

doi: 10.12029/gc20160303

肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 721–737.

Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, et al. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction [J]. *Geology in China*, 2016, 43(3): 721–737(in Chinese with English abstract).

## 识别洋陆转换的岩石学思路 ——洋内弧与初始俯冲的识别

肖庆辉<sup>1,2</sup> 李廷栋<sup>1,3</sup> 潘桂棠<sup>4</sup> 陆松年<sup>3,5</sup> 丁孝忠<sup>1</sup> 邓晋福<sup>3,6</sup>

冯益民<sup>7</sup> 刘 勇<sup>1</sup> 寇彩化<sup>1</sup> 杨琳琳<sup>6</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 3. 国土资源部咨询研究中心, 北京 100035; 4. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610082; 5. 天津地质矿产研究所, 天津 300170; 6. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 7. 西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 阐述了洋陆转化形成的洋内弧与初始弧的岩石组合序列及其地球化学特征, 提出岩浆弧是由洋陆转化以及底侵的壳幔转化共同作用形成的认识, 前弧环境是洋陆转化形成初生大陆的场所, 由特征的类似洋中脊的洋内弧前弧玄武岩类构成。大陆的形成过程如下: 从地幔中生长出洋壳, 从洋壳中的洋陆转化生长出不成熟的弧陆壳, 最后从弧陆壳底侵的壳幔转化中长出成熟的陆壳。这样, 地壳的生长和形成主要通过岩浆增生作用来实现。

**关键词:** 洋内弧; 初始俯冲; 大陆生长; 洋陆转换; 前弧; 壳幔转化

中图分类号: P542.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016) 03-0721-17

### Petrologic ideas for identification of ocean–continent transition: Recognition of intra–oceanic arc and initial subduction

XIAO Qing-hui<sup>1,2</sup>, LI Ting-dong<sup>1,3</sup>, PAN Gui-tang<sup>4</sup>, LU Song-nian<sup>3,5</sup>, DING Xiao-zhong<sup>1</sup>,  
DENG Jin-fu<sup>3,6</sup>, FENG Yi-min<sup>7</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, KOU Cai-hua<sup>1</sup>, YANG Lin-lin<sup>6</sup>

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*; 2. *Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*; 3. *Consulting Research Center, MLR, Beijing 100035, China*; 4. *Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China*; 5. *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China*; 6. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 7. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, Shaanxi, China*)

收稿日期: 2015-10-12; 改回日期: 2015-12-01

基金项目: 中国地质调查局“中国地质志、图及欧亚大陆大地构造图编制”(2011FY120100)、“主要地质单元区域地质调查与片区总结”(1212011120115)、“江南造山带区域地质调查与片区总结”(12120111120117)联合资助。

作者简介: 肖庆辉, 男, 1939年生, 博士生导师, 研究员, 现从事花岗岩大地构造学、矿产资源成矿地质背景研究与中国岩石圈三维结构研究; E-mail: qinghuixiao@126.com。

**Abstract:** In this paper, the authors describe the rock assemblage series and geochemical characteristics of the intra-oceanic arc and initial arc during the ocean-continent transition, and propose that the magmatic arc was formed together with the ocean-continent transition and the underplating crust-mantle transition. The former arc environment was the place where the primary continent was formed by the ocean-continent transition, which constituted diagnostic basalts of former arc of intra-oceanic arc similar to the mid-oceanic ridge. The formation process of the continent is as follows: the oceanic crust grew from the mantle, and the immature arc-continent crust grew from the ocean-continent transition in the oceanic crust; at last, the mature continent crust grew from the crust-mantle transition of underplating arc-continent crust. Therefore, the growth and formation of the earth's crust was mainly realized by the accretion of magma.

**Key words:** intra-oceanic arc; initial subduction; continent growth; ocean-continent transition; former arc; crust-mantle transition

**About the first author:** XIAO Qing-hui, male, born in 1939, supervisor of doctor candidates, professor, engages in the study of granite tectonics, metallogenic geological background, mineral resources and lithospheric structure of China; E-mail: qinghuixiao@126.com.

**Fund support:** Supported by Chinese Geology, Maps and Eurasian Tectonic Mapping (No. 2011FY120100), Regional Geological Survey and Summary of the Main Geological Units (No. 1212011120115) and Regional Geological Survey and Summary in Jiangnan Orogen (No. 12120111120117).

大洋如何演化形成大陆?这是当代板块构造理论和大陆动力学与地学研究重大前沿问题之一。现在地学家普遍认为,大洋演化形成大陆的洋陆转换过程是大洋演化形成大陆的重大过程之一。现代矿产资源地学研究发现,洋陆转换带是全球多数矿产资源的产地,是勘探公司寻找矿产的首要探测目标<sup>[1]</sup>。

从大陆地壳形成来说,洋内俯冲带是洋盆演化形成大陆的诞生地。洋内俯冲作用形成的洋内弧是洋盆演化形成大陆的大陆雏体,所以洋内弧形成的弧地壳,特别是大陆化的弧地壳相当于新生陆壳(juvenile continental crust),是大陆地壳形成的第一阶段。随后的弧弧、弧陆和陆-陆碰撞直至克拉通化则是大陆地壳形成第二阶段,即成熟弧形成演化陆壳阶段。

洋盆识别与重建研究以后,如何识别中国古大洋、古陆块群转换形成大陆,即探讨研究中国古大洋、古陆块群如何通过洋陆转换形成中国大陆就成了重大关键问题了。本文将从洋内弧的火成岩构造组合,洋内弧的主要地质特征,和洋内弧地壳的形成演化几个方面讨论洋陆转换作用及其过程。

## 1 洋陆转化特征岩石组合的发现

近年来在俯冲带岛弧前弧地区发现前弧玄武岩(FAB,又称MORB-Like玄武岩),玻尼岩,埃达克岩(即高锆低钪中酸性岩)和富铌玄武岩(NEB)及高镁

安山岩(HMA)等多种不同的特征火成岩组合<sup>[2-6]</sup>。它们是洋陆转化形成大陆的初生弧火成岩组合,代表了洋陆转化形成大陆的大陆胚胎、大陆胚芽、或称大陆的雏体,是初生大陆的诞生地。它不同于正常的岛弧钙碱性火山岩,称为洋内弧前弧玄武岩家族(图1)。这一发现,为人们研究大陆从海洋变来,洋盆如何转化形成大陆提供了岩石学依据与思路,也打破了俯冲带岛弧火成岩由TTG和钙碱性火山岩:玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩组合的传统模式。对俯冲带岛弧的火成岩组合序列及其岩浆作用的形成有了更深刻的认识。

目前研究发现,俯冲带岛弧岩浆的形成不是早期认为来源于俯冲板片的直接熔融或由俯冲板片部分熔融直接产生的,而主要是俯冲洋壳的脱水流体与熔融作用产生的硅质熔体由俯冲带上升进入地幔楔,使地幔楔发生熔融作用和交代作用形成的。目前研究表明,岛弧是大洋板块俯冲作用有关的板片熔融作用形成的硅质熔体和板片洋壳的脱水作用释放的水流体共同作用于地幔楔和地壳,使其发生部分熔融作用形成洋内弧前弧玄武岩家族与钙碱性火成岩组合,主要起源于洋壳及其上面的楔形地幔区。来自俯冲板片的熔融作用和洋壳的脱水作用释放的流体会向上运移引发地幔楔和地壳发生水化和熔融作用。当来自俯冲板片的流体和熔体上升进入到上驮板片地幔楔的底部,它会熔蚀已经存在的地幔楔物质,形成含水玄武岩类硅质



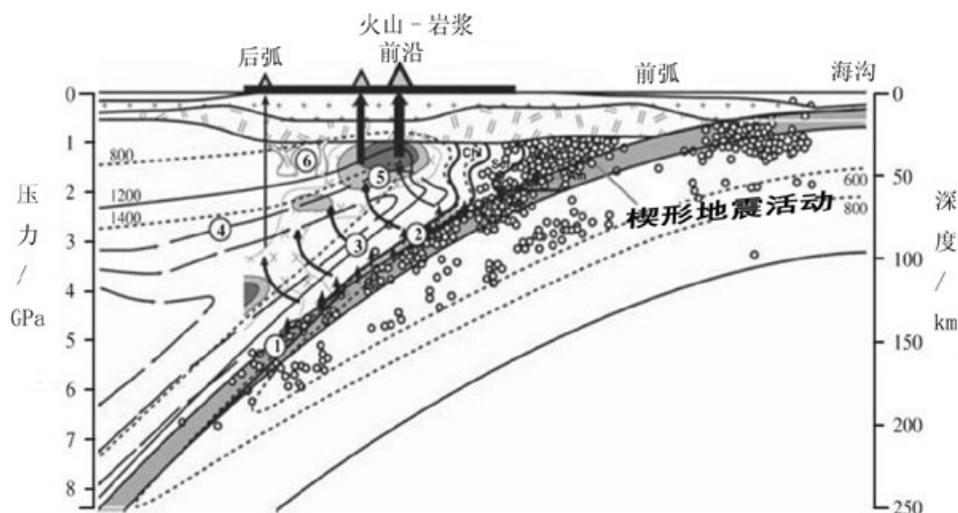


图2 岛弧岩浆由俯冲洋壳的脱水流体与熔体形成的新认识示意图<sup>[7]</sup>

- ①—俯冲沉积物、蛇纹岩化岩石圈、蚀变洋壳的脱水和递进变质作用；②—地幔楔底部的水化和脱水作用以及超临界流体的向上运移；  
③—地幔楔内的流体的运移和带状的熔化作用；④—被诱发的软流圈对流；⑤—地幔楔中的开放体系的熔融作用；  
⑥—下地壳的拆沉作用和下伏软流圈的再混合作用

