台湾东部海岸山脉对弧陆碰撞的响应

耿威^{1,2)},张训华³⁾,温珍河³⁾,黄奇瑜^{4,5)},高志清³⁾

1)中国科学院海洋研究所,中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室,山东青岛,266071;
2)中国科学院研究生院,北京,100049;3)国土资源部青岛海洋地质研究所,山东青岛,266071;
4)中国科学院广州地球化学研究所,广州,510640;5)成功大学地球科学系,台湾台南,70146

内容提要:台湾岛位于欧亚板块和菲律宾海板块的交界处,处在马尼拉海沟和琉球海沟两个方向相对的俯冲带的转换位置。由于从中新世以来吕宋岛弧与欧亚大陆斜向碰撞(弧陆碰撞)形成了今日台湾构造格局,特有的构造地质环境和正在进行中的块体增生使其成为地质学家的研究热点。针对吕宋岛弧海岸山脉段对弧陆碰撞的响应,本文综述了近年来海岸山脉年代学、地球化学、构造地质和利吉混杂岩等方面的研究成果,对海岸山脉的快速隆升和剥蚀特征进行了总结,并在此基础上指出了目前海岸山脉地质研究工作中存在的主要问题,提出今后的研究方向应集中在利吉混杂岩的形成机制、花东海盆洋壳性质和利用海岸山脉凝灰岩进行弧陆碰撞发展过程研究等几个方面。

关键词:台湾;海岸山脉;弧陆碰撞;斜向碰撞;吕宋岛弧

台湾岛是新生代以来全球最活跃的造山带之 一,所有学者都认为台湾的隆升是由于吕宋岛弧和 欧亚板块东南边缘的碰撞(弧陆碰撞)造成的(Biq Ching-chang, 1972; Bowin, 1978; Ho C S, 1986; Barrier and Angelier, 1986; Teng Louis S, 1990; Huang Chi-Yue and Yin Yuan-chi, 1990; Sibuet and Hsu Shu-Kun, 2004)。属于欧亚板块的南海洋壳沿 马尼拉海沟俯冲到菲律宾海板块之下,吕宋岛弧是 一个菲律宾海板块东缘的火山弧,菲律宾海板块相 对于欧亚大陆以 5.6~8cm/a 的速率向 NW 方向运 动(Seno et al., 1993; Yu Shui-Beih et al., 1997; Sibeut, 2002), 吕宋岛弧与欧亚大陆板块边缘发生 斜向碰撞(Suppe, 1981);而台湾岛东北部,菲律宾 海板块沿琉球海沟俯冲到欧亚板块之下,琉球海沟 和其伴生的琉球岛弧与冲绳海槽弧后盆地形成典型 的沟一弧一盆体系。因此,台湾及邻近海域丰富的 地质现象,使之成为一个天然的地质实验室,吸引着 全球地质学家几十年来不断的研究。

吕宋岛弧从 13°N 明都洛到 24°N 台湾海岸山 脉北端,延绵 1200km(Defant et al., 1990)。弧陆碰 撞向南传播(Davis et al., 1983; Suppe, 1984, Sibuet and Hsu Shu-Kun, 2004), 吕宋岛弧海岸山脉段已经 发生碰撞变形的地质构造单元均可与其南部海域吕 宋岛弧巴士海峡段正在发生碰撞的构造单元关联起 来(Huang Chi-Yue, 1993)。以海岸山脉南北延伸 的一线代表了弧陆碰撞的各个不同阶段(Huang Chi-Yue et al., 2000)(图1):洋一洋俯冲(21°20'N 以南),初期弧陆碰撞(21°20'N~22°40'N), 成熟期 弧陆碰撞(22°40'N~24°N)和岛弧下陷(24°N~ 24°30'N)。海岸山脉叠合了多期俯冲一碰撞事件, 是火山岛弧和弧前盆地以及弧间盆地碰撞演化出露 水面的最终产物, 对研究吕宋岛弧巴士海峡段以及 台湾东南部弧前盆地沉积物和构造演化具有很好的 参考价值;同时, 吕宋岛弧作为菲律宾海板块与欧亚 板块碰撞的最前缘, 其火山物质中记录着菲律宾海

海岸山脉独特的地质环境和重要的科学意义使 其成为多领域地质学者关注的热点地区,对海岸山 脉碰撞造山的演化过程和特征研究无疑是众多科学 问题中的核心问题之一。笔者认为,深化对海岸山 脉及其南部吕宋岛弧的演化过程的认识,不仅可以 丰富对马尼拉俯冲体系火山活动的认识,还能深入

收稿日期:2012-05-21;改回日期:2012-08-09;责任编辑:章雨旭。

注:本文为国家地质调查专项"中国海陆地质地球物理及地球化学系列图"项目(编号 GZH200900504)成果。

作者简介:耿威,女,1983年生。主要从事海洋地质构造研究。通讯地址:266071,中国科学院海洋研究所; Email: gengwei0128@ yahoo. com. cn。通讯作者:张训华,电话:0532-85755800; Email: xunhuazh@ vip. sina. com。

