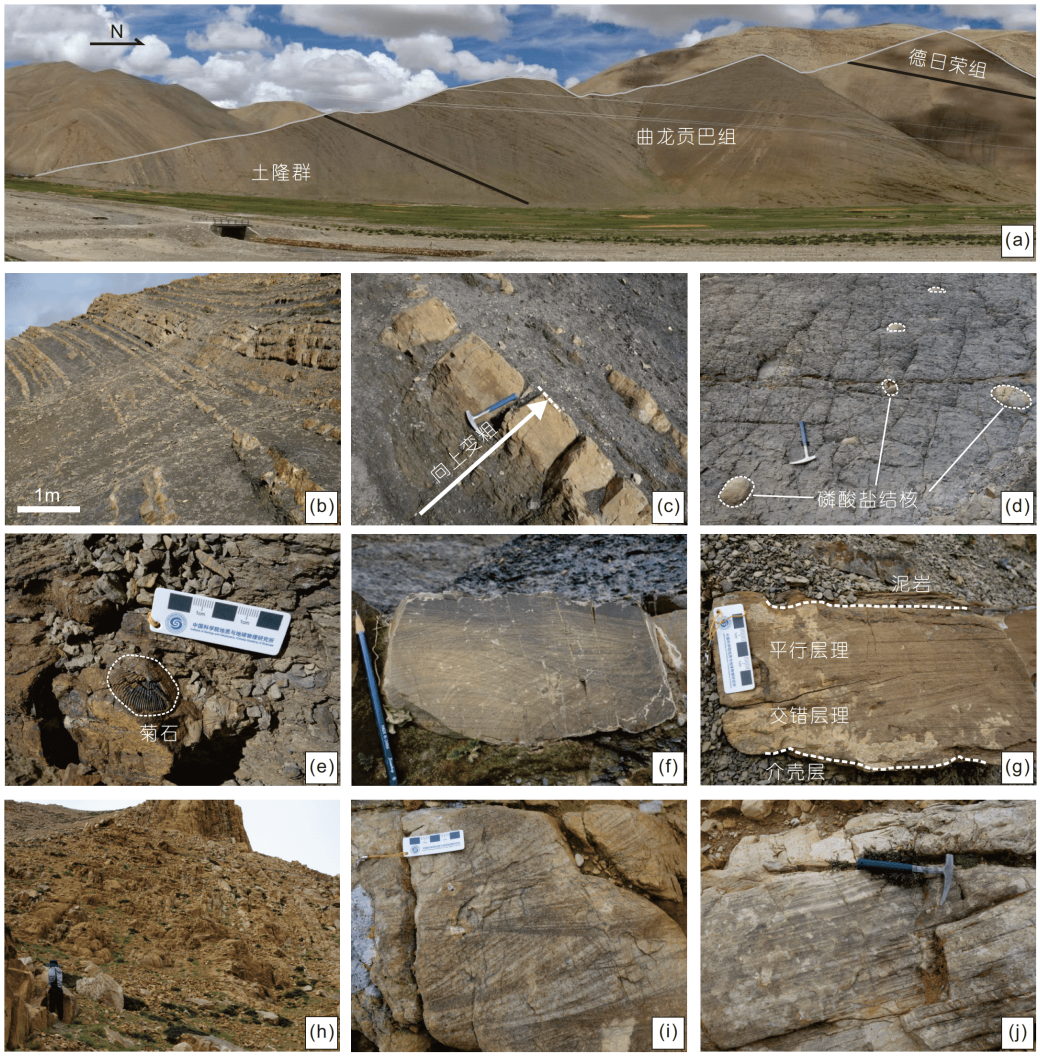


图 3　聂拉木-定日地区上三叠统野外照片

(a) 土隆剖面全景与地层划分; (b) 土隆群顶部泥灰岩与粉砂质生物碎屑灰岩互层(土隆剖面); (c) 土隆群泥灰岩向粉砂质生物碎屑灰岩逐步过渡, 构成向上变粗的旋回(土隆剖面); (d) 曲龙贡巴组中下部黑色泥质岩中的磷酸盐结核(切村剖面); (e) 曲龙贡巴组下部泥质岩中的菊石化石(土隆剖面); (f) 曲龙贡巴组中部细砂岩中的丘状交错层理(切村剖面); (g) 曲龙贡巴组中部砂岩层中的风暴序列(土隆剖面); (h) 德日荣组石英砂岩远景照片(土隆剖面); (i) 德日荣组石英砂岩中的槽状交错层理(土隆剖面); (j) 德日荣组石英砂岩中的低角度冲刷层理(土隆剖面)

(图3c). 整体看来, 岩层或单个泥灰岩-灰岩旋回的厚度向上变小, 岩石中的生物化石变少而粉砂质含量增高. 土隆群顶部地层中富含陆源碎屑, 化石分异度低且缺少广海生物化石, 指示靠近陆地的、富氧的泻湖环境. 根据地层中发现的牙形石化石, 土隆群顶部的时代被限定为晚三叠世Carnian晚期(Garzanti等, 1998).

3.2　曲龙贡巴组

曲龙贡巴组底部和土隆群顶部的岩层在产状上存在些微差异, 但从沉积特征上看, 为整合接触. 在土隆剖面, 曲龙贡巴组厚度约430m. 曲龙贡巴组下部(约60m)为黄灰色细砂岩与灰黑色粉砂岩、粉砂质泥岩互层. 砂岩层多中厚层状(大多30cm左右), 分选较好, 钙质胶结. 岩层中发育平行层理、槽状交错层理和小型波状交错层理. 粉砂质泥岩中富含磷酸盐结核和菊石化石(图3d和3e), 生物潜穴发育. 地层中偶见砂质介壳灰岩层. 曲龙贡巴组中部(约260m)主要为灰色粉砂质泥岩夹灰黑色(风化为土黄色)薄层状或透镜状细砂

