# 造山带沉积盆地与大陆动力学

胡修棉1),薛伟伟1),赖文2),王建刚3),安慰4),李娟1)

1) 南京大学大陆动力学研究院,内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室,

地球科学与工程学院,南京,210023;2)南京大学地理与海洋科学学院,南京,210023;

3) 中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029;

4) 合肥工业大学资源与环境工程学院,合肥,230009

内容提要:造山带原型盆地恢复是地质学研究的重要内容,是板块构造研究的难点与前沿,对于理解造山带演化及 其大陆动力学具有重要意义。本文从原型盆地恢复的方法出发,评述了前人根据碎屑组成、元素地球化学和碎屑 单矿物年代学来进行原型盆地恢复的原理、方法和效果。基于喜马拉雅造山带沉积盆地的实践,提出造山带原型 盆地恢复的五个要素:盆地顶底界面、古地理环境、物源分析、构造分析和盆地外围研究。详细介绍了新特提斯洋 俯冲、印度-亚洲大陆碰撞以及后碰撞阶段的沉积盆地的地质特征,包括印度北缘被动大陆边缘盆地、日喀则弧前 盆地、雅鲁藏布海沟盆地、林周弧后-弧背叠合盆地、桑单林同碰撞盆地,以及后碰撞阶段的冈仁波齐盆地、柳区盆 地和札达-吉隆裂谷盆地。基于沉积盆地研究反演了喜马拉雅大洋俯冲-大陆碰撞的演化过程,探讨了沉积盆地与 大陆动力学之间的耦合关系。

关键词:造山带;沉积盆地;原型盆地恢复;大陆动力学;喜马拉雅;青藏高原

从沉积作用出发研究板块构造作用的历史可以 追溯到板块构造理论的诞生时期(Mc-Kenzie et al., 1967; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968). -些学者尝试性地通过研究沉积盆地、沉积物(岩)来 探讨板块构造作用,取得了巨大成功,诞生了沉积 大地构造学科(Deway et al., 1970; Dickinson, 1971, 1974)。沉积大地构造(或称大地构造沉积 学)以板块构造和沉积学的基本原理为其理论基 础,探讨各类沉积盆地的大地构造背景、盆地的形 成条件和机理以及盆地的发展演化史(Ke Baojia, 1992)。通过这些研究,建立不同大地构造背景与 沉积作用的对应关系,来认识和理解地壳及岩石 圈的演化特点和规律,指导人类经济活动。通过 沉积作用来研究板块构造作用具有不可替代性, 其重要原因在于沉积岩(物)保留了同期板块构造 作用的过程,并且这种记录往往是连续且完整的。 改革开放以来,我国学者也相继对沉积大地构造 学科的发展做出了重要贡献(Wang Hongzhen,

1985;Yu Guangming et al., 1990;Li Sitian,1992; 刘宝珺等, 1994;Li Jiliang et al., 1999;Wang Chengshan et al., 2003)。

造山带沉积盆地是大陆动力学研究的重要方 面,也是揭示板块构造作用和大陆增生作用的主要 切入点(Xu Zhiqin et al., 2008)。大陆造山带的原 型盆地恢复是造山带研究的难点和前沿科学问题之 一。沉积盆地完整地记录了板块边缘动力学过程和 构造演化以及造山作用方式和时限(Yan Zhen et al., 2018)。通过沉积盆地的深入研究,可以动态 刻画造山带大陆动力学构造应力、地形地貌、岩石圈 性质等要素的演化过程。本文基于青藏高原造山带 沉积盆地的研究实践,介绍和评述了造山带原型盆 地恢复的原理、方法和有效性。以喜马拉雅造山带 为例,提出了造山带原型盆地恢复的数据基础和工 作思路,并分别介绍了沉积盆地记录的大洋俯冲、大 陆碰撞、后碰撞、高原垮塌等不同大陆演化阶段的动 力学特征。

geodynamics. Acta Geologica Sinica, 95(1):139~158.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号:41525007和 91755209)资助的成果。

收稿日期:2020-08-18;改回日期:2020-10-04;网络发表日期:2020-10-27;责任编辑:黄敏。

作者简介:胡修棉,男,1974年生。教授,博士生导师,主要从事沉积地质学科研与教学工作。Email: huxm@nju.edu.cn。

**引用本文:**胡修棉,薛伟伟,赖文,王建刚,安慰,李娟. 2021. 造山带沉积盆地与大陆动力学. 地质学报,95(1): 139~158,doi: 10. 19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021008. Hu Xiumian,Xue Weiwei,Lai Wen,Wang Jiangang,Aa Wei,Li Juan. 2021. Sedimentary basinsin orogenic belt and continental

1 沉积盆地大地构造背景判别方法

### 1.1 Dickinson 碎屑组分判别法

早在板块构造理论建立之前,一些学者就意识 到源区的构造活动对盆地内砂岩组成有很大影响 (Krynine et al., 1948)。Dickinson et al. (1979)在 板块构造理论的框架下,研究了已知构造背景下北 美地区古代砂岩的组成特征,建立了具有广泛影响 的板块构造背景三角图解,为构造活动对盆地内砂 岩组成的控制提供了标准。三个主要的源区类型被 涵盖到 Qt-F-L 以及 Qm-F-Lt 三角图解中(图 1a), 包括大陆地块、岩浆弧和再旋回造山带;其中根据长 石和石英的相对含量,大陆地块又被细分为克拉通 内部、过渡大陆以及基底隆起三个次一级分区。依 据长石和岩屑的相对含量,岩浆弧也细分为切割弧、 过渡弧以及未切割弧三个分区。根据单晶石英 Qm 和岩屑总量 Lt 的相对含量还可将再旋回造山带分 为石英再旋回、过渡再旋回和岩屑再旋回分区 (Dickinson et al., 1983)。Dickinson 图解为盆地 砂岩组成与源区大地构造背景建立了定量的联系, 自建立以来一度成为恢复沉积盆地源区构造背景的 重要方法。

然而,近年来 Dickinson 图解的有效性备受挑 战。Weltje(2006)利用统计学的方法重新定量评估 了 Dickinson 图解所使用的原始数据,他的数据表 明,利用该图解进行源区板块构造还原的准确率为 64%~78%;Dickinson图解的建立主要依靠的是新 近纪以前的砂岩数据(Dickinson et al., 1983),其 所谓的"已知源区"本身也是通过其它方法推断而 来,未必能代表真实的源区大地构造背景,因此利用 推论得出的另一个推论可能会造成结果的循环论证 (Garzanti, 2016)。事实上,单独使用砂岩的碎屑 组分来区分大地构造背景,其理论方法是不完备 的。原因如下:①一般情况下,在显微镜下难以区 分盆内和盆外的碎屑颗粒,但是只有盆外来源的 碎屑颗粒才具有相应的大地构造意义;②砂岩是 经过充分混合的产物,其中不同时代的、不同大地 构造背景的碎屑组分混合在一起,其投点得到是 混合的组分特征;③Dickinson图解中与弧相关的 物质没有考虑非造山弧(如裂谷火山作用)的影 响;④Dickinson图解中没有考虑碎屑颗粒的再循 环(Garzanti, 2016)。

近年来对现代河流砂物源的深入研究直接改变 了对 Dickinson 图解的认识。由于现代河流砂的物 源区是客观存在的,因此通过物源分析可以真实地 反应源区的大地构造背景和砂岩组成的关系。研究 发现,已知构造环境为大陆板块的南非被动陆缘和 东非裂谷带,它们产生的河流砂并非完全投点在 Dickinson 图解的大陆板块内部区域(Garzanti, 2016),有相当一部分样品投点于再旋回造山带(图 1a);而红海裂谷带产出的河流砂则广泛分布于 Dickinson 图解的再旋回造山带、大陆地块和岩浆弧 分区(图 1b)。此外,不同的造山带类型通常具有不 同的源区物质组成,这并不能被 Dickinson 图解中 的再旋回造山带分区所覆盖(Garzanti et al., 2007)。不仅如此,砂岩的水动力环境和粒度变化也 会直接影响 Dickinson 图解的准确性,如尼罗河现 代河流砂的研究显示水动力较强的沙坝环境中的中 粒砂投点于 Dickinson 图解中的大陆地块,细砂投 点于再旋回造山带,而沉积于河漫滩的粉砂则投点 于岩浆弧(图 1c;Garzanti et al., 2015a, 2016)。以 上的一系列研究实例表明仅仅用特定砂岩成分的 Dickinson 图解来区分上述源区的构造背景时会造 成很大的误判。

### 1.2 全岩元素地球化学法

砂岩的全岩元素地球化学组成也被用作推断沉 积盆地的大地构造背景(Bhatia, 1983; McLennan et al., 1993)。其原理是不同的造岩矿物具有特定 的地球化学组成,通过将特定砂岩的元素地球化学 组成与对应的全球标准大地构造背景的化学组成作 对比,来推测其源区类型。例如,贫石英(石英含量 <15%)的火山碎屑杂砂岩具有低的 SiO<sub>2</sub> 含量 (58%),且 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 远小于 1,这与弧环境的安山 岩的全岩地球化学组成相类似;而富石英(石英含量 >65%)的杂砂岩,其 SiO<sub>2</sub> 含量大于 89%, K<sub>2</sub>O/ Na<sub>2</sub>O>1,与俄罗斯或北美被动陆缘的成熟度高的 化学组成类似(Crook, 1974)。基于类似原理, Bhatia(1983)研究了澳大利亚东部古生代 69 个浊 积砂岩样品,并认为这些砂岩的源区构造背景为已 知的,据此提出了一系列常量元素构造环境判别图 m,包括 TiO<sub>2</sub>-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) +MgO), K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO +Na<sub>2</sub>O)-(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO)以及综合不同元素权重的 常量元素判别图解,用来区别活动大陆边缘、被动大 陆边缘、大洋岛弧和大陆弧四种构造环境。此外,一 些稀土元素以及微量元素图解也被用来判别沉积盆 地的源区大地构造背景(Bhatia, 1985; Bhatia et al., 1986).





Fig. 1 The detrital composition of modern river sands from South Africa, the Red Sea rift and the Nile.

The classification of tectonic environment is based on Dickinson et al. ,1983

(a)—Qt 代表单晶石英+多晶石英+燧石,Qm—单晶石英,F—长石,L—除燧石、碳酸盐岩颗粒和多晶石英以外的岩屑,Lt—包括燧石和多晶 石英在内的岩屑;(b-c)Q—单晶石英和多晶石英,F—长石,L—包括燧石和碳酸盐岩颗粒在内的岩屑;南非被动陆缘的数据源自 Garzanti et al. (2014),红海裂谷和尼罗河的河流砂组成据 Garzanti (2016)修改

(a)—Qt represents monocrystalline quartz, polycrystalline quartz and chert, Qm—monocrystalline quartz, F—feldspar, L—lithic fragments other than chert, carbonate fragments and polycrystalline quartz, Lt—lithic fragments including chert and polycrystalline quartz; (b-c) Q—the monocrystalline quartz and polycrystalline quartz, F—feldspar, and L represents lithic fragments including chert and carbonate fragments; The data of the South African passive margin is derived from Garzanti et al. (2014), the sandstone composition of the Red Sea rift and the Nile River, modified after Garzanti (2016)

然而,由于陆缘碎屑岩的元素地球化学信息是 母岩类型、风化强度、搬运作用、成岩作用等过程的 综合产物,在很多情况下并不能直接反映真实的物 源信息(McLennan et al., 1993;Bahlburg, 1998)。 Armstrong-Altrin et al. (2005)使用新近纪以来已 知大地构造背景的砂岩地球化学数据重新评估了 Bhatia(1983)提出的主量元素地球化学图解,结果 显示其成功率为 0%~62%,因此他们认为这些图 解不能有效推断沉积盆地的大地构造背景。事实 上,砂岩的全岩地球化学图解反映的是所有物质的 平均值,在源区是多物源的情况下(自然界通常是多 物源混合的情况),使用类似的图解会造成对大地构 造背景极大的误判(van de Kamp et al., 1986)。由 于搬运过程中水动力的影响,碎屑的粒度也会对其 地球化学组成产生显著影响(Garzanti, 2016),如 Roser et al. (1985)提出使用同一构造背景的砂岩 和泥岩在 Bhatia 图解中得到的构造环境有显著差 异。尽管全岩地球化学法使用的元素为迁移性较差 的元素,但是由于表生成岩过程中风化作用的不确 定性、埋藏成岩过程中不稳定矿物的溶解以及胶结 物和自生矿物的沉淀等(Garzanti, 2016),使得基于 全岩元素地球化学进行大地构造判别的相关图解变 得更加不准确。

