文章编号:1000-0550(2020)02-0319-12

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.037

# 台湾始新统一中新统沉积物源与沉积环境

陈淑慧,侯元立,邵磊,黄奇瑜,乔培军,崔宇驰,孟宪博 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

**摘 要** 台湾地区出露的始新统一中新统地层属南海北侧的范畴,其物质组成及沉积环境为揭示南海新生代早期构造沉积演 化提供了关键性依据。对台湾西部麓山带中部南投粗坑地区、国姓地区以及东北海岸新港一基隆地区的始新统一中新统地层 进行了岩石学、矿物学、稀土元素地球化学特征以及碎屑锆石 U-Pb 定年分析等研究。结果显示:台湾中部和北部从始新世到中 新世经历了从陆相河流一湖泊相沉积环境到滨浅海相的环境转变,其砂岩成分成熟度随时间由老变新呈现规律性变化;沉积物 源分析表明研究区沉积物在始新世一早渐新世,物源以近源中生代源区为主,碎屑锆石年龄谱系出现120 Ma和230 Ma两个主要 峰值,与周边及华南沿海地区中生代火山岩时代一致;进入晚渐新世以后,锆石年龄谱系出现900 Ma及1 800 Ma等古老峰值,说 明古老地块物质明显增加,这可能反映了昆莺琼古河流由南海西部到东部的物质输送对台湾地区的影响作用。 关键词 台湾;物源;砂岩;锆石;沉积环境

**第一作者简介** 陈淑慧,女,博士研究生,工程师,沉积环境与储层地质学,E-mail: 13701319138@163.com

通信作者 侯元立,男,硕士研究生,E-mail: treyzim@163.com

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

东亚地区在进入新生代后经历了一系列剧烈的 构造运动,包括太平洋板块的转向和俯冲后撤四、菲 律宾板块和欧亚板块边缘的碰撞四、以及造成青藏高 原隆升的印度板块与欧亚板块间的碰撞等事件吗。 这一系列的地质构造运动对东亚地区的构造、地质 演化及气候等都产生了巨大的影响。南海就是在这 一系列构造运动中形成的新生代边缘海,是研究新 生代东亚地区板块构造运动的热点地区之一,其在 新生代东亚大陆边缘大规模张裂作用的背景下<sup>[4]</sup>,经 历了海底扩张与消亡的旋回过程<sup>51</sup>。伴随着断陷扩 张过程,南海盆地接受了巨厚的新生代沉积。然而, 由于南海北部钻遇新生代早期的探井有限,极大地 限制了通过沉积手段对南海早期的沉积演变过程的 研究。台湾地区新生代始新世—中新世沉积属南海 北部沉积的一部分,是南海北部陆源剥蚀--沉积充 填过程的产物。由于菲律宾板块向西北方向的漂移 并在中中新世开始与欧亚大陆发生拼合碰撞,使南 海东北部新生代沉积层序变形抬升,最终形成台湾 隆升岛屿[67]。因此,台湾地区作为南海北部新生代 地层唯一的出露区,对揭示南海早期构造演化和沉 积充填过程具有重要意义。前人对台湾地区新生代 沉积环境的研究工作已取得了大量成果<sup>[7-8]</sup>,但其物 源演化尚存争议<sup>[9-11]</sup>。本研究通过对台湾岛中部、北 部始新世一中新世样品的岩石学及沉积物源的研 究,并结合南海北部的对比分析,揭示了沉积物的形 成环境及物源演变信息(图1)。

### 1 地质背景

中生代晚期到新生代早期,欧亚大陆边缘发生 了大规模的张裂事件,形成了一系列的断陷盆地<sup>[13]</sup>, 其中的新生代沉积地层为了解新生代沉积环境及 水系演化提供了重要研究素材。南海洋壳自16 Ma 开始沿马尼拉海沟向东俯冲于菲律宾海板块之下, 同时由于菲律宾海板块持续地向西北方向运动,在 6.5 Ma左右与欧亚大陆边缘发生碰撞,导致欧亚大陆 边缘新生代沉积层序变形抬升,形成台湾岛<sup>[14-15]</sup>。

台湾为板块俯冲增生的产物<sup>[8]</sup>,其大地构造演化 时间大致可以分为以下几个阶段(图2):1)陆缘断陷 盆地阶段(45~34 Ma),以陆相河流一湖泊沉积为主,

收稿日期:2019-01-11;收修改稿日期:2019-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(41576059,91528302);国家自然科学基金联合基金项目(U1505231);国家科技重大专项(2016ZX05026-004)
 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41576059, 91528302; Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China, No.U1505231; National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05026-004]