了解菲律宾海东部/花东海盆地质构造特征。近几 十年来,国内外的众多学者针对台湾弧陆碰撞演化 已经做了大量工作,在台湾构造演化过程、吕宋岛弧 火山喷发模式及地球化学特征、利吉混杂岩的形成、 弧前盆地关闭过程、弧间盆地形成演化以及快速的 隆升和剥蚀等方面取得了许多重要成果。



Fig. 1 Tectonics map about island and offshore of Taiwan (Modified from Huang Chi-Yue et al., 2000)

1 海岸山脉的研究进展

1.1 海岸山脉年代学

在 20 世纪 70 年代初,中国台湾的地质学家就 开始了对海岸山脉的研究,在板块构造格架中识别

> 出海岸山脉代表菲律宾 海板块前缘面向西的新 近纪岛弧,被认为是吕宋 火山岛弧和吕宋海槽北 延的部分(Biq Ching-Chang, 1972; Bowin et al., 1978; 纪文荣等, 1982),在这个时期徐铁 良(1976)和纪文荣等 (1982) 对海岸山脉的地 层作了较详细的研究,奠 定了日后研究的基础。 1986年开始许多学者对 海岸山脉火山岩的喷发 年龄进行 K-Ar、Ar-Ar、 Rb-Sr 和裂变径迹等方法 分析 (Richard et al., 1986; Juang Wen-Shing, 1988; Defant et al., 1990; Juang Wen-Shing and Chen Ju-Chin, 1990; Lan Ching-Ying et al., 1986; Yang T Y et al., 1988; Lo Ching-Hua et al., 1994; Yang Tsanyao F et al., 1996), 年龄范 围在 29.7~0.14Ma,海 岸山脉主体年龄在16~ 1.5Ma,绿岛安山岩喷发 年龄为 2.0~0.5Ma, 兰 屿为 3.4~1.9Ma。Yang Tsanyao F 等人(1996)根 据海岸山脉一吕宋岛之 间的火山岩样品裂变径 迹年龄,将吕宋岛弧巴士 海峡段分为西火山岛链 和东火山岛链,西老东 新,绿岛位于东火山岛

链,兰屿位于西火山岛链,这样就可以解释绿岛位于 兰屿以北的位置,但其安山岩的年龄反而比兰屿要 小。Huang Chi-yue 等学者(2006)对弧前盆地沉积 岩的样品进行了锆石年代分析,年龄范围出现两个 峰值分别是 > 64Ma 和 < 20Ma,分别代表了来自欧 亚大陆的沉积物源和火山岛弧的沉积物源。就目前 发表资料显示,作为海岸山脉主体的奇美火成杂岩 的年龄以中新世为主,绿岛和兰屿的年龄从中新世 持续到更新世,虽然年龄跨度比较大,但总体上显示 出海岸山脉自北向南到绿岛和兰屿两火山岛年龄变 小的趋势。

由于吕宋岛弧是南海洋壳俯冲到菲律宾海板块 下产生的火山弧,南海中央海盆洋壳的年龄在 32 ~ 17Ma(Taylor and Hayes, 1983),根据南海洋壳俯冲 的时间判断吕宋岛弧最早的火山喷发时间应在中中 新世之后,因此笔者认为海岸山脉主体最老的喷发 年龄 16Ma 是比较合理的,但目前唯一的记录是在 奇美火山岛中心部位以裂变径迹定年所得 16Ma (Yang T Y et al., 1988),仍缺少其他样品证据的支 持。对于大于 16Ma 的测年结果,我们推测可能是 来自于菲律宾海板块洋壳的年龄或俯冲下板块的年 龄。

1.2 海岸山脉地球化学

Defant 等(1990)分析表明海岸山脉的安山岩属 于岛弧低钾拉斑玄武岩系列; Chen Chang-Hwa 等 (1990)根据海岸山脉火山岩的地球化学特征提出 其为首例岛弧背景下 EMI 型富集地幔的产物; Lai Yu-Ming 等(2008) 对海岸山脉南部东河地区的火山 岩进行地球化学分析指出,黑色火山角砾和白色火 山角砾分别来自于铁镁质岩浆和长英质岩浆,二种 岩浆具有不同的主量元素和微量元素以及矿物组合 特征,但同位素组成和微量元素配分模式相似,因此 推断二种岩浆来源相同只是分馏程度的差异造成了 这种现象,并且二者的混合作用发生在接近地表处, 而不是岩浆房。已有资料表明,海岸山脉与绿岛兰 屿都属于岛弧钙碱性岩石,目前对海岸山脉地球化 学特征的研究主要集中在安山岩与部分闪长岩特征 上,对于广泛分布的凝灰岩和凝灰质砂岩的研究并 不多见,由于弧陆碰撞在海岸山脉没有发现动力变 质岩,因此前人都没有对海岸山脉断层接触带的地 球化学特征做过多的研究。