### 1.3 碎屑单矿物 U-Pb 年代学

近年来,碎屑单矿物 U-Pb 年代学方法的快速 发展为恢复沉积盆地物源和大地构造背景提供了新 的途径。

#### 1.3.1 碎屑锆石 U-Pb 年龄

沉积盆地的碎屑锆石可以有效地记录源区沉积 期的岩浆活动,而岩浆岩的时代、性质、规模可以大 概反映所处的构造环境(Cawood et al., 2012)。在 汇聚背景(俯冲)下,通常发生大规模的岩浆活动,且 形成的中酸性岩浆岩容易快速剥蚀进入相邻的沉积 盆地内,这类沉积盆地中最年轻的碎屑锆石年龄峰 与沉积年龄相似;而在拉张背景下,通常以镁铁质的 岩浆活动为主,同沉积的岩浆活动中锆石产出量相 对较小,这类沉积盆地中最年轻的碎屑锆石年龄峰 通常比其地层的沉积年龄大几十甚至几百个 Ma (Cawood et al., 2012)。基于以上原理, Cawood et al. (2012)通过对全球已知构造背景的沉积盆地碎 屑锆石年龄谱的统计分析,提出识别汇聚(I;俯冲)、 碰撞(II)或拉张环境(III)的碎屑锆石累积密度曲线 分布图解(图 2a)。该图解利用单颗粒碎屑锆石的 结晶年龄(CA)与所属地层的沉积年龄(DA)之差为 横坐标(定义为滞后(lag)时间),累积分布概率为纵 坐标,显示出在俯冲背景下,大于 30%的锆石颗粒 的滞后时间小于100Ma,而碰撞背景下,大于5%且 小于 30%的锆石颗粒的滞后时间小于 100Ma,在拉 张背景下,锆石颗粒的滞后时间小于 150 Ma 的仅 不到 5%(图 2a)。

事实上,仅靠碎屑锆石年龄的统计学方法进行 构造背景判别依然存在一些问题:首先,锆石在碎屑 岩中的平均含量约为0.02%(Taylor et al.,1995), 因此只是将视野关注于碎屑锆石本身会使其余 99.98%的信息被弱化(Garzanti,2016);其次,锆石 的产出能力与基岩的地质条件、风化、岩性等多种因 素有关(Malusà et al.,2020),因此不同源区锆石 的产出能力也会影响碎屑锆石概率图解对源区大地 构造属性的判别,如拉张背景下的 A 型岩浆岩同样 可以为盆地提供大量的同沉积活动的岩浆锆石 (Pereira et al., 2020);第三,受水动力分选的影响, 不同粒度的砂岩中产出的碎屑锆石年龄的峰谱也有 显著差异(Ibanez-Mejia et al., 2018)。

为了进一步验证该图解的有效性,本文选取了 喜马拉雅造山带两侧被动大陆边缘(特提斯喜马拉 雅)、活动大陆边缘(日喀则弧前盆地)和后碰撞沉积 盆地三个已知构造背景下的碎屑错石年龄进行验证 (图 2a)。可以看出,虽然特提斯喜马拉雅侏罗系、 日喀则弧前盆地的碎屑错石分布符合 Cawood et al.(2012)提出的图解特征(图 2a),但是属于印度北 缘拉张背景下的早白垩世卧龙砂岩落入了图解中碰 撞相关区域,而碰撞后背景下的冈仁波齐砾岩则落 入了图解中的俯冲相关区域。此外,Pereira et al. (2020)利用澳大利亚北部前寒武纪弧后盆地和美国 怀俄明州的大绿河前陆盆地来验证上述图解,结果 也显示该图解不能完全反映其真实的大地构造 环境。

### 1.3.2 碎屑金红石 U-Pb 年龄

最近,碎屑金红石 U-Pb 年龄同样被认为对于 恢复源区大地构造背景具有重要意义(Pereira et al., 2020)。由于金红石的形成与变质作用密切相 关,因此其主要分布在与造山作用有关的俯冲和碰 撞阶段相关的盆地;在拉张环境下,低压变质作用很 难形成大量的金红石。通过汇集全球已知大地构造 背景的碎屑金红石年代学数据库, Pereira et al. (2020)提出了可以区别裂谷-被动陆缘环境、大陆俯 冲(汇聚)环境、碰撞环境相关的概率累积分布图解 (图 2b, c)。该图解的构建思路与 Cawood et al. (2012)提出的碎屑锆石概率累积分布图解基本相 似,只是金红石年龄的图解更趋向于利用线形来区 别构造环境("s"型为拉张环境,"r"型为汇聚环境)。 事实上,由于地质构造演化的复杂性,利用相对并不 丰富的碎屑金红石数据形成的图解仍存在很大问 题,如缝合带之上发育的裂谷盆地的累积分布线型 与汇聚环境下的弧前或弧后盆地很难区别(图 2b, c,线型1和线型3),后碰撞的喜马拉雅前陆盆地现 代河流砂中的碎屑金红石年龄累积分布曲线也与俯 冲背景下的相关盆地很相似(图 2b, c, 线型 2 和线 型 3; Pereira et al., 2020)。由于金红石 U-Pb 年代 学的封闭温度明显低于锆石(前者 570 ℃左右,后者 超过 900℃, Hodges, 2014), 因此金红石年龄的热重 置和源区复杂的剥露历史也会使其概率分布图变得

复杂、多解。另外,与锆石等单矿物类似,其同样受 控于沉积环境及水动力分选的控制,而造成的潜在 差异是不容忽视的(Garzanti, 2016)。

综上,仅仅利用碎屑单矿物的年龄分布来反 映源区大地构造背景具有明显的片面性与局限 性,没有考虑沉积再循环的影响,并不能捕捉源区 的全部信息,因此该方法的推广和使用需要非常 谨慎。

#### 1.4 小结

无论是砂岩的碎屑组成还是全岩元素地球化学 图解,判别源区大地构造背景时均不能全面地反映 源区的信息。这是因为砂岩是经过充分混合的产 物,不同时代、不同大地构造背景的碎屑物质混合在 一起的投点得到是混合的组分特征。例如现今长江 口的沉积物组成就是青藏高原东部、秦岭-大别造山 带、华北板块、扬子板块、华夏板块等不同物源区混 合的结果(He Mengying et al.,2013)。当然,在盆 地为单一物源区的情况下,类似的图解可能会起到 较好的效果,但这种情况在自然界是少数现象。

同样的,仅仅利用单矿物的 U-Pb 年代学进行 大地构造背景的判别也是片面的,首先单矿物相对 于全岩的含量始终处于次要地位(如锆石,平均约为 0.02%),且单矿物的产出能力差异很大,水动力的 分选也会影响单矿物的富集。因此只有在确定潜在 源区单矿物产出能力的情况下,分析不同沉积环境 下不同粒径砂岩的单矿物年龄峰谱或许可作为判别 大地构造背景的一个依据。我们也注意到,基于单 矿物年代学的大地构造判别图解对于原始沉积构造 缺乏地区或者多期次变形变质的前寒武纪研究而 言,可以提供一些重要的信息。



#### 图 2 基于全球碎屑锆石和金红石 U-Pb 年龄累积分布曲线得到的盆地大地构造环境图解

Fig. 2 Diagram of basin tectonic environment based on cumulative U-Pb age distribution of detrital rutile and zircon CA-结石的结晶年龄,DA-所属地层的沉积年龄。(a)-碎屑锆石 U-Pb 年龄的累积分布图解(底图据 Cawood et al., 2012),I 代表汇聚(俯冲)环境,III 代表碰撞环境,III 代表拉张环境,其中日喀则弧前盆地数据源自 An Wei et al. (2014),岗仁波齐盆地和柳区盆地的数据源自 Wang Jiangang et al. (2010, 2013),印度北缘早白垩世卧龙砂岩源自 Hu Xiumian et al. (2010),印度北缘侏罗纪被动陆缘数据源自 Neupane et al. (2020)。(b-c)-基于碎屑金红石 U-Pb 年龄的盆地构造环境图解(修改自 Pereira et al., 2020)

CA—crystallization age of zircon grains, DA—sedimentary age of strata. (a)—The cumulative U-Pb age distribution diagram of detrital zircon (modified after Cawood et al., 2012), I—convergence (subduction) zone, II—collision zone, III—extension zone. The Xigaze forearc basin data is derived from An Wei et al. (2014), and data of the Gangrinboche and Liuqu basins are derived from Wang Jiangang et al. (2010, 2013), the data of the Early Cretaceous Wölong sandstone in the northern margin of India is derived from Hu Xiumian et al. (2010), and the data of the Jurassic passive continental margin in the northern margin of India is derived from Neupane et al. (2020). (b-c)—Diagram of basin tectonic environment based on cumulative U-Pb age distribution of detrital rutile (modified after Pereira et al., 2020)

### 2 原型盆地恢复的要素

沉积盆地原型恢复是一项复杂的工作,我们认 为,不能简单地从沉积物质组成(无论是全岩还是单 矿物)一个维度的研究而获得。经过在青藏高原和 华南沉积盆地的实践,以及对阿尔卑斯、伊朗、土耳 其、美国西海岸沉积盆地的调研和考察,我们认为, 原型盆地恢复的要素至少要包括以下五个方面(图 3)。

#### 2.1 清晰的盆地顶底界面

原型盆地恢复是有时间概念的,是指某一特定 时间段的原型盆地恢复。原型盆地恢复的时间对象 是介于上下区域性不整合界线(分别称之为盆地顶 底界面)的一套具有相同大地构造背景的沉积体。 从延续的时间来看,两个不整合界线限定的就是沉 积盆地的生命周期,通常为几千万年,可以很短仅几 个 Ma,也可以超长时间达几亿年。相比较而言,这 样的沉积盆地比 Roberts et al. (2012)提出的构造 巨层序(TSM)还要高一级。盆地顶底界面代表着 沉积盆地类型的改变。一般而言,盆地顶底界面都 表现为角度不整合界线。连续的沉积过渡通常不会 发生沉积盆地性质的改变,因为这不符合"大地构造 控盆"的基本原则。因此,对于一个新的研究地区, 原型盆地恢复的第一项工作就是确定沉积盆地垂向 序列上的顶底界面。对这些不整合的精确厘定(时 间和空间)是理解沉积盆地大地构造背景的重要基 础。在没有弄清楚盆地顶底界面、不整合界线的时 代和性质就讨论其大地构造背景是不现实的,也不 科学。从这个角度来说,一个地区的沉积演化历史 可以看作是时间序列上不同原型盆地的叠合演化 历史。

### 2.2 明确的古地理环境

准确建立沉积盆地多个剖面或点的时空古地理 变迁历史是进行原型盆地恢复的重要基础。一些沉



图 3 原型盆地恢复的要素卡通示意图

Fig. 3 A cartoon sketch of the elements of the prototype basin reconstruction

积盆地只发育在陆地环境,一些盆地只发育在海洋 环境,而更多的盆地是多个沉积环境的演变。沉积 盆地是随着大地构造背景的演化而演化的。例如裂 谷-大陆边缘盆地一般会区域上显示冲积扇、河流、 湖泊、浅海、陆棚、深海环境这些环境中某几个依次 顺序叠置的过程;而弧前盆地无一例外地会显示深 海-浅海-陆相的古地理环境的演化过程。海沟盆地 的沉积环境都以深海碳酸钙补偿深度(CCD 面)之 下为特征,同时出现滑塌、滑移等重力流(Hu Xiumian et al., 2020)。古地理环境的重建, 不仅需 要考虑单个剖面时间序列的沉积环境,更需要考虑 平面上沉积相的空间组合关系。这些需要建立在详 细的地层学、沉积学和古地理学数据基础上。另外, 古地理环境的重建也包含古水深、古气候、古海洋、 古地貌演变等信息,这些都在次一级时间尺度深刻 影响着沉积盆地的沉积作用。

#### 2.3 定量化的物源分析

尽管沉积物质的组成不能直接用来获得准确的 大地构造背景,但却可以用作有效的物源分析指标, 用于判断沉积盆地组合在时间序列上、空间尺度上 是否存在明显的物源变化,来阐明不同地区时间-空 间上物源变化规律,进而用来推断盆地的大地构造 背景是否发生了改变。理论上,沉积盆地大地构造 性质的改变必然会反映在盆地的物质组成上。通过 沉积物质组成,可以直接反映源区的物质变化,而这 是进行原型盆地恢复的重要参数。源区是否存在弧 火山、蛇绿岩、超高压变质岩、裂谷火山作用等对于 原型盆地恢复意义重大。物源分析不仅要弄清楚沉 积物质的组成和来源,更需要获得古水流、古水系的 信息。随着分析技术的快速发展,物源分析不仅可 以准确重建源区的位置,重建"源-汇"过程和古水 系,结合碎屑低温热年代学还可以定量刻画源区的 隆升历史,实现真正意义上的"盆-山耦合"的研究。