Fig.2 Schematic diagram of the new understanding of island arc magmas from the dehydration fluid and melt of subducted oceanic crust

- ①—Dehydration and progressive metamorphism of subducted sediments, serpentinization of the lithosphere and the altered oceanic crust;  
②—Hydration and dehydration at the bottom of the mantle wedge and upward migration of supercritical fluid; ③—Ribbon melting and the fluid migration within the mantle wedge; ④—Elicited asthenosphere convection; ⑤—Melting of the open system in the mantle wedge;  
⑥—Delamination of the lower crust and re-mixing of the underlying asthenosphere

件进入含水条件,在达到固相线温度后熔出HMA岩浆<sup>[15-17]</sup>。

富铌玄武岩是由受板片部分熔融形成的埃达克质熔体交代过的地幔楔橄榄岩发生部分熔融形成的。与俯冲板片脱水释放的流体不同,板片部分熔融形成的埃达克岩岩浆携带有Nb (HFSE),该岩浆在穿过地幔楔时把Nb释放在地幔交代矿物中,被交代过的地幔楔部分熔融以后就形成了富Nb玄武岩。也有人认为,一个已经过萃取后变得高度难熔的地幔楔受到俯冲而衍生的流体的交代作用形成不均一的地幔楔,此种地幔楔再发生第二阶段的高温低压的原生液体部分熔融以后会产生富Nb玄武岩,而大洋拉斑玄武岩熔浆受到该原生液体淋滤后的残渣,便可以形成富Nb玄武岩。简单来说,富Nb玄武岩就是形成于多次俯冲的并被改造了的俯冲带中。

埃达克岩是 $\leq 25$  Ma、热的俯冲洋壳熔融形成的,加厚地壳底侵玄武质岩石或拆沉的地壳的部分熔融也可以形成埃达克岩<sup>[13-17]</sup>。

## 2 前弧(Forearc)是诞生大陆雏体的特殊构造环境

洋内俯冲作用形成的弧按其结构和火山-岩浆活动特点可分为3个构造区:前弧,火山-岩浆前锋和弧后盆地<sup>[22-23]</sup>(图3)。前弧是位于海沟和火山-岩浆弧之间的岩石圈,通常100~200 km宽。它是海(洋)板块刚开始发生初始浅俯冲作用地方(其俯冲深度不足百千米),也是洋盆俯冲转化形成大陆的地方,是大陆胚胎、大陆胚芽、大陆的雏体诞生的地方。其最重要的特点是保存了洋盆俯冲作用刚开始时形成初生地壳独特的早期火成活动的历史的证据,这个初生地壳大部分都是从地幔以镁铁质岩浆(玄武岩质或玻安岩质)型式形成。它们大部分是后来的地壳深熔作用、重熔或发生拆沉而产生接近地壳全岩成分的安山质物质。虽然初生的陆壳最先形成时是镁铁质的,但它继承了俯冲带的一些作用,使它具有与俯冲作用有关的标志性的、独特的地球化学特点:即富集硅和大离子亲石元素(即

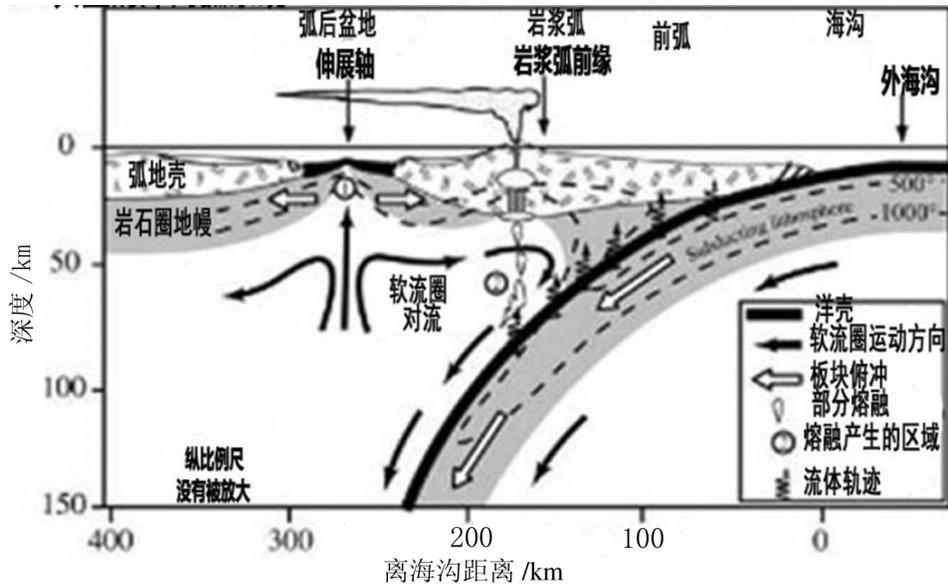
图3 洋内弧的构造分区<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Configuration of the partition of intra-oceanic arc

K、U、Sr 和 Pb), 亏损了高场强不相容元素(即 Nb、a 和 Ti), 在弧岩石中的痕量元素变化类似于地壳的全岩成分。可见与俯冲作用有关的岩浆作用是形成现今大陆壳的主要方式。

地形上前弧斜坡平缓向海沟倾斜, 它可以分成比较稳定的内前弧和变形比较强烈的外前弧。地球物理揭示, 典型的前弧系统, 如伊豆—小笠原—马里亚纳前弧主要是镁铁质地壳, 它通常向海沟倾斜, 在海沟内壁上常出露地幔橄辉岩, P 波速度向下垂直递增, 与海沟内壁采样获得的洋壳蛇绿岩一致。它保留了洋内弧系统早期历史的记录。

岩浆前锋又称岩浆弧, 火山—岩浆前锋是洋盆俯冲转化形成岛弧主体或大陆的地方。现代岩浆弧的火成岩主体产于岛弧或活动大陆边缘弧内。与大洋俯冲带有关的火山或侵入岩浆活动, 通常突然在岩浆前锋(magmatic front)处爆发式发育, 构成岛弧岩浆活动主体。以往人们对岛弧岩浆研究活动主要也以它为主。岩浆前锋大致与海沟平行, 离邻近海沟轴部 200~300 km 处。岩浆活动在岩浆前锋处的突然爆发式发育, 反映了洋俯冲带内或其上覆地幔楔内局部熔融作用主要发生离海沟轴部 200~300 km 处的地幔楔内。Sengor<sup>[24-25]</sup>曾指出, 岩浆前锋是造山带的一个重要的结构标志: 当位于两个大陆之间的洋壳俯冲消减和消亡之后, 就成为拼

合的两个大陆之间的缝合带(suture zone), 如果其间的洋足够宽, 并有多幕洋俯冲作用, 岩浆弧常常会向洋后退, 晚幕岩浆弧常常侵入并吞噬先前的俯冲增生杂岩带, 使其残缺不全, 如果这种过程不止一次地发生, 则洋陆转换带完全由俯冲增生杂岩带和岩浆弧共同构成, 这样就会形成一个宽阔的“新生陆壳”。这个宽阔的“新生陆壳”在后来的陆—陆碰撞造山过程时期, 又会发生强烈的变质和变形, 就会变得难以解读它的大尺度的结构。这是因为在一个单调的、千篇一律的高度变质变形的玄武岩—硅质岩—浊积岩为主的岩石建造内缺乏标志性的岩性, 导致野外地质工作者在过去无法确定其构造性质。由此, Sengor<sup>[24-25]</sup>提出用不断移动进入俯冲增生杂岩的岩浆前锋作为造山带结构演变标记去追索造山带的走向线和重建已经变形的和已经破碎的俯冲增生杂岩的原先的连续性, 以及重建造山带的构造单元。观察表明, 岩浆弧前锋很陡直突变, 但弧的后缘却是分散的(diffuse backs), 同时他指出, 增生楔向洋方向生长时, 岩浆前锋不是连续的向前延伸的, 而是正常的幕式跳跃的, 其距离常常大于岩浆弧内主要岩浆轴的宽度, 在野外可辨认岩浆前锋遗迹(fossil); 相反, 在连续生长的俯冲增生杂岩中蛇绿岩最长也不过 200 km, 被夹持在增生楔中, 而不是古老的大陆之间, 所以, 用蛇绿岩作为

结构标志则可能会产生误导,因为,蛇绿岩在这里是作为增生碎片偶然的样式而存在的。另外,岩浆前锋面向海沟的俯冲增生杂岩与岩浆作用有相同的年龄,而岩浆弧的后陆(hinter land)是由比岩浆弧老的岩石构成的,这样,岩浆前锋的面向可指示洋壳的俯冲方向,即与岩浆前锋面向相反的方向为洋俯冲的方向。

弧后盆地位于火山-岩浆弧后部岩石圈,是洋内弧或岛弧火成活动的最后场所。其岩浆主要是拉斑玄武岩,其成分介于MORB和火山-岩浆弧之间。弧后盆地玄武岩岩浆一般比洋中脊更富含水(1%~2% vers 0.5%),其成分因下列4个因素而发生变化:(1)流进弧后扩张脊下面的熔融区的软流圈成分;(2)流体或流体为主的俯冲构件的成分及其相关的影响;(3)软流圈和俯冲构件如何相互作用;(4)含水地幔的熔融作用和正在形成的含水岩浆的同化-结晶历史。弧后盆地拉斑玄武岩玻璃的微量元素和水含量表明,弧后盆地的减压熔融作用(类似洋中脊下面)因含水流体充足的流体熔融作用而增大了。