1.3 海岸山脉构造特征

海岸山脉是在弧陆碰撞后期距今 2Ma 才向西 逆冲上陆的吕宋火山岛弧体系,海岸山脉的构造特 征受弧陆碰撞的控制,展布一系列近于 NNE 走向、 向西逆冲的断层(图2)。海岸山脉南部卑南山砾岩 的东西两侧分别发育向西的逆断层和左旋走滑断 层,这两条活断层分解了菲律宾海板块向北西方向 运动的力。现已识别出二个中新世一上新世火山岛 (奇美和成广澳)、四个上新世一更新世残余弧前盆 地(水琏、乐合、泰源和台东)和两个弧间盆地(奇美 火山岛上的上新世的静浦盆地和成广澳火山岛上的 更新世成功盆地)(Huang Chi-Yue, 1993)。海岸山



图 2 海岸山脉构造地层图(根据 Huang, 1993 简化) Fig. 2 Tectonostratigraphic map of the Coastal Range (Modified from Huang, 1993)

脉表现的现今构造特征均是以吕宋岛弧向西逆冲为 主导因素。

奇美和成广澳两座火山岛是由中新世辉绿岩、 安山质熔岩、安山质—英安质火山碎屑岩、熔结凝灰 岩、玄武质熔岩、凝灰岩和凝灰质碎屑岩组成。由于 两座火山岛内多处发育褶皱和断层,并见不到完整 发育的火山岩相。Song Sheng-Rong 和 Lo Huann-Jih (2002)分析了火山岩相和古环境,对奇美火山岛的 喷发过程及环境做了推测,提出大约 30Ma 时奇美 火山在水下 500m 左右开始喷发,这与 Yang Tsanyao F等(1996)提出的吕宋岛弧最早的喷发在16Ma出 入较大。火山喷发停止后,积累了巨厚的火山产物, 目前讨论过此问题的学者都同意由于碰撞作用火山 发生下陷,但对于火山下陷的机制仍未有一致的认 识。Dorsey(1992)提出了两种解释,其一为火山岛 下洋壳拉张裂开减薄,整体形成一系列小裂谷或凹 陷;另一种是由于负荷庞大的增生楔造成洋壳岩石 圈弯曲下沉; Huang Chi-Yue 等(1995)提出火山岛 内发育走滑断层以适应转换拉伸作用,崩塌的火山 岛上的弧间盆地就是在这样的应力环境下发育的。 Van der Werff(1995)对中一晚中新世西班达岛弧与 澳大利亚大陆碰撞初始岛弧的下陷原因分析认为是 逆冲带前端地壳热沉降和挠曲作用造成的。Shyu J BH等(2011)根据地震和波速的分布图,提出吕宋 岛弧在弧陆碰撞初期阶段之初,在马尼拉俯冲带的 贝尼奥夫带上存在向西的俯冲,他们用这种观点来 解释弧前盆地在碰撞过程中整体或大部分的消失, 但似乎也可以解释岛弧在碰撞过程中的下陷现象。 根据已有资料分析,笔者认为热沉降作用可能是造 成弧陆碰撞过程中吕宋岛弧火山下陷的主要因素。

对于弧前盆地中散落分布的火成岩岩块的识别 一些学者也存在争议,郑文弘^①(1996)认为丰滨以 北的火成岩体并非岛弧本体,而是弧陆碰撞时由岛 弧崩落下来的巨大岩块。Huang Chi-Yue 等(1995) 认为海岸山脉最北端的大型火成岩体是奇美火山岛 向西逆冲形成向斜的西翼。根据野外考察及公开发 表的相关图件资料,笔者支持上述 Huang Chi-Yue 等人的观点,认为花莲至六阶鼻一线的火成岩体为 主向斜的西翼(图2),是奇美火山的一部分,而水琏 盆地中的火成岩体位于向斜的核部且无主要断层发 育,因此可以认为这些火成岩体为岛弧碰撞过程中 崩落跌入水琏盆地中的巨大岩块。

1.4 利吉混杂岩

利吉混杂岩的特征一直是海岸山脉研究的焦

点,也是理解弧陆碰撞的关键。从 20 世纪 70 年代 以来,许多学者对于利吉混杂岩的形成模式、混杂岩 中蛇纹岩岩块的来源以及混杂岩的分布等问题争论 不休。一些学者把这个混杂堆积的地质单元看作是 来自于中央山脉或古欧亚大陆边缘新生代岩层经滑 塌倾泻作用产生的混积层(Wang C S, 1976; Ernst, 1977; Page and Suppe, 1981; Lin S Band Chen G T, 1986; Ho C S, 1986);另外一部分学者认为利吉混 杂岩是俯冲的产物,许靖华(1992)针对海岸山脉的 这个地质单元区分了对于 mélange 和 olistostrome 的 概念,强调了利吉混杂岩强烈的韧性剪切的特征,主 张利吉混杂岩不属于滑塌混积层,而是俯冲的产物, 从而明确了利吉混杂岩的性质。