#### 2.4 动态的盆地构造分析

盆地构造分析对于原型盆地恢复有重要意义, 如前陆盆地周缘普遍发育的冲断带,裂谷盆地发育 的同生正断层等,都可作为盆地原型恢复的重要依 据。这就需要对沉积盆地和相邻地体的构造地质进 行详细的调查和研究。

盆地的构造分析还包括构造沉降分析。地层回 剥法综合考虑了压实作用、负载作用、古水深、海平 面等一系列影响沉积盆地构造沉降的因素,其获得 的不同时代构造沉降量和沉降曲线反映了大地构造 对沉积盆地的控制,因而可以用来判别时间序列上 沉积盆地性质是否发生了改变,尤其是一些明显受构造控制的沉积盆地,如不同类型的前陆盆地 (Sinclair et al., 2012)、断陷盆地等,可以从构造沉 降量上明显表现出来。需要说明的是,沉积盆地的 沉降机制的控制因素众多(Allen et al., 2005),每一 个盆地沉降机制并不是唯一的,多数情况下受多种控 制因素叠加影响,目前的技术还很难定量区分每一种 沉降机制对总构造沉降的贡献。因而构造沉降曲线 本身很难区分沉积盆地的原型。需要提及的是,近年 来许多学者认识到,沉积盆地的沉降也受地幔的影 响,如动力地形的产生(Liu Shaofeng et al., 2016)。

#### 2.5 综合的盆地外围研究

早在1974年,William R Dickinson 在考虑沉积 盆地大地构造性质划分时就提出三条基本原则:① 盆地基底的类型,包括陆壳、洋壳、过渡壳等;②控制 盆地的板块边界的类型,包括离散型、汇聚型、转换 型、混合型;③沉积盆地离板块边界的距离,如根据 距离海沟向活动大陆弧一侧可依次有弧前盆地、弧 间盆地、弧背(挤压)或弧后(拉张)盆地等。因此,在 进行沉积盆地原型恢复时要考虑这三条基本原则, 也就是要关注沉积盆地的基底,查明盆地的边界类 型及其与沉积盆地之间的地体及其相互关系。例 如,日喀则弧前盆地基底洋壳的确认对于认识该盆 地的演化及其与雅鲁藏布蛇绿岩的关系具有重要的 意义(An Wei et al., 2014; Wang Jiangang et al., 2017)。西瓦里克盆地的发育就与喜马拉雅逆冲断 裂系的发育密切相关,因而被认为是典型的喜马拉 雅周缘前陆盆地,呈狭窄的线性分布于喜马拉雅 山前。

### 2.6 原型盆地恢复存在的问题

原型盆地恢复还存在一些问题,导致在现实操 作中困难重重。简列几条,希望起到抛砖引玉的作 用,需要今后工作中不断总结和完善:

(1)国际学术界缺乏一个统一的沉积盆地分类 方案。绝大多数学者采用基于大地构造背景的划分 (Halbouty et al., 1970; Dickinson, 1974; Dickinson et al., 1976; Bally et al., 1980; Kingston et al., 1983; Klein, 1991; Ingersoll, 1988,2012; Liu Chiyang et al., 2015)。但一些沉 积盆地在这些分类方案中都没有包括,例如广泛分 布在造山带内部的山间盆地、明显受海平面变化控 制的沉积盆地等。也有一些学者过分强调盆地的沉 降机制作为盆地分类的要素(Allen et al., 2005)。 这就导致原型盆地恢复在术语体系中存在很大的不 一致,增加了认识上的困难。Liu Chiyang et al. (2015)曾精辟地总结"以偏概全、将今论古、词不达 意"三个表现是我国学术界对沉积盆地类型理解方 面的突出问题。

(2)近年来研究表明,既存在单一动力学机制下 形成的沉积盆地,也存在几种动力学机制在同一时 期形成的沉积盆地,有学者称之为"复合盆地"。例 如北拉萨班戈地区早白垩世晚期既有受新特提斯洋 俯冲相关的多尼组,又发育受拉萨-羌塘碰撞相关的 多巴组,形成弧后-周缘复合前陆盆地(Lai Wen et al., 2019a)。

(3)越来越多的研究者认识到,每一个沉积盆地 都是独特的。即便是同一类大地构造背景的沉积盆 地,也总是表现出明显的差异性。目前,在造山带研 究中,针对每一类沉积盆地,尚未总结出可靠的、有 效的判别标准,这进一步造成了原型盆地恢复的困 难和不确定性,也是导致争议的一个重要原因。

## 3 喜马拉雅造山带沉积盆地与大陆动 力学

喜马拉雅造山带是印度板块与亚洲板块拼贴的 产物,完整地记录了新特提斯洋俯冲、印度-亚洲大 陆碰撞以及后碰撞造山带垮塌等一系列过程(Xu Zhiqin et al.,2021),是研究造山带大陆动力学的 "天然实验室",其所属的一系列盆地也是全球尺度 内研究程度相对较高的区域,因此对该造山带沉积 盆地的详细剖析对理解沉积盆地与大陆动力学之间 的联系有重要意义(表 1;图 4)。

### 3.1 新特提斯洋南缘:印度北缘被动大陆边缘盆地

印度北缘被动大陆边缘盆地位于特提斯喜马拉 雅带,从印度西北的赞斯卡地区,一直延伸到中国西 藏地区,东西向延伸近1500 km,其北侧边界是雅 鲁藏布江缝合带,南侧边界为藏南拆离系(STD)分 隔的高喜马拉雅带(Gansser, 1964)。特提斯喜马 拉雅的基底为前奥陶系碎屑岩、碳酸盐岩。关于印 度北缘何时变为被动大陆边缘盆地缺乏统一的认 识,一些学者把整个特提斯喜马拉雅作为一个沉积 盆地,把底界应该放到奥陶系与盆地基底的不整合 界线处(Garzanti et al., 1986)。如果事实确实如 此,这个盆地存在的寿命超过4亿年,是一个超级长 寿的沉积盆地。也有一些学者认为只有中生代时期 才是被动大陆边缘盆地(Liu Guanghua et al., 1994: Willems et al., 1996: Jadoul et al., 1998: Garzanti, 1999)。另外一个令人迷惑不解的问题 是:长期以来有些学者认为拉萨或者羌塘地体是从 印度北缘分裂的,然而在现今特提斯喜马拉雅地体 内,至今没有发现明显的裂谷阶段的沉积记录,这需 要进一步深入研究。



图 4 印度-雅鲁藏布缝合带和喜马拉雅造山带简化地质图(修改自 DeCelles et al., 2018b) Fig. 4 Simplified geological map of India-Yarlung Zangbo suture zone and Himalaya orogenic belt (modified after DeCelles et al., 2018b)

		Table 1 Ch <sup>a</sup>	aracteristics	of sediment	tary basins in the Hin	nalaya orogenic	belt (see text descr	iption for referenc	es)	
盆丸	也类型与名称	分布特征	形状	时代	顶底界面	沉积环境	物源	构造沉降	基底	相邻地体
被	印度北缘被动大 陆边缘盆地	平行于缝合带走向 分布	寬长形	? 輿 陶纪- 古近纪	? 奧陶系角度不整 合为底界:宗浦组顶 部不整合为顶界	南带浅海环境,北带徐罗虎,北带徐罗纪-白垩纪为深水环境	印度北缘泛非造山 带和板内火山作用	构造沉降曲线平缓、延伸长、斜摩、近降速率向十、沉降速率向上 上,沉降速率向上 呈指数衰减	印度大陆陆壳	北侧是雅鲁藏布江缝 合带,南侧为藏南拆离 系 分隔的高喜马拉 雅带
	日喀则弧前盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	白 垩 纪-古 近纪	底界为冲堆组,顶界 为曲贝亚组	深海-半深海→ 陆棚-三角洲、 河流	冈底斯弧和中拉萨 地体	由下向上,沉降速 率先加快后减慢,	茶売	北侧与冈底斯弧相邻, 南侧与雅鲁藏布蛇绿 岩带相邻
大 冲 洋 相 ィ 術 邦 地	雅鲁藏布海泊盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	晚白垩世	顶底界 由于构造作 用不明	深水海底扇	冈底斯弧和中拉萨 地体		基 底 不 明, 推 测为洋壳	南侧为特提斯喜马拉 雅被动陆缘沉积,北侧 为俯冲杂岩和雅鲁藏 布蛇绿岩
	林周弧后-弧背叠 合盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	晚徐罗世- 晚白垩世	底界不明:顶界为设 兴组与林子宗群角 度不整合	河流-沿岸平原 →河流	早期北拉萨,晚期 冈底斯弧	由下向上,沉降速 率先加快后减慢	冈底斯弧	南侧为冈底斯岩浆弧, 北侧为北拉萨地体
同碰撞 沉积盆地	桑单林同碰撞沉 积盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	古近纪	底界为秦单林组亚 洲物源砂岩层开始 出现,顶界不明	深 海-半 深 海- 浅海-三角洲	冈底斯弧和中拉萨 地体	/	印度被动陆缘 远端	南侧为特提斯喜马拉 雅,北侧为俯冲杂岩和 日喀则弧前盆地
后碰撞	冈 仁 波 齐 伸 展 盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	渐渐世末 期-早中新 世	底界为冈仁波齐砾 岩与冈底斯弧不整 合,顶界冲断不明	曲流河、湖泊- 辫状河	因底斯弧、日喀则 弧前盆地、蛇绿岩 以及墙生楔		冈底斯弧或雅 鲁藏布缝合带	北侧与冈底斯弧相邻, 南侧与日喀则弧前盆 地或雅鲁藏布缝合带 相邻
び 谷 七	柳区山间盆地	平行于缝合带走向 分布	狭长形	早中新世	底界为蛇绿岩套,顶 界不明	冲积扇-辫状河	雅鲁藏布缝合带和 特提斯喜马拉雅	/	雅 鲁 藏 布 缝 合带	北侧为雅鲁藏布缝合 带蛇绿岩,南侧为蛇绿 岩、俯冲杂岩、特提斯 喜马拉雅
造山带裂 谷盆地	札达-吉隆裂谷 盆地	垂直于缝合带走向 分布	狭长形	晚中新世- 更新世	前中新世喜马拉雅 地体为基底,顶界多 为第四系	冲 积 扇-辫 状 泡、递泊	物源复杂,来自周 围邻近的地体		相邻地体作为 基底	高喜马拉雅、低喜马拉 雅、特提斯喜马拉雅、 雅鲁藏布江缝合带、冈 底斯弧

表1 喜马拉雅造山带沉积盆地的基本特征(参考文献见正文描述)

特提斯喜马拉雅古生代整体为浅水环境沉积, 多分布在南带,发育典型的冈瓦纳大陆属性的舌羊 齿(Glossopteris)植物群、冷水动物群以及晚石炭世 冰碛岩(Sun Dongli, 1993; Jin Xiaochi, 2002)。中 生代时期,特提斯喜马拉雅显示"南浅、北深"的古地 理格局。在特提斯喜马拉雅南带,早侏罗世早期以 潟湖-障壁岛沉积的细粒石英砂岩和陆源碎屑岩-碳 酸盐岩混合沉积为特征,早侏罗世中期发育灰白色 中-厚层生物碎屑灰岩,为碳酸盐岩台地沉积(Han Zong et al., 2016); 早侏罗世晚期-中侏罗世, 发育 深灰色薄层泥灰岩、粒泥灰岩夹鮞粒泥粒灰岩、颗粒 岩,局部见细粒陆源石英碎屑,为碳酸盐缓坡沉积 (Han Zong et al., 2016)。中侏罗世主要为暗红 色、黄褐色铁质鮞粒砂岩夹黄绿色页岩、灰色钙质页 岩,形成于外陆棚环境(Jadoul et al., 1998);晚侏 罗世为黑色、黄绿色含碳酸盐岩质或磷质结核的页 岩、粉砂质页岩、粉砂岩夹砂岩,形成于浅水陆棚环 境(Jadoul et al., 1998)。早白垩世,南带早期以出 现石英砂岩、晚期出现火山岩屑砂岩为特征(Hu Xiumian et al., 2010);早白垩世末期-晚白垩世,以 广泛发育远洋-半远洋碳酸盐沉积为特征(Willems et al., 1996)。白垩纪晚期-古新世早期,在特提斯 喜马拉雅南带出现海水变浅、再旋回石英砂岩广泛 发育为标志(Garzanti et al., 2015b),之后富含底 栖大有孔虫的碳酸盐缓坡一直持续到始新世早期 (Li Juan et al. ,2013)。