间夹火山碎屑沉积,其基底为中生代一古生代陆相 一浅海相碎屑沉积岩或变质岩,此时由于断陷活动 产生了地堑一半地堑张裂盆地;2)海底扩张阶段 (34~16 Ma),该时期台湾地区作为南海北部的一 部分经历南海海底扩张<sup>[16]</sup>;3)洋壳俯冲阶段(16~ 6.5 Ma),南海洋壳沿马尼拉海沟向东俯冲于菲律宾 板块之下,同时,原陆棚、陆坡沉积物及深海浊积层 被刮积形成增生楔;4)弧陆碰撞阶段(6.5 Ma至今), 北吕宋岛弧与欧亚大陆边缘发生斜向弧陆碰撞造山 运动,使沉积在被动大陆边缘的地层向西逆冲,褶皱 隆升出露于海平面之上形成台湾造山带<sup>[7-8]</sup>。

台湾西部麓山带为典型的被动大陆边缘沉积, 其出露的新生代地层总体上可以分为裂陷层序和裂 后层序<sup>[7-8]</sup>(图2)。其中,裂陷层序主要为始新世地 层,裂后层序包括晚渐新世和中新世地层。裂陷层 序和裂后层序之间以破裂不整合接触,其代表的地 质事件在台湾被称为"埔里运动",对应南海洋壳的 打开。不整合面时间位于33~39 Ma之间,代表南海 洋壳形成的亚洲大陆边缘张裂构造活动<sup>[17]</sup>。

### 2 材料与方法

本研究在台湾中部南投县粗坑地区采集始新统

一中新统砂岩样品44个,东北海岸地区砂岩样品 17个。

样品中34个制作成岩石薄片,进行岩石矿物学鉴定工作。根据Dickinson和Suczek的分类方法<sup>[18]</sup>,对薄片进行矿物鉴定和成分统计。

稀土元素地化分析中,共选取了39个样品进行 分析测试。样品经研磨、烘干、加酸溶解等与处理 后,用ICP-MS测量微量元素<sup>[19]</sup>。实验分析测试在同 济大学海洋地质国家重点实验室完成。

重矿物研究制备遵循国际制定的《海洋底质调 查技术规程》,记录每种矿物的颗粒百分比,同时对 形态、颜色、条痕、颗粒相对大小和磁性等矿物特征 进行描述<sup>[20]</sup>。

锆石 U-Pb年龄研究中,共选取粗坑地区 26个样品以及东北海岸地区 8个样品进行实验分析。样品经预处理后使用和 Thermo Elemental X-Series ICP-MS相连的 New Wave 213nm激光剥蚀系统完成锆石 U-Pb定年测试工作,以国际标准锆石 91500(1065.4±0.3 Ma<sup>[21]</sup>)为外标,并采用锆石标样 Plešovice(年龄为337.1±0.4 Ma<sup>[22]</sup>)来校正。实验分析测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,同位素比值及年龄计算采用 ICPMSDataCal 软件完成<sup>[23]</sup>,利用 Andersen



图 2 台湾西部麓山带与雪山山脉新生代早期地层层序(修改自黄奇瑜等<sup>[12]</sup>) Fig.2 Early Cenozoic strata of the western foothills and Hsuehshan range, Taiwan (modified from Huang *et al.*<sup>[12]</sup>)

(2002)方法进行普通Pb校正<sup>[24]</sup>,根据Compston et al.<sup>[25]</sup>的计算方法得出年龄。最终实验结果数据采用 Vermeesch<sup>[26]</sup>的DensityPlotter软件来绘图展示。

### 3 分析结果

台湾粗坑地区和东北地区始新世一中新世各时 代地层的砂岩镜下分析结果如下:

始新世普遍为中细砂结构(粒径),分选中等,次 棱一次圆状,颗粒含量80%,杂基15%,胶结物5%。 碎屑颗粒以石英为主,占70%左右,岩屑25%,长石 5%。碎屑颗粒边缘溶蚀交代现象普遍发育;岩屑以 火山燧石岩屑为主,含部分泥质岩屑和少量变质岩 屑。长石颗粒主要为斜长石,多发生高岭土化。胶 结物主要为方解石亮晶胶结。晚始新世样品开始出 现有孔虫化石及自生海绿石(图3A)。