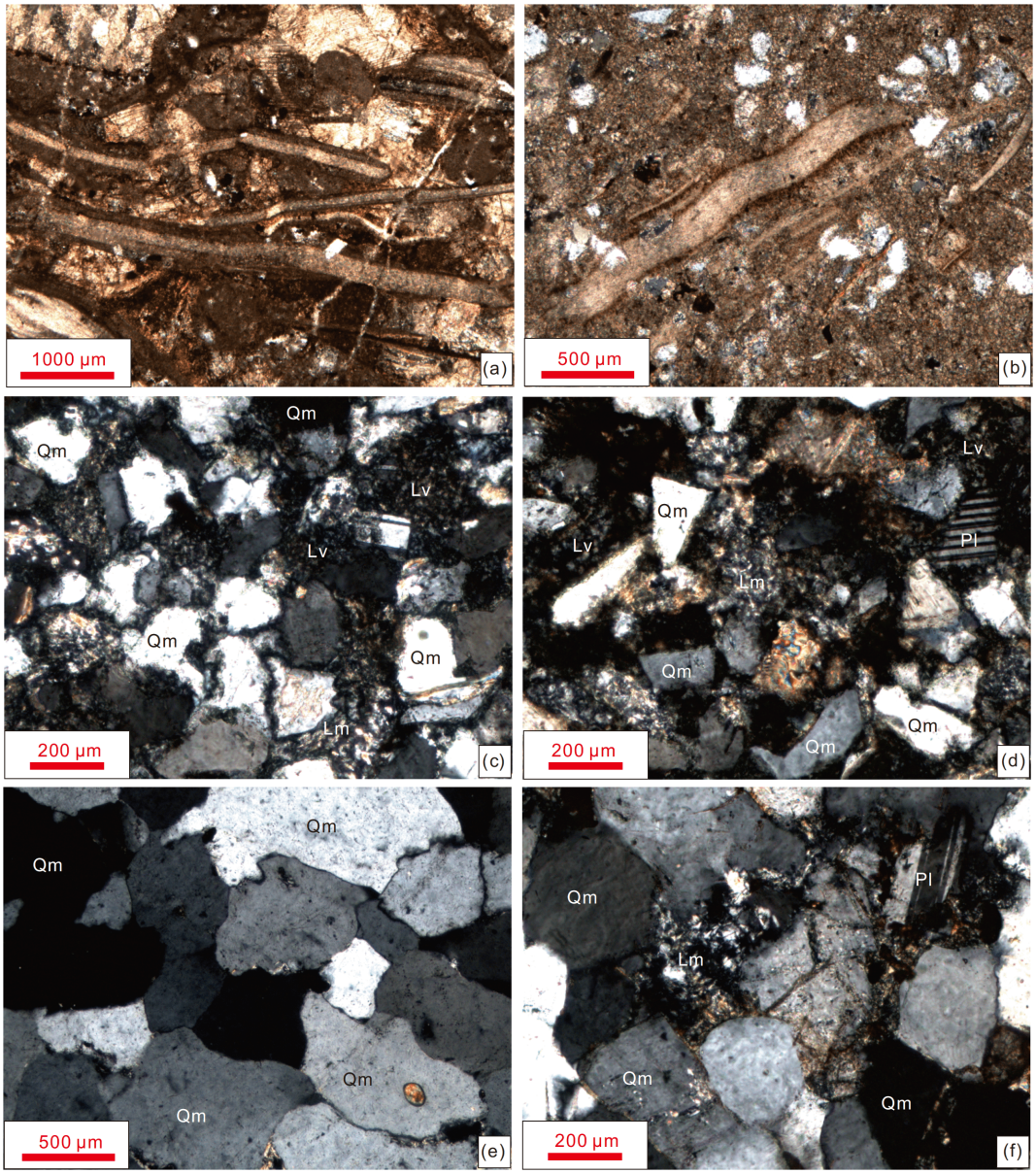


图 4　薄片显微照片

(a), (b) 土隆群顶部粉砂质生物碎屑灰岩, 样品17TL04和17TL03; (c), (d) 曲龙贡巴组火山岩屑砂岩, 样品16TL17和16WL11; (e), (f) 德日荣组石英砂岩, 样品16TL21和16WL14

岩. 砂岩层中常见丘状交错层理(图3f), 部分岩石中可见由介壳层、交错层理、平行层理和水平层理组成的风暴序列(图3g). 泥质岩中见菊石、磷酸盐结核, 发育生物扰动构造. 另外, 地层中还发育少量富含介壳化石的砂质灰岩. 曲龙贡巴组上部为黑色粉砂质泥岩、粉砂岩夹灰黑色(风化为黄褐色)中厚层细砂岩. 砂岩层厚20~60cm, 沿剖面向上砂岩层有增多增厚的趋势, 砂岩中发育板状交错层理、槽状交错层理和平行层理. 从交错层理中获得的古水流方位为北西西方向.

曲龙贡巴组下部以砂岩、粉砂岩为主, 交错层理发育, 指示较动荡的水体环境; 同时, 砂岩粒度较细, 富含钙质组分并含菊石等海相化石, 表明其同时受到陆源输入和海洋沉积作用的影响. 结合剖面地层序列, 我们将下段解释为泻湖外障壁浅滩沉积. 曲龙贡巴组

中部主体为低能安静水体沉积, 但常见含丘状交错层理的砂岩和发育风暴序列的介壳灰岩-砂岩层, 指示受风暴影响的内陆棚沉积环境. 曲龙贡巴组上部仍以粉砂质泥岩为主, 但水动力作用明显增强, 水体有变浅的趋势, 反映滨岸-内陆棚过渡带沉积环境. 根据地层中下部产出的菊石化石组合, 曲龙贡巴组的时代被限定为晚三叠世Norian早期(Jadoul等, 1998).

3.3 德日荣组

德日荣组整合沉积于曲龙贡巴组之上, 厚度大于40m, 主要由灰白色、黄灰色石英砂岩组成(图3h), 局部夹少量黑色泥岩, 部分石英砂岩中可见少量黑色泥砾. 石英砂岩多中厚层状(0.1~1m)或呈叠置的透镜状, 分选磨圆好. 岩层中见板状交错层理、低角度交错层理(冲刷层理, 图3j), 偶见槽状交错层理(图3i)和平行层理. 根据交错层理获得古水流的方向主体向北(北东-北西方向). 地层中偶见植物和双壳化石.

德日荣组石英砂岩反映整体较强的水动力条件, 砂岩成分成熟度和结构成熟度均很高, 明显受到波浪长期淘洗作用的影响, 本次工作将其解释为临滨-前滨沉积环境. 根据地层中产出的双壳化石, 德日荣组的时代被限定为晚三叠世(西藏自治区地质矿产局, 1993). 同时, 由于它与曲龙贡巴组的整合接触关系, 其时代可进一步限定为Norian晚期-Rhaetian期.

整体看来, 聂拉木-定日一带的上三叠统沉积于滨岸-内陆棚沉积环境, 吻合特提斯喜马拉雅南带滨浅海的沉积特征(Jadoul等, 1998; Garzanti等, 1998). 详细的沉积学工作揭示这些地层中记录了一次明显的海进-海退旋回: 土隆群顶部和曲龙贡巴组下部为障壁海岸(泻湖-障壁沙滩)沉积, 之后水深不断加大, 曲龙贡巴组中部最深, 为受风暴影响的陆棚, 向上水深又变浅, 到德日荣组恢复滨岸沉积. 古生物地层学证据约束地层的主体沉积时间为晚三叠世Carnian-Norian期, 与郎杰学群的沉积时间大体一致.

4 分析方法

为了查清砂岩的物源区, 本次工作对部分砂岩进行了碎屑颗粒统计, 对其中5件样品进行了碎屑锆石U-Pb年龄分析, 另外, 对曲龙贡巴组中出现的晚古生代-早中生代锆石进行了Hf同位素分析. 碎屑颗粒统计运用Gazzi-Dickinson分析法(Ingersoll等, 1984), 在显微镜下对薄片采用栅格计数法进行分析, 每件样品统计420点(数据见网络版附表1, http://earthcn.scichina.com). 碎屑组分划分为单晶石英(Qm)、多晶石英(Qp)、斜长石(Pl)、钾长石(KF)、沉积岩岩屑(Ls)、火山岩岩屑(Lv)、变质岩岩屑(Lm). 在薄片分析的基础上, 选择粒度较粗的样品进行破碎, 淘洗出重矿物后, 在双目镜下挑选出碎屑锆石. 将锆石固定在环氧树脂靶上, 抛出中心面, 然后通过阴极发光(CL)照相获得锆石内部结构.

碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素分析在中国科学院地质与地球物理研究所的岩石圈演化国家重点实验室完成(数据见网络版附表2和3). U-Pb定年采用激光剥蚀(Geolas 193nm ArF准分子激光)-等离子质谱仪(Agilent 7500a型四极杆)完成. 根据锆石大小, 选择32或44μm的激光束斑进行分析. 详细的仪器参数和分析流程参照谢烈文等(2008). 实验过程中采用跳峰方式对^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb、^{232}Th和^{238}U进行离子计数, 运用GLITER软件计算获得锆石年龄(Griffin等, 2008). 在年龄数据处理时, 对于^{206}Pb/^{238}U年龄小于1000Ma的锆石, 采用^{206}Pb/^{238}U年龄; 而对于^{206}Pb/^{238}U年龄大于1000Ma的锆石, 采用^{207}Pb/^{206}Pb年龄. 不谐和度大于10% 或1σ误差大于5%的单颗粒锆石年龄不予采用. Hf同位素分析采用连接激光剥蚀系统的Neptune多接收等离子质谱仪(MC-ICPMS)进行, 详细的仪器参数和流程参照Wu等(2006).

5 分析结果

5.1 砂岩碎屑组成

曲龙贡巴组砂岩粒度较细, 主要为岩屑石英砂岩或长石岩屑石英砂岩(图4c和4d), 碎屑组分平均成分为Q:F:L=72:10:18(图5a; 附表1), 泥质胶结或钙质胶结. 石英几乎为单晶石英, 含量63~83%, 磨圆度较差, 发育一定程度的次生加大. 岩屑含量10~30%, 主要为酸性火山岩岩屑, 另有少量浅变质或未变质的泥质岩岩屑和碳酸盐岩碎屑(图5b). 长石含量较少(1~6%), 绝大多数为发育聚片双晶的斜长石, 少量蚀变较严重, 发育卡式双晶或无双晶的可能为钾长石. 砂岩中的副矿物包括锆石、云母、角闪石、金红石、磁铁矿等.

