

南海北缘盆-岭格局及地貌演化过程

闫义¹, ALMATARI Ali Ahmed Ali^{1,2}, 田陟贤¹, 钱坤^{1,2}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:南海北缘及华南沿海在新生代经历了复杂的盆-岭构造演化历史。目前对南海北部大陆边缘的研究大多集中于南海北缘盆地构造演化, 而对南海北缘新生代盆-岭构造格局及大陆边缘地貌演化还缺乏完整的认识。盆地沉积物源区示踪和邻区岩体剥露过程的综合对比研究是深入探讨大陆边缘构造和地貌演化的重要途径。文章详细介绍了目前关于盆地沉积物源区示踪和山脉隆升剥蚀过程的主要方法和进展。综合分析南海北缘盆地碎屑沉积物来源及华南沿海主要岩体剥露过程矿物热年代学的已有研究成果, 对南海北缘新生代地貌演化及盆地沉积物剥蚀-沉积过程进行了双重约束。华南沿海主要岩体锆石、磷灰石裂变径迹和磷灰石(U-Th)/He热年代学分析结果表明, 南海北部大陆边缘演化过程较为复杂, 剥蚀过程表现为明显的多阶段性且剥蚀中心由南向北迁移, 与典型被动大陆边缘演化有明显的区别。总体上, ~25Ma之前的沉积物 ϵNd 值较高、碎屑锆石以年轻颗粒(<500Ma)为主, 表明物源以华南沿海地区的中生代花岗岩近源剥蚀为主; 而~25Ma之后的沉积物 ϵNd 值较低、前寒武纪碎屑锆石年龄(>500Ma)明显增加, 表明物源向华南内陆逐渐迁移。南海北缘盆地沉积物来源由近源向远源的逐渐转变, 反映了东亚大陆边缘主要水系, 如珠江和闽江等由沿海向内陆的侵蚀扩展过程, 这一过程对应于南海的扩张和青藏高原东缘的隆升。

关键词:南海; 沉积物示踪; 低温年代学; 裂变径迹

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2016)06-0046-12

Basin-mountain evolution, thermo-tectonic history and surface crustal recycling processes of the northern margin of the South China Sea

YAN Yi¹, ALMATARI Ali Ahmed Ali^{1,2}, TIAN Zhixian¹, QIAN Kun^{1,2}

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The continental margin of South China has a long and complex history that dates back to the Mesozoic when it formed part of an active “Andean type” margin associated with north-directed subduction of the Paleo-Pacific Plate. In the Paleocene, the margin experienced significant extension, leading to a complex passive margin. Whilst considerable research effort has been directed at explaining extension across the South China margin, and the age and mechanisms for opening of the South China Sea, relatively little attention has been paid to the impact of these processes on the evolution of the exposed South China continental margin. Coupling between the sedimentation in a basin and the unroofing-erosion in the surrounding orogens makes it possible to understand the basin-mountain evolution, thermo-tectonic history and surface crustal recycling processes by studying the detritus composition, geochemical characteristics of the basin sediments and the timing and rates of exhumation surrounding the orogens. The purpose of this study is to document the timing and rates of exhumation across the Pearl River Mouth region of the South

收稿日期: 2016-02-23; 修订日期: 2016-04-19。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476036)

作者简介: 闫义(1973—), 男, 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质以及沉积-构造耦合关系研究。E-mail: yanyi@gig.ac.cn

Received date: 2016-02-23; Revised date: 2016-04-19. Editor: YIN Bo

Fundation item: National Natural Science Foundation of China (41476036)

Corresponding author: YAN Yi. E-mail: yanyi@gig.ac.cn

China margin and the provenance of the basins in the northern margin of the South China Sea. Zircon fission track (ZFT), apatite fission track (AFT) and (U-Th)/He thermochronometric data show that the timing and pattern of rock uplift and erosion do not fit conventional passive margin landscape models that require youngest exhumation ages to be concentrated at or close to the rifted margin. The history of South China margin is more complex aided by weakened crust from the active margin period that immediately preceded rifting and opening of the South China Sea. Generally, the higher ϵNd values dominated by Yanshanian (180~67 Ma) zircon grains in sediments deposited prior to 25 Ma indicate the detritus in the northern margin of the South China Sea mainly eroded from Phanerozoic granitic sources exposed in coastal South China. Whereas the lower ϵNd values dominated by the Indosinian (257–205 Ma) zircon grains together with Yanshanian, Proterozoic and Archean population in the Miocene rock suggest that the main sources had evolved to inland South China by 25 Ma.

Key words: South China Sea; basin provenance; lower thermochronometry; fission track

南海在新生代处于欧亚板块、太平洋板块和印-澳板块的交汇区,在地质历史上又受到古特提斯和古太平洋板块演化的影响,经历了复杂的地质演化过程,其地质结构、构造演化及形成机制长期以来一直受到中外学者的普遍关注,是研究东亚大陆边缘动力学的“天然实验室”(Hayes, 1980; Tapponnier et al, 1990; 刘光鼎, 1992; Briais et al, 1993; 汪品先, 1995; Ren et al, 2002; Li et al, 2014)。南海北部大陆边缘是在经历加里东运动微板块间的拼贴、印支运动的缝合及燕山运动的活动大陆边缘等多期构造作用基础上,又经过两次不同方向海底扩张的短期改造而形成的(Briais et al, 1993; 张渝昌, 1997; Liu et al, 2004)。前人对该地区基底性质、地壳结构、构造-岩浆活动、盆地构造演化及动力学机制进行了详细的研究(Ru et al, 1986; 茹克, 1988; 姚伯初等, 1994; Zhou et al, 1995; 龚再升, 1997; 李思田等, 1998)。

近年来,南海北缘的活动性特征得到了越来越多的重视,特别是通过对盆地沉积充填序列、沉积构造及热演化史分析和对比,探讨南海北缘及邻区构造格架、演化历史及板块相互作用关系方面取得了很大的进展,如南海北缘地壳的减薄方式是不连续的,呈阶梯状变化(姚伯初等, 1994; Qiu et al, 2001; 阎贫等, 2002);南海北缘盆地具有被动大陆边缘盆地所具备的典型双层结构,但盆地构造演化却表现出明显的幕式裂隙特征,裂隙中心由北向南逐渐迁移,同时盆地存在明显的裂后异常沉降现象(Zhou et al, 1995; 龚再升, 1997; 闫义等, 2005)。1999年南海大洋钻探计划(IODP)184航次为系统研究南海深海盆的形成、演化及南海北缘海陆变迁提供了珍贵的研究素材。经过多学科综合研究,取得了许多新的科学认识,如南海地区在32Ma、23.9Ma、16Ma时期均存在明显的沉积地层界线(陈长民等, 2003; 吴国璋等, 2003); IODP1148站深海沉积物地球化学分析结果显示,在32Ma、30Ma、

28.5Ma、25Ma、23.5Ma、16Ma以及10Ma、8Ma、3Ma沉积物成分存在明显的突变或不连续面,特别是在晚渐新世沉积物成分发生剧烈改变,并伴有沉积间断和滑塌作用,代表着南海以及我国东部地区一次重大构造运动(邵磊等, 2004)。2015年IODP 349航次的实施及国家自然科学基金委重大研究计划“南海深海研究计划”的执行将南海的地质研究推向了高潮,取得了许多重大的科研进展(李春峰等, 2009)。其中IODP349航次首次获得南海深海洋壳的岩石样品,并最终确定了南海洋盆扩张的年龄(Li et al, 2014)。