特提斯喜马拉雅北带自晚三叠世开始就出现深 水相泥质岩夹砂岩地层,偶含火山岩。晚三叠世朗 杰学群以深水沉积岩为特征,广泛分布于喜马拉雅 东部(Wang Jiangang et al., 2016)。早-中侏罗世早 期发育泥质粉砂岩、硅质岩、页岩夹玄武岩,为深水 盆地沉积(Yu Guangming et al., 1990)。晚侏罗 世-早白垩世早期以石英砂岩与灰黑色页岩互层为 特征,为深海下斜坡沉积环境(Hu Xiumian et al., 2008)。早白垩世晚期主要发育灰黑色页岩夹火山 岩屑砂岩,形成于深海斜坡环境。早白垩世-晚白垩 世 Coniacian 期,以深灰色页岩含硅质、钙质页岩、 粉砂岩、灰岩为特征,沉积环境为深海斜坡下部-深 海盆地(Hu Xiumian et al., 2008)。晚白垩世主要 为紫红色、褐红色泥灰岩、硅质岩、灰岩,为大洋红层 沉积,形成于深水盆地环境(Hu Xiumian et al., 2005)。盆地物源区为印度克拉通北缘泛非造山带, 受早白垩世大陆裂解火山作用和白垩纪末德干大火 成岩省的影响。侏罗纪-白垩纪,印度北缘被动大陆 边缘盆地构造沉降曲线比较平缓、延伸长、斜率小, 沉降速率呈指数衰减,反映盆地以稳定沉降为主(L Juan et al.,2013)。

### 3.2 新特提斯洋北缘:大洋俯冲相关沉积盆地

### 3.2.1 日喀则弧前盆地

中生代新特提斯洋向拉萨地体的北向俯冲导致 拉萨地体南缘形成日喀则弧前盆地,分布于雅鲁藏 布缝合带中部,东西向延伸约 550km,主要接受来 自冈底斯岩浆弧和拉萨地体的碎屑物(Einsele et al., 1994; Dürr, 1996; Wang Chengshan et al., 1999)。日喀则弧前盆地的基底是雅鲁藏布蛇绿岩 的玄武岩单元(An Wei et al., 2014; Wang Jiangang et al., 2017),由下向上依次沉积了白垩 纪深水环境的冲堆组、昂仁组和浅海-海陆过渡环境 的帕达那组、曲贝亚组(Liu Chengjie et al., 1988; Yin Jixiang et al., 1988; Wang Chengshan et al., 1999),印度-亚洲大陆初始碰撞后继续沉积古近纪 曲下组和加拉孜组(Wang Chengshan et al., 2012; Hu Xiumian et al., 2016)。详细的物源分析表明, 日喀则弧前盆地的沉积环境及充填历史伴随着新特 提斯洋的俯冲而不断演化。冲堆组下段/桑祖岗组 沉积时期(~120~113 Ma), 盆地南北两侧分别沉 积了深水硅质岩及浅水碳酸盐,缺少陆源碎屑物质 输入;冲堆组上段-昂仁组沉积时期(Albian晚期-Santonian 晚期,113~88 Ma),盆地内广泛发育深 水浊流沉积,接受大量陆源碎屑物质,期间源区不断 从冈底斯岩浆弧向北扩展至中拉萨地体;帕达那组 沉积时期(Santonian 晚期-Campanian 期, 88~70 Ma),盆地充填基本完成,发育陆棚-三角洲-河流相 沉积,碎屑物质来自冈底斯岩浆弧及中拉萨地体;而 曲贝亚组沉积时(Maastrichtian 期 70~65 Ma),盆 地局部发育内陆棚环境,缺少陆源碎屑物质输入。 从冲堆组到帕达那组,弧前盆地显示出不断充填、水 深逐渐变浅的趋势。物源的变化指示了冈底斯岩浆 弧及中拉萨地体作为俯冲上盘随着俯冲进行不断抬 升-剥蚀的过程,但是日喀则弧前盆地主体碎屑物质 仍然以火山岩端元为主,为未切割的大陆弧提供主 要火山物质。仲巴地区古近纪加拉孜组沉积时期开 始出现相对高含量的石英组分,物源分析表明没有 新的源区加入,因此很可能代表着冈底斯弧在该时 期存在明显的剥露作用,导致大陆弧侵入岩出露 地表。

日喀则弧前盆地的发育历史清楚地表明在亚洲 大陆南缘存在成熟的"沟-弧-盆"大洋俯冲体系,类 似现今东太平洋大陆边缘。令人迷惑不解的是,日 喀则弧前盆地和美国西海岸 Great Valley Basin 一 样,是发育于洋壳基底之上的弧前盆地。然而洋壳 基底上发育弧前盆地的案例在现今大洋普遍缺乏 (Noda,2016)。基底的洋壳玄武岩端元是位于大陆 边缘圈捕的洋壳(Einsele et al.,1994)或者新生弧 前拉张的洋壳(Dai Jingen et al.,2013)还存在很大 的争论。类似于日喀则弧前盆地,在雅鲁藏布缝合 带西侧拉达克地区也发育一个 Indus 弧前盆地 (Garzanti et al.,1988),今后有必要做进一步对比 研究。

#### 3.2.2 雅鲁藏布海沟盆地

海沟盆地是俯冲体系的重要沉积储库,记录了 上覆板块的剥蚀过程和古地理、古水系演化等信息。 近年来在雅鲁藏布缝合带中段的江孜-萨嘎地区成 功识别出多套晚白垩世早期(92~81Ma)新特提斯 洋俯冲海沟盆地,包括甲查拉组、荣马瓦组、罗岗错 绢(Hu Xiumian et al., 2020; An Wei et al., 2017; Fu Hanpu et al., 2018; Metcalf et al., 2019)。通过与日喀则弧前盆地同时代的地层和物 源对比,发现东部的甲查拉组、中部荣马瓦组出现拉 萨河流域内特征的三叠纪岩浆岩源区,指示拉萨河 很可能在晚白垩世就存在(Laskowski et al., 2019);西部的罗岗错组与其毗邻的日喀则弧前盆地 具有相同的源区,指示了沉积物不同的搬运路径 (An Wei et al., 2017)。90~80Ma 雅鲁藏布海沟 盆地的出现,一种解释是当时新特提斯洋汇聚速率 的突然减少,但现有的古地磁数据并不支持这种可 能性(van Hinsbergen et al., 2011; Gibbons et al., 2015);另一种可能性是源区拉萨地体(包括冈 底斯弧和中拉萨)提供了丰富的碎屑物质,尤其是冈 底斯东部地区为甲查拉组、荣马瓦组海沟提供物源。 低温热年代学数据也表明,日喀则弧前盆地南缘在 ~90 Ma 左右出现一次快速冷却事件(Li Guangwei et al., 2017)。需要特别提及的是,最近大量研究 表明,北拉萨地区早在~90 Ma 很可能就率先隆起 (Sun Gaoyuan et al., 2017; Lai Wen et al., 2019b),可能向南提供碎屑物质,并越过尚没有隆 起的冈底斯弧进入到新特提斯洋的海沟盆地中。萨 嘎-江孜之间海沟盆地的发现,连同含有大量与海沟 盆地类似的砂岩物质的修康俯冲杂岩一起,共同说 明在雅鲁藏布缝合带中部发育了小型的增生杂岩 (An Wei et al., 2017; Metcalf et al., 2019b)。在 仲巴以西的阿里地区和仁布以东地区,雅鲁藏布缝 合带缺乏类似的俯冲杂岩、海沟盆地的记录,也没有 出现大规模的弧前盆地。在西部取而代之的是出现 仲巴地体的古生代-三叠纪变质沉积岩,可能代表一 个独立的亲印度北缘的微陆块;在东部则表现为朗 杰学地体(深水浊积岩体系)与冈底斯弧的断裂系, 间或出现蛇绿岩套物质。这些地质事实表明,白垩 纪新特提斯洋在仲巴以西、仁布以东地区主体为侵 蚀型的活动大陆边缘,沉积物质堆积的速率小于俯 冲消减的速率,因而海沟盆地处于饥饿状态,沉积物 得不到保存。

#### 3.2.3 林周弧后-弧背叠合盆地

林周盆地位于拉萨市以北堆龙-林周县一带,为 一东西向延伸的狭长盆地,其南北两侧分别与冈底 斯岩浆弧和北拉萨古生代-早中生代地层呈断层接 触。盆地的基底由于覆盖而不清楚。盆地出露最老 的岩石为中上侏罗统叶巴组火山岩和火山碎屑岩, 上侏罗统和下白垩统发育浅海相-陆相碳酸盐岩和 碎屑岩沉积。早期的地层在晚白垩世时期发生南北 向挤压变形,并在古近纪早期被林子宗火山岩覆盖 (He Shundong et al., 2007)。

林周盆地的白垩系包括楚木龙组、塔克那组和 设兴组。根据塔克那组的大型底栖有孔虫和碎屑岩 中最年轻的碎屑锆石年龄,楚木龙组、塔克那组和设 兴组的沉积时代被分别约束为~140~124 Ma、124  $\sim$ 119 Ma 和 $\sim$ 119 $\sim$ 90 Ma (BouDagher-Fadel et al., 2017; Wang Jiangang et al., 2020)。 楚木龙 组(~500 m)为一套陆相-滨岸相陆源碎屑岩沉积, 其顶部发育海侵序列,逐步过渡为滨岸-内陆棚过渡 带细砂岩、砂质灰岩和黑色页岩。塔克那组整合沉 积于楚木龙组之上,主体由灰黑色、灰色钙质泥岩、 泥灰岩和生物碎屑灰岩、砂质灰岩组成,沉积于潟湖 环境;其上部转变为灰绿色一紫红色洪泛泥质岩沉 积。设兴组沉积于塔克那组之上,以巨厚层砂岩的 出现为标志。设兴组主体为一套紫红色陆相碎屑岩 沉积,根据内部的岩相变化,可被划分为四个岩性 段,即下部河流相砂泥岩段、中部海岸平原相泥岩-泥灰岩段、上部河流相砂泥岩段和顶部辫状河相粗 碎屑岩段(Leier, 2007a, 2007b; Wang Jiangang et al., 2020).

构造沉降分析显示,林周盆地白垩纪沉积可划 分为四个沉降阶段,包括楚木龙组慢速稳定沉降阶 段(~40 m/Ma)、塔克那组-设兴组中部快速沉降 (~350 m/Ma)、设兴组上部中速沉降(~170 m/Ma) 和设兴组顶部构造抬升。物源分析显示,楚木龙组 和设兴组中下部的碎屑沉积源自北拉萨的古生代沉 积岩和近同时代的火山岩;设兴组上部碎屑岩主要 源自冈底斯,少量源自北拉萨;而设兴组顶部碎屑主 要再旋回自北拉萨,仅少量为冈底斯火山碎屑 (Wang Jiangang et al., 2020)。

基于地层、沉积、物源和沉降历史资料的综合分 析发现,林周盆地被认为记录了拉萨活动大陆边缘 由早白垩世伸展向晚白垩世安第斯型造山(挤压)的 构造转变(Wang Jiangang et al., 2020)。楚木龙组 顶部的海侵、塔克那组和设兴组中下部的快速沉降 和沉积作用记录了区域拉张作用;设兴组上部地层 记录了伸展作用结束后的热沉降;设兴组顶部的沉 积相变和粗碎屑岩沉积标志着区域挤压作用的开 始,之后,拉萨活动陆缘进入安第斯型造山阶段,林 周盆地沉积作用结束。

林周盆地所记录的构造转换过程在拉萨地体中 西部也有记录。则弄群火山岩、多尼组火山碎屑岩 对应于主伸展期;郎山灰岩对应伸展后热沉降期;而 达雄组、竟柱山组等陆相砾岩的沉积代表安第斯型 造山作用(挤压构造)的开始,其时间大概为 92 Ma (Sun Gaoyuan et al., 2015; Lai Wen et al., 2019b)。