利吉混杂岩中出露蛇纹岩岩块,蛇纹岩的来源 和混杂机制目前仍是具有争议的问题,南海洋壳和 菲律宾海板块可能是两个主要来源。一种观点认为 利吉混杂岩来自南海洋壳(Biq Ching-Chang, 1972; Teng Louis S, 1990; Chung Sun-Lin and Sun Shen-Shu, 1992), Big Ching-Chang(1972)提出利吉混杂 岩是在弧陆碰撞前,马尼拉海沟俯冲刮下来的南海 洋壳的物质;另一种观点是利吉混杂岩的蛇纹岩块 来源于菲律宾海板块(Juan V C et al., 1980; Malavieille et al., 2002),蛇纹岩作为吕宋岛弧基底 的组成部分,随弧陆碰撞向西逆冲出露于海岸山脉 混杂岩中,Huang Chi-Yue 等(1992, 1995)对恒春半 岛出露的混杂岩作了分析,认为此处的蛇纹岩为马 尼拉海沟增生楔的蛇纹岩。Huang Chi-Yue 等 (2008)通过沉积物中底栖有孔虫分析得出,利吉混 杂岩的沉积时代、沉积物组分都与其西邻的泰源弧 前盆地下部沉积时代和组分相同,从而判断利吉混 杂岩在弧陆碰撞初始阶段由弧前盆地西缘向东逆 冲,正如今日花东海脊,而在弧陆碰撞后期随吕宋岛 弧一弧前盆地向西逆冲增生至海岸山脉,形成出露 海面的混杂岩。按照上述 Huang Chi-Yue 等(2008) 的观点,同样形成机制下利吉混杂岩也应出露于海 岸山脉北部水琏盆地西侧及下部,此处的混杂岩基 质成分应与水琏盆地的沉积物成分相似,但在水琏 盆地西侧并未有混杂岩出露的报道,至于弧前盆地 下部的推论,也有待于钻井等方法的验证。

利吉混杂岩中的各种外来岩块的年龄和泥质基 质的年龄一直以来都备受关注,这对混杂岩的起源 是不可或缺的参考因素。角砾岩中的页岩超微化石 为中新世早期一中期,有孔虫属于中新世一上新世, 钙质超微化石从渐新世到上新世中期(何春荪, 1986);蛇纹岩中所保存的钙质微型浮游有孔虫化 石判定其时代为 15Ma (Huang Chi-Yue et al., 2008)。外来岩块年龄的跨度较大,岩块种类多样 且具有不同来源,因此利吉混杂岩承载着马尼拉海 沟俯冲和海岸山脉碰撞隆升的综合信息,一直以来 都是海岸山脉弧陆碰撞研究的重点,随着研究的不 断深入,利吉混杂岩将会揭示更多弧陆碰撞的关键 事件。

1.5 海岸山脉的快速隆升和剥蚀

由于碰撞造山作用,海岸山脉经历急速的隆升 和剥蚀,大部分的研究主要集中在全新世。许多学 者对包括海岸山脉、绿岛和兰屿在内的不同地点在 不同时间尺度的抬升速率作过分析 (Peng Tsung-Hung et al., 1977; Liu C Cand Yu S B, 1990; Lundberg and Dorsey, 1990; Wang Chung-Ho and Burnett, 1990; Liew Ping-Mei et al., 1990, 1993; Yamaguchi and Ota, 2004; Song Sheng-Rong et al., 2004)(表1),除了1986年花莲地震造成的大约 120mm 的抬升外,每年的抬升速率为 2.2~14mm/ a。海岸山脉的南部抬升速率要高于北部,基本上大 型地震是造成海岸山脉大幅度抬升的主要原因,海 成阶地是记录地震抬升的有效途径,基本上每隔几 百年至一千年就会发生一次促使阶地抬升的大型地 震。尽管有如此巨大的隆升量,但海岸山脉的高度 变化还是比较缓慢的。笔者总结主要原因是海岸山 脉地貌形态陡峭、地震频发、降水量大以及频繁受到 台风影响,造成较高的侵蚀速率。海岸山脉剥蚀率 接近台湾平均剥蚀率 5mm/a, 有些地区可达 6~ 7mm/a(Lundberg and Dorsey, 1990).

1.6 花东海盆的研究现状

花东海盆西邻海岸山脉,东边界为加瓜海脊。

由于台湾海岸山脉东侧陡峭的地形,使花东海盆西 缘充分发育海底峡谷,大部分台湾造山带的沉积物 沉积于此(Schnürle et al., 1998)。花东海盆的水深 自西向东增加,而沉积基底(洋壳顶面)的深度却由 东向西增加(李春峰等, 2007)。花东海盆具有一个 挠曲的地壳和隆升的上地幔,在成因上应该与加瓜 海脊的形成有关,加瓜海脊作为一片隆升的洋壳,可 能由早期菲律宾海板块在加瓜海脊东侧短暂的西北 向俯冲有关。一些学者通过磁异常条带判断花东海 盆形成时代是始新世(Hilde and Lee, 1984; Kao Hong-Ming et al., 1999; Lee Chao-Shing et al., 1999); Deschamps 等(2000) 通过在加瓜海脊西翼拖 网获取的辉长岩样品及地球物理资料得出结论,花 东海盆基底时代为白垩纪早期,而加瓜海脊东侧的 菲律宾海盆的年龄小于50Ma,从而认为花东海盆是 被围困的早白垩世洋壳块体,同时 Deschamps 等 (2000)对在兰屿发现白垩纪硅质放射虫为化石作 了解释,认为这些放射虫化石在晚渐新世吕宋岛弧 形成时就位于洋壳之上了,随后经由火山喷发带出 地表,这与花东海盆榴辉岩样品白垩纪的年龄相一 致。但限于花东海盆研究程度不够深入,资料并不 十分充分,对花东海盆形成时代和形成过程、与菲律 宾海板块的相互作用关系以及在弧陆碰撞中的角色 等方面的问题仍需进一步研究。