早渐新世砂岩粒径100μm,分选良好,颗粒含量 67%,杂基30%,胶结物3%。次棱一次圆状,碎屑颗 粒以石英为主,占70%左右,岩屑28%,长石2%。碎 屑颗粒边缘溶蚀交代现象普遍发育;石英常见次生 加大边。岩屑以燧石岩屑为主,部分火山岩岩屑和 少量变质岩屑,长石颗粒含量较少。胶结物主要为 黏土亮晶,少量方解石。泥质杂基含量达到30% (图3B)。

晚渐新世砂岩样品以细砂岩为主,粒径100 μm, 分选较好,次棱一次圆状,碎屑含量80%~90%。石英 含量70%左右。岩屑占28%左右,以燧石岩屑为主, 含有泥质岩屑和少量变质岩屑。长石较少,仅有 2%。胶结物主要为高岭石亮晶。岩石中自生海绿石 普遍发育。样品整体上成熟度明显提高(图3C)。

中新世砂岩以中一细砂岩为主结构,分选较好, 次棱一次圆状,碎屑含量80%~90%,以石英碎屑为 主,常见石英颗粒边缘发生溶蚀交代现象,60%。岩 屑占35%左右,以燧石岩屑为主,含有泥质岩屑和少 量变质岩屑。长石约占5%,正长石、斜长石为主。 胶结物主要为绢云母和方解石亮晶胶结。样品中普 遍含有有孔虫及双壳类生物碎屑,指示为海相沉积 环境(图3D)。

台湾粗坑地区和东北海岸两地的样品由于含有 大量石英质燧石岩屑,因此样品中普遍石英含量较 高,整体上表现为石英砂岩,成熟度较高。两地区各 时代间砂岩成分变化不明显,在粗坑地区晚渐新世 砂岩成分成熟度最高,以石英砂岩为主,始新世及中



图 3 台湾中北部典型地层沉积物 (a1)(a2)始新世地层典型沉积物(样号CK08A);(b1)(b2)早新新世地层典型沉积物(样号DB14);(c1)(c2)晚渐新世地层 典型沉积物(样号CK7);(d1)(d2)中新世地层典型沉积物(样号DB2)

Fig.3 Typical sediment slices of central and northern Taiwan (a1)(a2)typical sediment of Eocene (sample number CK08A);(b1)(b2)typical sediment of Lower Oligocene (sample number DB14); (c1)(c2)typical sediment of upper Oligocene (sample number CK7);(d1)(d2)typical sediment of Miocene (sample number DB2)

新世均以长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主;在东 北地区从始新世到中新世砂岩成分成熟度明显增 高。岩屑类型上,样品表现为火山质岩屑为主,泥质 岩屑也有一定含量。同时,东北和粗坑两地均呈现 随地质时代演变火山质岩屑增多的现象(图4)。

由样品球粒陨石标准化的 REE 配分模式结果 (图5)可见,两地始新世一中新世各地质时代的沉积 物样品均出现了典型的上地壳稀土元素特征,表现 为轻稀土富集、重稀土亏损,Eu元素表现为负异常。 各地质时代间并未出现明显的差异,也未显示出随

#### 时间变化的趋势。

粗坑地区的重矿物组合在始新世主要含有锆石 和少量石榴子石、磷灰石、电气石、金红石。其中,锆 石含量为80%,稳定矿物含量较高,而代表岩浆岩母 岩的石榴子石以及接触变质岩的电气石也有记录, 而绿帘石含量几乎为零,说明母岩区变质岩较少。 整体上,粗坑地区始新世表现为母岩为岩浆岩的特 点。进入晚渐新世以后,锆石含量进一步增加,达到 了近90%,而石榴子石和电气石含量降低,锆石+金 红石的稳定矿物含量达到了95%以上,说明沉积物



图 4 台湾砂岩沉积物和岩屑判别模式(VRF:岩浆岩屑;SRF:沉积岩屑;MRF:变质岩屑) Fig.4 Petrographic data of sandstone and rock fragments from Taiwan (VRF: volcanic rock fragment; SRF: sedimentary rock fragment; MRF: metamorphic rock fragment)



(PAAS: Post-Archean Australian Shale<sup>[27]</sup>)

整体成熟度较高。中新世时期与晚渐新世时期相 似,同样表现为大量稳定矿物富集,指示来自岩浆岩 母岩的矿物含量减少。东北海岸地区始新世和早渐 新世均表现为大量稳定矿物富集,含有少量电气石, 而表示岩浆岩母岩的石榴子石数量较少。到了中新 世,台湾东北及粗坑地区均呈现出稳定矿物含量下 降,不稳定重矿物含量明显增多的现象(图6)。