德日荣组砂岩多中粗粒, 部分含细砾, 为石英砂岩

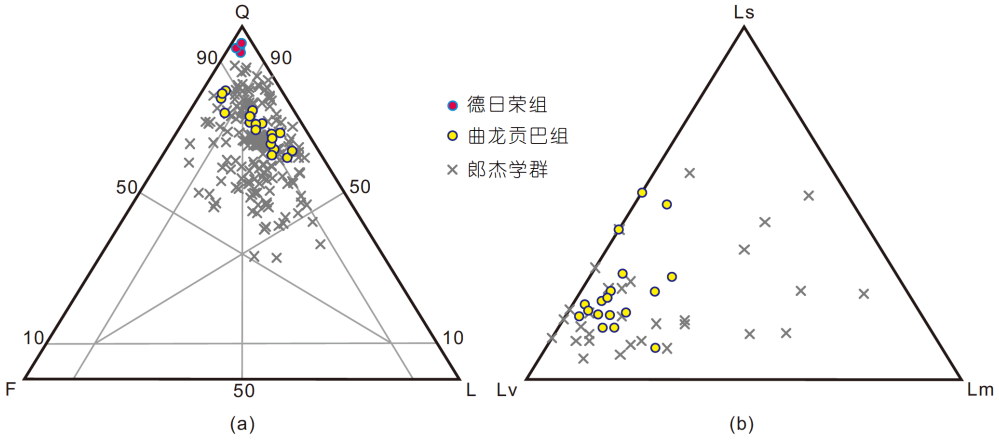


图 5　砂岩碎屑组成三角图解

(a) Q-F-L三角图(据Garzanti, 2016). Q, 石英; F, 长石; L, 岩屑; (b) Ls-Lv-Lm三角图. Ls, 沉积岩岩屑; Lv, 火山岩岩屑; Lm, 变质岩岩屑; 郎杰学群数据来自李祥辉等(2004)、Li等(2010)、徐文礼等(2011)、Cai等(2016)、Zhang等(2017)和Wang等(2016)

(图4e和4f), 单晶石英含量均大于90%(图5a; 附表1), 分选性好. 石英颗粒表面干净, 磨圆度好, 发育显著的次生加大, 硅质胶结. 岩石中还见少量的斜长石和变泥质岩岩屑(均小于5%). 副矿物主要为锆石、金红石和电气石.

5.2　碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素

从曲龙贡巴组三个碎屑锆石样品(16WL10、16TL10和16TL18)中获得170个有效的碎屑锆石年龄(附表2), 最显著的年龄区间为新元古代晚期-早古生代(约700~450Ma), 年龄峰值为~550Ma. 次级的年龄区间出现在中元古代-新元古代早期, 在约1400~850Ma形成宽缓的年龄峰. 太古代和古元古代的锆石年龄较少, 主要出现在~1850和~2500Ma左右. 特征的年龄是, 样品中出现了晚古生代-早中生代的碎屑锆石年龄(379~207Ma; 14个年龄, 占总数的~8%), 主要集中在260~207Ma, 峰值为~225Ma(图6).

从德日荣组2件样品(16TL21和16WL08)中获得有效年龄173个(附表2), 所有锆石年龄均大于470Ma, 缺少晚古生代-早中生代年龄. 主要年龄区间为650~470Ma, 年龄峰值为~515Ma. 次级年龄区间为1250~720Ma, 峰值为950Ma. 另外, 在~2450Ma左右存在小的年龄峰(图6).

本次工作还对曲龙贡巴组中的晚古生代-早中生代的碎屑锆石进行了Hf同位素的分析(附表3). 这部分锆石均具有良好的震荡环带, 为典型的岩浆锆石(图7; Corfu等, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004). 大部分锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值在−3~4, 对应的地壳模式年龄为1.0~1.5Ga. 另外有3颗晚三叠世锆石(226~214Ma)的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为11~17, 对应的地壳模式年龄为0.15~0.76Ga, 指示新生地壳源区(图8).

6　讨论

6.1　特提斯喜马拉雅上三叠统沉积体系对比

如图5、图6和图8所示, 曲龙贡巴组的所有物源特征均可与郎杰学群进行对比, 砂岩岩石学方面, 二者均为岩屑石英砂岩或长石岩屑石英砂岩, 在Q-F-L图解上位于重合的区域(图5a); 岩屑以酸性火山岩岩屑为主(图5b); 而长石主要为斜长石. 碎屑锆石年代学方面, 二者的年龄频谱近乎相同, 除了具有相似的早古生代-前寒武纪年龄之外, 也均具有晚古生代-早中生代碎屑锆石年龄和相似的年龄峰值(图6). 另外, 晚古生代-早中生代锆石都具有良好的震荡环带, 为典型的岩浆锆石(图7; Wang等, 2016). 而且, 这些锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值和地壳模式年龄也趋于一致, 仅曲龙贡巴组中少数锆石颗粒具有特别亏损的同位素特征, 指示明显的新生地壳物质贡献(图8).

晚三叠世曲龙贡巴组和郎杰学群物源的相似性指示它们具有相同的物源区, 而且很可能受控于相同的沉积搬运体系. 二者岩石组合和沉积特征的差异只是因为它们沉积于不同沉积环境, 分别位于浅海陆棚区

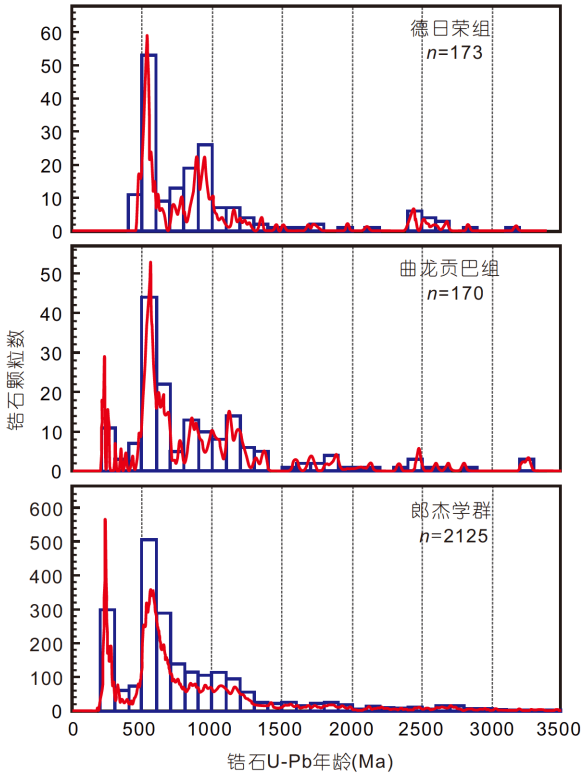


图 6　碎屑锆石U-Pb年龄频谱图

郎杰学群的数据来自Li等(2010)、Cai等(2016)、Li等(2016)、Wang等(2016)和Cao等(2018)

和深海大陆斜坡-盆地区. 由于曲龙贡巴组与上下部地层均为沉积接触关系, 确定属于特提斯喜马拉雅沉积体系, 它与郎杰学群一致的物源特征证实后者亦属于印度大陆北缘原地沉积, 并非外来地质体.