2 海岸山脉研究中存在的主要问题

尽管这些年对海岸山脉的构造地质特征研究取 得了很多重要的成果,但由于海岸山脉的特殊性和 复杂性,一些重要的科学问题仍存在很多争议或未 引起足够重视,主要表现在如下方面:

| 资料来源 | 地点 | 时间跨度 | 抬升速率 (mm/a) | 方法 |
|---------------------------------|-------|-------------|----------------|---|
| Peng Tsung-Hung et al., 1977 | 花莲一成功 | 全新世 | 5 | 抬升的珊瑚礁 |
| Liu C Cand Yu S B, 1990 | 东部海岸带 | 1984 ~ 1987 | 0~35 | 海平面 |
| Lundberg and Dorsey, 1990 | 海岸山脉 | 近1Ma 以来 | 5.9 ~7.5 | 地层计算 |
| Wang Chung-Ho and Burnett, 1990 | 海岸山脉 | 10Ka | 4.7~5.3 | 化石和珊瑚的 ¹⁴ C 测年 |
| Wang Chung-Ho and Burnett, 1990 | 绿岛和兰屿 | 10Ka | 1.6~2.2 | 化石和珊瑚的 ¹⁴ C 测年 |
| Liew Ping-Mei et al., 1990 | 东部海岸 | 全新世 | 9~10 | ²³⁴ U/ ²³⁰ U和 ¹⁴ C测年 |
| Liew Ping-Mei et al., 1993 | 东部海岸 | 全新世 | 2.5 ~ 8.0 | 抬升的海岸线 |
| Yamaguchi and Ota,2004 | 东部海岸 | 全新世 | 5 ~ 15 | 海阶 ¹⁴ C 测年 |
| Song Sheng-Rong et al.,2004 | 东部海岸 | 过去几百年 | 5.4~10.9 | 海阶浮石层 |

表1 台湾东部海岸抬升速率研究概况 Table 1 Uplift rates in Eastern Coast of Taiwan

混杂岩对于理解俯冲与碰撞过程具有十分重要 的意义,因此对于利吉混杂岩的形成机制有待进一 步研究。虽然现在的大多数观点支持利吉混杂岩中 的蛇纹岩并非来自南海洋壳,但仍需要结合其外来 岩块的来源与基质成分合理地提出其形成的过程。 利吉混杂岩是否普遍存在于海岸山脉之下?花东海 脊是否为混杂岩组成?

花东海盆是台湾东邻的沉积盆地,一直以来大部分学者都把其看作是菲律宾海板块的一部分,但 Deschamps等(2000)判断花东海盆具有早白垩世的 洋壳基底,与加瓜海脊东侧的西菲律宾海盆的年代 截然不同,因此有些学者推测花东海盆不属于菲律 宾海盆,可能是残留的中生代洋壳。对于这个推测 则需要详细的海洋地质调查和样品分析来判断其性 质和演化过程。

凝灰岩广泛地分布于火山岛和弧前盆地以及弧间盆地中,对于海岸山脉火成岩严重变形变位的状况,选择凝灰岩进行火山岛的喷发史研究是很好的研究方法。从凝灰岩的喷发过程来判断火山岛的形成时间与弧陆碰撞发生时间,可以与从闪长岩和安山岩以及弧前盆地沉积岩对弧陆碰撞演化的过程研究结果互相印证。

3 对进一步研究工作的思考

虽然海岸山脉段是巴士海峡段的先行者,但二 者在演化过程中仍存在差异,过去的研究中大多数 是对弧陆碰撞时空演化的相同点进行研究,虽然海 岸山脉是弧陆碰撞的成熟期阶段,但现在的吕宋岛 弧巴士海峡段在构造演化的过程上,并不完全仿照 海岸山脉段的演化,因为南海洋中脊当时对俯冲的 抵抗作用造成了吕宋岛弧 2Ma 后形成东新西老的 两条火山链(Yang Tsanyao F et al., 1996),从而使 此处弧陆碰撞的演化结果更加复杂化,对海岸山脉 以南的吕宋岛弧构造演化预测则变得十分困难。另 外,海岸山脉火山岛、弧前盆地和弧间盆地都有各自 的特点,在掌握其演化规律的同时,抓住其区别,对 海岸山脉构造演化的研究将会大有益处。