弧后盆地扩张通常不对称,扩张轴常比残余弧更靠近活动火山弧附近。弧后盆地寿命比火山弧更短,只几十百万年,一般为30~15 Ma。这是因为当弧后盆地成熟时或变宽时,新火山岩带离海沟的距离增大了,以致俯冲构件的水流进熔融区随时间减小了,因此在弧后盆地寿命范围内,其岩浆产物变少了。因为弧后盆地玄武岩和辉长岩成分和地壳与典型洋壳相似,但微量元素的富集程度仅在汇聚边缘可以见到,所以它们常常被认为是形成SSZ型蛇绿岩的地方。一些蛇绿岩可能形成于弧后盆地,但大多数可能形成在前弧,因为在前弧它们处于可以仰冲在漂浮地壳之上的构造位置上。玻尼岩在前弧出现普遍,但在弧后盆地却很少,因此,玻尼岩的出现可以帮助我们解决蛇绿岩产出的不确定性。但是玻尼岩也仅仅出现在一些前弧上,并不是所有前弧都产生玻尼岩。另一个区分前弧和弧后盆地的方法是弧后盆地地壳形成在岩浆弧以后的时间间隔里,而前弧地壳则形成于岩浆弧形成之前。

### 3 前弧玄武岩(FAB)的特征(识别标志)

前弧玄武岩(FAB)又称MORB-Like玄武岩,

是指洋盆开始转化形成大陆时的与初始俯冲作用有关的、具有特殊地球化学特征的拉斑玄武岩,这些玄武岩熔岩是在洋内俯冲开始不久以后发生的伸展作用的首次喷发的熔岩<sup>[11-13]</sup>。这些熔岩以前被认为是弧拉斑玄武岩,近年来,随着研究的深入,人们发现,这些熔岩地球化学特征比弧拉斑玄武岩更像扩张中心洋中脊喷发的玄武岩,但它不是产在扩张中心洋中脊而是产在前弧的喷发玄武岩,故称它为MORB-Like玄武岩。由于这些熔岩是在当今的前弧位置发现的,而且这些玄武岩是前弧中最广泛的岩石,因此把它命名为前弧玄武岩(FAB)。

由于它具有特殊的指示存在洋内俯冲带构造以及洋盆开始转化形成大陆以及产生在洋内弧前弧特殊位置的特殊意义,近年来受到人们广泛关注。

这些前弧玄武岩(FAB)常与玻尼岩和高镁安山岩组合有序产出,或共同构成洋内初始俯冲组合序列。它一般下伏在玻尼岩之下,但一些前弧玄武岩也会与玻尼岩互层,或上覆在玻尼岩之上。近年来,普遍认为,这些前弧玄武岩-玻尼岩-高镁安山岩组合序列是洋盆初始俯冲开始后伸展环境下形成的初始弧,是洋盆演化形成大陆的大陆胚胎、大陆胚芽、是大陆的雏体。例如在伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)前弧关岛东南地区水下,广泛分布有地球化学特征比弧拉斑玄武岩更像洋中脊前弧玄武岩。在该地区6500~2000 m大量的岩石类型为玄武质枕状熔岩和伴生的浅成辉绿岩侵入体,它们下伏在玻尼岩之下,一些前弧玄武岩则与玻尼岩互层。IBM前弧小笠原前弧地区FAB火山岩下覆在面向海沟的玻尼岩和更年轻的弧玄武岩之下。

根据伊豆-小笠原-马里亚纳(IBM)现代洋内弧以及古造山带洋陆转换过程的岩石地层剖面研究发现,前弧玄武岩(FAB)的特征(识别标志)如下:

(1)发育了一套由洋壳向大陆转化的特殊初始弧岩石组合:似洋中脊玄武岩(MORB-like玄武岩)-玻尼岩和镁质安山岩组合。

例如,在马里亚纳前弧Mariana forearc地区,初生弧火成岩组合剖面由底到顶层序依次为(图4):地幔橄榄岩, MORB-like玄武岩,玻尼岩和镁质安山岩,拉斑和钙碱性岛弧熔岩;又如小笠原(玻尼岛)岛前弧经深海钻探揭示其层序由底到顶依次为(图5):①地幔橄榄岩,②辉长岩,③席状岩墙,④枕状玄

武质熔岩(FAB) MORB-like 玄武岩,⑤玻尼岩和镁质安山岩,⑥拉斑和钙碱性岛弧熔岩。

上述两个剖面表明,前弧地区熔岩由老到新依次主要由前弧玄武岩(FAB)、玻尼岩和高镁安山岩组合构成(图4)。有时前弧拉斑玄武岩与玻尼岩互层,或上覆在玻尼岩之上。前弧玄武岩(FAB)与玻尼岩,玻尼岩和高镁安山岩之间常分布有介于它们之间的特殊岩石类型,人们称为过渡型岩石。玻尼岩和其他与俯冲有关的岩石的时间关系是可变化的,但总的来说,前弧玄武岩(MORB-like 玄武岩)的形成在玻尼岩之前,而玻尼岩的形成却在弧拉斑玄武岩和钙碱性熔岩之前或同时。例如在IBM,前弧玄武岩(MORB-like 玄武岩)首先喷发,紧接着为前弧玄武岩与玻尼岩之间的过渡型熔岩,然后则是玻尼岩,其后为玻尼岩与高镁安山岩之间的过渡型高镁安山岩,高镁安山岩在弧不同部分与正常的弧熔岩同时喷发,紧接着才是与整个俯冲有关的拉斑玄武岩和钙碱性熔岩的喷发。它们之间没有任何间断,都是连续的<sup>[11,22,26]</sup>。

(2)前弧初始弧岩石组合基底为洋壳或SSZ型蛇绿岩。

当俯冲板块在俯冲带进入地幔导致地幔楔发生部分熔融形成岩浆弧。如果大洋岩石圈是俯冲于大洋板块之下,其形成的岩浆弧称为洋内弧(有人又称岛弧),岩石组合以钙碱性玄武质岩石组合为特征,如西太平洋岛弧带。但是,如果大洋岩石圈是俯冲于大陆之下,在大陆地壳基础上形成的岩浆弧称为大陆边缘弧(陆缘弧),岩石组合以钙碱性安山质岩石组合为主,如安第斯大陆边缘弧。

例如,在马里亚纳前弧 Mariana forearc 地区,初生弧火成岩组合剖面底部为MORB-like 玄武岩,它的基底为SSZ型蛇绿岩,即席状岩墙、辉长岩、地幔橄橄榄岩(图4,图6),又如小笠原(玻尼岛)岛前弧经深海钻探揭示其初生弧火成岩组合剖面底部为MORB-like 枕状玄武岩,它的基底为SSZ型蛇绿岩层序,由底到顶依次为(图5):地幔橄橄榄岩、辉长岩、席状岩墙。特别要注意的是,前弧初生弧火成岩组合基底为洋壳或SSZ型蛇绿岩在古造山带也一样,例如 Izu-Bonin-Mariana 前弧岩石地层剖面与古造山带的特鲁多和阿曼 Semail 蛇绿岩可以对比,具有广泛普适性(图7)。陆缘弧与洋内弧岩浆作用的机理相似,但由于源区岩石圈地幔不同,其岩浆作用形成的岩石组合则不同。在陆缘活动大陆边缘,大陆岩石圈地幔在成为稳定大陆地块的时期内被地幔流体长期的交代、富集,成为富集型地幔源区参与部分熔融。但大洋岩石圈地幔极度亏损,岩石成分却是难熔的方辉橄橄榄岩,只有在软流圈上涌,或俯冲作用形成的热流体作用的特殊地质条件下才能发生再次部分熔融,如玻尼岩。另外,从整体上看,大陆壳比大洋壳更厚,更酸性。与岛弧火山岩相比,大陆活动边缘所产生的火山岩在岩浆上升过程中,会经历更强烈的结晶分异作用和同化混染作用,从而形成的岩石更酸性(岩石组合以安山岩,流纹岩为主),具有更高的K、Sr、Rb、Ba、Zr、Th、U、K/Rb、Fe/Mg 和更宽的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr、<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd、Pb同位素组分。这主要是由于大陆壳物质卷入岩浆作用过程造成的,尽管地幔楔也起到部分作用。岛弧火山岩也以钙碱性玄武岩为主,但岩石组合通常为

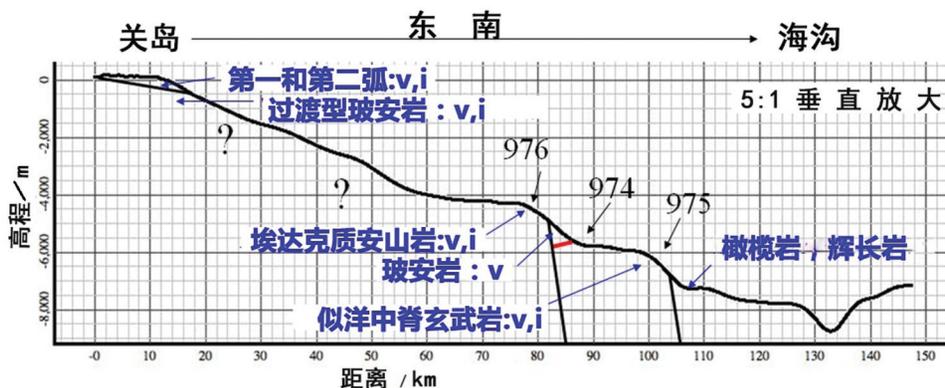


图4 马里亚纳前弧初生弧火成岩组合剖面<sup>[26]</sup>

Fig.4 Igneous composition section of Mariana forearc primary arc

岩性		年龄 /Ma	深度/m
岛弧拉斑和钙碱性玄武岩		37~44	出露
高镁安山岩		44~45	
玻安岩		44~48	
玄武岩(FAB)	无状熔岩	50~52	5500~4760
	席状岩墙		6300
辉长岩/中生代玄武岩	辉长岩	50~52	6780
	玄武岩		
橄榄岩			