但由于南海北缘盆地结构和演化历史十分复杂,地层埋藏较深,深层探测技术尚未有效地解决,而且盆地早期陆相沉积相变复杂,主要以近源剥蚀沉积为主,盆地地层的沉积序列、不整合面的形成时限还具有较大的不确定性(黄虑生, 1999; 秦国权, 2000)。因此,目前对南海北缘盆地沉积物剥蚀-搬运-沉积过程还缺乏完整的认识,对南海北缘构造属性及其动力学机制还存在诸多争议: 1) 南海北缘沉积物来源的多样性、复杂性导致了对IODP1148站沉积物来源的不确定,一般认为1148站沉积物大部分应来源于珠江口或者华南(Clift et al, 2002),但Li等(2003)通过Nd同位素分析则认为27Ma以前1148站沉积物主要来自于南海西南部,23Ma以后物源发生明显的改变,主要来自于华南; 2) 南海北缘在新生代经历了神狐运动、南海运动及东沙运动等多期构造运动(姚伯初, 1996)。邵磊等(2005)通过对珠江口盆地沉积物地球化学成分分析发现, IODP1148站所揭示的主要构造沉积地层界线在珠江口盆地中亦同样存在,这些构造沉积界线,特别是晚渐新世滑塌事件揭示怎样的地质构造背景? 3) 被动大陆边缘海岸带的演化大致可归纳为3种主要的模式(Gallagher et al, 1998)。近年来,不同学者应用低温矿物热年代学方法对一些被动大陆边缘海岸带演化

的几何学模式进行了研究,如Persano等(2002)利用磷灰石(U-Th)/He方法对澳大利亚东南海岸带的演化进行了制约;Balestrieri等(2005)综合磷灰石裂变径迹及(U-Th)/He资料重塑了红海南缘海岸带的发育过程。但目前对于南海北缘在这方面的研究还缺乏低温热年代学资料的支持。

1 盆地沉积物及岩体剥蚀对比

盆地和山脉作为在空间上相互依存、在物质上相互转化的正负构造单元,它们之间的剥蚀-沉积整体动态演化过程已成为大陆动力学研究的热点和前沿(Dickinson et al, 1979、1983; 肖庆辉等, 1995; 刘和甫, 2001; 闫义等, 2002), 而目前对于南海北缘在这方面的研究明显不足(赵泉鸿等, 1999)。以往的研究多偏重于对盆地沉积充填序列、构造几何学、运动学及动力学的研究, 对盆地沉积物中所包含的区域构造演化、海陆变迁信息未能进行深入的提取, 对邻区岩体的剥露过程还缺乏精细的热年代学研究, 特别是未能从岩体剥露与盆地沉降两个方面来进行综合对比研究(舒良树等, 2004; 闫义等, 2005)。

晚白垩世以来, 华南沿海发育了一系列沿北西向大断裂呈串珠状排列的小型陆相断陷盆地, 如华南地区的南雄盆地、三水盆地、河源盆地及东莞盆地等, 与华南沿海岩浆岩带形成盆-岭相间的构造地貌格局。这些盆地往往继承燕山晚期的特征而又加以改造, 形态比较复杂, 盆地沉积类型复杂, 沉积环境多变, 主要发育晚白垩世—早第三纪陆相沉积, 在中新世以后隆起。同时南海北部陆架发育一系列具有相似发展史的断陷盆地, 如台西盆地、珠江口盆地及琼东南盆地等, 各沉积盆地的主要成盆期是第三纪、古新世、始新世及早渐新世, 主要为陆相沉积。晚渐新世时开始海侵, 至晚第三纪形成海相沉积。南海北缘盆地具有裂陷大陆边缘典型的双层结构, 即下层为断陷和断隆, 上层为披盖式拗陷, 二者间以一明显张裂不整合为界。但有别于一般的被动大陆边缘, 珠江口盆地晚白垩世—早第三纪表现出明显的多幕裂陷活动及晚第三纪的裂后沉降加速, 在盆地内形成多个区域不整合面(龚再升, 1997; 李思田等, 1998; Li, 2000; Shi et al, 2005; 孙珍等, 2005)。南海北缘盆地处于华南大陆与南海海盆的连接部位, 盆地沉积物包含了南海北缘构造格局形成及与周围环境相互作用的诸多历史信息。各种不同来源的物质, 特别是陆源碎屑物质的组成是定量示踪源区、反演区域构造演化的重要依据。

华南大陆以构造变形复杂著称, 历经多期造山与伸展运动, 发生在中三叠世的印支运动使扬子板块和华夏板块最终拼合(程裕淇, 1994; Chen et al, 1998; 殷鸿福等, 1999)。统一的华南大陆在燕山期经历了强烈的构造岩浆作用, 发育大面积的中生代花岗岩, 自南向北形成3条东西向的构造——岩浆岩带(程裕淇, 1994; 陈培荣等, 2002)。燕山早期第一阶段花岗岩(180~155Ma)主要分布在南岭北部(都庞岭—九嶷山—骑田岭—诸广山—大埠—古田岩带)。燕山早期第二阶段花岗岩(155~140Ma)主要分布在南部(连阳—佛冈—白石岗—河田—大埔岩带), 均呈东西向展布。燕山晚期花岗岩(140~70Ma)主要分布在福建和广东沿海地区, 与海岸线平行, 总体呈北东向展布(Li, 2000; 陈培荣等, 2002)。这些中生代花岗岩, 特别是晚中生代以来的花岗质岩石目前已广泛出露地表, 这表明华南自中生代以来至少有千米级的上覆盖层被剥蚀。南海北缘盆地均已不同程度钻遇晚中生代花岗岩基底, 如被珠江口盆地沉积物直接覆盖的白垩纪花岗岩, 其同位素年龄为70.5~130Ma。盆地裂陷沉积始于晚白垩世—古新世, 反映陆缘隆升剥蚀速度较高(邹和平, 1995; 龚再升, 1997)。前人对华南中生代构造岩浆作用、变形序列和地球动力学机制进行了大量的研究和探讨(李献华等, 1999; 陈培荣等, 2002; Wang et al, 2003; Li et al, 2007), 但对于华南沿海中生代以来的构造地貌格局、隆升剥蚀及其时空格架等方面的研究还相当薄弱, 一方面不利于对华南沿海构造岩浆带隆升剥蚀过程的完整理解, 另一方面也限制了对南海北缘盆地新生代沉积物剥蚀-搬运-沉积过程的深入认识。在缺乏邻区岩体精细矿物热年代学资料的情况下, 很难对南海北缘盆地不同阶段物源区的演化及供给比例进行定量分析(Clift et al, 2002)。

2 源区示踪手段研究进展

盆地陆源碎屑沉积物中包含的盆-山构造演化信息可分为如下两个方面: 1) 沉积物物质组成信息; 2) 沉积物年龄组成信息。以往的研究多偏重于对盆地沉积物物质组成的分析, 而忽略了另一重要信息——年代学信息。由于盆地碎屑沉积物来源非常复杂, 受不同物源区贡献的差异及碎屑物搬运过程中分选作用等因素的影响, 单纯分析盆地沉积物物质组成信息[如碎屑组成、副(重)矿物及地球化学成分]并不能定量地示踪源区的性质和特征(金秉福等, 2002; 闫义等, 2002)。近年来国外研究者开始尝试通过盆地矿物热年代学方法, 如沉积物碎屑锆

石U-Pb年龄谱、裂变径迹(FT)年龄及亏损地幔Nd同位素模式年龄(T_{DM})的研究来获取盆地沉积物所包含的年代学信息, 结合对比周缘岩体出露情况及构造演化特征, 进而界定源区, 定量计算山脉的隆升剥蚀速率、剥蚀比例, 取得了很好的效果(Henry et al, 1997; Najman et al, 1997; Yan et al, 2009)。

沉积岩地球化学及钐同位素方法是研究沉积物物源的重要手段之一。沉积岩中的某些不活动元素(如高场强元素和稀土元素等)在水体中的分配系数很低, 在水里中停留时间很短, 不易被水体带走, 因此, 在风化、搬运和沉积等过程中它们几乎被等量地转移到沉积物中(Taylor et al, 1995)。沉积岩元素比值, 尤其是化学稳定性较好的元素的比值, 能够很好地反映源区性质的变化, 如沉积岩中Eu/Eu*、Th/Sc、Th/La、Th/Cr元素比值几乎不受粒度及沉积环境的影响(Cullers, 1994; Yan et al, 2007)。钐-钕(Sm-Nd)同位素体系只与源区岩石的年龄组成有关, 而在岩石风化、搬运及沉积等地表过程中能够很好地保持稳定, 基本不发生变化(McCulloch et al, 1978; Goldstein et al, 1984), 因此, Nd同位素能够提供沉积物源演化的可靠信息。目前在物源研究中将沉积物地球化学与Nd同位素研究结合起来是广泛使用并行之有效的办法(Li et al, 2003; Yan et al, 2007)。