从 20 世纪 80 年代以来,许多学者作过海岸山 脉火山岩的同位素测年,这对厘定吕宋岛弧北部火 山岛的形成与活动时间和弧陆碰撞过程都有决定性 的意义。用不同种测年方法得到的年龄不尽相同, 其原因主要有两点:其一,由于海岸山脉火山岛自北 向南的斜向碰撞而发生强烈的叠置变形变位,使得 原有的火山与弧前盆地构造样式遭到隐藏或破坏, 取样位置的选取不同,造成了分析结果的差异;其 二,由于弧陆碰撞发生在晚中新世以来,一些测年方 法选择不当造成了较大的误差。目前,SHRIMP、 SIMS 同位素等一些新的测年方法技术成熟、精度 高,适于中新世以来年龄分析,应该应用于海岸山脉 的样品测年。

海岸山脉是成熟期弧陆碰撞的结果,对于研究 碰撞造山的机制和演化具有非常重要的意义,可以 为台湾南部的海洋地质构造和沉积盆研究地提供借 鉴。因此对于海岸山脉构造地质的研究方兴未艾, 随着对海岸山脉周边海域地质的研究不断加深,海 岸山脉的研究会日益增显其重要地位。

注释 / Note

郑文弘. 1996. 台湾东部海岸山脉北段构造特性之研究. 导师: 林庆伟. 成功大学硕士论文.

参考文献 / References

- 何春荪. 1986. 台湾地质概论——台湾地质图说明书. 台北:"经济 部中央地质调查所", 118~125.
- 纪文荣. 1982. 台湾利吉层与垦丁层内超微化石及其在地质构造上 之意义. 地质, 4(1): 99~112.
- 李春峰,周祖翼,李家彪,陈焕疆,耿建华,李辉.2007.台湾岛南 部海域的前碰撞构造地球物理特征.中国科学(D辑),27(5): 649~659.
- 徐铁良. 1976. 台湾海岸山脉中的利吉混同层. 台湾省地质调查所 汇刊, 25:87~96.
- 许靖华. 1992. 混杂岩与台湾之混杂岩构造. 台湾石油通讯, 9(1): 11~13.
- Barrier E and Angelier J. 1986. Active collision in eastern Taiwan: the Coastal Range. Tectonophysics, 125: 39 ~ 72.
- Biq Ching-Chang. 1972. Dual-trench in the Taiwan—Luzon region. Proceedings of the "Geological Society of China", 15: 65 ~ 75.
- Bowin C, Lu Richard S, Lee Chao-Shing and Schouten H. 1978. Plate convergence and accretion in Taiwan—Luzon region. AAPG Bulletin, 62: 1645 ~ 1672.
- Chen Chang-Hwa, Shieh Yuch-Ning, Lee Typhoon, Chen Cheng-Hong and Mertzman S A. 1990. Nd—Sr—O isotopic evidence for source contamination and an unusual mantle component under Luzon Arc. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 2473 ~ 2483.
- Chung Sun-Lin and Sun Shen-Su. 1992. A new genetic model for the East Taiwan ophiolite and its implications for Dupal domains in the Northern Hemisphere. Earth and Planetary Science Letters, 109: 133 ~ 145.
- Davis D, Suppe J, Dahlen F A. 1983. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedge. Journal of Geophysical Research, 88: 1153 ~1172.
- Defant M J, Maury R C, Joron J L, Feigenson M D, Leterrier J, Bellon H, Jacques D and Richard M. 1990. The geochemistry and tectonic setting of the northern section of the Luzon arc (the Philippines and Taiwan). Tectonophysics, 183: 187 ~ 205.
- Deschamps A, Moni P, Lallemand S, Hsu S K, Yeh K Y. 2000. Evidence for early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine

Sea plate. Earth and Planet Science Letters, 179: 503 ~ 516.