#### 3.3 桑单林同碰撞沉积盆地

印度-亚洲大陆初始碰撞时间被精确限定在 59 ±1Ma,主要证据来自萨嘎地区桑单林剖面(Hu Xiumian et al, 2015)。剖面下部碰撞之前的深水沉 积被称之为蹬岗组,被认为属于印度大陆北缘斜坡-盆地过渡沉积,以硅质页岩夹薄-厚层石英砂岩为特 征,硅质页岩代表盆地相,石英砂岩代表浊流沉积, 物源来自沉积区南侧的印度大陆(Wang Jiangang et al., 2011; Hu Xiumian et al, 2015, 2017)。蹬 岗组之上,出现来自印度来源的石英砂岩和来自亚 洲来源的岩屑砂岩交互沉积的现象(桑单林组),这 被解释为初始碰撞事件的产物,沉积环境也被限定 为同碰撞时期的海沟盆地(Hu Xiumian et al., 2015)。随后单向的亚洲物源占据了该同碰撞海沟 盆地(者雅组),一直持续到者雅组结束。详细的物 源数据表明,桑单林组上部和者雅组沉积时期,物质 组成与仲巴地区同时期曲下组和加拉孜组相同,来 自紧邻北侧的冈底斯岩浆弧和中拉萨地体,推测水 系以垂直海沟的纵向搬运为主(Wang Jiangang et al., 2011; DeCelles et al., 2014; Wu Fuyuan et al., 2014; Hu Xiumian et al., 2015)。需要指出的 是,桑单林组和者雅组也有学者认为是周缘前陆盆 地的前渊沉积(Ding Lin, 2003; DeCelles et al., 2014, 2018b)。根据前陆盆地的定义,褶皱逆冲带构造的发育是其必备条件,导致下伏板片岩石圈挠曲形成楔形的沉积盆地(Beaumont, 1981; DeCelles et al., 1996)。在没有足够证据表明桑单林组和者雅组沉积时期(古新世中晚期)雅鲁藏布造山带发育同期褶皱逆冲带构造之前,我们认为采用构造地理位置原则将其命名为同碰撞海沟盆地更贴切。

在特提斯喜马拉雅定日遮普热山、岗巴宗山和 亚东县堆纳地区,始新世底栖大有孔虫灰岩(宗浦 组)之上出现一套碎屑岩系,由下部灰绿色页岩夹砂 岩的恩巴组和紫红色页岩夹少量砂岩的扎果组组成 (Li Xianghui et al., 2000; Wang Chengshan et al., 2002)。恩巴组与下伏宗浦组呈低角度不整合接触, 界线处见硬底构造,代表着宗浦碳酸盐缓坡的淹没。 恩巴组为前三角洲-三角洲前缘环境,扎果组沉积环 境主体为三角洲平原。时代很可能延续到 45 Ma 之后。与基堵拉组砂岩组成差异明显,恩巴和扎果 组砂岩组成与桑单林组-者雅组、加拉孜组等类似, 含有丰富的中酸性岩屑,碎屑组分、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成显示物源来自亚洲冈底斯弧 和中部拉萨。恩巴组-扎果组沉积时期,喜马拉雅山 系尚未形成,大反转逆冲断裂(GCT)也没有发育, 冈底斯山脉的碎屑物质直接越过雅鲁藏布缝合带被 搬运到特提斯喜马拉雅定日-岗巴-堆纳地区;类似 现今的波斯湾地区,通过大陆水系搬运的方式持续 接受来自北侧伊朗高原的碎屑物质。

这一阶段的沉积盆地记录保留下来的露头太 少,使得对这个阶段沉积盆地演化和大陆动力学的 研究有待进一步深入。此外,印度-亚洲同碰撞沉积 盆地还存在一些重要问题没有解决,比如印度-亚洲 大陆在走向上是否存在明显的穿时碰撞、海相地层 最后消失的确切时代。从现有的资料来看,定日地 区海相地层的时代消失的比岗巴地区早,而最晚消 失的是堆纳地区,显示出从西向东的穿时退出的特 征,这仍需要进一步深入开展生物地层和年代地层 的工作。

### 3.4 喜马拉雅后碰撞沉积盆地

### 3.4.1 冈仁波齐伸展盆地

沿冈底斯弧南麓分布着一套粗碎屑岩沉积,西 起冈仁波齐地区甚至印度河流域(Indus Group 可 能为冈仁波齐砾岩的相当沉积),东至南迦巴瓦峰附 近,延伸超过1300 km。这套地层曾被赋予许多区 域性的名称,如秋乌组、大竹卡组、恰布林组、大竹卡

151

砾岩、罗布莎砾岩、冈底斯砾岩等(Aitchison et al., 2002)。在1:25万地质图中,这套地层被统一定义为大竹卡组;而在许多英文文献中,它被称为冈仁波齐砾岩(Aitchison et al., 2002; DeCelles et al., 2011)。

冈仁波齐砾岩常在其北侧与冈底斯岩基及相关 的火山岩呈不整合沉积接触,而在南侧位于大反转 逆冲断裂(GCT)下盘,与日喀则弧前盆地或俯冲杂 岩呈断层接触。由于后期构造破坏严重且遭受不同 程度的剥蚀,冈仁波齐砾岩的总厚度很难确定。在 一些地区,其保存的厚度可达2 km(DeCelles et al.,2011; Wang Jiangang et al.,2013; Leary et al.,2016a)。根据地层中火山灰的锆石年龄以及砂 岩中碎屑锆石的最年轻年龄,约束冈仁波齐砾岩的 沉积时代为渐新世末期-早中新世(26~18 Ma; Aitchison et al.,2002; DeCelles et al.,2011)。并 且,自西向东有整体变年轻的趋势(Leary et al., 2016a)。

尽管冈仁波齐砾岩的岩相沿走向并不完全一 致,且由于保存条件的差异以及缺少标志性地层,难 以有效地进行区域对比,但根据目前的资料看,冈仁 波齐砾岩在垂向上存在系统的演化规律。冈仁波齐 砾岩下部发育河湖相沉积(以冈仁波齐地区保存最 好),其碎屑物完全来自于冈底斯弧;而上部发育河 流相(曲流河-辫状河)沉积,碎屑物质同时来自盆地 两侧(北侧冈底斯弧和南侧日喀则弧前盆地、蛇绿岩 以及俯冲杂岩),且南侧物质的比重随时间逐渐增加 (DeCelles et al., 2011; Wang Jiangang et al., 2013; Li Shun et al., 2017)。

冈仁波齐盆地的形成被解释为俯冲的印度板片 发生反转、撕裂和断离的结果(DeCelles et al., 2011; Leary et al., 2016a)。在渐新世末期,俯冲 到亚洲大陆之下的印度板片发生反转,倾角变陡,引 起冈底斯南缘发生短暂的伸展作用,导致了冈仁波 齐盆地的形成,部分伸展程度较大的地区甚至出现 了巨厚的湖相沉积。这一时期,沉积物几乎全来自 伸展作用的下盘——冈底斯弧。紧接着,印度板片 发生了断离作用,印度和亚洲大陆之间发生"硬碰 撞",导致一系列逆冲断裂的发育和喜马拉雅山脉的 全面隆升。因此,南侧的源区开始为冈仁波齐盆地 提供碎屑物质。由于印度板片的断离在东西方向上 存在差异,导致冈仁波齐砾岩的沉积具有穿时性。 随着挤压作用的持续,大部分的冈仁波齐砾岩被卷 入大反逆冲转断裂(GCT)的下盘,上地壳在南北向 发生了强烈的缩短。

值得注意的是,冈仁波齐砾岩上部的河流相地 层沉积于喜马拉雅山脉和冈底斯山脉之间,很可能 是雅鲁藏布江最早期的沉积记录。根据初步的古水 流测量,冈仁波齐砾岩上部的古水流方向主体向西, 与现今水流方向相反。现代雅鲁藏布江的形成应可 能更晚,并且发生了流向的反转(Wang Jiangang et al., 2013)。

### 3.4.2 柳区山间盆地

柳区砾岩主要分布在日喀则地区拉孜至白朗一带,常与雅鲁藏布蛇绿岩相伴出现,但据1:25万区 调报道,它在更西部地区也有零星分布。野外构造 关系分析显示,柳区砾岩常与南北两侧的地质体呈 断层接触关系,仅在少数地点不整合于硅质岩或蛇 绿岩之上(Leary et al., 2016b)。在柳区砾岩北侧, 日喀则蛇绿岩逆冲其上;而在南侧,逆冲断层上盘包 括蛇绿岩、俯冲杂岩和特提斯喜马拉雅沉积岩。柳 区砾岩的沉积时代长期存在争议,早期根据地层中 发现的植物化石和孢粉化石,认为沉积时代为晚始 新世到渐新世(Fang Aimin et al., 2006; Wei Lijie et al., 2011),但最近的锆石裂变径迹年龄分析和 野外构造关系解析表明,其沉积时代很可能为早中 新世,时代比冈仁波齐砾岩略晚(18~16 Ma, L Guangwei et al, 2015; Leary et al., 2016b)。

柳区砾岩整体为一套紫红色粗碎屑岩,主要沉积于冲积扇和辫状河环境,显示近源快速堆积的特征(Davis et al., 2002)。由于构造破坏,柳区砾岩的沉积厚度无法恢复,但根据剖面测量,其最大保存厚度可达2km。柳区砾岩的砾石成分复杂,包括基性岩、超基性岩、硅质岩、岩屑砂岩、石英砂岩、板岩等。物源分析显示,柳区砾岩同时包含了源自印度、亚洲陆缘和缝合带的碎屑物质(Wang Jiangang et al., 2010)。

由于柳区砾岩的沉积时代存在争议,它的沉积 模式亦未有统一认识。但毫无疑问,柳区砾岩的沉 积与印度-亚洲大陆碰撞之后沿雅鲁藏布缝合带的 构造 抬升有关(Wang Jiangang et al., 2010)。 Leary et al. (2016b)根据柳区砾岩的沉积特征、主 体向北-西北的古水流方向以及物源分析结果提出, 柳区砾岩的沉积很可能与早中新世的大反转逆冲断 裂构造(GCT)有关,其碎屑物质来源于沉积区南侧 的雅鲁藏布俯冲杂岩。

### 3.4.3 札达-吉隆裂谷盆地

藏南地区中新世以来发育一序列走向南北的裂

谷系,这些裂谷系切穿了雅鲁藏布缝合带和喜马拉 雅造山带,伴随着这些地堑的诞生,发育了一系列裂 谷盆地。这些盆地属喜马拉雅造山带最年轻的一批 沉积盆地,出露和保存也相对完整。相比较而言,札 达盆地、普兰盆地、吉隆盆地和 Thakkhola 盆地研 究资料较多。札达盆地充填了>800 m 厚的陆相沉 积,主要由砂岩、粉砂岩、湖相泥灰岩和砾岩,序列上 呈现出由粗变细,再变粗的"三明治"结构(Saylor et al., 2009, 2010), 开始于~9.2 Ma 并延续到<1 Ma(Saylor et al., 2009, 2010)。普兰盆地沉积了> 500 m 厚向上变粗的砂-砾岩沉积,属于冲积扇-辫状 河沉积体系,沉积时代约束在 8.7~6.8 Ma (Murphy et al., 2002)。Thakkhola 盆地由~240 m 厚的 Tetang 组和~800 m 厚的 Thakkhola 组构 成,主要由巨砾岩、砂岩、灰岩、粉砂岩构成,为冲积 扇-辫状河沉积体系(Garzione et al., 2003)。沉积 开始于 11 Ma,并延续至~7 Ma 之后(Garzione et al., 2000, 2003)。吉隆盆地由~240 m 厚的旦增珠 康组砾岩、~400 m 厚的沃马组砂岩与砾岩和厚约 32 m 的贡巴组粗砾岩共同组成,由冲积扇演化成湖 泊沉积,最后又变为冲积扇沉积环境(Xu Yadong et al., 2012),时代约束在~10.8 Ma 至>1.7 Ma 期间(Xu Yadong et al., 2012)。

这些裂谷盆地的出现,不仅作为造山带垮塌的 重要证据;而且由于裂谷盆地这种有利地形助推了 冰川和河流的发育以及对造山带的进一步侵蚀与破 坏,例如札达盆地中的 Sutlej 河、普兰盆地内的 Maja 河、Thakkhola 盆地中的 Kali Gandaki 河、吉 隆盆地内 Trisuli 河的源头段等。此外,造山带相关 的信息和物质也大量保存在这些裂谷盆地之中,例 如喜马拉雅造山带隆升的古海拔变化过程,甚至历 史最高海拔可能比现在还高 1500m 等关键信息就 保存在 Thakkhola 盆地和札达盆地的沉积物中 (Garzione et al., 2000; Saylor et al., 2009; Huntington et al., 2015)。古水流、砂岩组分等物 源分析显示,以上四个新生代裂陷盆地中的沉积物 均来自周边喜马拉雅造山带、冈底斯弧、特提斯喜马 拉雅、雅鲁藏布缝合带等构造带物质的再旋回 (Murphy et al., 2002; Garzione et al., 2003; Saylor et al., 2010; Xu Yadong et al., 2012).