在特提斯喜马拉雅, 还存在另一套上三叠统, 称为涅如组. 涅如组建组于康马县东涅如乡附近, 指一套黑色粉砂质页岩、板岩夹石英细砂岩的地层(西藏自治区地质矿产局, 1993). 在1:25万区域地质填图过程中, 浪卡子-隆子一带未变质的上三叠统也被列入涅如组(图9a和9b), 区分于低级变质的郎杰学群. 李祥辉等(2011)通过详细的对比研究发现, 浪卡子-隆子地区的上三叠统在岩石组合、沉积环境、化石面貌、碎屑组成、地球化学、碎屑锆石U-Pb年龄和Hf同位素等方面与郎杰学群高度相似, 因此建议将这些地层并入郎杰学群. 康马地区的涅如组以黑色泥质岩为主, 地层中的少量砂岩多呈透镜状, 发育丘状交错层理(图9c和9d), 因此它和曲龙贡巴组相似, 沉积于浅水陆棚环境, 属于特提斯喜马拉雅南带. 碎屑锆石U-Pb年龄分析表明, 康马地区的涅如组具有与郎杰学群、曲龙贡巴组相似的年龄频谱, 因此也是特提斯喜马拉雅上三叠统亲郎杰学群沉积体系的一部分(Cai等, 2016; Wang等, 2016). 但鉴于康马地区与聂拉木-定日地区具有不同的地层命名体系, 我们仍建议保留涅如组在康马一带的地层称谓.

Ao等(2018)认为郎杰学群甚至整个特提斯喜马拉雅东段为一个大型的增生楔, 最初形成于新特提斯洋向亚洲大陆俯冲的海沟位置, 并在印度-亚洲大陆碰撞过程中增生至印度大陆北缘. 但是, 详细的沉积学研究表明, 大部分的郎杰学群具有完全可恢复的浊积岩地层层序(Zhang等, 2015), 并不具有典型的混杂岩特征. 而且, 拉萨地体无法提供郎杰学群沉积所需的碎屑物

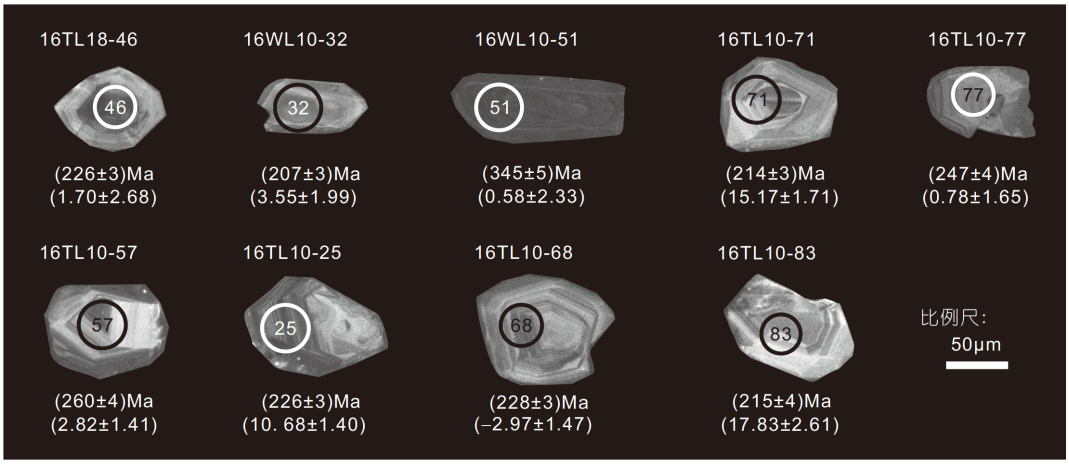


图 7　曲龙贡巴组晚古生代-早中生代部分碎屑锆石阴极发光图像

圆圈表示分析点位, 锆石下方标注锆石U-Pb年龄和$\varepsilon_{Hf}(t)$值

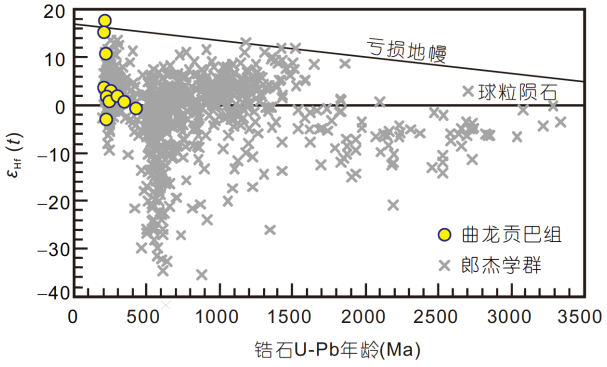


图 8　碎屑锆石U-Pb年龄与$\varepsilon_{Hf}(t)$值散点图

郎杰学数据来自Li等(2010)、Li等(2016)和Wang等(2016)

质(Li等, 2016; Wang等, 2016). 本次研究工作表明, 郎杰学群是印度北缘由南向北古水深逐步增大的沉积体系的一部分. 因此, 目前的观察并不支持郎杰学群属于增生楔的认识. 值得注意的是, 郎杰学群以及整个东特提斯喜马拉雅中的"基性岩块"的年龄均为130Ma左右, 这意味着"岩块"的年龄可能晚于"基质"的年龄(晚三叠世; 西藏自治区地质矿产局, 1993; 西藏自治区地质调查院, 2007), 难以解释其成因. 因此, 综合目前的资料, 我们倾向于认为这些"基性-超基性岩块"是措美-Bunbury大火成岩省的组成部分, 因在印度-亚洲大陆碰撞过程中受到强烈的构造破坏而呈"岩块"状. 区域上发现的灰岩"岩块"、硅质岩"岩块"也可能是印度北缘的组成部分, 但因靠近雅鲁藏布缝合带和东构造结而遭受强烈的变质变形, 难以确定其层序.

6.2　物源分析

郎杰学群及相关沉积体系物源分析的关键是合理解释地层中出现的晚古生代-早中生代(约400~200Ma)的碎屑锆石及相关火山碎屑的来源. 本次工作表明, 郎杰学群和曲龙贡巴组、涅如组具有类似的碎屑组成和物源, 均属印度大陆北缘沉积体系, 这意味着碎屑物质必须来自印度本身或与之相连的其他陆块. Cao等(2018)提出这些锆石可能来自印度北缘的基性岩, 但这种解释存在很多不足: (1) 特提斯喜马拉雅上三叠统中的火山岩岩屑主要为酸性, 缺乏基性岩岩屑; (2) 晚古生代-早中生代碎屑锆石具有良好的生长环带, 为中酸性岩浆锆石特征, 与基性岩锆石明显不同(吴元保等, 2004); (3) 晚古生代-早中生代碎屑锆石的年龄宽

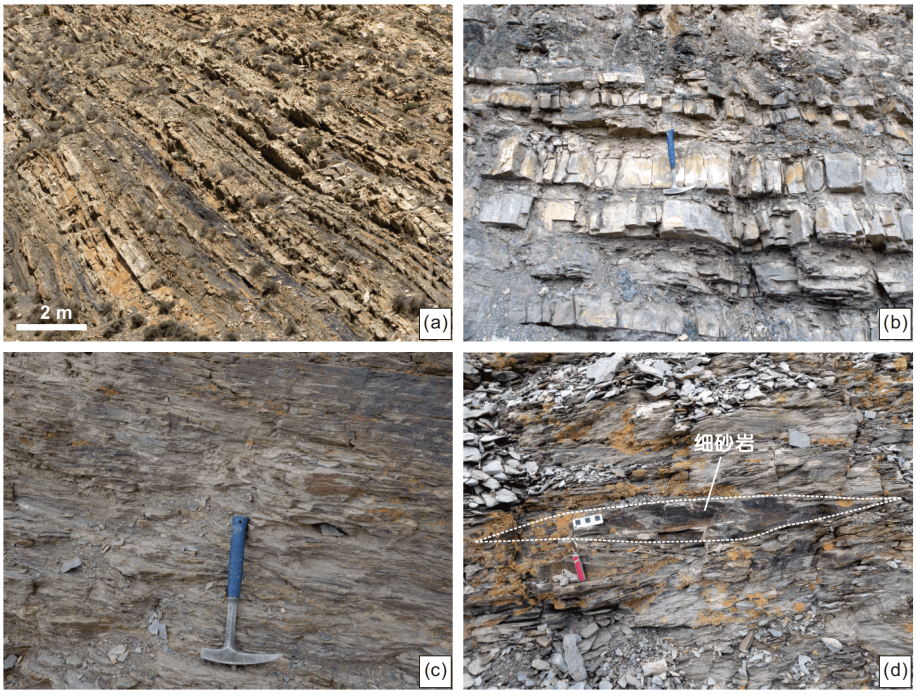


图 9　藏南特提斯喜马拉雅涅如组野外照片

(a), (b) 山南地区琼结县城-哲古错一带的"涅如组", 为典型的浊积岩地层, 建议归为郎杰学群(李祥辉等, 2011); (c), (d) 康马县涅如乡地区的涅如组, 为黑色泥岩、板岩夹少量透镜状风暴沉积的砂岩

泛, 峰值约245Ma, 但特提斯喜马拉雅目前所报道的玄武岩时代为中二叠世, 尽管Cao等(2018)认为郎杰学群中的部分基性岩的时代可能为晚三叠世, 但目前缺少年代学证据; (4) 上三叠统中的碎屑铬尖晶石具有低铝、低钛的特征, 与岛弧玄武岩及橄榄岩中的铬尖晶石成分相似, 不同于大火成岩省铬尖晶石高钛的特征(Li等, 2016); (5) 二叠系玄武岩沿整个特提斯喜马拉雅都有分布(Garzanti等, 1999), 但郎杰学群及相关沉积体系局限于喜马拉雅东段.