图5 小笠原(玻尼岛)岛前弧层序及特殊岩石组合<sup>[26]</sup>  
Fig.5 Forearc sequence and special rock combination of Ogasawara (Boniface Island)

玄武岩-安山岩-流纹岩,地球化学特征是:TiO<sub>2</sub>含量低(0.82%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量大于13%;K<sub>2</sub>O含量较低, K<sub>2</sub>O<Na<sub>2</sub>O。所以,岛弧玄武岩 TiO<sub>2</sub>含量与 MORB (1.5%)相比却低得多。原因为 Ti 保留在金红石和钛铁矿等残留矿物中随着俯冲板块返回地幔(OIB 源区);其他不相容元素由于俯冲流体萃取作用,浓度相应的增加,导致 Ti 浓度相应减小。岛弧玄武岩微量元素及 REE 特征是以富集大离子亲石元素(LILE)(Sr、Rb、Ba 等),亏损高场强元素(HFSE)(Nb、Ta、Ti 等)为特征。在 REE 配分图解上,轻稀土(LREE)表现为富集,重稀土(HREE)较富((HREE)<sub>N</sub>>10, Yb≥2×10<sup>-6</sup>, Y≥25×10<sup>-6</sup>)。其中,富集的 LILE 主要来自俯冲流体,强烈亏损 HFSE,尤其是 Ti、Nb、Ta,因为这些元素保留在俯冲板片的残留矿物中(如金红石、钛铁矿等)。岛弧火山岩通常由于其岩浆源区存在消减沉



图6 洋内弧前弧基底为洋壳或SSZ型蛇绿岩<sup>[22]</sup>  
Fig.6 The basement of intra-oceanic arc forearc which is oceanic crust or SSZ ophiolite

积物组分出现Ce负异常。

(3)洋内俯冲的前弧初始弧岩石组合有序产出:前弧玄武岩(FAB)是洋内俯冲的初始俯冲作用形成的首次岩浆作用产物,代表了洋内俯冲的洋陆转变初始俯冲时代,玻尼岩、高镁安山岩及其相关的岩浆作用,它们晚于初始俯冲玄武岩岩浆作用,代表了初始弧逐步向正常岛弧岩浆作用转换的洋陆转化的相关的岩浆作用产物及其向大陆转化的方向。

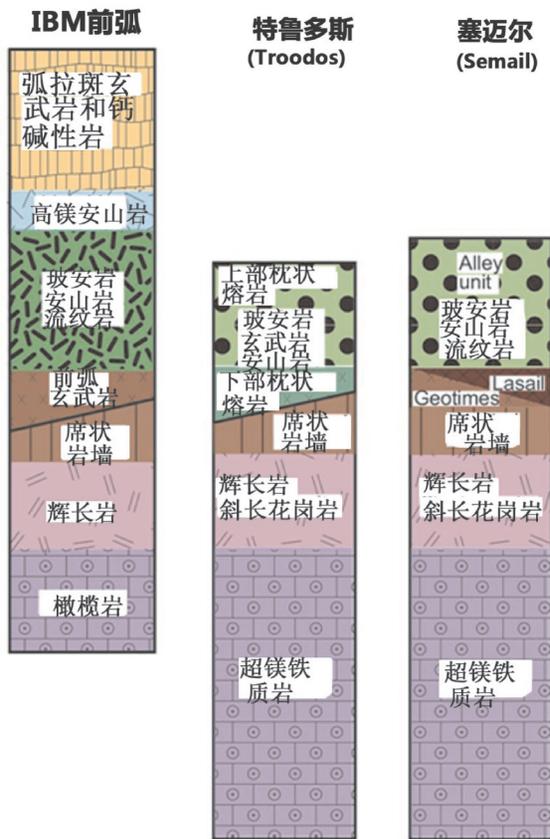


图7 Izu-Bonin-Mariana 前弧岩石地层剖面与古造山带的特鲁多斯和塞迈尔蛇绿岩对比<sup>[22]</sup>

Fig.7 The comparison between Izu-Bonin-Mariana forearc rock stratigraphic section and ancient orogenic belt ophiolite in Troodos and Semail

最近对前弧的 MORB-like 玄武岩地质和地球物理调查查明了俯冲初始阶段形成的以及岛弧形成的最早阶段的事件的情况: FAB 首先喷发,紧接着为过渡型熔岩,然后则是玻尼岩,其后为过渡型高镁安山岩,它与相当正常的弧不同部分的弧熔岩同时喷发,紧接着才是与整个俯冲有关的拉斑玄武岩和钙碱性熔岩的喷发。总的来说,这些岩石构成了 IBM 前弧洋壳洋陆转化的岩浆喷出岩层序。例如在 IBM 前弧的一定地段,岩浆作用的递进变化一般是从 MORB-like 玄武岩到玻尼岩,再到弧拉斑玄武岩和钙碱性熔岩,它们之间没有任何间断,都是连续的。

小笠原前弧的 FAB 玄武岩 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄介于 52~48 Ma,前弧辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 51.6 Ma 和

51.7 Ma,说明这些侵入岩与前弧玄武岩是同时形成的。而最老的玻尼岩 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为 48.2 Ma,而小笠原岛的玻尼岩的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为 46.0~48.2 Ma,其上覆的过渡型的高镁安山岩年龄为 44.3~44.74 Ma (图 8)。该地区剖面最上部的岩石由拉斑玄武岩和钙碱性弧熔岩组成,其年代比 44 Ma 年轻一些。这就证实 FAB 玄武岩在玻尼岩之前喷发。这个年龄关系意味着在 IBM 弧地区最老的岩浆活动为 52 Ma,这个年龄与太平洋板块运动发生变化的时代(约 50 Ma)接近。

马利亚纳前弧的 FAB 玄武岩 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄为 51.1 Ma,表明与初始俯冲作用相关的火山作用沿整个 IBM 长度范围内都是同时发生的。深海钻探 458 和 459 钻孔获得的熔岩其成分介于 FAB 和玻尼岩之间的过渡型岩石,其年龄为 49 Ma。在关岛地区的玻尼岩和拉斑弧玄武岩之间过渡型熔岩的年龄为 44 Ma。在塞班岛的高硅流纹岩喷出(其年龄为 45.1 Ma)标志着首次出现了具有相对正常的微量元素成分的弧火山作用。在罗塔、塞班和关岛正常的拉斑玄武岩到钙碱性弧熔岩是在 42 Ma 以后喷出的(图 8)。这些时代关系表明,沿着 IBM 大部分或所有的弧沟体系的,出露在海沟和前弧高地之间的地壳剖面都是在 7~8 Ma 内产生的,而此时该地区正在经历着初始俯冲以后从地幔上涌和海沟附近的伸展向正常的地幔对流的过渡或转变<sup>[18,19,22]</sup>。

上述时代关系表明,前弧初始弧岩石组合序列的演变代表了洋陆转化的岩浆作用由洋壳向正常岛弧陆壳岩浆作用转换的大陆胚胎,代表了洋陆转化的大陆化方向。初始弧岩石组合序列的演变也证实了洋陆转化的这种转换作用的确存在的证据,这是近几年来洋陆转化研究的重大发现与进展。从岩石组合成因来说,前弧 MORB-like 玄武岩地球化学特点可以和缺乏单斜辉石的残余地幔形成的岩浆对比。这个残余地幔是亏损软流圈地幔早期减压熔融留下来的,软流圈上涌则是由于太平洋板块开始俯冲到菲律宾海板块之下时造成的。前弧 MORB-like 玄武岩特点是具有类似洋中脊一样的轻稀土亏损型式,但具有较低的轻稀土和高场强元素含量,如 Nb、Ta 和 Zr 的含量却又像弧玄武岩。与 REE 和 HFSE 元素相比,大多数 MORB-like 玄武岩缺乏明显的大离子亲石元素(如 Ba、Sr、Pb)富集。

这意味着,像洋中脊一样,它们很少接纳或没有输入来源于板片的物质,说明前弧 MORB-like 玄武岩是俯冲作用刚开始发生的产物,虽然具有与俯冲作用带入物质的标志,表明它兼有洋中脊与岛弧双重特性,但是更像洋中脊,统称为 MORB-like;而来自深海钻探 458 和 459 地点的过渡型 FAB 玻璃则明显富集了大离子亲石元素,这是由于它们的熔体输入了来自俯冲作用释放的流体改造的结果。这意味着俯冲作用正在加强;玻尼岩是地幔难熔的斜方辉橄岩再次发生部分熔融的产物,它需要大量受板片来源流体水化作用以及由与板片下沉有关的上涌软流圈供给的热而发生部分熔融才能形成的,玻尼岩的发育说明前弧俯冲作用进一步发展了。紧跟玻尼岩浆作用之后的是过渡型高镁安山岩,其后则是 44 Ma 以后开始喷发的正常的拉斑质到钙碱性的弧岩浆。44 Ma 以后开始喷发的正常的拉斑质到钙碱性的弧熔岩具有比其更老的玻尼岩熔岩较高的  $\text{TiO}_2$ 、Zr、Hf 和稀土含量(图 5-A)。这些地球化学特点意味着,产生更年轻的 IBM 弧岩浆作用的地幔,其亏损程度比老于 44 Ma 岩浆的地幔源小得多。这个现象说明,新建立的地幔楔中软流圈已从简单的上涌变成了角流对流,标志着开始了初始俯冲作用向正常的拉斑质到钙碱性的弧熔岩重大转变,也标志着地幔楔中软流圈已从简单的上涌变成了稳态的俯冲作用和地幔楔的真正对流作用。对流作用引起了浅部部分熔融作用向更深部地幔内部移动。在这个过程中,这个弧的岩浆轴从海沟后退,从而引发了因后续俯冲作用而使前弧地幔变冷。