锆石U-Pb年龄研究显示,台湾中部粗坑地区的 锆石年龄频谱明显可以分为两组(图7),即始新世一 组,晚渐新世一中新世一组。由于该地区破裂不整 合的发育,造成了早渐新世地层的缺失<sup>[8]</sup>。

粗坑地区始新世6个样品共计374个数据点显示, 锆石年龄较为集中的分布在500 Ma之内, 其中 115 Ma左右的中生代燕山期的峰值尤其突出, 数据 占比超过了50%。而437 Ma左右的加里东期的锆石 数据也有明显的峰值。整体上看该地区始新世时期 锆石年龄数据分布集中, 应指示相对于单一的物源 输入。

粗坑地区晚渐新世9个样品共计588个数据点, 中新世10个样品共计870个数据点。两个时期的错 石年龄频谱图显示一定的相似性,而相对于始新世 则有明显的差异。其中,较为年轻的锆石(<500 Ma) 数量依然处于绝对优势,而110 Ma左右的燕山期锆 石数量依然最多,此外中生代早期印支期(230 Ma左 右)的锆石分化出了明显的次峰。430 Ma左右加里 东期的锆石也有明显的峰值。与始新世时期不同的 是,晋宁期和吕梁期的较老年龄锆石数量明显提升, 两个时期频谱图在760 Ma和1870 Ma左右均有明显 的峰值,而中新世样品在2500 Ma的吕梁期锆石数 量也较为突出。总体上看,粗坑地区从晚渐新世碎 屑锆石年龄分布发生明显改变,样品中古老锆石年 龄含量明显增加,显示沉积物源区应发生明显改变, 中新世碎屑锆石年龄谱系特征与晚渐新世基本 相同。

东北海岸始新世两个样品共计89个数据点,早 渐新世两个样品共计159个数据点,锆石年龄频谱图 从始新世到渐新世基本相似,以年轻锆石(<500 Ma) 数量占据压倒性优势。其中,始新世锆石频谱主要 表现120 Ma的燕山期峰值和417 Ma的加里东期峰 值,且燕山期锆石数量超过50%;早渐新世锆石年龄 以113 Ma左右燕山期的锆石数量超过80%,加里东



Fig.6 Histogram of heavy mineral content and relationship of GZi, ZTR, and ATi from Taiwan (Blue represents the Tsukeng area, and red represents the northeast shoreline area)

期锆石仅有少量分布。到中新世4个样品235个数据 点显示出与始新世和早渐新世较为明显的差异。虽 然中生代的锆石依然最多,以132 Ma左右燕山期为 主,200 Ma左右燕山期早期发育次峰,但是较老年龄 的锆石分布明显增多,其中754 Ma左右的晋宁期和 1787 Ma左右的吕梁期均有明显的峰值,在408 Ma 发育次一级的加里东期峰值,总体上锆石年龄谱系 分布范围明显扩大。

### 4 讨论

台湾在始新世时期主要为辫状河一沼泽相沉积

环境,水深较浅,水动力较强,整体为陆相环境。破裂不整合之上的晚渐新世地层开始大量出现海绿石 颗粒和海相生物化石,指示沉积环境由陆相转为滨 浅海相。早中新世以后水深进一步加深,沉积地层 出现了浅海、半深海相沉积,部分地区发育碳酸盐沉 积(图8)。

稀土元素配分特征说明台湾新生代地层沉积物 主要来自于上地壳酸性岩及沉积岩区。砂岩碎屑成 分特征及重矿物组合显示,始新世研究区以近源搬 运沉积为特征,砂岩碎屑中含有较多火山硅质碎屑, 重矿物组合中含有一定磷灰石等不稳定重矿物;晚



图 7 台湾中北部东北海岸和粗坑地区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱和协和图 Fig.7 Detrital zircon U-Pb age and the concord diagram of central and northern Taiwan

渐新世,砂岩的磨圆、分选及成分成熟度均明显变 好。沉积物源区以岩浆岩源区为主,沉积物中高含 量的锆石可能与滨海相沉积有关。特别是粗坑地区 从晚渐新世到中新世砂岩成分成熟度明显下降,重 矿物ATi指数明显上升,可以认为该时期沉积物源发 生了明显的转变。虽然整体上石英及石英质燧石岩 屑含量较高,但砂岩中仍然包含较多的火山碎屑物 质,沉积物搬运距离应该仍以近源搬运为主。

砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系图显示,台湾始 新世和渐新世,锆石年龄主要以显生宙为主,燕山期 锆石数量尤为突出,而前寒武纪古老锆石含量较少。 由于二叠纪到白垩纪岩浆岩(主要是燕山期和印支 期)广泛发育在华南沿海地区<sup>[28]</sup>,其年龄具有从沿海 向内陆逐渐变老的趋势<sup>[29-32]</sup>。华南沿海河流沉积物 碎屑锆石 U-Pb 年龄显示<sup>[33-34]</sup>,华夏地块现代河流沉积 物主要为燕山期、印支期和加里东期,几乎不含新元 古代甚至更老地层,与台湾始新世和早渐新世锆石 年龄频谱有很好的一致性(图9)。由于该时期研究 区砂岩碎屑大量出现火山质岩屑,具有较低的成分 成熟度,可以认为该时期台湾沉积物应源自华南中 生代岩浆岩活动区(图9)。

值得指出的是,进入晚渐新世以后,粗坑地区沉

积物碎屑锆石U-Pb年龄中前寒武纪锆石数量明显增 加,显示沉积物源发生明显改变,部分学者认为该时 期沉积物源可能源自华南内陆及扬子地块,甚至源 自长江物源[9-11]。粗坑地区碎屑锆石760 Ma左右的 晋宁期锆石峰值较为突出,可能对应罗迪尼亚超大 陆的裂解[35]或是古代扬子板块和华夏地块的拼合[36]。 但本次研究中台湾沉积物与华夏地块内部的锆石年 龄数据存在很多不一致:粗坑地区和东北海岸的锆 石在晋宁期峰值均在760 Ma左右,这个数值要晚于 华夏地块内部更为显著的950 Ma左右的晋宁期峰值 以及印支地块东部(安南山脉)的958 Ma的纪录<sup>[37]</sup>, 而在扬子板块内部晋宁期锆石年龄则在800~840 Ma 最为突出<sup>[38]</sup>,750 Ma左右的峰值在华夏板块以及扬 子板块南部都以次级峰的形式出现。华夏地块和扬 子地块晋宁期主导的950 Ma和840 Ma的锆石年龄 峰值在台湾沉积物并未得到显著的纪录,且东北海 岸没有发现2500 Ma左右的锆石。同时,尽管华夏 地块内部存在元古代及太古代锆石年龄的纪录[39-40], 但现代闽浙沿海河流沉积物总体缺乏这些锆石颗 粒,加之砂岩中普遍存在的火山岩碎屑颗粒及较低 的成分成熟度,没有证据显示该时期存在源自华南 以及扬子地块内陆的长大河流存在。因此,台湾岛



依据台西南盆地CFC-10,CFC-16,CFD-1,CFM-1,CFS-2,DP-21,CIT-1,CJA-1,PK-1等9口井的资料,结合中海油深圳分公 司十二五的地震资料解释成果编绘

Fig.8 Brief development pattern of Early Cenozoic sedimentary facies for Taiwan and north SCS Based on the data of wells from Taixinan Basin, including CFC-10, CFC-16, CFD-1, CFM-1, CFS-2, DP-21, CIT-1, CJA-1, PK-1, and seismic data from CNOOC Ltd.-Shenzhen

晚渐新世起沉积物物源开始接受内陆物质影响的观 点仍有很多需要解决的疑点。

由于大陆东南沿海河流锆石U-Pb年龄与晚渐新 世一中新世粗坑地区差异明显,因此晚渐新世一中 新世台湾岛的沉积物不太可能由华南沿海河流搬运 沉积而成。长江流域范围广阔,其河口沉积物锆石 年龄频谱分布广,与台湾晚渐新世一中新世锆石年 龄有较好的对应<sup>[41-42]</sup>,因此,有观点认为该时期长江 沉积物是台湾重要的物质来源<sup>[9-11]</sup>,长江沉积物通过 洋流搬运至台湾地区甚至南海东北部。但是,台湾 地区沉积物砂岩较低的成分成熟度并不支撑长距离 搬运的观点。同时,目前主流的长江中下游格局和 东西贯通的研究普遍认为,长江应于中晚中新世逐 渐发育形成,甚至长江实现东西贯通的时限可能为 晚上新世到早更新世<sup>(43-45]</sup>,而元古代的岩浆岩体更多 地出露在扬子地块的西南部以及与华夏地块的拼接 区域<sup>[46]</sup>。所以晚渐新世以来台湾物源开始受长江物 质影响的观点尚需更多证据。珠江口盆地记录的沉 积物锆石 U-Pb 年龄在元古代晋宁期和吕梁期也有相 似的峰值<sup>[47]</sup>。但是,珠江口盆地中新世以后才开始接 受包含大量古老锆石在内的华南及扬子内陆的沉积 物输入<sup>[48]</sup>,其在晚渐新世—早中新世对台湾地区沉积