尽管由于印度大陆缺乏晚古生代-早中生代的岩浆活动, 给物源分析带来很大的难度, 但特提斯喜马拉雅上三叠统本身的物源特征提供了重要线索, 包括: (1) 岩石中晚古生代-早中生代碎屑锆石年龄近连续分布; (2) 锆石晶型完好、发育良好的震荡环带; (3) 锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值在−5~10(地壳模式年龄0.5~1.5Ga), 指示岩浆源区存在地壳-地幔混合贡献; (4) 岩石中包含较多的火山岩岩屑, 且存在少量的斜长石; (5) 铬尖晶石的地球化学特征显示弧玄武岩的特征. 这些特征表明晚古生代-早中生代碎屑锆石应该来自一个长期活动的岩浆弧物源区(Wang等, 2016). 板块构造重建显示, 在三叠纪时期, 印度所在的东冈瓦纳大陆的东南缘由于受到古太平洋的俯冲作用, 形成长达数千公里的俯冲岩浆岩带; 而东冈瓦纳大陆的西北缘(包括印度大陆北缘)为离散型被动大陆边缘(Golonka和Ford, 2000; Veevers, 2004; Cawood, 2005), 缺少长期的岩浆活动. 因此, 作为东冈瓦纳三叠纪时期唯一的大型岩浆弧, 冈瓦纳大陆东南缘与古太平洋俯冲有关的岩浆岩无疑是郎杰学群及相关沉积体系中晚古生代-早中生代锆石最可能的源区(图10b; Cai等, 2016; Wang等, 2016). 目前, 与古太平洋俯冲岩浆作用有关的岩浆-沉积记录在澳大利亚东缘(如新英格兰岩基)、环南极造山带、新西兰、巴布亚、新几内亚等地都有发现(e.g., Cawood等, 1999; Sircombe, 1999; Elliot和Fanning, 2008; Gunawan等, 2012). 这些岩石中的锆石年龄分布和Hf同位素特征与郎杰学群及相关沉积体系中的晚古生代-早中生代锆石的特征一致(Kemp等, 2009; Jeon等, 2014), 进一步支持了这种解释.

如果冈瓦纳大陆东南缘的岩浆弧是郎杰学群及相关沉积体系的物源区, 将要求沉积物横穿冈瓦纳大陆, 经历数千公里的搬运. 尽管目前缺乏足够的古地理证据, 但跨大陆的沉积物搬运不管在地质历史上还是在现今地球上都是常见的(Dickinson, 1988). 冈瓦纳大陆东南缘在古生代时期经历长期的俯冲增生作用, 形成了一条大型的造山带——冈瓦纳造山带(Gondwanide Orogen; Carey和Browne, 1938; Collins, 1991; Holcombe等, 1997). 东冈瓦纳大陆早古生代的这种构造类似于现今的南美大陆. 冈瓦纳造山带的发育很可能导致了东冈瓦纳大陆东南高-西北低的古地理格局, 为跨冈瓦纳大型河流的发育提供了条件(类似于现今的亚马孙河). 源自冈瓦纳造山带的沉积物在搬运过程中, 混入冈瓦纳大陆基底的碎屑组分, 从而使得郎杰学群中出现大量的早古生代-前寒武纪碎屑锆石. 同时, 大型古水系的发育也为郎杰学群大型浊积岩体系的形成提供了足够的碎屑物质.

尽管将冈瓦纳大陆东南缘的岩浆弧作为郎杰学群及相关沉积体系的物源区(Wang等, 2016)还只是一种理论模型, 但考虑到本文提供的最新证据以及其他模型的局限性(详细论述见Wang等, 2016), 这种解释具有很高的合理性. 但值得注意的是, 碎屑物质的具体来源(物源区在冈瓦纳造山带中的具体位置)仍不明确, 目前的物源解释和详细的沉积物搬运路径仍有待更多工作的验证和完善.

曲龙贡巴组之上的德日荣组由石英砂岩组成, 岩石中没有火山岩岩屑, 碎屑锆石中也没有晚古生代-早中生代的年龄. 德日荣组的碎屑锆石频谱特征与印度北缘其他时代地层中的碎屑锆石年龄一致, 表明其物源区很可能就是印度北缘的基底和早古生代花岗岩(e.g., Cawood和Buchan, 2007; Gehrels等, 2011). 曲龙贡巴组和德日荣组之间显著的岩石学和碎屑锆石年代学差异, 反映物源区的变化.

6.3 古地理与沉积模式

本次研究工作表明, 特提斯喜马拉雅南带上三叠统记录了显著的沉积环境和物源区变化, 而且这些变化之间存在相互的耦合联系. 在土隆群沉积晚期, 酸性火山碎屑物质、斜长石和晚古生代-早中生代碎屑锆石开始输入印度大陆北缘. 物源区的变化伴随着沉积古水深的加大. 这一时期, 印度北缘的沉积速率和构造沉降速率明显增加(Jadoul等, 1998; Sciunnach和Garzanti, 2012). 之后, 随着曲龙贡巴组沉积作用的结束, 火山岩屑砂岩沉积被源自印度北缘的石英砂岩沉积所取代, 这一物源的变化伴随着明显的海退, 区域

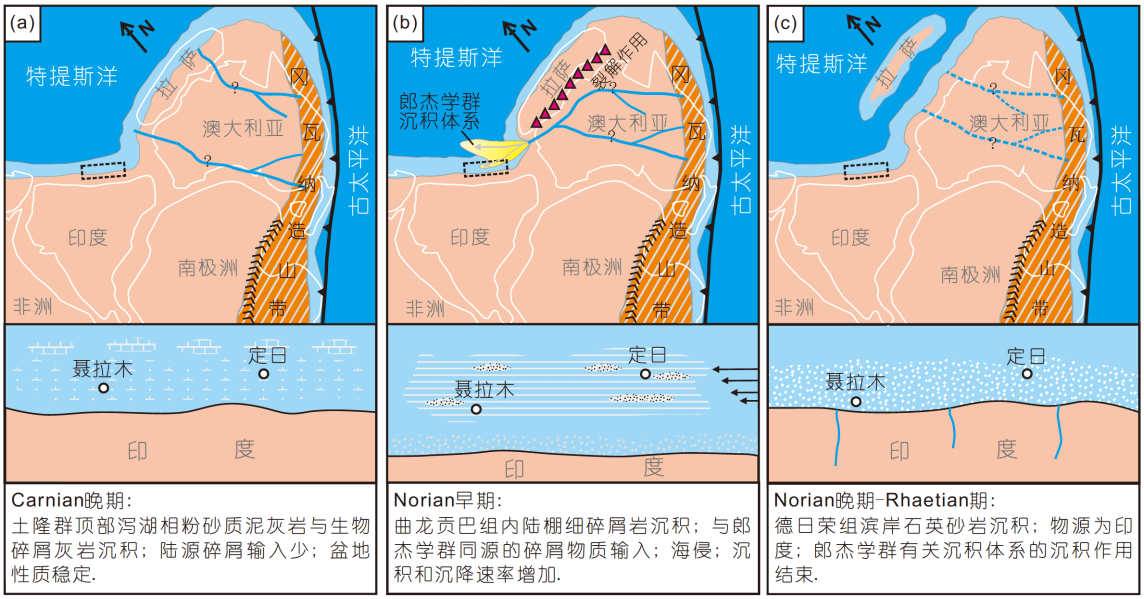


图 10　印度大陆北缘晚三叠世古地理演化及其控制因素模式图

沉积作用和沉降作用恢复稳定.