上述研究表明,初始俯冲作用的整个岩浆演变过程分 3 个阶段递进演变:从类似洋中脊的前弧玄武岩(MORB-like FAB)到玻尼岩、高镁安山岩,再到正常的弧拉斑玄武岩和钙碱性熔岩,它们之间没有明显间断,这些岩石的递进演变反映了与俯冲作用有关的岩浆作用(形成洋内弧岩浆作用)不寻常的洋盆向大陆转化的原始弧性质(图 9)。前弧玄武岩首先喷发,随后是过渡型岩石,其后是玻尼岩,再后是过渡型高镁安山岩岩石(其与后面相对正常弧岩浆几乎同时喷发),最后是完全与俯冲作用有关的代表真正岛弧的拉斑和钙碱性熔岩喷发(图 8~图 9)。前弧玄武岩(FAB)是初始俯冲过程中首次岩浆作用的产物<sup>[18,19,22,27]</sup>,其形成时代代表了洋壳初始俯

冲时代,玻安岩相关的岩浆作用晚于初始俯冲岩浆作用,两者转换所需时代较短(2~4 Ma),而向正常岛弧岩浆作用转换所需时代较长(7~8 Ma)(图 8)。

(4)洋内弧前弧玄武岩的微量元素具有独特的所谓 MORB-like 型的地球化学特征,即微量元素兼有洋中脊与岛弧双重特性的洋陆转换特殊地化特征,代表了洋盆俯冲并向大陆转化的原始弧性质。

一般来说,洋中脊玄武岩为亏损型,亏损轻稀土和大离子亲石元素,洋中脊标准化曲线为平坦型,而岛弧玄武岩则富集大离子亲石元素 Cs、K、Rb、Ba、Sr、Pb 和 U,洋中脊标准化的曲线为选择性富集的隆凹明显的曲线<sup>[7,13,18,19,22]</sup>。

洋内弧前弧玄武岩的微量元素洋中脊标准化的曲线为平坦型,类似洋中脊的轻稀土亏损型式,但具有弧玄武岩较低的轻稀土和高场强元素含量,如 Nb、Ta 和 Zr 富集(图 10)。与洋盆玄武岩相比,其 Ti 含量和 Ti/V 比值明显偏低(图 11),而且与 N-MORB 和弧后盆地玄武岩相比,它们一般且有较低的轻稀土和重稀土比值(LREE/HREE)。与 N-MORB 玄武岩相比,重稀土元素较低,说明地幔楔以熔融为主。

岛弧与洋中脊最大本质差别是具有与大洋板块俯冲作用有关流体作用诱发形成的独特的流体活动元素,如 K、Rb、U、Pb,使地幔源岩发生水化的微量元素成分并形成钙碱性火成岩组合。洋内弧前弧玄武岩的微量元素原始地幔标准化不相容元素地球化学特点总体上与洋中脊相似,洋内弧前弧玄武岩的微量元素洋中脊标准化的曲线也基本为平坦型,总的特点类似洋中脊,故称具有独特的所谓 MORB-like 型的地化特征。但流体活动元素有些富集,大离子亲石元素比洋脊稍高,也说明有一些板片流体输入,虽然大离子亲石元素含量比洋中脊高,但与洋中脊一样还不算太多,表明来自俯冲流体与洋中脊一样还不算太多,俯冲作用不强烈,可能处于刚开始阶段。但总的特点也类似洋中脊,也具有独特的所谓 MORB-like 型的地化特征。紧跟前弧玄武岩以后喷出的玻尼岩,大离子亲石元素比洋脊高得多,而重稀土又比洋脊低得多,说明玻尼岩形成时已有大量俯冲板片流体输入,使残余地幔高度熔融,形成玻尼岩。从前弧玄武岩到玻尼岩形成演变地球化学特点代表了大洋向初始岛弧逐

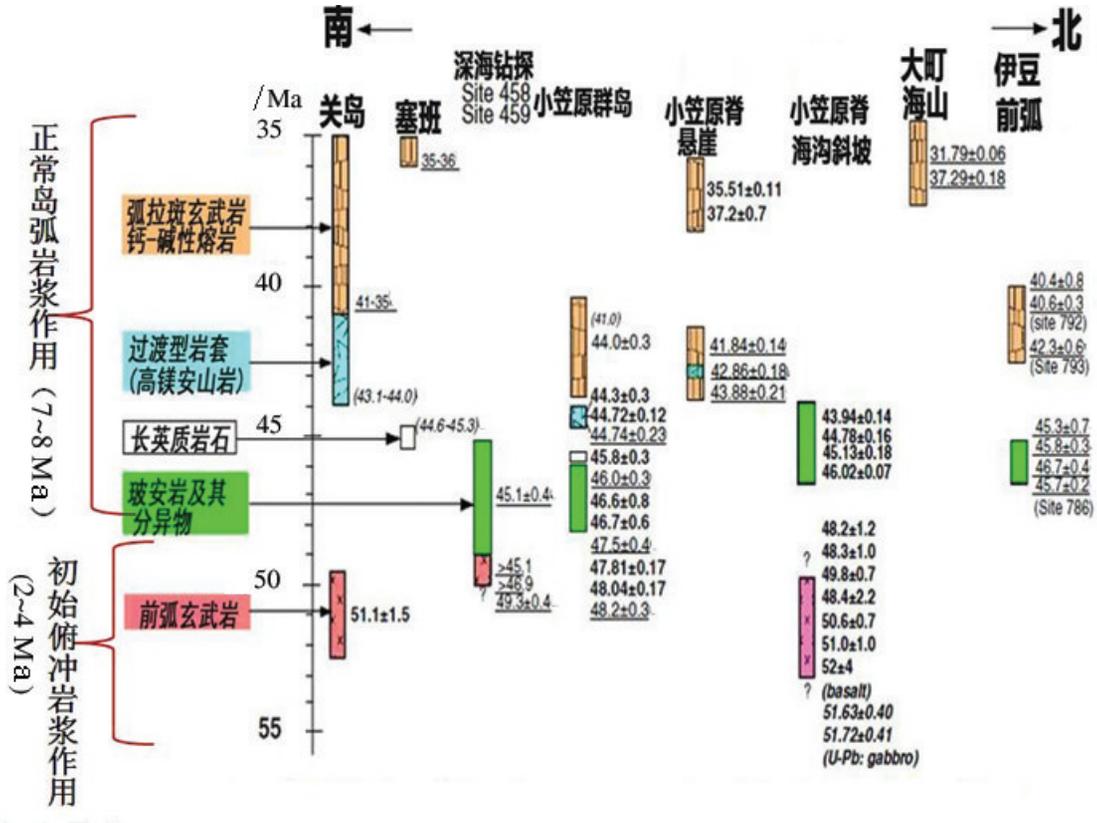


图8 Izu-Bonin-Mariana前弧玄武岩和玻安岩时代(Ma)关系<sup>[18,19,22]</sup>  
 Fig.8 Age relationship between Izu-Bonin-Mariana forearc basalt and boninite

步转换,然后再向正常岛弧岩浆作用转换的大陆化方向(图10、图12)。例如来自Izu-Bonin-Mariana深海钻探458和458地点的过渡型前弧玄武岩玻璃则明显富集了大离子亲石元素, Nb、Ta和Zr也明显亏损,洋中脊标准化的曲线表现为似选择性富集隆凹曲线,具有岛弧玄武岩特点,这是由于它们开始输入了来自俯冲流体改造的结果。这表明来自俯冲流体增加了,俯冲作用已开始了(图12)。

#### 4 洋内弧初始俯冲系统形成的模式

洋内初始俯冲作用如何产生的机制至今仍未定案。但一般认为,老的海洋板块因重力不稳定性与洋中脊推挤作用是洋内初始俯冲作用发生的主要原因。这是因为海洋板块在洋中脊形成以后,经过10~50 Ma后由于冷却使其密度变大,并超过下覆的软流圈而诱发形成初始俯冲带<sup>[21]</sup>。

一般认为,洋内弧初始俯冲系统的产生起因于初始俯冲以及随后的板片快速后退所导致的在俯

冲带上盘中的伸展和海底扩张(图13)。在俯冲的初始阶段,岩浆首先起因于深部富含二辉橄橄榄岩地幔的减压熔融并产生了具有MORB-like型成分的最早地壳单元。在此初始阶段俯冲板片产生的流体对熔体的影响很弱,产生了具有MORB-like型的前弧玄武岩。地幔的熔融的后续阶段受到俯冲板片脱水以及相关变质交代作用、俯冲沉积物的熔融、变质交代橄橄榄岩重复多次部分熔融以及形成于伸展的原始弧-弧前地区下方熔体柱中与难熔熔体一起存在的起源于下部富集源区高度富集流体的混合等因素的强烈影响产生了初始俯冲系统的独特的岩浆岩石组合。

里根<sup>[13]</sup>认为,Izu-Bonin-Mariana洋内弧俯冲系统的形成分3个阶段,其模型如下(图14):

幼年弧(48~44 Ma)阶段,软流圈上涌阶段:太平洋岩石圈沿转换断裂发生断裂错位以后,断裂一侧太平洋板块因重力不稳定性而发生下沉,海沟随着太平洋板块下沉而快速后退,下沉板块一侧的软