然而, 由于Nd同位素反映的是沉积物各种组分的综合信息, 是各种组分的平均值, 因此对于源区岩石组分非常复杂的区域, 该方法很难提供物源演化的详细信息。锆石稳定性极强(锆石U-Pb体系封闭温度约为700℃)且在盆地碎屑沉积物中分布广泛, 因而能较好地保存源区信息。锆石常具有良好的晶形、特殊的晶体习性以及颜色、环带等现象, 并会随着形成环境的变化呈现不同的特点(Murphy et al, 2000; Boatner, 2002)。因此, 不同来源锆石的形态、成分及年龄组成就成为示踪源区, 反演区域构造演化的重要指标(Bruguier et al, 1997)。选择沉积盆地内控制性层位的样品, 进行单颗粒锆石U-Pb年龄测定, 获取盆地沉积物的锆石U-Pb年龄谱, 综合锆石形态、成分组成分析, 通过与盆地毗邻山脉出露岩体进行对比, 可以了解某一沉积时期沉积物源区的多样性及盆地不同时期物源性质的变化特征(Bruguier et al, 1997; Murphy et al, 2000)。砂岩碎屑锆石U-Pb年龄谱及Hf同位素组成已被广泛用于追踪物源的详细演化过程。该方法与全岩Sm-Nd同位素方法能够形成很好的互补, 可以为沉积物的物源演化提供可靠且详细的信息。

3 低温阶段山脉隆升过程的确

自Dodson (1973)提出矿物同位素封闭理论以来, 矿物同位素封闭温度年龄已被广泛应用于研究造山带的 $T-t$ 冷却轨迹、厘定造山带地貌格局、构造热事件期次和隆升剥露作用时空格局(Hacker et al, 1995; Krol et al, 1996; Davis et al, 2001)。

裂变径迹技术利用矿物内放射性同位素发生放射性衰变, 粒子对矿物产生损伤而留下“径迹”, 以及“径迹”对温度的敏感特性获得热事件发生的年龄, 并利用不同矿物的退火模式反演矿物热演化历史。近年来裂变径迹技术迅速发展, 裂变径迹年龄、封闭径迹长度及其分布状态的综合分析为研究造山带隆升过程提供了有效的低温热年代学工具, 已被广泛用于阿尔卑斯山、阿巴拉契山、安第斯山、青藏高原、秦岭大别等地区中生代隆升作用时空格局研究(Thomson, 1994; Sorkhabi et al, 1996; Reid et al, 2005)。

(U-Th)/He低温定年技术是近年才开始实际应用的同位素定年技术(Warnock et al, 1997; Reiners et al, 1999, 2002)。该技术的原理是矿物中的放射性元素U、Th通过 α 衰变, 形成稳定的 ^4He 同位素, 通过测定矿物中的U、Th、He含量而获得其同位素年龄。由于(U-Th)/He体系的封闭温度较其他已有同位素定年体系的封闭温度更低[如磷灰石(U-Th)/He封闭温度为40~75℃], 特别适用于近地表隆升-剥蚀研究。20世纪90年代以来, 国外一些实验室, 如澳大利亚墨尔本大学地球科学学院实验室、美国加利福尼亚理工学院同位素实验室及英国伦敦大学同位素热年代学中心等先后开展了(U-Th)/He定年的研究工作。由于不同地区、不同成因样品的磷灰石、锆石、榍石中He扩散实验结果的一致性, He扩散模型理论推导的实现及试验样品(U-Th)/He年龄与已知其他同位素定年技术所获年龄值具有合理协调的结果, 表明(U-Th)/He定年技术不仅可用于实际, 而且是一种极富潜力的有效热年代学研究方法。近年来国外学者开始尝试利用此方法进行地质体定年、热演化、地形地貌及山脉隆升剥蚀等方面的研究, 并取得了很好的效果。如Kohn等(1992)利用(U-Th)/He方法对新西兰北岛Rangitawa Tephra的新生代流纹质黑耀岩形成年龄进行了测定; House等(1997)利用磷灰石(U-Th)/He定年技术开展了对美国加利福尼亚内华达山脉中部地区新生代热演化研究; Clark等(2005)和Kirby等(2002)分别结合磷灰石(U-Th)/He、裂变径迹及Ar-Ar测年技术对青藏高原东缘隆升剥蚀过程

进行了示踪。但目前国内学者对这一方法的应用尚不多见(吴堃虹 等, 2002; 周祖翼 等, 2003)。封闭温度较高的同位素体系, 如锆石U-Pb、不同矿物的Rb/Sr、⁴⁰Ar/³⁹Ar等获得的*T-t*轨迹受两种因素控制: 一是岩浆热或变质热的自然冷却, 二是隆升导致的冷却。较高温度阶段的*T-t*轨迹是地质体的自然冷却与隆升冷却的混合结果, 包含更明显的散热冷却意义, 因而利用较高封闭温度同位素体系进行山脉隆升剥蚀研究具有较大的不确定性。相对于封闭温度较高的同位素体系, 裂变径迹和U-Th/He定年技术具有相对较低的封闭温度, 使人们能获得约200~45℃温度段内的*T-t*轨迹, 轨迹所包含的地质体自然冷却散热信息进一步下降, 其*T-t*轨迹较其他同位素方法所获轨迹信息有更明确的隆升意义。锆石、磷灰石裂变径迹和磷灰石(U-Th)/He测试相结合, 在确定低温阶段(~200℃以内)山脉去顶与地貌隆升作用方面能够提供较完整的*T-t*轨迹。

4 南海北缘盆-岭格局及地貌演化

笔者近年来通过对南海北缘盆地碎屑沉积物地

球化学及矿物热年代学分析, 结合华南沿海花岗岩岩体隆升剥蚀过程研究, 对南海北缘构造地貌演化及沉积物剥蚀-沉积过程进行了综合分析, 取得了如下主要认识。

4.1 南海北缘裂解过程地貌反演

为全面了解南海北缘裂解过程地貌格局演化, Yan等(2009)对华南沿海主要花岗岩岩体进行了裂变径迹及(U-Th)/He年代学测试分析, 对南海北缘岩体剥露过程的*T-t*轨迹进行了制约。华南沿海主要花岗岩岩体锆石裂变径迹年龄均落入(87.3±4.0)Ma到(116.6±4.7)Ma (图1), 表明南海扩张以前华南沿海经历了相对均一的热事件, 可能与太平洋板块俯冲引起的岩浆活动有关, 南海区域由晚中生代造山到新生代扩张的构造转化时间约为90Ma。磷灰石裂变径迹(AFT)及(U-Th)/He年龄则表现出明显的差异: 沿海地区年龄较大, 分别为(60.9±3.6)Ma(AFT)和(47.5±1.9)Ma[(U-Th)/He]; 向内陆年龄逐渐变小, 分别为(37.3±2.3)Ma(AFT)和(15.3±0.5)Ma[(U-Th)/He] (图1)。