物源产生影响的可能性也不大。

最新的研究成果显示,在晚始新世一早渐新世 开始,南海北部发育一条昆莺琼古河[49-50],把南海西 侧包含大量古老碎屑锆石在内的沉积物由西向东输 送,沉积物甚至到达台西南盆地,其锆石年龄谱系特 征包括晋宁期750 Ma左右和少量吕梁期的峰值出 现[49](图9),与台湾晚渐新世一中新世沉积物碎屑锆 石年龄谱系特征完全吻合。结合台湾晚渐新世一中 新世的沉积物中包含大量火山碎屑物以及成分成熟 度较低的重矿物组合特征,可以认为,台湾该时期沉 积物应为近源剥蚀搬运沉积的产物,其沉积物源除 了近源的火山碎屑外,也包含大量经沿岸流等作用 再改造的昆莺琼古河流搬运的南海西部物质。这两 种来源的沉积物混和沉积,构成台湾晚渐新世一中 新世滨浅海相的碎屑岩,造成砂岩沉积物中虽然成 分成熟度并不高,但是古老碎屑锆石含量明显增多 的现象。

### 5 结论

本文主要针对台湾中部南投粗坑地区和东北海

岸地区西部麓山带始新世—中新世地层沉积物进行 了岩石学、矿物学、稀土元素地球化学特征以及碎屑 锆石U-Pb定年分析等研究,对其物质组成及物源演 化提出了新的认识和看法。认为台湾始新世—中新 世沉积物主要源自于陆壳物质,砂岩中包含较多火 山碎屑,总体呈现成分成熟度较低的特点。碎屑锆 石U-Pb年龄频谱显示,粗坑和东北海岸地区在始新 世一中新世具有相似的物源演化模式,表现为始新 统一下渐新统沉积物来源较为单一,碎屑锆石年龄 分布较为集中,以中生代燕山期锆石为主,少量加里 东期锆石,前寒武纪锆石数量极少。进入晚渐新世 以后,晋宁期和吕梁期锆石数量明显增多;而在中新 世年龄频谱分布进一步扩大,更多古老碎屑锆石加 入进来,显示沉积物来源明显增多。综合分析认为, 始新世---早渐新世,台湾沉积物主要来源于近源中 生代岩浆岩区域;晚渐新世一中新世沉积物来源发 生明显改变,除近源岩浆岩提供沉积物质外,再沉积 而来的、由发育在南海北部东西向分布的昆莺琼古 河提供的古老物质可能对该时期台湾沉积产生重要 影响。

#### 参考文献(References)

- [1] Sharp W D, Clague D A. 50-Ma initiation of Hawaiian-emperor bend records major change in pacific plate motion [J]. Science, 2006, 313(5791): 1281-1284.
- [2] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1996, 106(1): 153-184.
- [3] Wang C S, Li X H, Hu X M, et al. Latest marine horizon north of Qomolangma (Mt Everest): Implications for closure of Tethys seaway and collision tectonics [J]. Terra Nova, 2002, 14(2): 114-120.
- [4] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin [M]//Hayes D E. The tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands. Washington: American Geophysical Union, 1980: 89-104.
- [5] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B4): 6299-6328.
- [6] Suppe J. Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan [J]. Memoir of the Geological Society of China, 1984, 6: 21-33.
- [7] Huang C Y, Yuan P B, Lin C W, et al. Geodynamic processes of Taiwan arc-continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Urals and Corsica [J]. Tectonophysics, 2000, 325(1/2): 1-21.
- [8] Huang C Y, Wu W Y, Chang C P, et al. Tectonic evolution of accretionary prism in the arc-continent collision terrane of Taiwan[J]. Tectonophysics, 1997, 281(1/2): 31-51.
- [9] Deng K, Yang S Y, Li C, et al. Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: Implications for sedimentary provenance of Taiwan and its source link with the east China mainland [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 164: 31-47.
- [10] Deng K, Yang S Y, Bi L. Reply to comment by Yonghang Xu on "Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: Implications for sedimentary provenance of Taiwan and its source link with the east China mainland" [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 168: 235-239.
- [11] Zhang X C, Yan Y, Huang C Y, et al. Provenance analysis of the Miocene accretionary prism of the Hengchun Peninsula, southern Taiwan, and regional geological significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 85: 26-39.
- [12] 黄奇瑜,闫义,赵泉鸿,等.台湾新生代层序:反映南海张裂,层序和古海洋变化机制[J].科学通报,2012,57(20): 1842-1862. [Huang Chiyue, Yen Yi, Zhao Quanhong, et al. Cenozoic stratigraphy of Taiwan: Window into rifting, stratigraphy and paleoceanography of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 1842-1862.]
- [13] 姚伯初,曾维军,陈艺中,等. 南海北部陆缘东部的地壳结