曲龙贡巴组、郎杰学群及相关沉积体系在晚三叠世中期突然出现, 之后又突然消失, 反映了明显的区域构造事件和古地理变化. 印度北缘晚三叠世沉积模式的变化, 可能反映一次区域性的拉张事件, 部分学者认为它与印度北缘的裂解事件或新特提斯洋的开启有关(Gaetani和Garzanti, 1991; Ogg和von Rad, 1994). 然而, 由于印度北缘这一时期的伸展因子(Stretching factor, 见Sciunnach和Garzanti, 2012)很低、古水深变化有限而且缺乏与裂解有关的岩浆作用, Sciunnach和Garzanti(2012)认为这次伸展事件可能是冈瓦纳陆内其他地区裂解事件的远程响应. 尽管目前没有足够的证据, 但这一事件很可能与拉萨地体从澳大利亚西北缘的裂解有关(Zhu等, 2009b, 2011a).

传统的古地理重建中, 拉萨地体常被置于印度大陆北缘(Yin和Harrison, 2000). 但拉萨地体二叠-三叠系的碎屑锆石组合明显不同于特提斯喜马拉雅同期地层, 相反, 却类似于澳大利亚西北缘的地层(Zhu等, 2011b; Wang等, 2016). 这使得越来越多的人倾向于认为拉萨地体起源于澳大利亚(Audley-Charles, 1983; Zhu等, 2011b). 而且澳大利亚西北缘保留了晚三叠世-早侏罗世的岩浆活动记录(Lewis和Sircombe, 2013), 这些岩浆作用可能与拉萨地体的裂解有关.

基于本次工作结果, 结合已发表的关于郎杰学群的地质资料, 我们尝试初步重建印度北缘晚三叠世的古地理演化过程(图10a~10c):

晚三叠世Carnian晚期(土隆群上部)(图10a), 这一时期印度北缘以碳酸盐岩沉积为主, 盆地性质稳定, 陆源输入有限. 源自冈瓦纳大陆的河流可能向西北流入冈瓦纳西北缘. 拉萨地体(如麦龙岗组)和澳大利亚西北缘(如Mungaroo组)晚三叠世地层中大量出现晚古生代-早中生代碎屑锆石(Li等, 2014; Li等, 2016; Wang等, 2016), 很可能与这些河流携带的沉积物输入有关.

晚三叠世Norian早期(曲龙贡巴组)(图10b), 澳大利亚西北缘的裂解作用开始发生, 区域热隆升和沿裂谷走向的岩浆作用阻断了之前流向澳大利亚西北缘的河流, 古河流体系发生重组并改道向西流入印度大陆北缘. 这类似于现今的东非裂谷, 它阻挡了非洲内陆的河流流向东海岸, 而是沿尼罗河流入地中海(Garzani等, 2015). 作为澳大利亚西北缘伸展作用的远程响应, 印度北缘发生明显的海侵和构造沉降. 同时, 由于新的河流体系导致大量的陆源碎屑输入, 印度北缘的沉积速率显著增加. 向西流动的河流体系也与郎杰学群以及曲龙贡巴组的古水流方向(主体南西方向, 李祥辉等, 2003a; 徐文礼等, 2011; Wang等, 2016)一致.

晚三叠世Norian晚期-Rhaetian期(德日荣组)(图10c), 裂解作用结束, 印度北缘不再受到伸展作用的影响, 由于持续的陆源碎屑沉积, 盆地的可容纳空间逐渐

被占据, 沉积古水深变浅. 这一时期, 印度东北缘的沉积物源区变为印度大陆本身, 岩石类型为稳定的石英砂岩, 郎杰学群、曲龙贡巴组及有关沉积体系的沉积作用结束. 这次的物源变化反映区域古水系的再次重组, 可能的控制因素包括: (1) 澳大利亚西北部发生热沉降, 阻挡河流的屏障消失, 河流体系重新流入澳大利亚西北缘; (2) 与冈瓦纳裂解有关的其他地质事件(比如冈瓦纳大陆东南缘的裂解导致冈瓦纳造山带崩塌, 分水岭作用消失; Veevers, 2004)导致整个冈瓦纳构造格局和古河流体系的改变等.

需要说明的是, 这里仅仅是根据目前的资料提供了一个可能的工作模型, 证实或证伪这一模型还需要大量的研究工作, 特别包括细致重建特提斯喜马拉雅地区与郎杰学群有关的沉积体系、寻找冈瓦纳大陆西北缘晚三叠世时期区域裂解事件的可靠地质证据、冈瓦纳北缘古板块重建以及澳大利亚地区三叠纪古水系恢复等.

7 结论

作为西藏南部印度-亚洲大陆碰撞带内一个特殊的地质体, 郎杰学群的大地构造属性一直存在争议. 本次工作运用沉积学和物源分析方法, 对特提斯喜马拉雅南带上三叠统曲龙贡巴组与郎杰学群开展对比研究, 获得以下几点主要认识:

(1) 特提斯喜马拉雅南带上三叠统包括土隆群顶部泥灰岩和粉砂质生物碎屑灰岩、曲龙贡巴组泥质岩和细砂岩、德日荣组石英砂岩, 分别沉积于泻湖、内陆棚和滨岸沉积环境.

(2) 曲龙贡巴组细砂岩中包含大量酸性火山岩岩屑(10~30%)和少量斜长石(1~6%). 碎屑锆石U-Pb年龄频谱除了具有典型的亲冈瓦纳的早古生代-前寒武纪年龄之外, 还具有晚古生代-早中生代年龄. 晚古生代-早中生代的碎屑锆石具有良好的震荡环带, 其$\varepsilon_{Hf}(t)$值为−3~4, 对应的地壳模式年龄为1.0~1.5Ga. 德日荣组砂岩主要由石英组成, 缺少火山岩岩屑和晚古生代-早中生代锆石年龄.

(3) 曲龙贡巴组和郎杰学群的物源特征具有广泛的一致性, 表明二者很可能来源于相同的物源体系, 这进一步证明郎杰学群是印度大陆北缘原地沉积地层, 而不是外来地体.

(4) 郎杰学群有关沉积体系中的火山岩碎屑和晚古生代-早中生代碎屑锆石很可能源自冈瓦纳大陆东南缘与古太平洋俯冲有关的岩浆弧, 碎屑物质经由跨冈瓦纳的河流体系搬运数千公里至印度北缘. 郎杰学群有关沉积体系在晚三叠世突然出现之后又突然消失, 很可能受冈瓦纳大陆北缘晚三叠世的裂解事件所控制.

致谢 特别感谢杨岳衡老师在锆石U-Pb年龄和Hf同位素分析过程中的帮助. 感谢主编、编委和两位评审人对本文提出的意见和建议.