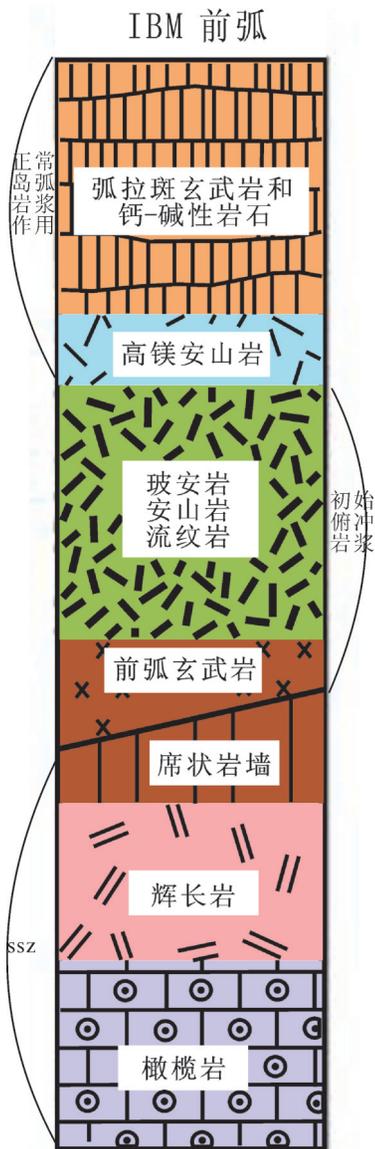


图9 初始俯冲作用的岩浆演变过程示意图<sup>[22]</sup>

Fig.9 The evolution schematic diagram of initial subduction magma<sup>[22]</sup>

流圈上涌到两个洋岩石圈破裂处而引发伸展构造的形成,结果在伸展扩张前弧处形成SSZ型蛇绿岩。

过渡弧(44~41 Ma)阶段,真俯冲作用开始阶段:软流圈重新组织对流循环作用,太平洋岩石圈由下沉转变成真正俯冲作用,这时在弧后发生伸展,形成小笠原海槽,在岩浆前锋(沿)地段形成Hahajima火山作用。

成熟弧阶段,稳态俯冲体制阶段:下沉软流圈

发生下沉拖曳作用,下沉太平洋岩石圈在下沉拖曳作用下发生连续的俯冲作用,在前弧地段形成小笠原海脊和岛弧,在后弧地区则形成了渐新世—现代的弧。

Shervais<sup>[27]</sup> 根据北美板块洋内弧俯冲系统形成演化认为,北美板块洋内弧俯冲作用与SSZ蛇绿岩形成演化有关,其形成演化可分5个阶段(图15):

(1)初始阶段,在初始俯冲带之上形成蛇绿岩,其以软流圈上涌使地幔楔重熔喷出低钾岛弧拉斑玄武岩(玄武岩-玄武安山岩甚至英安岩),形成层状辉长岩和席状岩墙为特点。低钾拉斑玄武岩地球化学特征比较像MORB(MORB-like型成分的,LREE亏损,没有后期LILE强烈富集的特点),但可通过低Ti/V比值、轻微富集LILE(特别是Th)、亏损HFSE区别于MORB岩石。层状辉长岩常发生韧性变形(片理或布丁)(与早期SSZ地壳伸展有关),后期岩浆序列很少见此类变形,伸展环境出现于早期意味着真正的席状岩墙形成于SSZ蛇绿岩建造的早期阶段。

(2)青年期,俯冲板片脱水形成的流体注入难熔软流圈,使其继续熔融,从而出现难熔岩(高镁安山岩、玻尼岩、拉斑质橄榄辉玄武岩)的喷出,异剥橄榄岩-辉石岩的侵入及老的深成岩的伸展变形。玻尼岩具有很好的指示作用,它出现于洋内弧初始阶段,当来自下插板块的富水流体进入浅层次高度亏损的残余地幔时,残余地幔的熔融可形成上覆于弧前玄武岩之上的玻尼岩<sup>[13]</sup>。

(3)成熟期,随着俯冲带的成熟稳定,岛弧火山作用进入高度发育稳定状态,火山作用、深成岩浆作用爆炸式发育,火山岩和深成岩构成岛弧主体部分。这时岩浆中硅更饱和,更富集LILE,并亏损HFSE。其中火山岩(包括玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩)为钙碱性或向碱钙性过渡。低硅火山岩以枕状熔岩流形式,演化更高的岩石则以火山角砾岩和其他火山碎屑沉积形式出现。这些火山岩很多情况下不被认为是邻近蛇绿岩的一部分,且位于蛇绿岩盖层硅质岩之下。而深成岩则包括角闪闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩、奥长花岗岩。很少蛇绿岩到达成熟阶段并就位。

(4)消亡期,洋中脊俯冲或直接仰冲,导致洋中脊扩张活动突然消失。洋中脊俯冲导致类似

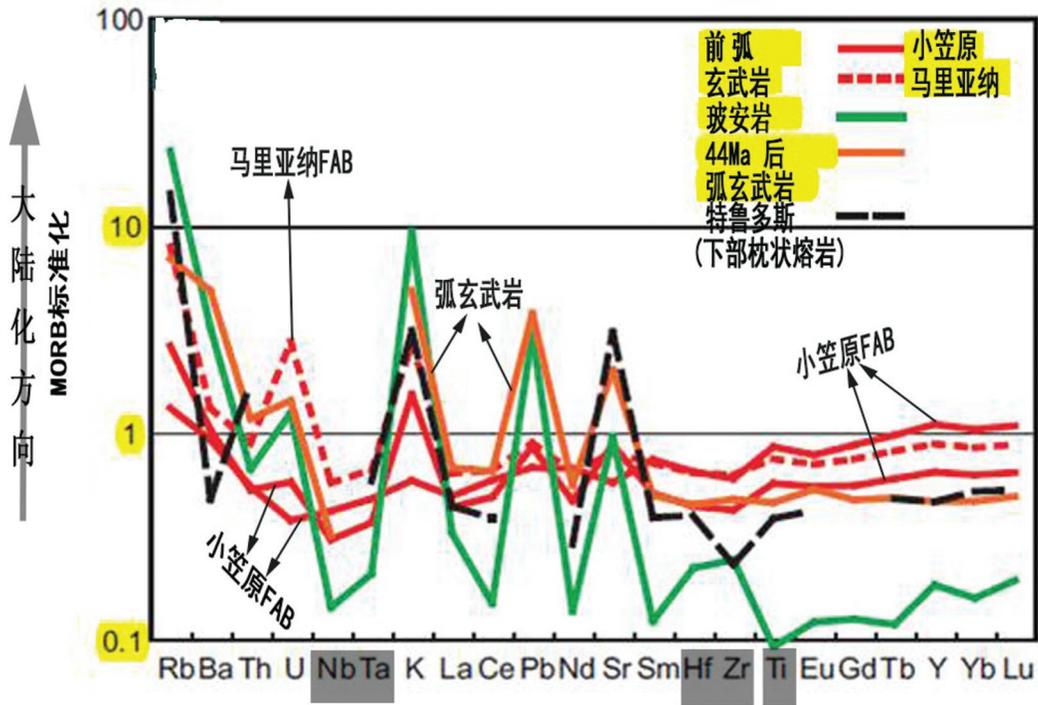


图10 IBN前弧玄武岩不相容元素地球化学特点<sup>[22]</sup>  
 Fig.10 Geochemical characteristics of IBN forearc basalts incompatible elements

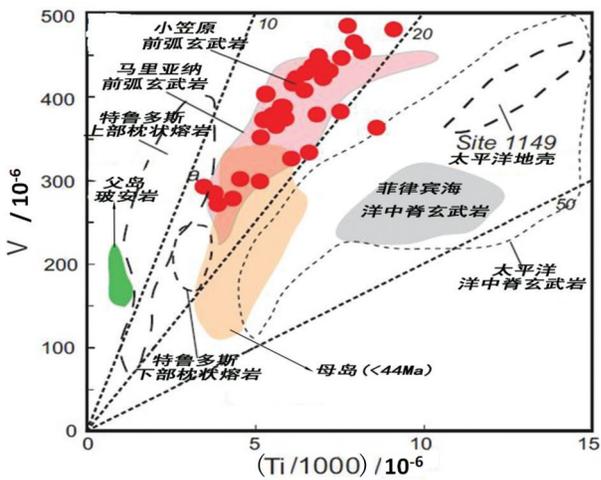


图11 Izu-Bonin-Mariana洋内弧前弧玄武岩Ti含量和Ti/V比值<sup>[22]</sup>  
 Fig.11 Geochemical characteristics of Ti content and Ti / V ratios of Izu-Bonin-Mariana intra-oceanic arc forearc basalts

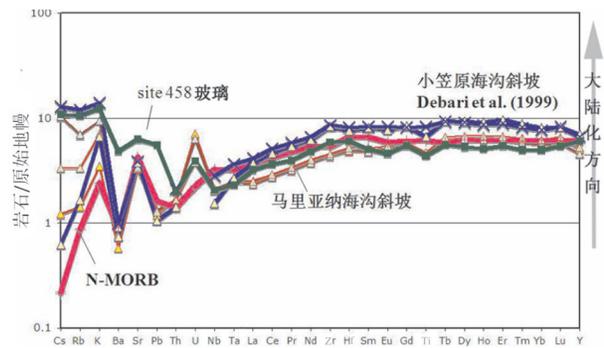


图12 前弧玄武岩的原始地幔标准化不相容元素地球化学特点<sup>[13]</sup>  
 Fig.12 Geochemical characteristics of primitive mantle normalized incompatible elements of forearc basalts <sup>[13]</sup>

MORB 或 OIB 的熔岩喷出在早期岛弧相关熔岩之上,或这些岩浆以岩墙型式侵入早期深成岩中形成岩墙。洋脊的俯冲和碰撞导致2个现象的产生:

①高温变质底(角闪岩、石榴角闪岩、麻粒岩)的出现,高温变质底所需温度为800℃,此温度是不能通过仰冲来得到的,冷板片的俯冲降低上部板块温度使其远低于800℃。相反,洋中脊扩张中心的俯冲在蛇绿岩底部提供了温度极高的物质。此结论的依据在于:变质底角闪岩主微量元素地球化学特点类似于MORB,而与其上的蛇绿岩明显不同;蛇绿岩与高级变质底形成时间差距很短。