构[J]. 地球物理学报, 1994, 37(1):27-35. [Yao Bochu, Zeng Weijun, Chen Yizhong, et al. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(1): 27-35.]

- [14] Yang T F, Lee T, Chen C H, et al. A double island arc between Taiwan and Luzon: Consequence of ridge subduction
   [J]. Tectonophysics, 1996, 258(1/2/3/4): 85-101.
- [15] Li X H, Wei G J, Shao L, et al. Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: A response to Cenozoic tectonism in SE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211(3/4): 207-220.
- [16] Sun S C. The Tertiary basins of offshore Taiwan [C]//Proceedings of the 2nd ASCOPE conference and exhibition. Manila, Philippines: 1982: 125-135.
- [17] Huang C Y, Shea K H, Li Q Y. A foraminiferal study on Middle Eocene-Oligocene break-up unconformity in northern Taiwan and its correlation with IODP Site U1435 to constrain the onset event of South China Sea opening [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 138: 439-465.
- [18] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63 (12) : 2164-2182.
- [19] Wei G J, Liu Y, Li X H, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea [J]. Geochemical Journal, 2003, 37 (5): 593-602.
- [20] 侯孟孜,衣华鹏,孙志高,等. 渤海北部海域碎屑矿物组成特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(4):118-123.
  [Hou Mengzi, Yi Huapeng, Sun Zhigao, et al. Detrital mineral composition features of the northern Bohai Sea[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(4): 118-123.]
- [21] Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards Newsletter, 1995, 19(1): 1-23.
- [22] Sláma J, Košler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon—a new natural reference material for U - Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. Chemical Geology, 2008, 249(1/2): 1-35.
- [23] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt - peridotite interactions in the trans-North China Orogen: U - Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [24] Andersen T. Correction of common lead in U Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb[J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/ 2): 59-79.
- [25] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. Journal of the Geological Society, 1992, 149(2): 171-184.
- [26] Vermeesch P. On the visualisation of detrital age distributions

- [J]. Chemical Geology, 2012, 312-313: 190-194.
- [27] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [28] 孙涛.新编华南花岗岩分布图及其说明[J].地质通报, 2006,25(3):332-335. [Sun Tao. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(3): 332-335.]
- [29] Li X H. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(3): 293-305.
- [30] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326(3/4): 269-287.
- [31] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 2006, 29(1): 26-33.
- [32] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction mode [J]. Geology, 2007, 35(2): 179-182.
- Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes [J].
   Precambrian Research, 2007, 158(1/2): 51-78.
- [34] Lan Q, Yan Y, Huang C Y, et al. Topographic architecture and drainage reorganization in Southeast China: Zircon U-Pb chronology and Hf isotope evidence from Taiwan [J]. Gondwana Research, 2016, 36: 376-389.
- [35] Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. Precambrian Research, 2005, 136(1): 51-66.
- [36] Wang Q, Wyman D A, Li Z X, et al. Petrology, geochronology and geochemistry of ca. 780 Ma A-type granites in South China: Petrogenesis and implications for crustal growth during the breakup of the supercontinent Rodinia [J]. Precambrian Research, 2010, 178(1/2/3/4): 185-208.
- [37] Usuki T, Lan C Y, Yui T F, et al. Early Paleozoic mediumpressure metamorphism in central Vietnam: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon ages [J]. Geosciences Journal, 2009, 13(3): 245-256.
- [38] Yang Z N, Yang K G, Ali P, et al. Early crustal evolution of the eastern Yangtze Block: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of the Neoproterozoic Huashan Group in the Dahongshan area [J]. Precambrian Research, 2018, 309: 248-270.
- [39] Wan Y S, Liu D Y, Xu M H, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and geochemistry of metavolcanic and metasedimentary rocks in Northwestern Fujian, Cathaysia block, China: Tectonic implications and the need to redefine lithostrati-

graphic units [J]. Gondwana Research, 2007, 12 (1/2) : 166-183.