参考文献

李祥辉, 曾庆高, 王成善. 2003a. 西藏山南地区琼结南部上三叠统郎杰学群的沉积学岩相特征与浊积扇模式. 现代地质, 17: 52–58

李祥辉, 曾庆高, 王成善. 2003b. 西藏南部郎杰学群碎屑物质来源的古水流证据. 地质论评, 49: 132–137

李祥辉, 曾庆高, 王成善, 谢绕武. 2004. 西藏南部上三叠统郎杰学群物源分析. 沉积学报, 22: 553–559

李祥辉, 王尹, 徐文礼, 孙勇, 孔庆友, 曾庆高, 谢绕武, 毛国政, 尼玛次仁, 周勇, 刘玲. 2011. 试论西藏南部上三叠统复理石郎杰学群与涅如组. 地质学报, 85: 1551–1562

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约. 科学通报, 49: 1589–1604

西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区岩石地层. 北京: 中国地质大学出版社. 302

西藏自治区地质调查院. 2007. 1:25万区域地质调查拉萨幅-泽当幅调查报告

谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石U-Pb和Lu-Hf同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53: 220–228

徐文礼, 李祥辉, 王尹, 曾庆高, 孙勇, 尼玛次仁. 2011. 西藏仁布地区上三叠统复理石物源分析. 高校地质学报, 17: 220–230

曾庆高, 李祥辉, 夏斌, 徐文礼, 尼玛次仁, 普琼, 李君. 2009. 西藏仁布地区上三叠统重矿物组合与物源分析. 地质通报, 28: 38–44

张朝凯, 李祥辉, 王尹, 孙勇. 2014. 西藏山南地区上三叠统复理石郎杰学群岩性分布样式及其意义. 沉积学报, 32: 36–43

Aikman A B, Harrison T M, Lin D. 2008. Evidence for early (>44 Ma) Himalayan crustal thickening, Tethyan Himalaya, southeastern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 274: 14–23

Aitchison J C, Badengzhu J C, Davis A M, Liu J, Luo H, Malpas J G, McDermid I R C, Wu H, Ziabrev S V, Zhou M. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-

Zangbo suture (southern Tibet). Earth Planet Sci Lett, 183: 231–244

Allègre C J, Courtillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, Schärer U, Marcoux J, Burg J P, Girardeau J, Armijo R, Gariépy C, Göpel C, Li T, Xiao X, Chang C, Li G, Lin B, Teng J, Wang N, Chen G, Han T, Wang X, Den W, Sheng H, Cao Y, Zhou J, Qiu H, Bao P, Wang S, Wang B, Zhou Y, Xu R. 1984. Structure and evolution of the Himalayan-Tibet orogenic belt. Nature, 307: 17–22

An W, Hu X M, Garzanti E, BouDagher-Fadel M K, Wang J G, Sun G Y. 2014. Xigaze forearc basin revisited (South Tibet): Provenance changes and origin of the Xigaze Ophiolite. Geol Soc Am Bull, 126: 1595–1613

An W, Hu X M, Garzanti E. 2017. Sandstone provenance and tectonic evolution of the Xiukang Mélange from Neotethyan subduction to India-Asia collision (Yarlung-Zangbo suture, south Tibet). Gondwana Res, 41: 222–234

Ao S J, Xiao W J, Windley B F, Zhang J E, Zhang Z Y, Yang L. 2018. Components and structures of the eastern Tethyan Himalayan Sequence in SW China: Not a passive margin shelf but a mélange accretionary prism. Geol J, 53: 1–25

Audley-Charles M G. 1983. Reconstruction of eastern Gondwanaland. Nature, 306: 48–50

Cai F L, Ding L, Leary R J, Wang H Q, Xu Q, Zhang L Y, Yue Y H. 2012. Tectonostratigraphy and provenance of an accretionary complex within the Yarlung-Zangpo suture zone, southern Tibet: Insights into subduction-accretion processes in the Neo-Tethys. Tectonophysics, 574-575: 181–192

Cai F L, Ding L, Laskowski A K, Kapp P, Wang H Q, Xu Q. 2016. Late Triassic paleogeographic reconstruction along the Neo-Tethyan Ocean margins, southern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 435: 105–114

Cao H W, Huang Y, Li G M, Zhang L K, Wu J Y, Dong L, Dai Z W, Lu L. 2018. Late Triassic sedimentary records in the northern Tethyan Himalaya: Tectonic link with greater India. Geosci Front, 9: 273–291

Carey S W, Browne W R. 1938. Review of the Carboniferous stratigraphy, tectonics and palaeogeography of New South Wales and Queensland. J Proc Royal Soc New South Wales, 71: 591–614

Carosi R, Montomoli C, Iaccarino S, Visonà D. 2018. Structural evolution, metamorphism and melting in the Greater Himalayan Sequence in central-western Nepal. Geol Soc Lond Spec Publ, 483: SP483-3

Cawood P A. 2005. Terra Australis Orogen: Rodinia breakup and development of the Pacific and Iapetus margins of Gondwana during the Neoproterozoic and Paleozoic. Earth-Sci Rev, 69: 249–279

Cawood P A, Nemchin A A, Leverenz A, Saeed A, Balance P F. 1999. U/Pb dating of detrital zircons: Implications for the provenance record of Gondwana margin terranes. Geol Soc Am Bull, 111: 1107–1119

Cawood P A, Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. Earth-Sci Rev, 82: 217–256

Collins W J. 1991. A reassessment of the 'Hunter-Bowen Orogeny': Tectonic implications for the Southern New England Fold Belt. Aust J Earth Sci, 38: 409–424

Corfu F, Hanchar J M, Hoskin W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Rev Mineral Geochem, 53: 469–500

Dai J G, Yin A, Liu W C, Wang C S. 2008. Nd isotopic compositions of the Tethyan Himalayan Sequence in southeastern Tibet. Sci China Ser D-Earth Sci, 51: 1306–1316

Dickinson W R. 1988. Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basins. In: Kleinspehn K L, Paola C, eds. New Perspectives in Basin Analysis. Berlin: Springer. 3–25

Dürr S B. 1996. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet). Geol Soc Am Bull, 108: 669–684

Elliot D H, Fanning C M. 2008. Detrital zircons from upper Permian and lower Triassic Victoria Group sandstones, Shackleton Glacier region, Antarctica: Evidence for multiple sources along the Gondwana plate margin. Gondwana Res, 13: 259–274

Fang D R, Wang G H, Hisada K, Yuan G L, Han F L, Li D, Tang Y, Pei Q M, Zhang L L. 2018. Provenance of the Langjiexue Group to the south of the Yarlung-Tsangpo Suture Zone in southeastern Tibet: Insights on the evolution of the Neo-Tethys Ocean in the Late Triassic. Int Geol Rev, 35: 1–20

Gaetani M, Garzanti E. 1991. Multicyclic history of the northern India continental margin (NW Himalaya). AAPG Bull, 75: 1427–1446

Garzanti E. 1999. Stratigraphy and sedimentary history of the Nepal Tethys Himalaya passive margin. J Asian Earth Sci, 17: 805–827

Garzanti E. 2016. From static to dynamic provenance analysis—Sedimentary petrology upgraded. Sediment Geol, 336: 3–13

Garzanti E, Nicora A, Rettori R. 1998. Permo-Triassic boundary and Lower to Middle Triassic in South Tibet. J Asian Earth Sci, 16: 143–157

Garzanti E, Le Fort P, Sciunnach D. 1999. First report of Lower Permian basalts in south Tibet: Tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys. J Asian Earth Sci, 17: 533–546

Garzanti E, Andò S, Padoan M, Vezzoli G, El Kammar A. 2015. The modern Nile sediment system: Processes and products. Quat Sci Rev, 130: 9–56

Gehrels G, Kapp P, Decelles P, Pullen A, Blakey R, Weislogel A, Ding L, Guynn J, Martin A, McQuarrie N, Yin A. 2011. Detrital zircon

geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. Tectonics, 30: TC5016

Golonka J, Ford D. 2000. Pangean (Late Carboniferous-Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 161: 1–34

Griffin W L, Powell W J, Person N J, O'Reilly S Y. 2008. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS. In: Sylvester P, ed. Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues. Mineral Assoc Canada Short Course, 40: 308–311

Gunawan I, Hall R, Sevastjanova I. 2012. Age, character and provenance of the Tipuma Formation, West Papua: New insights from detrital zircon dating. In: Proceedings, Indonesian Petroleum Association. Thirty-Sixth Annual Convention & Exhibition. IPA12-G-027

Hébert R, Bezard R, Guilmette C, Dostal J, Wang C, Liu Z. 2012. The Indus-Yarlung Zangbo ophiolites from Nanga Parbat to Namche Barwa syntaxes, southern Tibet: First synthesis of petrology, geochemistry, and geochronology with incidences on geodynamic reconstructions of Neo-Tethys. Gondwana Res, 22: 377–397