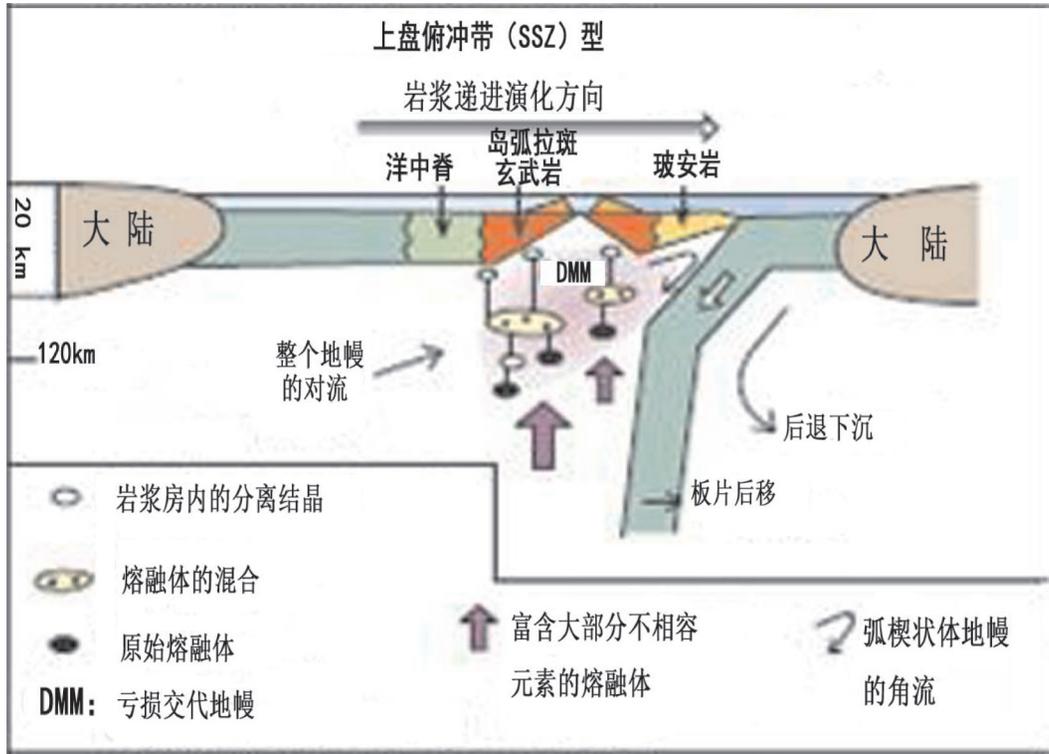


图 13 俯冲带上盘中的伸展和海底扩张产生洋内弧初始俯冲系统的示意图<sup>[21]</sup>

Fig.13 Schematic diagram of intra-oceanic arc initial subduction system due to the subduction zone plate extension and seafloor spreading

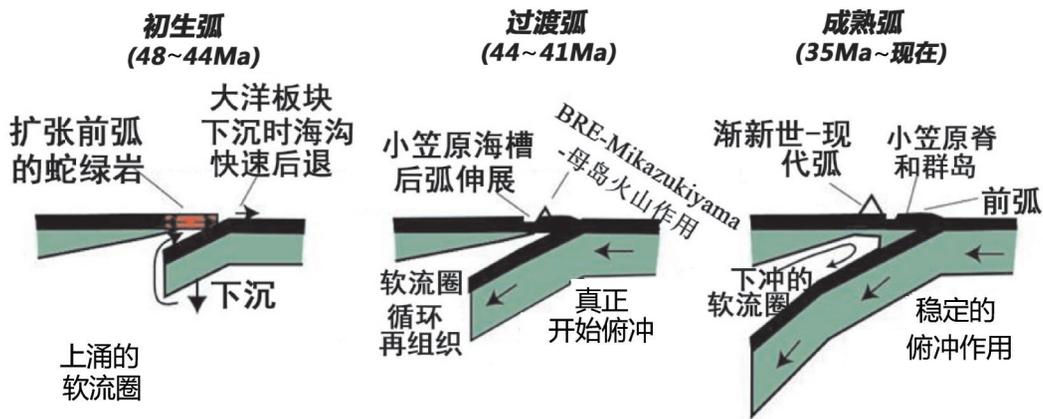


图 14 洋内弧俯冲系统形成的三个阶段模型<sup>[13]</sup>

Fig.14 Three phase model of intra-oceanic arc subduction system<sup>[13]</sup>

②蛇绿岩开始向邻近大洋岩石圈逆冲,蛇绿岩逆冲于活动洋中脊之上,由于浮力使俯冲角度太小而不能产生部分熔融,从而中止了类似岛弧蛇绿岩的形成,洋中脊两侧的蛇绿岩因有浮力,其在形成后 10 Ma 内不能俯冲,因此俯冲起始于洋中脊是不可能的,假如能俯冲,则变质底的形成会先于蛇绿岩。

(5)复活期,仰冲就位于被动大陆边缘之上(Tethyan 型蛇绿岩)或增生抬升就位(Cordilleran 型蛇绿岩)。

Stern and Bloomer<sup>[17]</sup> 认为,洋内弧初期俯冲(幼年期)作用特殊,其模式如下(图 16):

A. 初始阶段,两个不同密度的岩石圈沿转换断

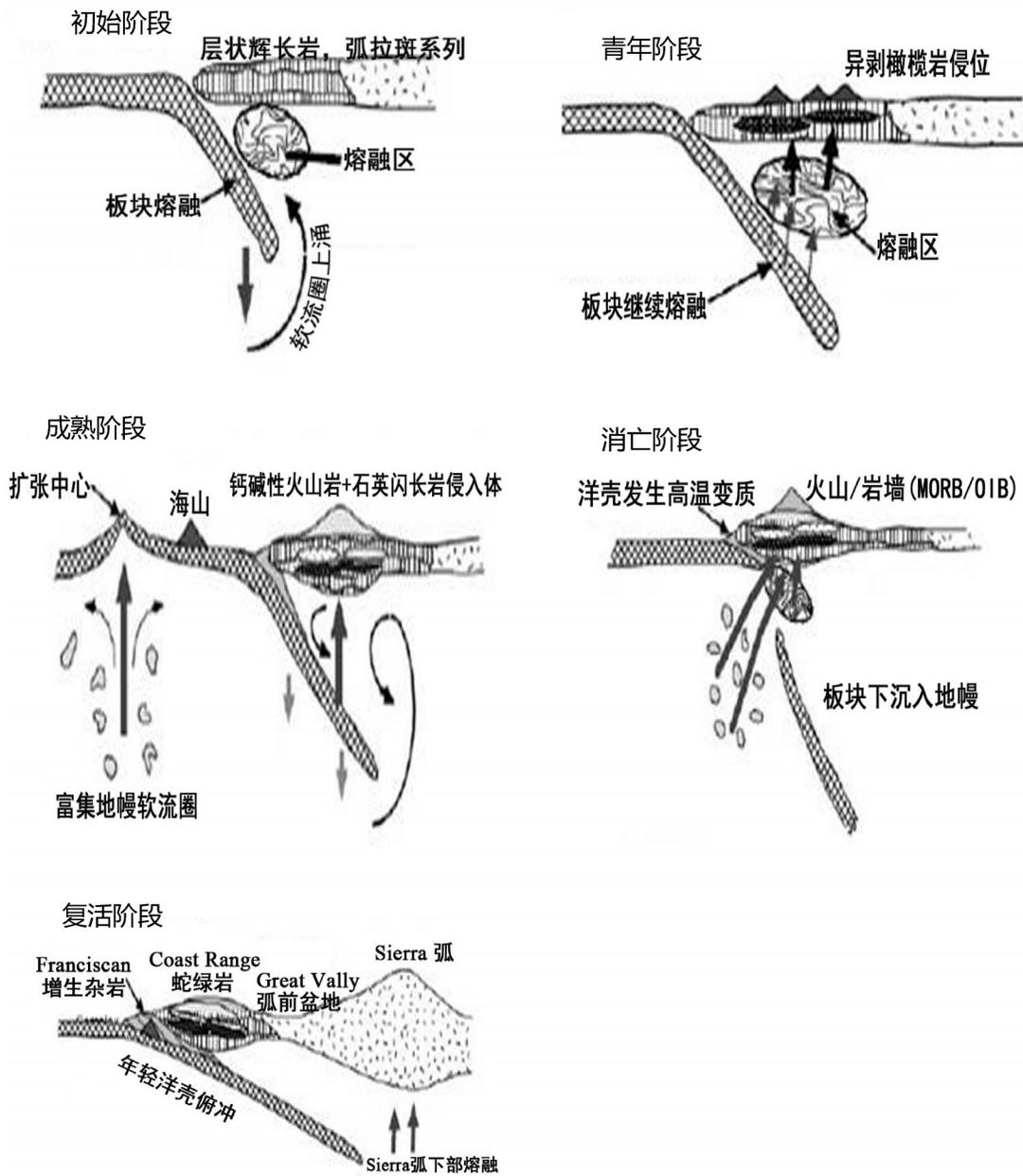


图15 北美板块洋内弧俯冲系统形成演化与SSZ蛇绿岩形成演化的关系<sup>[27]</sup>

Fig.15 The formation and evolution relationship between intra-oceanic arc subduction system and SSZ ophiolite system in North American plate (after reference [27])