### 3.5 喜马拉雅造山带大陆动力学演化

造山带沉积盆地包含了构造应力、运动学和古 环境信息,对于重建所在大陆内部的造山带应力状 态具有重要意义(Sundell et al., 2013; DeCelles et al.,2018b)。图 5 展示了基于沉积盆地反演的喜马拉雅造山带演化过程。

白垩纪-古新世中期,新特提斯洋向北发生俯 冲,仅在日喀则弧前盆地的前缘发育小型的增生杂 岩,而在西侧阿里地区和东侧山南地区很可能为侵 蚀性的大陆边缘(图5a)。约80Ma在中部发育海沟 盆地,同时发育穿越冈底斯弧的古拉萨河,把碎屑物 质搬运到雅鲁藏布海沟盆地(图5b)。约60Ma印 度-亚洲大陆发生初始碰撞,桑单林同碰撞沉积盆地 持续到始新世中期(约60~45 Ma),日喀则弧前盆 地与桑单林同碰撞沉积盆地共存(图5c)。印度大 陆北缘在特提斯洋壳的拖拽下发生俯冲,印度大陆 北缘通过刮削进入修康增生杂岩。该时期沉积盆地 继承了大洋俯冲阶段的应力,主体为南北向挤压为 主。随着特提斯洋壳板片断离的发生,40~30Ma 进入印度大陆俯冲阶段,喜马拉雅造山带及其周围 普遍缺乏沉积记录。

渐新世-中新世时期(图 5d),很可能由于俯冲 的印度大陆板片发生俯冲角度的变陡,使得平行于 雅鲁藏布缝合带发育拉张型的冈仁波齐盆地,沉积 了冈仁波齐砾岩(DeCelles et al., 2011, 2018a; Leary et al., 2016a)。冈仁波齐盆地温暖潮湿的古 环境表明当时的古海拔较低。同时,喜马拉雅逆冲 带活跃(Hodges, 2000; Kohn, 2014),沉积物从喜马 拉雅逆冲带搬到同期中新世早期前陆盆地系统中。

在西藏西部开始于约 25 Ma 的印度板块断裂, 向东发生迁移(DeCelles et al., 2011; Leary et al., 2016a; Webb et al., 2017),印度板块较浅的部分 能够再次以较低的角度向北俯冲到西藏下面。地表 以发育 GCT 为特征,同时在逆冲带前缘沉积了柳 区山间盆地(图 5e)。

中新世中-晚期,喜马拉雅地区的地壳持续缩短,印度板块向北的逆冲推力使地壳增厚,得足以均衡地支撑较高的海拔(图 5f; Styron et al., 2015)。 该时期高原开始垮塌,这导致了平行于冈底斯弧方向扩展的开始(图 5f),以及走向南北、拉张方向东西向裂谷盆地的广泛发育(Xu Yadong et al., 2012;Xu Zhiqin et al., 2021)。

### 4 结语

我国所在的亚洲大陆是多块体、多期次拼合而 成的,造山带异常发育。如何准确判别我国不同地 区、不同时期的造山带沉积盆地的大地构造性质,对 于认识大陆演化具有重要的意义。原型盆地恢复需



图 5 西藏南部晚中生代-新生代以来基于沉积盆地反演的喜马拉雅造山过程(其中 d~f 平面图参考自 DeCelles et al., 2018b)

Fig. 5 The Himalayan orogenic process based on sedimentary basin inversion since the Late Mesozoic in southern Tibet (the floor plan of the d∼f modified after DeCelles et al. , 2018b)

MCT-主中央逆冲断裂;STD-藏南拆离系;MFT-主前缘逆冲断裂;GM-纳木那尼核杂岩;MBT-主边界断裂;

GCT一大反转逆冲断裂;KF—喀喇昆仑断裂;P—普兰盆地;T—Thakkhola盆地;Y—亚东盆地;G—吉隆盆地

MCT-Main Central thrust; STD-South Tibetan detachment; MFT-Main Frontal thrust; GM-Gurla Mandhata core complex;

MBT-Main Boundary thrust; GCT-Great Counter thrust; KF-Karakoram fault; P-Pulan basin;

T-Thakkhola basin; Y-Yadong basin; G-Gyirong basin

要依赖于高质量的地层学、古生物学、沉积学、物源 分析、构造地质学、古地理学、地质年代学等基础地 质数据的获得。长期以来,我国地质工作者对沉积 盆地开展了大量的基础地质调查和研究,但是还远远达不到精确约束这些沉积盆地构造背景的程度。 客观地讲,许多沉积盆地研究程度还不够高,仍然缺 乏关键的基础地质数据。只有基础地质数据的数量 和质量同时得到保证,才能准确地恢复沉积盆地的 性质,探讨大陆动力学的演化。这在喜马拉雅造山 带沉积盆地研究中体现得淋漓尽致。

以喜马拉雅造山带沉积盆地为例,通过沉积盆 地的系统研究,可以反演该时期临近大陆的构造应 力状态、深部与浅部的相互耦合过程,也可以反演该 时期古地貌、古水系、古气候等特征,而这些正是大 陆动力学研究的重要内容。因此,从某种程度而言, 大地构造沉积学在今后相当长的时间内,对于我国、 世界大部分地区的地质学工作而言仍然是非常重要 的一项工作,对于提高我国乃至全球基础地质演化 的认识具有十分重要的现实意义。

**致谢:**感谢 Eduardo Garzanti、Hugh Sinclair、 Luba Jansa、王成善、吴福元、冯志强、李祥辉等关于 青藏高原沉积盆地的持续指导、讨论与合作。感谢 课题组成员马安林、张世杰、傅焓埔、李超、刘群等先 后参与此项研究。由于笔者水平有限,不当之处敬 请批评指正。

#### References

- Aitchison J C, Davis A M, Luo Hui. 2002. New constraints on the India-Asia collision: the lower Miocene Gangrinboche conglomerates, Yarlung Tsangpo suture zone, SE Tibet. Journal of Asian Earth Sciences, 21(3):251~263.
- Allen P A, Allen J R. 2005. Basin analysis: principles and applications. Blackwell Pub, Malden, MA.
- An Wei, Hu Xiumian, Garzanti E, BouDagher-Fadel M K, Wang Jiangang, Sun Gaoyuan. 2014. Xigaze forearc basin revisited (South Tibet): Provenance changes and origin of the Xigaze Ophiolite. Geological Society of America Bulletin, 126 (11 ~ 12):1595~1613.
- An Wei, Hu Xiumian, Garzanti E. 2017. Sandstone provenance and tectonic evolution of the Xiukang Melange from Neotethyan subduction to India-Asia collision (Yarlung-Zangbo suture, south Tibet). Gondwana Research,41:222~234.
- Armstrong-Altrin J S. Verma S P. 2005. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. Sedimentary Geology, 177(1~2):115~129.
- Bahlburg H. 1998. The geochemistry and provenance of Ordovician turbidites in the Argentine Puna. Geological Society, London, Special Publications, 142(1):127~142.
- Bally A W, Snelson S. 1980. Realms of subsidence. CSPG Special Publications, 9~94.
- Beaumont C. 1981. Foreland basins. Geophysical Journal International,65(2):291~329.
- Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. The Journal of Geology,91(6):611~627.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45(1~2):97~113.
- Bhatia M R,Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2):181 ~193.
- BouDagher-Fadel M K, Hu Xiumian, Price G D, Sun Gaoyuan, Wang

Jiangang, An Wei. 2017. For aminiferal biostratigraphy and palaeoenvironmental analysis of the mid-Cretaceous limestones in the southern Tibetan plateau. Journal of Foraminiferal Research, 47(2):188 $\sim$ 207.

- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. Geology,40(10):875~878.
- Crook K A W. 1974. Lithogenesis and geotectonics: the significance of compositional variation in flysch arenites (graywackes). Special Publications of SEPM, 304.
- Dai Jingen, Wang Chengshan, Polat Ali, Santosh M, Li Yalin, Ge Yukui. 2013. Rapid forearc spreading between 130 and 120 Ma: evidence from geochronology and geochemistry of the Xigaze ophiolite, southern Tibet. Lithos,172:1~16.
- Davis A M, Aitchison J C, Luo Hui, Zyabrev S. 2002. Paleogene island arc collision-related conglomerates, Yarlung-Tsangpo suture zone, Tibet. Sedimentary Geology, 150 (3 ~ 4); 247 ~273.
- DeCelles P G, Giles K A. 1996. Foreland basin systems. Basin Research,8(2):105~123.
- DeCelles P G, Kapp P, Quade J, Gehrels G E. 2011. Oligocene-Miocene Kailas basin, southwestern Tibet: Record of postcollisional upper-plate extension in the Indus-Yarlung suture zone. Geological Society of America Bulletin, 123 (7 ~ 8):1337~1362.
- Decelles P G, Kapp P, Gehrels G E, Ding Lin. 2014. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision. Tectonics, 33(5):824~849.
- DeCelles P G,Castañeda I S,Carrapa B,Liu Juan,Quade J,Leary R, Zhang Liyun. 2018a. Oligocene-Miocene great lakes in the India-Asia collision zone. Basin Research,30:228~247.
- DeCelles P G, Leary R J, Kapp P. 2018b. Cenozoic basin evolution in the Indus-Yarlung suture zone and High Himalaya. In: Ingersoll R V et al. (eds). Tectonics, Sedimentary Basins, and Provenance: A Celebration of William R. Dickinson's Career. Geological Society of America Special Papers, 540:707~739.
- Dewey J F, Bird J M. 1970. Mountain belts and the new global tectonics. Journal of Geophysical Research, 75 (14): 2625  $\sim$ 2647.
- Dickinson W R. 1971. Detrital modes of New Zealand graywackes. Sedimentary Geology, 5(1):37~56.
- Dickinson W R. 1974. Plate tectonics and sedimentation. Special Publication of SPEM, 22: 1~27.
- Dickinson W R. 1976. Sedimentary basins developed during evolution of Mesozoic-Cenozoic arc-trench system in western North America. Canadian Journal of Earth Sciences, 13(9): 1268~1287.
- Dickinson W R., Suczek C A. 1979. Plate-Tectonics and sandstone compositions. AAPG Bulletin, 63(12):2164~2182.
- Dickinson W R, Beard L S, Brakenridge G R, Erjavec J L, Ferguson R C, Inman K F, Knepp R A, Lindberg F A, Ryberg P T. 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. Geological Society of America Bulletin, 94(2):222~235.
- Ding Lin. 2003. Paleocene deep-water sediments and radiolarian faunas. Implications for evolution of Yarlung-Zangbo foreland basin, southern Tibet. Science China Earth Sciences, 46(1):85 ~95.
- Dürr S B. 1996. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet). Geological Society of America Bulletin, 108(6):669~684.
- Einsele G, Liu Baojun, Dürr S, Frisch W, Liu G, Luterbacher HP, Ratschbacher L, Ricken W, Wendt J, Wetzel A. 1994. The Xigaze forearc basin: evolution and facies architecture (Cretaceous, Tibet). Sedimentary Geology,90(1~2):1~32.
- Fang Aimin, Yan Zhen, Pan Yusheng, Li Jiliang, Yu Liangjun, Liu Xiaohan, Huang Feixing, Tao Junrong. 2006. The age of the plan fossil assemblage in the Liuqu Conglomerate of southern Tibet and its tectonic significance. Progress in Natural Science,