Holcombe R J, Stephens C J, Fielding C R F, Gust D, Little T A, Sliwa R, Kassan J, McPhie J, Ewart A. 1997. Tectonic evolution of the northern New England Fold Belt: The Permian-Triassic Hunter-Bowen event. Tectonics Metall New England Orogen, 19: 52–65

Hou Z Q, Duan L F, Lu Y J, Zheng Y C, Zhu D C, Yang Z M, Yang Z S, Wang B D, Pei Y R, Zhao Z D. 2015. Lithospheric architecture of the Lhasa terrane and its control on ore deposits in the Himalayan-Tibetan orogen. Econ Geol, 110: 1541–1575

Hu X M, Jansa L, Wang C S. 2008. Upper Jurassic-Lower Cretaceous stratigraphy in south-eastern Tibet: A comparison with the western Himalayas. Cretac Res, 29: 301–315

Hu X M, Jansa L, Chen L, Griffin W L, O'Reilly S Y, Wang J G. 2010. Provenance of lower cretaceous Wölong Volcaniclastics in the Tibetan Tethyan Himalaya: Implications for the final breakup of Eastern Gondwana. Sediment Geol, 223: 193–205

Hu X M, Sinclair H D, Wang J G, Jiang H H, Wu F Y. 2012. Late Cretaceous-Palaeogene stratigraphic and basin evolution in the Zhepure Mountain of southern Tibet: Implications for the timing of India-Asia initial collision. Basin Res, 24: 520–543

Hu X M, Garzanti E, Moore T, Raffi I. 2015. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59 ±1 Ma). Geology, 43: 859–862

Hu X M, Garzanti E, Wang J, Huang W T, An W, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset—Facts, theories, controversies. Earth-Sci Rev, 160: 264–299

Ingersoll R V, Fullard T F, Ford R L, Grimm J P, Pickle J D, Sares S W. 1984. The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. J Sediment Res, 54: 103–116

Jadoul F, Berra F, Garzanti E. 1998. The Tethys Himalayan passive margin from Late Triassic to Early Cretaceous (South Tibet). J Asian Earth Sci, 16: 173–194

Jeon H, Williams I S, Bennett V C. 2014. Uncoupled O and Hf isotopic systems in zircon from the contrasting granite suites of the New England Orogen, eastern Australia: Implications for studies of Phanerozoic magma genesis. Geochim Cosmochim Acta, 146: 132–149

Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, Li J X, Liu C Z. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. Chem Geol, 262: 229–245

Kamenetsky V S, Crawford A J, Meffre S. 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks. J Petrol, 42: 655–671

Kemp A I S, Hawkesworth C J, Collins W J, Gray C M, Blevin P L. 2009. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: The Tasmanides, eastern Australia. Earth Planet Sci Lett, 284: 455–466

LeFort P. 1996. Evolution of the Himalaya. In: Yin A, Harrison T M, eds. The Tectonics of Asia. New York: Cambridge University Press. 95–106

Lewis C J, Sircombe K N. 2013. Use of U-Pb geochronology to delineate provenance of North West Shelf sediments, Australia. In: Keep M, Moss S J, eds. The Sedimentary Basins of Western Australia IV: Proceedings of the Petroleum Exploration Society of Australia Symposium. Petroleum Exploration Society of Australia. Perth WA, 1–27

Li G W, Liu X H, Alex P, Wei L J, Liu X B, Huang F X, Zhou X J. 2010. *In-situ* detrital zircon geochronology and Hf isotopic analyses from Upper Triassic Tethys sequence strata. Earth Planet Sci Lett, 297: 461–470

Li G W, Sandiford M, Liu X H, Xu Z Q, Wei L J, Li H Q. 2014. Provenance of Late Triassic sediments in central Lhasa terrane, Tibet and its implication. Gondwana Res, 25: 1680–1689

Li X H, Wang C S, Hu X M. 2005. Stratigraphy of deep-water Cretaceous deposits in Gyangze, southern Tibet, China. Cretac Res, 26: 33–41

Li X H, Mattern F, Zhang C K, Zeng Q G, Mao G Z. 2016. Multiple sources of the Upper Triassic flysch in the eastern Himalaya Orogen, Tibet, China: Implications to palaeogeography and palaeotectonic evolution. Tectonophysics, 666: 12–22

Najman Y. 2006. The detrital record of orogenesis: A review of approaches and techniques used in the Himalayan sedimentary

basins. Earth-Sci Rev, 74: 1–72

Ogg J G, von Rad U. 1994. The Triassic of the Thakkhola (Nepal). II: Paleolatitudes and comparison with other eastern Tethyan margins of Gondwana. Geol Rundsch, 83: 107–129

Orme D A, Laskowski A K. 2016. Basin analysis of the Albian-Santonian Xigaze Forearc, Lazi Region, South-Central Tibet. J Sediment Res, 86: 894–913

Ratschbacher L, Frisch W, Liu G, Chen C. 1994. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision. J Geophys Res, 99: 19917–19945

Sciunnach D, Garzanti E. 2012. Subsidence history of the Tethys Himalaya. Earth-Sci Rev, 111: 179–198

Sircombe K N. 1999. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia. Sediment Geol, 124: 47–67

van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, McQuarrie N, Doubrovine P V, Spakman W, Torsvik T H. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. Proc Natl Acad Sci USA, 109: 7659–7664

Veevers J J. 2004. Gondwanaland from 650–500 Ma assembly through 320 Ma merger in Pangea to 185–100 Ma breakup: Supercontinental tectonics via stratigraphy and radiometric dating. Earth-Sci Rev, 68: 1–132

Wang C S, Li X H, Liu Z F, Li Y L, Jansa L, Dai J G, Wei Y S. 2012. Revision of the Cretaceous-Paleogene stratigraphic framework, facies architecture and provenance of the Xigaze forearc basin along the Yarlung Zangbo suture zone. Gondwana Res, 22: 415–433

Wang J G, Hu X M, Jansa L, Huang Z C. 2011. Provenance of the Upper Cretaceous-Eocene deep-water sandstones in Sangdanlin, Southern Tibet: Constraints on the timing of initial India-Asia collision. J Geol, 119: 293–309

Wang J G, Wu F Y, Garzanti E, Hu X, Ji W Q, Liu Z C, Liu X C. 2016. Upper Triassic turbidites of the northern Tethyan Himalaya (Langjiexue Group): The terminal of a sediment-routing system sourced in the Gondwanide Orogen. Gondwana Res, 34: 84–98

Wang J G, Hu X, Garzanti E, An W, Liu X C. 2017. The birth of the Xigaze forearc basin in southern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 465: 38–47

Willems H, Zhou Z, Zhang B, Gräfe K U. 1996. Stratigraphy of the upper Cretaceous and lower Tertiary strata in the Tethyan Himalayas of Tibet (Tingri area, China). Geol Rundsch, 85: 723–754

Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chem Geol, 234: 105–126

Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. Earth-Sci Rev, 76: 1–131

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annu Rev Earth Planet Sci, 28: 211–280

Zhang C K, Li X H, Mattern F, Mao G Z, Zeng Q G, Xu W L. 2015. Deposystem architectures and lithofacies of a submarine fan-dominated deep sea succession in an orogen: A case study from the Upper Triassic Langjiexue Group of southern Tibet. J Asian Earth Sci, 111: 222–243

Zhang C K, Li X H, Matter F, Zeng Q G, Mao G Z. 2017. Composition and sediment dispersal pattern of the Upper Triassic flysch in the eastern Himalayas, China: Significance to provenance and basin analysis. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 106: 1257–1276

Zhu D C, Chung S L, Mo X X, Zhao Z D, Niu Y, Song B, Yang Y H. 2009a. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and south-western Australia. Geology, 37: 583–586

Zhu D C, Mo X X, Niu Y, Zhao Z D, Wang L Q, Liu Y S, Wu F Y. 2009b. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. Chem Geol, 268: 298–312

Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q, Wu F Y. 2011a. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. Earth Planet Sci Lett, 301: 241–255

Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Mo X X. 2011b. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia. Geology, 39: 727–730

(责任编委: 胡修棉)