- Dorsey R J. 1992. Collapse of the Luzon volcanic arc during onset of arc—continent collision: evidence from a Miocene—Pliocene unconformity, eastern Taiwan. Tectonics, 11: 177 ~ 191.
- Ernst W G. 1977. Olistostromes and included ophiolite debris from the Coastal Range of eastern Taiwan. "Geological Society of China" Memoir, 2: 97 ~ 114.
- Hilde T W C, Lee Chao-Shing. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin, Tectonophysics, 102: 85 ~ 104.
- Ho C S. 1986. A synthesis of the geological evolution of Taiwan. Tectonophysics, 125: 1~16.
- Huang Chi-Yue, Chien Chih-Wei, Yao Bochu, Chang Chung-Pai. 2008. The Lichi M lange: a collision formation along early arcward backthrusts during forearc basin closure, Taiwan arc—continent collision, The Geological Society of America, Special Paper 436: 127~154.
- Huang Chi-Yue, Shyu Chen-Tien, Lin Szubin B, Lee Teh-Quei and Sheu David D. 1992. Marine geology in the arc—continent collision zone off southeastern Taiwan: Implications for late Neogene evolution of the Coastal Range. Marine Geology, 107: 183 ~212.
- Huang Chi-Yue and Yin Yuan-Chi. 1990. Bathymteric ridges and troughs in the active arc—continent collision region off southeastern Taiwan. Proceedings of the "Geological Society of China", 33(4): 351 ~ 372.
- Huang Chi-Yue, Yuan Peter B, Lin Ching-Weei, Wang Tan K and Chang Chung-Pai. 2000. Geodynamic processes of Taiwan arc continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Urals and Corsica. Tectonophysics, 325: 1~21.
- Huang Chi-Yue, Yuan Peter B, Song Sheng-Rong, Lin Ching-Weei, Wang Chengsung, Chen Min-Te, Shyu Chen-Tien and Boris Karp. 1995. Tectonics of short-lived intra-arc basins in the arc—continent collision terrane of the Coastal Range, eastern Taiwan. Tectonics, 14: 19~38.
- Huang Chi-Yue, Yuan Peter B, Tsao Shuh-Jung. 2006. Temporal and spatial records of active arc—continent collision in Taiwan: A synthesis. Bulletin of Geological Society of American, 118: 274 ~ 288.
- Huang Chi-Yue. 1993. Bathymetric ridges and troughs in the active arc—continent collision region off southeastern Taiwan: reply and discussions. Journal of the "Geological Society of China", 36(1): 91 ~ 109.
- Juan V C, Lo H J, Chen C C. 1980. Genetic relationships and emplacement of the exotic basic rocks enclosed in the Lichi m lange, east Coastal Range, Taiwan. Proceedings of the "Geological Society of China", 23: 56~68.
- Juang Wen-Shing. 1988. Geochronology and chemical variations of late Cenozoic vocalnic rocks along the arc—continent collision zone in eastern Taiwan. Bulletin of National Museum Natural Science, 2: 89 ~ 118.
- Juang Wen-Shing, Chen Ju-Chin. 1990. Geochronology and chemical variations of volcanic rocks along the arc—continent collision zone in eastern Taiwan. Bulletin of the "National Museum of Natural Science", 2: 89 ~ 118.
- Kao Hong-Ming, Lee Chao-Shing, Hsu Shu-Kun, Wang Cheng-Song. 1999. Magnetic ages in the East and South of Taiwan onshore areas and its possible tectonic evolution, abstract in SEASIA Conference, May 9 ~ 12th: 277 ~ 279.
- Lai Yu-Ming, Song Sheng-Rong, Iizuka Y. 2008. Magma mingling in

the Tungho area, Coastal Range of eastern Taiwan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178:608~623.

- Lan Ching-Ying, Shen J J S, Lee Typhoon. 1986. Rb-Sr isotopic study of andesites from LuTao, LanHsu and Hsiao Lanhsu: Eruption ages and isotopic heterogeneity. Bulletin of the Institute of Earth Sciences Academia Sinica, 6: 211 ~ 226.
- Lee Chao-Shing, Hsu Shu-Kun Okino K, Tamaki K. 1999. Deep Drag Ocean Bottom Magnetometer and its application on the Tertiary Magnetic Isochrons, Abstract in Geophysical Meeting.
- Liew Ping-Mei, Hsieh Moon-Lung, Lai Cheng-Kuo. 1990. Tectonic significance of Holocene marine terraces in the Coastal Range, eastern Taiwan. Tectonophysics, 183: 121 ~ 127.
- Liew Ping-Mei, Pirazzoli P A, Hsieh Moon-Lung, Arnold M, Barusseau J P, Fontugne M and Giresse P. 1993. Holocene tectonic uplift deduced from elevated shorelines eastern, Coastal Range of Taiwan. Tectonophysics, 222: 55~68.
- Lin S B and Chen G T. 1986. Clay minerals from the Lichi Melange and its adjacent formations in the Coastal Range, eastern Taiwan. Acta Geological Taiwanica, 24: 319 ~ 356.
- Liu C C and Yu S B. 1990. Vertical Crustal Movement in Eastern Taiwan and its Tectonic Implications. Tectonophysics, 183:111 ~119.
- Lo Ching-Hua, Onstott Tullis C, Chen Chang-Hwa and Lee Typhoon. 1994. An assessment of ⁴⁰ Ar/³⁹ Ar dating for the whole-rock volcanic samples from the Luzon Arc near Taiwan. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section), 114: 157 ~ 178.
- Lundberg N, Dorsey R J. 1990. Rapid Quaternary emergence, uplift, and denudation of the Coastal Range, eastern Taiwan. Geology 18: 638 ~ 641.
- Malavieille J, Lallemand S E, Dominguez S, Deschamps A. 2002. Arc—continent collision in Taiwan: New marine observations and tectonic evolution. Geological Society of America Special Paper, 358: 187 ~ 211.
- Page B M and Suppe J. 1981. The Pliocene Lichi Melange of Taiwan: Its plate tectonic and olistostromal origin: American Journal of Science. 281: 193 ~ 227.
- Peng Tsung-Hung, Li Yuan-Hui, Wu Francis T. 1977. Tectonic uplift of Taiwan Island since the early Holocene. Memoir of the "Geological Society of China", 2: 57~69.
- Richard M, Bellon H, Maury R C, Barrier E, Juang Wen-Shing. 1986. Miocene to recent calc-alkalic volcanism in eastern Taiwan: K-Ar ages and petrography. Memo. "Geological Society of China", 7: 369 ~ 382.
- Schnürle P, Liu Char-Shine, Serge E, Reed D L. 1998. Structural insight into the south Ryukyu margin: effects of the subducting Gagua Ridge. Tectonophysics, 288: 237 ~ 250.
- Seno T, Stein S, Gripp A E. 1993. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geologic data. Journal of Geophysical Research, 98(B17): 17941 ~ 17948.
- Shyu J B H, Wu Yih-Min, Chang Chien-Hsin, Huang Hsin-Hua. 2011. Tectonic erosion and the removal of forearc lithosphere during arc continent collision: Evidence from recent earthquake sequences and tomography results in eastern Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences, 42: 415 ~ 422.
- Sibuet J C and Hsu Shu-Kun. 2004. How was Taiwan created. Tectonophysics, 379: 159 ~ 181.
- Sibuet J C. 2002. East Asia plate tectonics since 15 Ma constraints from the Taiwan region. Tectonophysics, 344: 103 ~134.
- Song Sheng-Rong and Lo Huann-Jih. 2002. Lithofacies of volcanic rocks