 $16(1):55 \sim 64.$ 

- Fu Hanpu, Hu Xiumian, Erica M C, An Wei, Wang Jiangang, Garzanti E. 2018. Upper Cretaceous trench deposits of the Neo-Tethyan subduction zone: Jiachala Formation from Yarlung Zangbo suture zone in Tibet, China. Science China Earth Sciences, 61(9): 1204~1220.
- Gansser A. 1964. Geology of the Himalayas. Wiley and Sons, New York, 289.
- Garzanti E, Raffaele C, Flavio J. 1986. Sedimentary evidence of a Cambro-Ordovician orogenic event in the northwestern Himalaya. Sedimentary Geology, 48(3~4):237~265.
- Garzanti E, Van Haver T. 1988. The Indus clastics: forearc basin sedimentation in the Ladakh Himalaya (India). Sedimentary Geology, 59(3~4):237~249.
- Garzanti E. 1999. Stratigraphy and sedimentary history of the Nepal Tethys Himalaya passive margin. Journal of Asian Earth Sciences, 17 (5~6):805~827.
- Garzanti E, Doglioni C, Vezzoli G, Ando S. 2007. Orogenic belts and orogenic sediment provenance. The Journal of Geology,115(3): 315~334.
- Garzanti E, Vermeesch P, Padoan M, Resentini A, Vezzoli G, Ando S. 2014. Provenance of passive-margin sand (Southern Africa). The Journal of Geology, 122(1):17~42.
- Garzanti E, Andò S, Padoan M, Vezzoli G, El Kammar A. 2015a. The modern Nile sediment system: Processes and products. Quaternary Science Reviews, 130:9~56.
- Garzanti E, Hu Xiumian. 2015b. Latest Cretaceous Himalayan tectonics: Obduction, collision or Deccan-related uplift? Gondwana Research, 28, 165~178.
- Garzanti E. 2016. From static to dynamic provenance analysis— Sedimentary petrology upgraded. Sedimentary Geology, 336:3 ~13.
- Garzione C N, Quade J, DeCelles P G, English N B. 2000. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from δ18O vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya. Earth and Planetary Science Letters, 183(1~2):215~229.
- Garzione C N, DeCelles P G, Hodkinson D G, Ojha T P, Upreti B N. 2003. East-west extension and Miocene environmental change in the southern Tibetan plateau. Thakkhola graben, central Nepal. Geological Society of America Bulletin, 115(1):3~20.
- Gibbons A D,Zahirovic S,Müller R D,Whittaker J M, Yatheesh V. 2015. A tectonic model reconciling evidence for the collisions between India, Eurasia and intra-oceanic arcs of the centraleastern Tethys. Gondwana Research,28(2),451~492.
- Halbouty M T, King R E, Klemme H D, Dott Sr R H, Meyerhoff AA. 1970. World's giant oil and gas fields, geologic factors affecting their formation, and basin classification: Part II: factors affecting formation of giant oil and gas fields, and basin classification. AAPG Special Volumes, 502~528.
- Han Zong, Hu Xiumian, Li Juan, Garzanti E. 2016. Jurassic carbonate microfacies and relative sea-level changes in the Tethys Himalaya (southern Tibet). Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 456:1~20.
- He Mengying, Zheng Hongbo, Jia Juntao. 2013. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of modern sediments in the Yangtze River: implications for the sediment provenance. Quaternary Sciences, 33(4):656~670(in Chinese with English abstract).
- He Shundong, Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M. 2007. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet. Tectonophysics,433(1~4):15~37.
- Hodges K V. 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives. Geological Society of America Bulletin, 112(3):324~350.
- Hodges K V. 2014. Thermochronology in orogenic systems. Treatise on Geochemistry, Second Edition. Oxford, UK: Elsevier, 281~308.
- Hu Xiumian, Jansa L, Wang Chengshan, Sarti M, Bak K, Wagreich M, Michalik J, Sotak J. 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds (CORBs) in the Tethys: occurrences, lithofacies, age,

and environments. Cretaceous Research, 26: 3~20.

- Hu, Xiumian, Jansa L, Wang Chengshan. 2008. Upper Jurassic-Lower Cretaceous stratigraphy in south-eastern Tibet: a comparison with the western Himalayas. Cretaceous Research, 29: 301~315.
- Hu Xiumian, Jansa L, Chen Lei, Griffin W L, O'Reilly S Y, Wang Jiangang. 2010. Provenance of Lower Cretaceous Wolong Volcaniclastics in the Tibetan Tethyan Himalaya: Implications for the final breakup of Eastern Gondwana. Sedimentary Geology, 223(3~4):193~205.
- Hu Xiumian, 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(10):859~862.
- Hu Xiumian, Garzanti E, Wang Jiangang, Huang Wentao, An Wei, Webb A. 2016. The timing of India-Asia collision onset-Facts, theories, controversies. Earth-Science Reviews, 160:264~299.
- Hu Xiumian, Wang Jiangang, An Wei, Garzanti E, Li Juan. 2017. Constraining the timing of the India-Asia continental collision by the sedimentary record. Science China Earth Sciences, 60(4):  $603 \sim 625$ .
- Hu Xiumian, An Wei. Garzanti E, Liu Qun. 2020. Identification of Trench Basin in Collision Orogenic Belt: Insights from the Yarlung Zangbo Suture Zone. Science China Earth Sciences. http://doi.org/10.1007/s11430-019-9687-x.
- Huntington K W, Saylor J, Quade J, Hudson A M. 2015. High late Miocene-Pliocene elevation of the Zhada Basin, southwestern Tibetan Plateau, from carbonate clumped isotope thermometry. Geological Society of America Bulletin, 127(1~2), 181~199.
- Ibanez-Mejia M, Pullen A, Pepper M, Urbani F, Ghoshal G, Ibanez-Mejia J C. 2018. Use and abuse of detrital zircon U-Pb geochronology-A case from the Rio Orinoco delta, eastern Venezuela. Geology,46(11):1019~1022.
- Ingersoll R V. 1988. Tectonics of sedimentary basins. Geological Society of America Bulletin, 100(11):1704~1719.
- Ingersoll R V. 2012. Composition of modern sand and Cretaceous sandstone derived from the Sierra Nevada, California, USA, with implications for Cenozoic and Mesozoic uplift and dissection. Sedimentary Geology, 280:195~207.
- Jadoul F, Berra F, Garzanti E. 1998. The Tethys Himalayan passive margin from late Triassic to early Cretaceous (South Tibet). Journal of Asian Earth Sciences, 16(2~3):173~194.
- Jin, Xiaochi. 2002. Permo-Carboniferous sequences of Gondwana affinity in Southwest China and their paleogeographic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 20:633~646.
- Ke Baojia. 1992. Geotectonic sedimentology. Advancein Earth Sciences,7(2):82~83(in Chinese with English abstract).
- Kingston D R, Dishroon C P, Williams P A. 1983. Hydrocarbon plays and global basin classification. AAPG Bulletin, 67(12): 2194~2198.
- Klein G D. 1991. Geodynamic and geochemical aspects of sedimentary basin classification. Journal of African Earth Sciences,13(1):1~11.
- Kohn, Matthew J. 2014. Himalayan Metamorphism and Its Tectonic Implications. Annual Review of Earth & Planetary sciences, 42 (1):381~419.
- Krynine P D. 1948. The megascopic study and field classification of sedimentary rocks. The Journal of Geology, 56(2):130~165.
- Lai Wen, Hu Xiumian, Garzanti E, Xu Yiwei, Ma Anlin, Li Wei. 2019a. Early Cretaceous sedimentary evolution of the northern Lhasa terrane and the timing of initial Lhasa-Qiangtang collision. Gondwana Research, 73:136~152.
- Lai Wen, Hu Xiumian, Garzanti E, Sun Gaoyuan, Garzione C N, BouDagher-Fadel M, Ma Anlin. 2019b. Initial growth of the Northern Lhasaplano, Tibetan Plateau in the early Late Cretaceous (ca. 92 Ma). Geological Society of America Bulletin,131 (11~12): 1823~1836.
- Laskowski A K, Orme D A, Cai Fulong, Ding Lin. 2019. The Ancestral Lhasa River: A Late Cretaceous trans-arc river that drained the proto-Tibetan Plateau. Geology, 47 (11): 1029

 $\sim 1033.$ 

- Le Pichon X. 1968. Sea-floor spreading and continental drift. Journal of Geophysical Research, 73(12): 3661~3697.
- Leary R,Orme D A,Laskowski A K,DeCelles P G,Kapp P,Carrapa B,Dettinger M. 2016a. Along-strike diachroneity in deposition of the Kailas Formation in central southern Tibet: Implications for Indian slab dynamics. Geosphere,12(4):1198~1223.
- Leary R J, DeCelles P G, Quade J, Gehrels G E, Waanders G. 2016b. The Liuqu Conglomerate, southern Tibet: Early Miocene basin development related to deformation within the Great Counter Thrust system. Lithosphere,8(5):427~450.
- Leier A L, DeCelles P G, Kapp P, Ding Lin. 2007a. The Takena Formation of the Lhasa terrane, southern Tibet: The record of a Late Cretaceous retroarc foreland basin. Geological Society of America Bulletin,119(1~2):31~48.
- Leier A L., Decelles P G, Kapp P, Gehrels G E. 2007b. Lower cretaceous strata in the Lhasa Terrane, Tibet, with implications for understanding the early tectonic history of the Tibetan plateau. Journal of Sedimentary Research, 77 ( $9 \sim 10$ ); 809  $\sim$ 825.
- Li Guangwei, Kohn B, Sandiford M, Xu Zhiqin, Wei Lijie. 2015. Constraining the age of Liuqu Conglomerate, southern Tibet: implications for evolution of the India-Asia collision zone. Earth and Planetary Science Letters, 426:259~266.
- Li Guangwei, Kohn B, Sandiford M, Xu Zhiqin. 2017. India-Asia convergence: Insights from burial and exhumation of the Xigaze fore-arc basin, south Tibet. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,122(5):3430~3449.
- Li Jiliang, Sun Shu, Hao Jie, Chen Haihong, Hou Quanlin, Xiao Wenjiao. 1999. On the classification of collision orogenic belts. Scientia Geologica Sinica, 34 (2): 129 ~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Li Juan, Hu Xiumian. 2013. Tectonic subsidence analysis of Late Triassic-Paleogene strata in Tingri area, Tibetan Tethyan Himalaya and evolution of sedimentary basins. Acta Petrologica Sinica, 29 (11) :  $3843 \sim 3851$  (in Chinese with English abstract).
- Li Shun, Ding Lin, Xu Qiang, Wang Houqi, Yue Yahui, Baral U. 2017. The evolution of Yarlung Tsangpo River: Constraints from the age and provenance of the Gangdese Conglomerates, southern Tibet. Gondwana Research, 41:249~266.
- Li Juan, Hu Xiumian, Garzanti E, Banerjee S, Boudagher-Fadel M. 2020. Late Cretaceous topographic doming caused by initial upwelling of Deccan magmas: Stratigraphic and sedimentological evidence. Geological Society of America Bulletin, 132(3~4):835~849.
- Li Xianghui, Wang Chengshan, Hu Xiumian, Wan Xiaoqiao, Xu Yulin, Zhao Wenjin. 2000. The Pengqu Formation: a New Eocene Stratigraphical Unit in Tingri Area, Tibet. Journal Of Stratigraphy, 24 (3): 243 ~ 248 (in Chinese with English abstract).
- Li Sitian. 1992. On fundamental system of basin analysis. Earth Science, 17:31~39 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhao Hongge, Zhang Dongdong, Deng Yu, Zhao Xiaochen. 2015. The classification of sedimentary basins and discussion on relevant issues. Earth Science Fronties, 22 (3): 1 ~ 16 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guanghua, Einsele G. 1994. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas. Geologische Rundschau, 83 (1):32~61.
- Liu Shaofeng, Wang Chengshan. 2016. Reconstruction of tectonopaleogeography and dynamic topography. Earth Science Frontiers, 23(6), 61~79(in Chinese with English abstract).
- Malusà M G, Fitzgerald P G. 2020. The geologic interpretation of the detrital thermochronology record within a stratigraphic framework, with examples from the European Alps, Taiwan and the Himalayas. Earth-Science Reviews, 201:103074.

McKenzie D P, Parker R L. 1967. The North Pacific: an example of

tectonics on a sphere. Nature, 216(5122): 1276~1280.

- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Special Papers-Geological Society of America: 21 ~21.
- Metcalf K, Kapp P. 2019. History of subduction erosion and accretion recorded in the Yarlung Suture Zone, southern Tibet. Geological Society, London, Special Publications, 483(1); 517  $\sim$ 554.
- Morgan W J. 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. Journal of Geophysical Research, 73(6):1959~1982.
- Murphy M A, Yin An, Kapp P, Harrison T M, Manning C E, Ryerson F J, Ding Lin, Guo Jinghui. 2002. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, southwest Tibet: Implications for the eastward extent of the Karakoram fault system. Geological Society of America Bulletin, 114 (4): 428 ~447.
- Neupane B,Zhao Junmeng,Allen C M,Ju Yiwen,Baral U,Gyawali B R. 2020. Provenance of Jurassic-Cretaceous Tethyan Himalayan sequences in the Thakkhola Section-Nepal, inferring pre-collisional tectonics of the central Himalaya. Journal of Asian Earth Sciences, 192:104288.
- Noda A. 2016. Forearc basins: Types, geometries, and relationships to subduction zone dynamics. Geological Society of America Bulletin, 128 (5~6): 879~895.
- Pereira I, Storey C D, Strachan R A, Dos Santos T B, Darling J R. 2020. Detrital rutile ages can deduce the tectonic setting of sedimentary basins. Earth and Planetary Science Letters, 537,116193.
- Roberts D G, Bally A W. 2012. Regional geology and tectonics: Phanerozoic passive margins, cratonic basins and global tectonic maps. Elsevier.
- Roser B P, Korsch R J. 1985. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones: a discussion. The Journal of Geology,93(1):81~84.
- Saylor J E, Quade J, Dettman D L, DeCelles P G, Kapp Paul A, Ding Lin. 2009. The late Miocene through present paleoelevation history of southwestern Tibet. American Journal of Science, 309 (1), 1~42.
- Saylor J E, DeCelles P, Gehrels G, Murphy M, Zhang R, Kapp P. 2010. Basin formation in the High Himalaya by arc-parallel extension and tectonic damming: Zhada basin, southwestern Tibet. Tectonics, 29: TC1004.
- Sinclair H D, Naylor M. 2012. Foreland basin subsidence driven by topographic growth versus plate subduction. Geological Society of America Bulletin, 124(3~4):368~379.
- Styron R, Taylor M, Sundell K. 2015. Accelerated extension of Tibet linked to the northward underthrusting of Indian crust. Nature Geoscience, 8(2):131~134.
- Sun Dongli. 1993. On the Permian biogeographic boundary between Gondwana and Eurasia in Tibet, China as the eastern section of the Tethys. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 100(1~2):59~77.
- Sun Gaoyuan, Hu Xiumian, Sinclair H D, BouDagher-Fadel M K, Wang Jiangang. 2015. Late Cretaceous evolution of the Coqen Basin (Lhasa terrane) and implications for early topographic growth on the Tibetan Plateau. Geological Society of America Bulletin,127(7~8):1001~1020.
- Sun Gaoyuan, Hu Xiumian, Sinclair H D. 2017. Early cretaceous palaeogeographic evolution of the Coqen basin in the Lhasa Terrane, southern Tibetan plateau. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 485,101~118.
- Sundell K E, Taylor M H, Styron R H, Stockli D F, Kapp P, Hager C, Liu Deliang, Ding Lin. 2013. Evidence for constriction and Pliocene acceleration of east-west extension in the North Lunggar rift region of west central Tibet. Tectonics, 32(5): 1454~1479.
- Taylor S R, McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Reviews of Geophysics, 33(2):241~265.

- Van De Kamp P C, Leake B E. 1986. Petrography and Geochemistry of Feldspathic and Mafic Sediments. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 76(4):411~499.
- Van Hinsbergen D J J, Steinberger B, Doubrovine P V, Gassmöller R. 2011. Acceleration and deceleration of India-Asia convergence since the Cretaceous: Roles of mantle plumes and continental collision. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116: B06101.
- Wang Chengshan, Liu Zhifei, Li Xianghui, Wan Xiaoqiao. 1999. The Xigaze forearc Basin and the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Li Xianghui, Hu Xiumian, Jansa L F. 2002. Latest marine horizon north of Qomolangma (Mt Everest): Implications for closure of Tethys seaway and collision tectonics. Terra Nova, 14(2):114~120.
- Wang Chengshan, Li Xianghui. 2003. Sedimentary basin: from principles to analyses. Beijing: Higher Education Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Li Xianghui, Liu Zhifei, Li Yalin, Jansa L, Dai Jingen, Wei Yushuai. 2012. Revision of the Cretaceous-Paleogene stratigraphic framework, facies architecture and provenance of the Xigaze forearc basin along the Yarlung Zangbo suture zone. Gondwana Research, 22(2):415~433.
- Wang Hongzhen. 1985. Explanation of the "Atlas of the Palaeogeography of China". Beijing: Sinomap press (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangang, Hu Xiumian, Wu Fuyuan, Jansa L. 2010. Provenance of the Liuqu Conglomerate in southern Tibet. a Paleogene erosional record of the Himalayan-Tibetan orogen. Sedimentary Geology, 231(3~4):74~84.
- Wang Jiangang, Hu Xiumian, Jansa L, Huang Zhicheng. 2011. Provenance of the Upper Cretaceous-Eocene deep-water sandstones in Sangdanlin, southern Tibet. Constraints on the timing of initial India-Asia collision. The Journal of Geology, 119(3):293~309.
- Wang Jiangang, Hu Xiumian, Garzanti E, Wu Fuyuan. 2013. Upper Oligocene-Lower Miocene Gangrinboche Conglomerate in the Xigaze area, southern Tibet. Implications for Himalayan uplift and paleo-Yarlung-Zangbo initiation. The Journal of Geology, 121(4):425~444.
- Wang Jiangang, Wu Fuyuan, Garzanti E, Hu Xiumian, Ji Weiqiang, Liu Zhichao, Liu Xiaochi. 2016. Upper Triassic turbidites of the northern Tethyan Himalaya (Langjiexue Group): The terminal of a sediment-routing system sourced in the Gondwanide Orogen. Gondwana Research, 34:84~98.
- Wang Jiangang, Hu Xiumian, Garzanti E, An Wei, Liu Xiaochi. 2017. The birth of the Xigaze forearc basin in southern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 465:38~47.
- Wang Jiangang, Hu Xiumian, Garzanti E, BouDagher-Fadel M K, Liu Zhichao, Li Juan, Wu Fuyuan. 2020. From extension to tectonic inversion. Mid-Cretaceous onset of Andean-type orogeny in the Lhasa block and early topographic growth of Tibet. Geological Society of America Bulletin, 132(11~12):2432~2454.
- Webb A A G, Guo Hongcheng, Clift P D, Husson L, Müller T, Costantino D, Yin An, Xu Zhiqin, Cao Hui, Wang Qin. 2017. The Himalaya in 3D: Slab dynamics controlled mountain building and monsoon intensification. Lithosphere, 9(4):637 ~651.
- Wei Lijie, Liu Xiaohan, Yan Fuhua, Mai Xueshun, Li Guangwei, Liu Xiaobing, Zhou Xuejun. 2011. Palynological evidence sheds new light on the age of the Liuqu Conglomerates in Tibet and its geological significance. Science China Earth Sciences, 54(6):901 ~911.
- Weltje G J. 2006. Ternary sandstone composition and provenance: an evaluation of the 'Dickinson model'. Geological Society, London, Special Publications, 264(1):79~99.
- 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). Geologische Rundschau, 85(4):723~754.

- Wu Fuyuan, Ji Weiqiang, Wang Jiangang, Liu Chuanzhou, Chung Sunlin, Clift P D. 2014. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India-Asia collision. American Journal of Science, 314(2):548~579.
- Xu Yadong, Zhang Kexin, Wang Guocan, Jiang Shangsong, Chen Fenning, Xiang Shuyuan, Dupont-Nivet G, Hoorn C. 2012. Extended stratigraphy, palynology and depositional environments record the initiation of the Himalayan Gyirong Basin (Neogene China). Journal of Asian Earth Sciences, 44:77 ~93.
- Xu Zhiqin, Li Tingdong, Yang Jinsui, Ji Shaochen, Wang Zongqi, Zhang Zemin. 2008. Advances and prospectives of continental dynamics: Theroy and application. Acta Petrologica Sinica, 24 (7):1433~1444(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Pêcher A, Liang Fenghua, Qi Xuexiang, Cai Zhihui, Li Huaqi, Zeng Lingsen, Cao Hui. 2013. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the late Oligocene and Miocene. Tectonics, 32:191~215.
- Xu Zhiqin, Zheng Bihai, Wang Qin. 2021. From accretion to collision: situation and outlook. Acta Geologica Sinica, 95(a): 76~98 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Yan Liren, Fang Aimin, Chen Juanlu. 2018. Identification and reconstruction of tectonic archetype of the sedimentary basin within the orogenic belt developed along convergent margin. Acta Petrologica Sinica, 34(7):1943~1958 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jixiang, Sun Xiaoxing, Sun Yiyin, Liu Chengjie. 1988. Stratigraphy on the molasse-type sediments of the paired molasse belts in Xigaze region, South Xizang. Memoirs of Institute of Geology, Academia Sinica, 3:159~176 (in Chinese with English abstract).
- Yu Guangming, Wang Chengshan. 1990. Sedimentary geology of the Xizang (Tibet). Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

### 参考文献

- 何梦颖,郑洪波,贾军涛. 2013. 长江现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年 龄及 Hf 同位素组成与物源示踪研究. 第四纪研究,33(4):656 ~670.
- 柯保嘉. 1992. 构造沉积学. 地球科学进展, 7(2):82~83.
- 李继亮,孙枢,郝杰. 1999. 论碰撞造山带的分类. 地质科学,34(2): 129~138.
- 李娟,胡修棉. 2013. 藏南定日地区上三叠统一古近系构造沉降分 析与沉积盆地特征. 岩石学报,29(11):3843~3851.
- 李思田. 1992. 论沉积盆地分析系统. 地球科学,17:31~39.
- 李祥辉,王成善,胡修棉,万晓樵,徐钰林,赵文金. 2000. 朋曲 组——西藏南部最高海相层位一个新的地层单元. 地层学杂 志,24(3):243~248.
- 刘宝珺,许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集: 震旦纪一三叠 纪. 北京:科学出版社.
- 刘成杰,尹集祥,孙晓兴,孙亦因. 1988. 西藏南部日喀则弧前盆地 非复理石型海相上白垩统一下第三系. 中国科学院地质研究所 集刊,3:134~148.
- 刘池洋,王建强,赵红格,张东东,邓煜,赵晓辰. 2015. 沉积盆地类 型划分及其相关问题讨论. 地学前缘,22(3):1~26.
- 刘少峰,王成善. 2016. 构造古地理重建与动力地形. 地学前缘, 23 (6): 61~79.
- 王成善,刘志飞,李祥辉,万晓樵. 1999. 西藏日喀则弧前盆地与雅 鲁藏布江缝合带. 北京:地质出版社.
- 王成善,李祥辉. 2003. 沉积盆地分析原理与方法. 北京:高等教育 出版社.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集说明书. 北京: 地图出版社.
- 余光明,王成善. 1990. 西藏特提斯沉积地质. 北京:地质出版社.
- 许志琴,李廷栋,杨经绥,嵇少丞,王宗起,张泽明. 2008. 大陆动力 学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报,24(7):1433

沉积盆地的鉴别与恢复.岩石学报,34(7):1943~1958. 尹集祥,孙晓兴,孙亦因,刘成杰.1988.西藏南部日喀则地区双磨 拉石带磨拉石岩系的地层学研究.中国科学院地质研究所集 刊,3;159~176.

### Sedimentary basinsin orogenic belt and continental geodynamics

HU Xiumian<sup>\*1)</sup>, XUE Weiwei<sup>1)</sup>, LAI Wen<sup>2)</sup>, WANG Jiangang<sup>3)</sup>, AN Wei<sup>4)</sup>, LI Juan<sup>1)</sup>

 $1) \ Institute \ of \ Continental \ Geodynamics \ , \ State \ Key \ Laboratory \ of \ Mineral \ Deposit \ Research \ ,$ 

School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023;

2) School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing, 210023;

3) Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

4) School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009

\* Corresponding author: huxm@nju.edu.cn

#### Abstract

Prototype restoration of sedimentary basins in orogenic belts, one of the most challenging tasks in earth sciences, is crucial for understanding the evolution of orogenic belts and continents geodynamics. This paper first reviews the traditional methods of restoration of prototype basins in orogenic belts with focus on their principles and methods to reconstruct the tectonic setting of the sedimentary basin based on clastic composition, elemental geochemistry, and single-mineral geochemistry. Based on our assessment of sedimentary basins in the Himalayan-Tibetan Plateau, five major elements for the restoration of orogenic prototype basins are proposed. These include the tectonostratigraphic boundaries of the sedimentary basin, paleogeographic analysis, provenance analysis, structure geological analysis and basin-related terrane analysis. Considering the Himalayan orogenic belt as an example, this paper analyzes in detail the geological characteristics of the relevant basins in three tectonic stages of the Neo-Tethys oceanic subduction, the India-Asia collision and the post-collision. This is followed by a discussion on the geodynamics of the orogenic belt as reflected by the sedimentary basins, including the northern Indian passive continent margin basin, the Xigaze forearc basin, the Yarlung Zangbo trench basin, the Linzhou backarc-foreland composite basin, the Sangdanlin syn-collision basin, and the post-collision Gangrinboche basin, the Liuqu basin and the Zhada-Gyirong rift basin. The evolution process of the Himalayan orogenic belt is proposed based on the analysis of the sedimentary basins, and the relationships between the sedimentary basins and continental geodynamics are further addressed.

**Key words**: orogenic belt; sedimentary basin; tectonic prototype; continental geodynamic; Himalaya; Tibetan Plateau