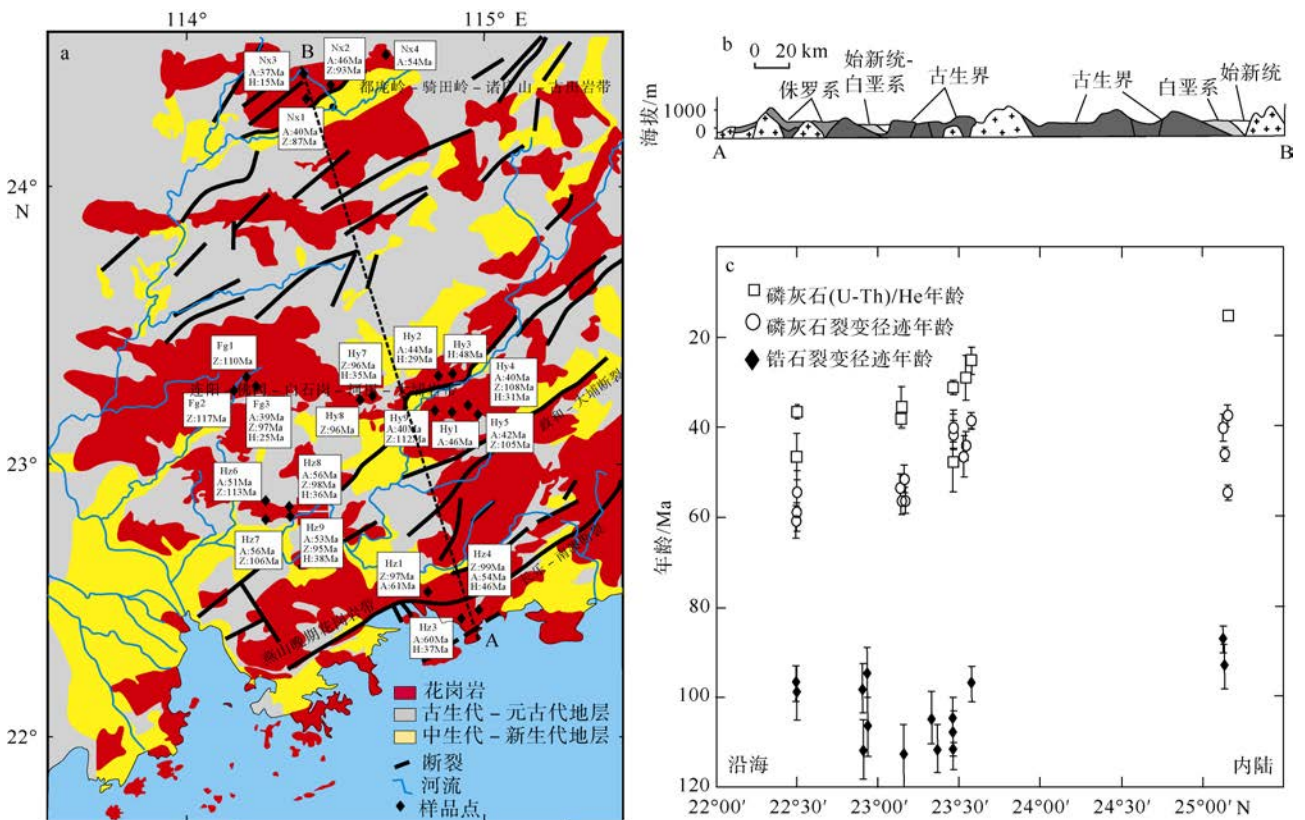


图1 华南沿海主要岩体裂变径迹及(U-Th)/He年龄(Yan et al, 2009 修改)

a. 样品位置及年龄; b. 样品年龄与大陆边缘距离的关系; c. 华南主要花岗岩岩体锆石裂变径迹年龄、磷灰石裂变径迹(AFT)及(U-Th)/He年龄。图a中Ns1、Fg1、Hy1、Hz1等表示样品编号; A为磷灰石裂变径迹年龄; Z为锆石裂变径迹年龄; H为(U-Th)/He年龄; 图a中线段AB为图b所示剖面位置; 图c中上下影线表示年龄值的误差

Fig. 1 Topographic cross-section showing the locations of samples compared against their FT and helium ages (error bars are ± 1 sigma)

热模拟结果显示,南海北缘岩体剥露过程具有明显的阶段性和非均衡特点,总体上由3个阶段组成:古新世(70~50Ma)快速剥露;晚始新世—中中新世(30~15Ma)构造活动相对稳定;晚中新世(15~10Ma)以来较快速的冷却过程(图2)。

华南沿海主要岩体锆石、磷灰石裂变径迹及磷灰石(U-Th)/He热年代学分析结果表明,南海北部大陆边缘演化过程较为复杂,表现为明显的多阶段性剥蚀过程及剥蚀中心由南向北迁移的特点。被动大陆边缘海岸带的演化大致可归纳为3种主要的模式(Gallagher et al, 1998)。南海北缘裂后阶段地貌演化接近于拗陷模式,内陆剥露过程明显强于沿海,与大部分被动大陆边缘演化有明显的区别

(图3)。南海北缘盆地沉降中心逐渐向南迁移,同时华南沿海剥蚀由沿海向内陆迁移的演化过程对应于南海的扩张过程。南海北缘早期为统一的盆-岭演化体系,由于太平洋板块的俯冲后撤,在东亚大陆边缘发生了大规模的张裂作用。南海北缘古新世(70~50Ma)的快速剥蚀过程,暗示南海北缘盆-岭相间的构造地貌格局开始形成。晚期(~30Ma)由于南海中央海盆开始扩张,华南沿海构造趋势于稳定。南海北部大陆边缘是在中生代岩浆岩带基础上经短期海底扩张形成,相对热的和较软的岩石圈结构造成南海北缘早期宽广的盆-岭相间的构造格局的形成,导致南海北缘复杂的地貌演化模式(Yan et al, 2009)。

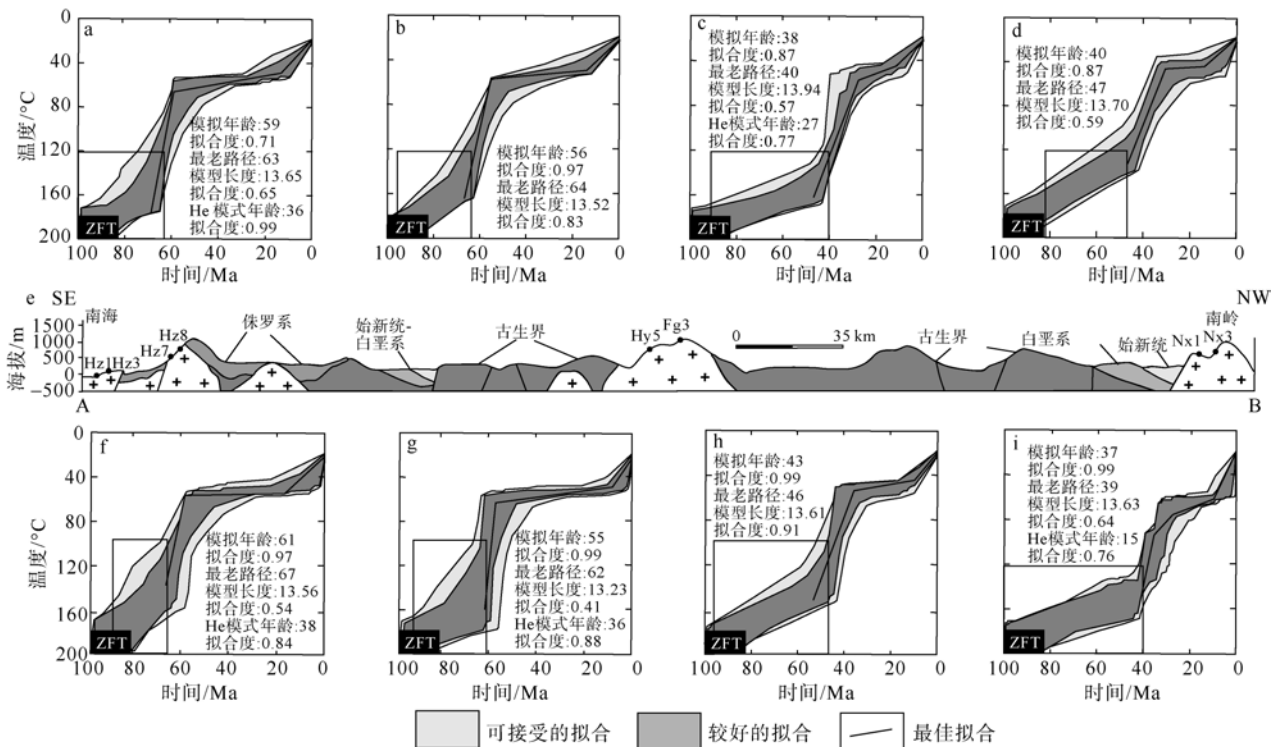


图2 华南沿海主要岩体多阶段剥蚀过程(Yan et al, 2009)

a. Hz3样品; b. Hz7样品; c. Fg3样品; d. Nx1样品; e. 南海—南岭地质剖面图及样品分布; f. Hz1样品; g. Hz8样品; h. Hy5样品; i. Nx3样品。ZFT表示锆石裂变径迹; 各图中的方框内为模拟插值