in the central Coastal Range, Eastern Taiwan: implications for island arc evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 21: 23 ~ 38.

- Song Sheng-Rong, Liu Chia-Mei, Chen Chang-Hwa, Lo Wei. 2004. Pumice layers in marine terraces: implications for tectonic uplift rates on the east and northeast coasts of Taiwan over the last hundreds of years. Quaternary International, 115 ~116: 83 ~92.
- Suppe J, 1984. Kinematics of arc—continent collision, flipping of subduction and back-arc spreading near Taiwan. Journal of the "Geological Society of China", 6: 21 ~ 34.
- Suppe J, Liou J G, Ernst W G. 1981. Paleogeographic origins of the Miocene East Taiwan Ophiolite. American Jounal of Science, 281: 228 ~ 246.
- Taylor B and Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea Basin. In: Hayes D E, ed. The Tectonic and Geological Evolution of Southeast Asian Seas and Islands Part II. American Geophysical Union Monograph, 20: 129 ~ 155.
- Teng Louis S. 1990. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc continental collision in Taiwan. Tectonophysics, 183: 67 ~ 76.
- van der Werff W. 1995. Cenozoic evolution of the Savu Basin, Indonesia: forearc basin response to arc—continent collision.

Marine and Petroleum Geology, 12(3): 241 ~ 262.

- Wang C S. 1976. The Lichi Formation of the Coastal Range and arc continent collision in eastern Taiwan. Geological Survey of Taiwan Bulletin, 25: 73 ~ 86.
- Wang Chung-Ho, Burnett W C. 1990. Holocene mean uplift rate across an active plate —— collision boundary in Taiwan. Science, 248: 204 ~ 206.
- Yamaguchi Masaru, Ota Yoko. 2004. Tectonic interpretations of Holocene marine terraces, east coast of Coastal Range, Taiwan. Quaternary International, 115 ~ 116: 71 ~ 81.
- Yang Tsanyao F, Lee Typhoon, Chen Cheng-Hong, Cheng Shih-Nan, Knittel U, Punongbayan R S, Rasdas A R. 1996. A double island arc between Taiwan and Luxon: consequence of ridge subduction. Tectonophysics, 258: 85 ~ 101.
- Yang T Y, Liu T K, Chen C H. 1988. Thermal event records of the Chimei igneous complex: Constraints on the ages of magma activites and the structural implication based on fission track dating. Acta Geologica Taiwanica, 26: 237 ~ 246.
- Yu Shui-Beih, Chen Horng-Yue, Kuo Long-Chen. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics, 274: 41 ~ 59.

A Review on Response of Arc—continent Collision in Coastal Range, Eastern Taiwan Island

GENG Wei^{1,2)}, ZHANG Xunhua³⁾, WEN Zhenhe³⁾, HUANG Chi-yue^{4,5)}, GAO Zhiqing³⁾

1) Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science,

Qingdao, Shandong, 266071, China;

2) Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

3) Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong, 266071, China;

4) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou, 510640, China;

5) Department of Earth Sciences, Cheng Kung University, Tainan, 70146, Taiwan, China

Abstract: Taiwan Island is situated in the active subduction—collision region between the Eurasian continent and the Philippine Sea plate. Tectonics in the Taiwan region is characterized by two opposite subduction systems: Manila subduction system and Ryukyu subduction system. The uplift of Taiwan results from the oblique collision of the Luzon arc and Eurasian margin. All of the geology characteristics attracted geologists all over the world. The Coastal Range is the onshore portion of the Luzon arc and is composed of deformed and accreted volcanic islands, intra-arc basins and forearc basins. Here we review geochronology, geochemistry, tectonic and geology research results of the Coastal Range and summarize the features of its uplift and erosion. We indicate the main research problems of the Coastal Range in the recent years. Meanwhile, some research directions about geology in the Coastal Range should be emphasized in the future, e. g. how the Lichi melange formed, the affiliation of the crust of the Huatung Basin, the process of the arc—continent collision recorded in tuff in the volcanoes and forearc basins.

Key words: Taiwan; Coastal Range; arc-continent collision; oblique collision; Luzon arc