层拼靠在一起。

B. 老的、密度大的岩石圈发生不对称下沉, 离断裂最近的地方下沉最大, 下沉岩石圈的软流圈向正在发生断裂的深陷处上涌, 并使断裂处两侧岩石圈向外扩张。在正在垂直下沉的岩石圈上方发生强烈伸展而形成海底扩张, 结果形成了原始的前弧

的幼年期弧地壳。

C. 下沉岩石圈开始发生下倾移动, 它标志着真正的俯冲作用的开始, 下沉岩石圈上面的伸展作用结束。它终止了软流圈进入该区域, 并使其冷却变成前弧岩石圈。火成活动场所后回到软流圈继续对流活动的地方, 结果形成了岩浆弧。

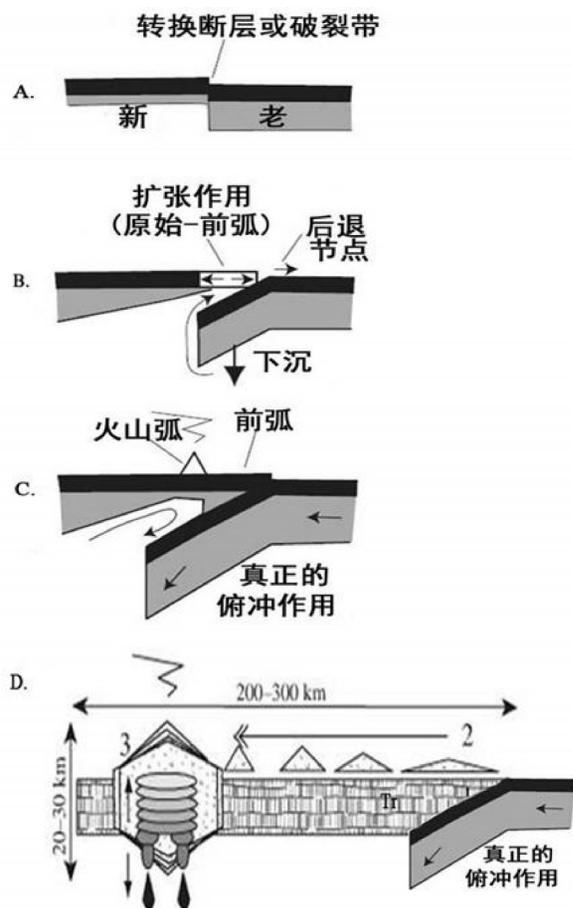


图 16 洋内弧初期俯冲(幼年期)作用形成演化模式<sup>[17]</sup>

Fig.16 The formation and evolution model of intra-oceanic arc initial subduction (infancy) (after reference [17])

D.这个弧岩浆随时间而演变:(1)在俯冲带最初演化的5 Ma期间通过海底扩张作用形成的前弧蛇绿岩的幼年期弧地壳。(2)在第二个5 Ma期间,岩浆活动朝远离海沟方向发生后退。(3)在活动岩浆弧位置上发生大规模的岩浆活动,结果形成了地壳加厚作用和拆沉作用。

## 5 结 论

通过上面阐述表明,今天和过去大陆壳的形成都是通过板块构造的洋陆转换及底侵的壳幔转化形成特征的岛弧岩石组合序列的岩浆增生作用实现的。洋陆转换的岩浆作用是通过俯冲带上面的地幔因俯冲流体诱发的熔融作用而形成。这个岩浆增生作用产生了初生的洋内弧系统弧地壳,这个

初生地壳大部分都是从地幔以镁铁质岩浆(玄武岩质或玻安岩质)型式形成。它们大部分是后来通过底侵的壳幔转化形成特征的地壳深熔作用、重熔或发生拆沉而产生全岩成分接近安山质物质的地壳的基本物质。初生地壳大部分下沉到它的底部进一步的提炼产生了花岗岩质地壳和难熔物质,这些难熔物质多数又下沉返回地幔中。虽然初生的陆壳形成时是镁铁质的,但它继承了俯冲带的一些作用,使它具有与俯冲作用有关的标志性独特地球化学特点。洋内弧系统的后来的岩浆爆炸式发育的成熟作用是与初生地壳增生作用一前一后发生的。而后来的各种初生地壳碎块不断聚合而形成愈来愈不一样的较大型的大陆地壳区域。大陆就是这样通过洋内弧系统洋陆转换及底侵的壳幔转化发育、成熟使大陆诞生、长大。根据上述,大陆的形成过程如下:从地幔中生长出洋壳,从洋壳中生长出不成熟的弧陆壳,最后从弧陆壳底侵的壳幔转化中长出成熟的陆壳。这样,地壳的生长和形成主要通过岩浆增生作用来实现。

## 参考文献(References):

- [1] 杨文采, 宋海斌. 从地壳上地幔构造看洋陆转换作用[J]. 地质评论, 2014, 60(1): 1-21.  
Yang Wencai, Song Haibin. Ocean-continent transition process revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures [J]. Geological Review, 2014, 60(1):1-21 (in Chinese with English abstract).
- [2] 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1112-1118.  
Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, et al. High magnesian andesitic/dioritic rocks (HMA) and magnesian andesitic/dioritic rocks (MA): two igneous rock types related to oceanic subduction [J]. Geology in China, 37(4):1112-1118 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境讨论[J]. 高校地质学报, 2007, 11: 392-402.  
Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, et al. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings: A discussion [J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 11: 392-402 (in Chinese with English abstract).
- [4] 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 长乐-南澳构造带花岗岩类年代学, 岩石组合与构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-168.  
Feng Yanfang, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, et al. The Granitoids, Geochronology, Rock Assemblages, Tectonic and Evolution of the

- Changle-Nan'ao Tectonic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013:1-168(in Chinese with English abstract).
- [5] 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. TTG岩类的识别: 讨论与建议[J]. 高校地质学报, 2011, 17(3): 406-414.  
Feng Yanfang, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, et al. Recognizing the TTG rock types: Discussion and suggestion [J]. Geological Journal of China Universities, 2011, 17(3): 406-414 (in Chinese with English abstract).
- [6] Yoshiyuki Tatsumi. 陆壳的生成: 与赞岐岩类的联系[J]. 科学通报, 2008, 53: 978-990.  
Yoshiyuki Tatsumi. Generating continental crust: Contact with Sanukite [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(9): 978-990 (in Chinese).
- [7] Ishikawa T, Fujisawa S, Nagaishi K, et al. Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 240:355-377.
- [8] 王强, 赵振华, 许继峰, 等. 天山北部石炭纪埃达克岩-高镁安山岩-富Nb岛弧玄武质岩: 对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 11-30.  
Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, et al. Carboniferous adakite-high Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt and Cu-Au mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1):11-30 (in Chinese with English abstract).
- [9] 唐功建, 王强. 高镁安山岩及其地球动力学意义[J]. 岩石学报, 2010, 26:2495-2512.  
Tang Gongjian, Wang Qiang. High Mg andesite and their geodynamic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26: 2495-2512 (in Chinese with English abstract).
- [10] 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 473-484.  
Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, et al. Magmatic arc and ocean-continent transition: Discussion [J]. Geological Review, 2015, 61(3):473-484 (in Chinese with English abstract).
- [11] Ishizuka O, KimuraJun-Ichi, Li Yi B, et al. Early stages in the evolution of Izu-Bonin arc volcanism: New age, chemical, and isotopic constraints [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 250: 385-401.
- [12] Ishizuka O, Yuasa M, Taylor R N, et al. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading [J]. Chemical Geology, 2009, 266: 274-296.
- [13] Reagan M K, Ishizuka Osamu, Sterner R J, et al. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2010, 11(3): 1-17. DOI: 10.1029/2009GC002871.
- [14] Dilek Y, Furnes H. Ophiolites and their origins [J]. Elements, 2014, 10: 93-100.
- [15] Reagan M K, B B Hanan, M T Heizler, et al. Petrogenesis of volcanic rocks from Saipan and Rota, Mariana Islands, and implications for the evolution of nascent island arcs [J]. Journal of Petrology, 2008, 49(3): 441-464. DOI: 10.1093/petrology/egm087.
- [16] Rogers N W, C J MacLeod, B J Murton. Petrogenesis of boninitic lavas from the Limassol Forrest Complex, in Boninites and Related Rocks [M]. Edited by A J Crawford, Unwin-Hyman, London, 1989:289-313.
- [17] Stern and Bloomer. Subduction zone infancy: examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California [J]. Geological Society of America Bulletin, 1992, 104:1621-1636.
- [18] Ishizuka O, et al. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 306: 229-240.
- [19] Ishizuka O, Taylor R N, Yuasa M, et al. Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc, Philippine Sea [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2011, 12, Q05005, doi: 10.1029/2010GC003440.
- [20] Dilek Y, Furnes H. Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems [J]. Lithos, 2009, 113: 1-20.
- [21] Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. Geological Society of America Bulletin, 2011, 123: 387-411.
- [22] Ishizuka o, Tani K, Reagan M. K Izu-Bonin-Mariana forearc Crust as a modern ophiolite Analogue [J]. Elements, 2014, 10: 115-120.
- [23] Stern .Subduction zones [J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(4): 3-1-3-38. DOI:10.1029/2001RG000108.
- [24] Sengor A M C, Natalin B A, Burtman U A. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. Nature, 1993, 364: 299-307.
- [25] Sengor A M C, Natalin B A. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[C]//Yin An, Harrison M T(eds.). The Tectonic Evolution of Asia, Cambridge. Cambridge Univ. Press, 1996: 486-640.
- [26] Reagan The geology of the Southern Mariana fore-arc crust: Implications for the scale of Eocene Volcanism in the western Pacific [J]. Earth and planetary science Letters, 2013, 380:41-51.
- [27] Shervais. Birth, death and resurrection: the life cycle of suprasubduction zone ophiolites [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 01/2001; 220925(8). DOI: 10.1029/2000GC000080.