Fig. 2 Representative plots of fission track and He modeled thermal histories

4.2 南海北缘盆地沉积物来源示踪及水系演化

中国台湾新生代地层泥岩样品的Nd同位素比值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 总体介于0.511877~0.512157。始新世—晚渐新世(~31Ma以前)样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为0.512033~0.512157, Nd同位素组成(ϵNd 值)为-11.8到-9.3, 平均值-10.56。而晚渐新世(~25Ma以后)之后样品Nd同位素明显降低, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值变为0.511895~0.512014, ϵNd 值为-14.5到-11.9, 平均值达-12.96。 ϵNd 在~31Ma时达-9.37, 而随后逐渐降

低, 于~25Ma时降为-12.74, 并且其后基本保持不变(图4)。同样, ODP1148站~23.8Ma左右沉积物的 ϵNd 值发生约2~3的负偏移(Clift et al, 2002; Li et al, 2003)。在莺歌海—琼东南盆地的钻井也发现类似的 ϵNd 负偏移, 不过发生时间不是在~23.8Ma, 而是在~13.8Ma(Yan et al, 2007)。在莺歌海—琼东南盆地渐新世—中中新统沉积岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值比较高, ϵNd 值高于-8, 上中新统—第四系 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值比较低。

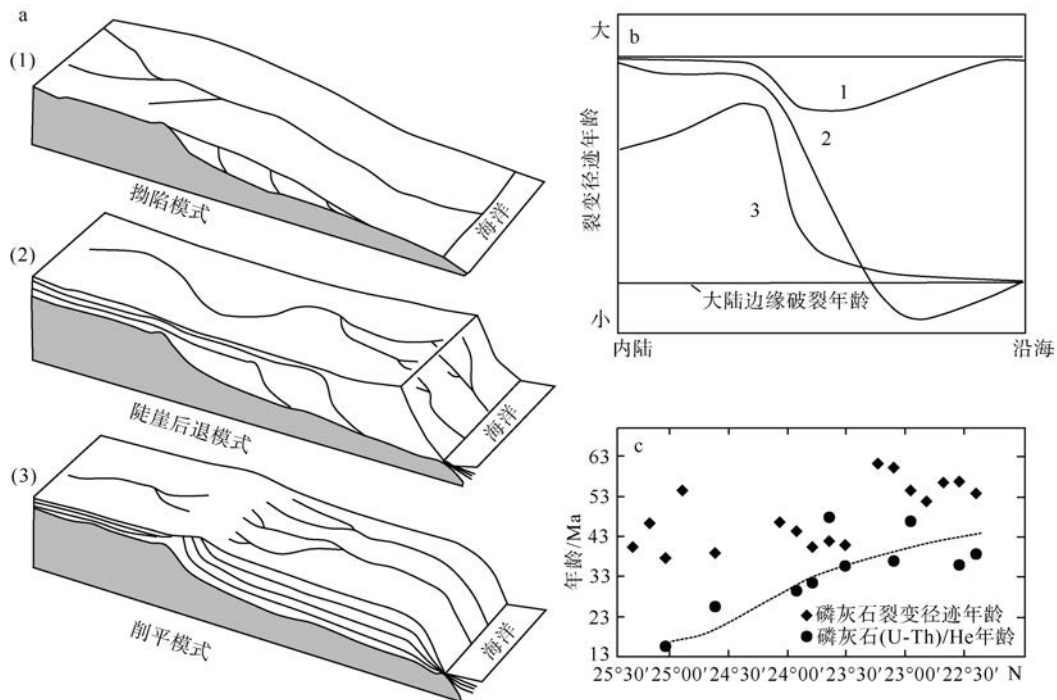


图 3 被动大陆边缘地貌演化模式(a)、3 种模式对应的裂变径迹年龄由沿海到内陆的变化趋势(b)和南海北缘裂变径迹年龄和(U-Th)/He 年龄由沿海到内陆的变化趋势(c)
图c中的虚线为磷灰石(U-Th)/He年龄的拟合曲线
Fig. 3 Geomorphc development of passive margins

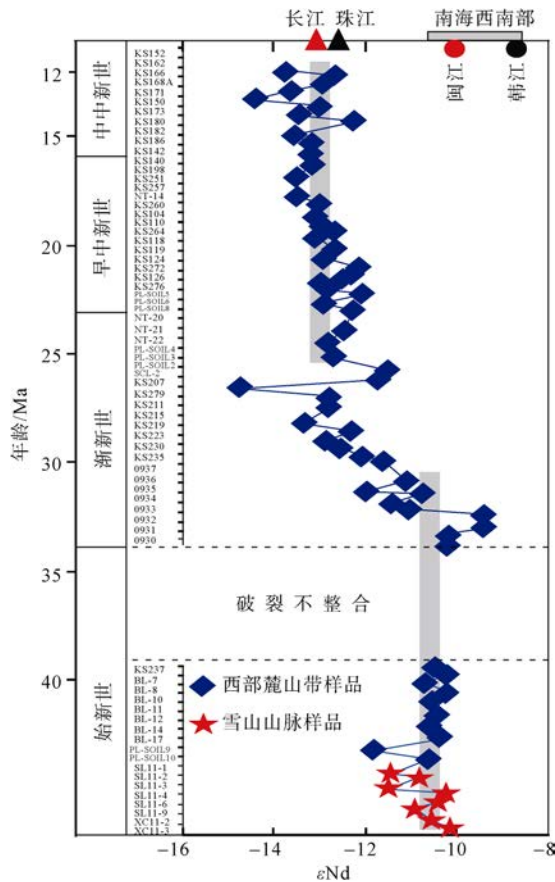


图 4 中国台湾西部麓山带新生代地层泥岩 ϵNd 同位素剖面变化(Lan et al, 2014)
Fig. 4 Profile variation of Nd isotopic composition of mudstone in Taiwan

碎屑锆石 U-Pb 年龄谱分析显示, 南海北缘盆地始新世—渐新世地层碎屑锆石主要由 120~150Ma、230~250Ma 及 400~500Ma 的年轻锆石组成。中新世样品中的年轻锆石颗粒(<500Ma)明显减少, 但前寒武纪锆石颗粒的比例明显增加, 其年龄峰值主要分布在 800~1000Ma、1800~2200Ma 和 2400~2600Ma 之间(图 5)。南海北缘盆地地层 Nd 同位素比值及锆石 U-Pb 年龄谱结果表明始新世—渐新世沉积物与渐新世以后(~25Ma)沉积物属性发生了明显变化。 ϵNd 值与岩石类型直接相关, 来自地幔岩浆岩的 ϵNd 值相对较高。华南沿海在晚中生代经历了强烈的岩浆作用, 发育大面积的晚中生代花岗岩, 扬子地块则是以前寒武纪地壳为主, 总体上导致华夏地块比相邻的扬子地块有更高的 ϵNd 值(Gilder et al, 1996)。同时, 华夏地块沿海地区比内陆显示更高的 Nd 同位素值, 主要是因为显生宙的花岗岩岩石主要分布在沿海地区(Chen et al, 1998)。始新世—渐新世(~25Ma 之前)华南沿海地区(ϵNd 为-2 到-7)出露的中生代花岗岩为盆地的主要物源; ~25Ma 之后, 相对较老的锆石组分明显增加, 华南内陆碎屑物质来源增多。盆地沉积物由近源向远源的逐渐转变, 反映了由于青藏高原的隆起及东亚边缘海扩张、地貌格局转变, 导致东亚河流, 如珠江和闽江等水系由沿海向内陆的侵蚀扩展过程。