- [40] Yao J L, Shu L S, Santosh M. Detrital zircon U Pb geochronology, Hf-isotopes and geochemistry—New clues for the Precambrian crustal evolution of Cathaysia Block, South China
   [J]. Gondwana Research, 2011, 20(2/3): 553-567.
- [41] Zheng H B, Clift P D, Wang P, et al. Pre-Miocene birth of the Yangtze River [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(19): 7556-7561.
- [42] 王扬扬,范代读.长江流域岩体锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位 素特征及沉积物源示踪意义[J].海洋地质与第四纪地质, 2013,33(5):97-118. [Wang Yangyang, Fan Daidu. U-Pb ages and Hf isotopic composition of crystalline zircons from igneous rocks of the Changjiang drainage basin and their implications for provenance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(5): 97-118. ]
- [43] 范代读,李从先,Yokoyama K,等.长江三角洲晚新生代地层 独居石年龄谱与长江贯通时间研究[J].中国科学(D辑): 地球科学,2004,34(11):1015-1022. [Fan Daidu, Li Congxian, Yokoyama K, et al. Monazite age spectra in the Late Cenozoic strata of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2004, 34(1): 1015-1022. ]
- [44] 贾军涛,郑洪波,黄湘通,等.长江三角洲晚新生代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对长江贯通的指示[J].科学通报,2010,55(4/5):350-358.[Jia Juntao, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Cenozoic sediments from the Yangtze delta: Implication for the evolution of the Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(4/5): 350-358.]
- [45] 袁胜元,李长安,张玉芬,等. 江汉盆地沉积物微量元素特 征与长江上游水系拓展[J]. 中国地质,2012,39(4):1042-1048. [Yuan Shengyuan, Li Chang'an, Zhang Yufen, et al. Trace element characteristics of sediments in Jianghan Basin: Implications for expansion of the upper reaches of the Yangtze River[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 1042-1048. ]
- [46] Yuan X C. Atlas of geophysics in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [47] Shao L, Cao L C, Pang X, et al. Detrital zircon provenance of the Paleogene syn-rift sediments in the northern South China Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17 (2): 255-269.
- [48] 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等.珠江口盆地的沉积充填与珠江的 形成演变[J]. 沉积学报, 2008, 26(2):179-185. [Shao Lei, Pang Xiong, Qiao Peijun, et al. Sedimentary filling of the Pearl River Mouth Basin and its response to the evolution of the Pearl River [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (2): 179-185.]
- [49] Shao L, Cui Y C, Stattegger K, et al. Drainage control of Eo-

provenance evolution of the Central Canyon in northwestern

South China Sea [J]. Marine Geophysical Research, 2018,

doi: 10.1007/s11001-018-9359-2.

cene to Miocene sedimentary records in the southeastern margin of Eurasian plate [J]. GSA Bulletin, 2018, 131 (3/4) : 461-478.

[50] Cui Y C, Shao L, Qiao P J, et al. Upper Miocene-Pliocene

## **Eocene-Miocene Sediment Source and Environmental Study of Taiwan**

CHEN ShuHui, HOU YuanLi, SHAO Lei, HUANG QiYu, QIAO PeiJun, CUI YuChi, MENG XianBo State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The exposed Eocene-Miocene strata of Taiwan is within the range of north SCS, whose composition and sedimentary environment revealed the early tectonic and sedimentary development of the Early Cenozoic SCS. This study is based on the Eocene-Miocene strata of the Tsukeng area, central Western Foothills and northeast shoreline of Taiwan and analyzed the petrology, mineralogy, rare earth element geochemistry, and detrital zircon U-Pb age study. Results show that central and northeastern Taiwan experienced transformation from continental facies to marine facies during the Eocene-Miocene, and the sandstone maturity transitioned with time. Source analysis shows that sediment from the Eocene-Lower Oligocene strata was mainly provided by short-distance transported Mesozoic rock, whose zircon age is consistent with the igneous rock in the surrounding and coastal Cathay areas, with 120 Ma and 230 Ma peaks on the age frequency diagram. Since the upper Oligocene, 900 Ma and 1 800 Ma peaks appeared, indicating matter from old blocks started to deposit, which may be the result of the "Kontum-Ying-Qiong" river system transporting the sediment of west SCS to the east and thus influencing Taiwan.

Key words: Taiwan; provenance; sandstone; zircon; sedimentary environment