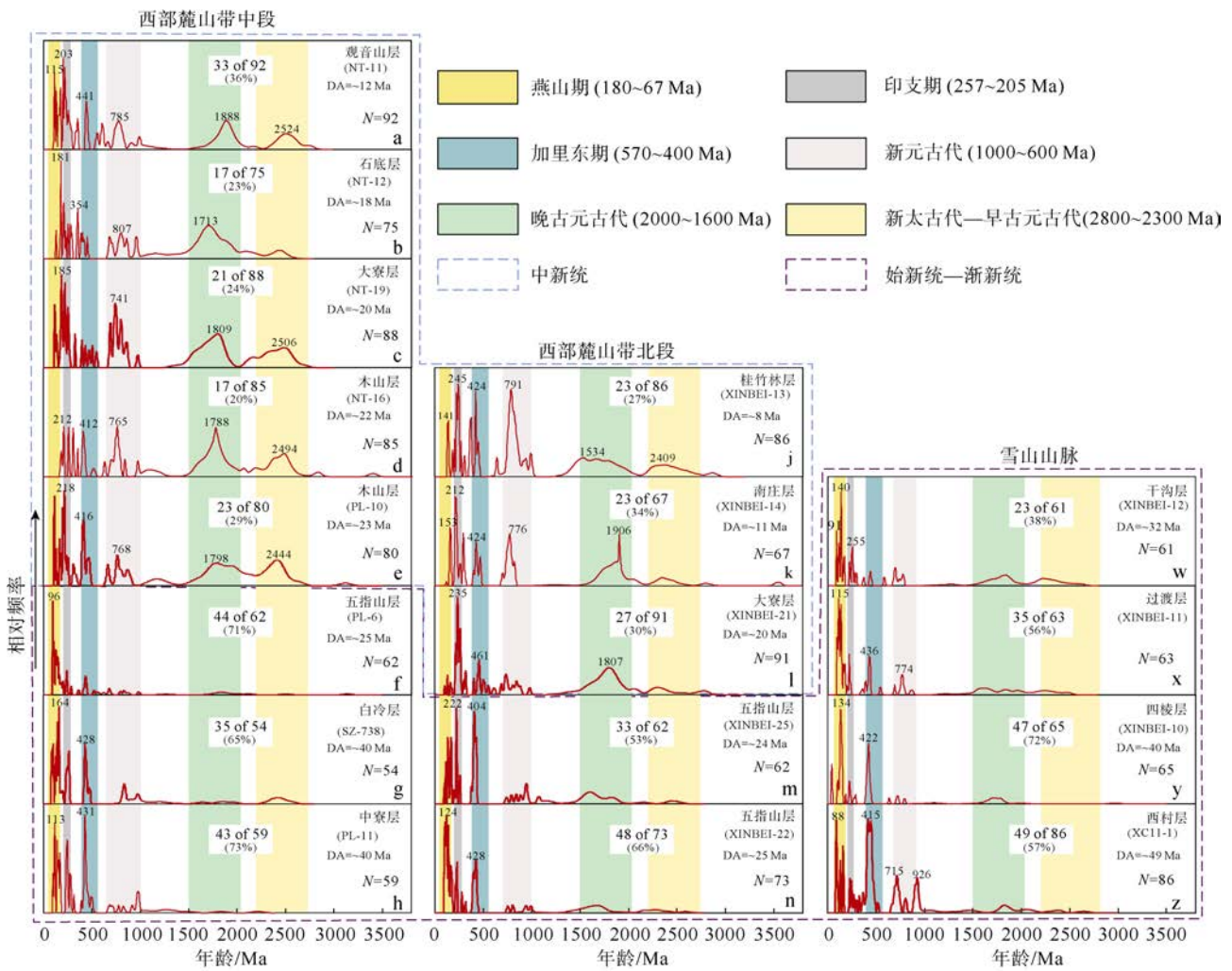


图 5 中国台湾新生代地层沉积物锆石 U-Pb 年龄谱(Lan et al, 2016)

图中DA为锆石年龄; N为样品总数

Fig. 5 U-Pb age spectra of detrital zircons from strata in Taiwan

印度板块与欧亚板块碰撞并导致青藏高原的隆升无疑是东亚新生代最为重大的地质事件(Wang et al, 2008), 其控制了东亚新生代构造及地貌演化, 进而对水系的重组及大陆边缘盆地物源的演化产生重要影响。尽管大量的热年代学研究已表明青藏高原东部在晚中新世有明显的抬升(Clark et al, 2005), 而Wang等(2012)在相同地区通过对各种热年代学指标的研究认为, 青藏高原东缘除了在晚中新世有一次隆升作用以外, 在晚渐新世(30~25Ma)也有一次明显的快速剥蚀抬升作用。除此以外, 东亚水系演化的证据(Clift et al, 2006; Zheng et al, 2013)也显示青藏高原在晚渐新世—早中新世期间发生了一次大规模的隆升运动。青藏高原隆升的直接结果就是亚洲地貌格局的调整及大型水系的重组, 这一次重大的构造隆升事件可能控制着东亚现今地貌格局、水系重组以及物源演化的形成。

通过珠江口盆地沉积物和华南沿海剥蚀过程的

对比, ~30~15Ma, 华南沿海构造活动相对稳定, 剥蚀量较小(图 2), 而珠江口盆地自~23Ma以来发育多期深水扇, 沉积速率达到 $2 \times 10^4 \text{ km}^3 \cdot \text{Ma}^{-1}$ (Clift, 2006)。东江和北江流域较少的剥蚀量不足以提供珠江口盆地持续的大量沉积, 据此认为~23Ma珠江深水扇的形成对应于珠江水系的向西侵袭或陆架物质的再沉积, 这为珠江深水扇的来源及珠江水系的演化提供了定量依据。

5 结论

盆-山耦合的动态过程研究是探讨南海北缘构造演化的重要途径。本文详细介绍了盆地沉积物源区示踪、山脉隆升剥蚀过程的主要研究方法及其进展, 并综合分析南海北缘盆地碎屑沉积物来源和华南沿海主要岩体剥露过程矿物热年代学的已有研究成果, 对南海北缘新生代地貌演化、盆地沉积物剥蚀-沉积过程进行了双重约束。

1) 南海北部大陆边缘剥蚀过程表现为明显的多阶段性且剥蚀中心由南向北迁移, 与典型被动大陆边缘有显著区别。南海北缘在古新世(70~50Ma)经快速剥蚀形成统一的盆-岭相间的构造地貌格局; 晚期(~30Ma之后)南海开始扩张, 华南沿海构造趋于稳定。南海北部大陆边缘是在中生代岩浆岩带基础上经短期海底扩张形成, 相对热的和较软的岩石圈结构造成南海北缘早期宽广的盆-岭

相间的构造格局的形成, 导致南海北缘复杂的地貌演化模式。

2) 南海北缘盆地地层Nd同位素、碎屑锆石U-Pb年龄谱结果表明始新世—渐新世沉积物与渐新世(~25Ma)以后沉积物属性存在明显差异, 反映了东亚大陆边缘主要水系(如珠江、闽江等)由沿海向内陆的侵蚀扩展过程, 这一过程对应于南海的扩张及青藏高原东缘的隆升。

参考文献 References

- 陈长民, 施和生, 许仕策, 等, 2003. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社. CHEN CHANGMIN, SHI HESHENG, XU SHICE, et al, 2003. The Pearl River Mouth Basin (eastern) Tertiary oil and gas reservoirs formation conditions[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 等, 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 32(4): 279–289. CHEN PEIRONG, HUA RENMIN, ZHANG BANGTONG, et al, 2002. Yanshan Nanling early post orogenic granite: Petrological constraints and geodynamic background[J]. China Science: Series D, 32(4): 279–289 (in Chinese).
- 程裕淇, 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社. CHENG YUQI, 1994. Concise regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- 龚再升, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社. GONG ZAISHENG, 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 黄虑生, 1999. 珠江口盆地第三系生物地层框架[J]. 中国海上油气: 地质, 13(6): 406–415. HUANG LUSHENG, 1999. Tertiary biostratigraphic framework of Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas: Geology, 13(6): 406–415 (in Chinese).
- 金秉福, 林振宏, 杨群慧, 等, 2002. 沉积矿物学在陆缘海环境分析中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 22(3): 113–118. JIN BINGFU, LIN ZHENHONG, YANG QUNHUI, et al, 2002. Application of sedimentary mineralogy to the environmental analysis in marginal seas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 22(3): 113–118 (in Chinese).
- 李春峰, 汪品先, FRANKE D, 等, 2009. 南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造的启示——IODP 建议书 735-Full 介绍[J]. 地球科学进展, 24(12): 1339–1351. LI CHUNFENG, WANG PINXIAN, FRANKE D, et al, 2009. Opening of the South China Sea and its implications for Southeast Asian tectonics since the late Mesozoic[J]. Advances in Earth Science, 24(12): 1339–1351 (in Chinese).
- 李思田, 林畅松, 张启明, 等, 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件[J]. 科学通报, 43(8): 797–810. LI SITIAN, LIN CHANGSONG, ZHANG QIMING, et al, 1998. The dynamic process of rifting and tectonic events since 10 Ma in northern continental margin basin of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 43(8): 797–810 (in Chinese).
- 李献华, 周汉文, 刘颖, 等, 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征[J]. 科学通报, 44(18): 1992–1998. LI XIANHUA, ZHOU HANWEN, LIU YING, et al, 1999. Shoshonitic intrusive rock belt in southeast Guangxi and its petrological and geochemical characteristics[J]. Chinese Science Bulletin, 44(18): 1992–1998 (in Chinese).
- 刘光鼎, 1992. 中国海区及邻域地质地球物理特征[M]. 北京: 科学出版社: 93–97. LIU GUANGDING, 1992. Geologic-geophysic features of China seas and adjacent regions[M]. Beijing: Science Press: 93–97 (in Chinese).
- 刘和甫, 2001. 盆地—山岭耦合体系与地球动力学机制[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 26(6): 581–596. LIU HEFU, 2001. Geodynamic scenario of coupled basin and mountain system[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 26(6): 581–596 (in Chinese).
- 秦国权, 2000. 论“关于珠江口盆地 BY7-1-1 井上、下第三系界线的讨论”[J]. 地层学杂志, 24(S1): 387–393. QIN GUOQUAN, 2000. Comments on “Discussion on the upper-lower Tertiary boundary in well BY7-1-1 of the Pearl River Mouth Basin”[J]. Journal of Stratigraphy, 24(S1): 387–393 (in Chinese).
- 茹克, 1988. 南海北部边缘叠合式盆地的发育及其大地构造意义[J]. 石油与天然气地质, 9(1): 22–31. RU KE, 1988. The development of superimposed basin on the northern margin of the South China Sea and its tectonic significance[J]. Oil & Gas Geology, 9(1): 22–31 (in Chinese).
- 邵磊, 雷永昌, 庞雄, 等, 2005. 珠江口盆地构造演化及对沉积环境的控制作用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 33(9): 1177–1181. SHAO LEI, LEI YONGCHANG, PANG XIONG, et al, 2005. Tectonic evolution and its controlling for sedimentary environment in Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 33(9): 1177–1181 (in Chinese).
- 邵磊, 李献华, 汪品先, 等, 2004. 南海渐新世以来构造演化的沉积记录——ODP1148 站深海沉积物中的证据[J]. 地球科学进展, 19(4): 539–544. SHAO LEI, LI XIANHUA, WANG PINXIAN, et al, 2004. Sedimentary record of the tectonic evolution of the South China Sea since the Oligocene –

- Evidence from deep sea sediments of ODP Site 1148[J]. *Advances in Earth Science*, 19(4): 539–544 (in Chinese).
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. *地质通报*, 23(9/10): 876–884. SHU LIANGSHU, ZHOU XINMIN, DENG PING, et al, 2004. Geological features and tectonic evolution of Meso-Cenozoic basins in southeastern China[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9/10): 876–884 (in Chinese).
- 孙珍, 庞雄, 钟志洪, 等, 2005. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. *地学前缘*, 12(4): 489–498. SUN ZHEN, PANG XIONG, ZHONG ZHIHONG, et al, 2005. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 489–498 (in Chinese).
- 汪品先, 1995. 十五万年来的南海[M]. 上海: 同济大学出版社. WANG PINXIAN, 1995. The South China Sea since one hundred and fifty thousand years[M]. Shanghai: Tongji University Press (in Chinese).
- 吴国璋, 覃军干, 茅绍智, 2003. 南海深海相渐新统孢粉记录[J]. *科学通报*, 48(17): 1868–1871. WU GUOXUAN, TAN JUNGAN, MAO SHAOZHI, 2003. Deep sea facies of Oligocene sporopollen records in South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1868–1871 (in Chinese).
- 吴瑛虹, 刘厚昌, 2002. (U-Th)/He 定年——低温热年代学研究的一种新技术[J]. *地球科学进展*, 17(1): 126–131. WU QIANHONG, LIU HOUCANG, 2002. (U-Th)/He dating – A new method of low-temperature thermochronometry[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(1): 126–131 (in Chinese).
- 肖庆辉, 李晓波, 贾跃明, 等, 1995. 当代造山带研究中值得重视的若干前沿问题[J]. *地学前缘*, 2(1/2): 43–50. XIAO QINGHUI, LI XIAOBO, JIA YUEMING, et al, 1995. Frontiers on orogenic belt researches[J]. *Earth Science Frontiers*, 2(1/2): 43–50 (in Chinese).
- 阎贫, 刘海龄, 2002. 南海北部陆缘地壳结构探测结果分析[J]. *热带海洋学报*, 21(2): 1–12. YAN PIN, LIU HAILING, 2002. Analysis on deep crust sounding results in northern margin of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 21(2): 1–12 (in Chinese).
- 闫义, 林舸, 王岳军, 等, 2002. 盆地陆源碎屑沉积物对源区构造背景的指示意义[J]. *地球科学进展*, 17(1): 85–90. YAN YI, LIN GE, WANG YUEJUN, et al, 2002. The indication of continental detrital sediment to tectonic setting[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(1): 85–90 (in Chinese).
- 闫义, 夏斌, 林舸, 等, 2005. 南海北缘新生代盆地沉积与构造演化及地球动力学背景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 25(2): 53–61. YAN YI, XIA BIN, LIN GE, et al, 2005. The sedimentary and tectonic evolution of the basins in the north margin of the South China Sea and geodynamic setting[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(2): 53–61 (in Chinese).
- 姚伯初, 曾维军, 陈艺中, 等, 1994. 南海北部陆缘东部的地壳结构[J]. *地球物理学报*, 37(1): 27–35. YAO BOCHU, ZENG WEIJUN, CHEN YIZHONG, et al, 1994. The crustal structure in the eastern part of the northern margin of the South China Sea[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 37(1): 27–35 (in Chinese).
- 姚伯初, 1996. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 16(2): 1–13. YAO BOCHU, 1996. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(2): 1–13 (in Chinese).
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等, 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 24(1): 1–12. YIN HONGFU, WU SHUNBAO, DU YUANSHENG, et al, 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(1): 1–12 (in Chinese).
- 张淦昌, 1997. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京: 南京大学出版社: 398–418. ZHANG YUCHANG, 1997. The prototype analysis of petroliferous basin in China[M]. Nanjing: Nanjing University Press: 398–418 (in Chinese).
- 赵泉鸿, 汪品先, 1999. 南海第四纪古海洋学研究进展[J]. *第四纪研究*, 19(6): 481–501. ZHAO QUANHONG, WANG PINXIAN, 1999. Progress in Quaternary paleoceanography of the South China Sea: A review[J]. *Quaternary Sciences*, 19(6): 481–501 (in Chinese).
- 周祖翼, 许长海, REINERS P W, 等, 2003. 大别山天堂寨地区晚白垩世以来剥露历史的(U-Th)/He 和裂变径迹分析证据[J]. *科学通报*, 48(6): 598–602. ZHOU ZHUYI, XU CHANGHAI, REINERS P W, et al, 2003. The exhumation history of (U-Th)/He and fission track analysis of evidence since Late Cretaceous in Tiantangzhai area Dabie Mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(6): 598–602 (in Chinese).
- 邹和平, 1995. 陆缘扩张型地洼盆地系及其形成机制探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 19(4): 303–313. ZOU HEPING, 1995. On the Diwa basin system of continental margin spreading type and its genetic mechanism[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 19(4): 303–313 (in Chinese).
- BALESTRIERI M L, STUART F M, PERSANO C, et al, 2005. Geomorphic development of the escarpment of the Eritrean margin, southern Red Sea from combined apatite fission-track and (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1/2): 97–110.
- BOATNER L A, 2002. Synthesis, structure, and properties of Monazite, Pretulite, and Xenotime[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 48(1): 87–121.
- BRIAIS A, PATRIAT P, TAPPONNIER P, 1993. 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*, 98(B4): 6299–6328.
- BRUGUIER O, LANCELOT J R, MALAVIEILLE J, 1997. U–Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch (Central China): Provenance and tectonic correlations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 152(1/4): 217–231.
- CHEN JIANGFENG, JAHN B M, 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J].

- Tectonophysics, 284(1/2): 101–133.
- CLARK M K, HOUSE M A, ROYDEN L H, et al, 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet[J]. *Geology*, 33(6): 525–528.
- CLIFT P D, 2006. Controls on the erosion of Cenozoic Asia and the flux of clastic sediment to the ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3/4): 571–580.
- CLIFT P D, BLUSZTAJN J, NGUYEN A D, 2006. Large-scale drainage capture and surface uplift in eastern Tibet-SW China before 24 Ma inferred from sediments of the Hanoi Basin, Vietnam[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(19): L19403.
- CLIFT P, LEE J I, CLARK M K, et al, 2002. Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea[J]. *Marine Geology*, 184(3/4): 207–226.
- CULLERS R L, 1994. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(22): 4955–4972.
- DAVIS G A, ZHENG YADONG, WANG CONG, et al, 2001. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China[J]. *GSA Memoirs*, 194: 171–197.
- DICKINSON W R, BEARD L S, BRAKENRIDGE G R, et al, 1983. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2): 222–235.
- DICKINSON W R, SUCZEK C A, 1979. Plate tectonics and sandstone composition[J]. *AAPG Bulletin*, 63(12): 2164–2182.
- DODSON M H, 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3): 259–274.
- GALLAGHER K, BROWN R, JOHNSON C, 1998. Fission track analysis and its applications to geological problems[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26(1): 519–572.
- GILDER S A, GILL J, COE R S, et al, 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137–16154.
- GOLDSTEIN S L, O'NIONS R K, HAMILTON P J, 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221–236.
- HACKER B R, WANG QINGCHEN, 1995. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China[J]. *Tectonics*, 14(4): 994–1006.
- HAYES D E, 1980. The Tectonic and geologic evolution of Southeast Asian seas and islands[M]. Washington, DC: American Geophysical Union: 89–104.
- HENRY P, DELOULE E, MICHARD A, 1997. The erosion of the Alps: Nd isotopic and geochemical constraints on the sources of the peri-Alpine molasse sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3/4): 627–644.
- HOUSE M A, WERNICKE B P, FARLEY K A, et al, 1997. Cenozoic thermal evolution of the central Sierra Nevada, California, from (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(3/4): 167–179.
- KIRBY E, REINERS P W, KROL M A, et al, 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Tectonics*, 21(1): 1–1–1–20.
- KOHN B P, PILLANS B, MCGLONE M S, 1992. Zircon fission track age for middle Pleistocene Rangitawa Tephra, New Zealand: Stratigraphic and paleoclimatic significance[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 95(1/2): 73–94.
- KROL M A, ZEITLER P K, POUPEAU G, et al, 1996. Temporal variations in the cooling and denudation history of the Hunza plutonic complex, Karakoram Batholith, revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology[J]. *Tectonics*, 15(2): 403–415.
- LAN QING, YAN YI, HUANG CHIYUE, et al, 2014. Tectonics, topography, and river system transition in East Tibet: Insights from the sedimentary record in Taiwan[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(9): 3658–3674.
- LAN QING, YAN YI, HUANG CHIYUE, et al, 2016. Topographic architecture and drainage reorganization in Southeast China: Zircon U-Pb chronology and HF isotope evidence from Taiwan[J]. *Gondwana Research*, 36: 376–389.
- LI CHUNFENG, XU XING, LIN JIAN, et al, 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958–4983.
- LI XIANHUA, 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293–305.
- LI XIANHUA, WEI GANGJIAN, SHAO LEI, et al, 2003. 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*, 211(3/4): 207–220.
- LI ZHENGXIANG, LI XIANHUA, 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179–182.
- LIU ZHIFEI, COLIN C, TRENTESAUX A, et al, 2004. Erosional history of the eastern Tibetan Plateau since 190 kyr ago: Clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 209(1/4): 1–18.
- MCCULLOCH M T, WASSERBURG G J, 1978. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation[J]. *Science*, 200(4345): 1003–1011.
- MURPHY J B, HAMILTON M A, 2000. Orogenesis and basin development: U-Pb detrital zircon age constraints on evolution of the Late Paleozoic St. Marys Basin, central mainland Nova Scotia[J]. *The Journal of Geology*, 108(1): 53–71.

- NAJMAN Y M R, PRINGLE M S, JOHNSON M R W, et al, 1997. Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of single detrital muscovite grains from early foreland-basin sedimentary deposits in India: Implications for early Himalayan evolution[J]. *Geology*, 25(6): 535–538.
- PERSANO C, STUART F M, BISHOP P, et al, 2002. Apatite (U–Th)/He age constraints on the development of the Great Escarpment on the southeastern Australian passive margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 200(1/2): 79–90.
- QIU XUELIN, YE SANYU, WU SHIMIN, et al, 2001. Crustal structure across the Xisha Trough, northwestern South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 341(1/4): 179–193.
- REID A J, FOWLER A P, PHILLIPS D, et al, 2005. Thermochronology of the Yidun Arc, central eastern Tibetan Plateau: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ K-feldspar and apatite fission track data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(6): 915–935.
- REINERS P W, EHLERS T A, GARVER J I, et al, 2002. Late Miocene exhumation and uplift of the Washington Cascade Range[J]. *Geology*, 30(9): 767–770.
- REINERS P W, FARLEY K A, 1999. Helium diffusion and (U–Th)/He thermochronometry of titanite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22): 3845–3859.
- REN JIANYE, TAMAKI K, LI SITIAN, et al, 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3/4): 175–205.
- RU KE, PIGOTT J D, 1986. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70(9): 1136–1155.
- SHI XIAOBIN, BUROV E, LEROY S, et al, 2005. Intrusion and its implication for subsidence: A case from the Baiyun Sag, on the northern margin of the South China Sea[J]. *Tectonophysics*, 407(1/2): 117–134.
- SORKHABI R B, STUMP E, FOLAND K A, et al, 1996. Fission-track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India[J]. *Tectonophysics*, 260(1/3): 187–199.
- TAPPONNIER P, LACASSIN R, LELOUP P H, et al, 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China[J]. *Nature*, 343(6257): 431–437.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265.
- THOMSON S N, 1994. Fission track analysis of the crystalline basement rocks of the Calabrian arc, southern Italy: Evidence of oligo-miocene late-orogenic extension and erosion[J]. *Tectonophysics*, 238(1/4): 331–352.
- WANG CHENGSHAN, ZHAO XIXI, LIU ZHIFEI, et al, 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(13): 4987–4992.
- WANG E, KIRBY E, FURLONG K P, et al, 2012. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. *Nature Geoscience*, 5(9): 640–645.
- WANG YUEJUN, FAN WEIMING, GUO FENG, et al, 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *International Geology Review*, 45(3): 263–286.
- WARNOCK A C, ZEITLER P K, WOLF R A, et al, 1997. An evaluation of low-temperature apatite U–Th/He thermochronometry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(24): 5371–5377.
- YAN YI, CARTER A, XIA BIN, et al, 2009. A fission-track and (U–Th)/He thermochronometric study of the northern margin of the South China Sea: An example of a complex passive margin[J]. *Tectonophysics*, 474(3/4): 584–594.
- YAN YI, XIA BIN, LIN GE, et al, 2007. Geochemical and Nd isotope composition of detrital sediments on the north margin of the South China Sea: Provenance and tectonic implications[J]. *Sedimentology*, 54(1): 1–17.
- ZHENG HONGBO, CLIFT P D, WANG PING, et al, 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(19): 7556–7561.
- ZHOU DI, RU KE, CHEN HANZONG, 1995. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region[J]. *Tectonophysics*, 251(1/4): 161–177.