

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.04.006

雅浦岛弧变质岩成因和构造环境研究

张吉^{1,2,3,4}, 张国良^{1,2,4}

1. 中国科学院海洋研究所, 海洋地质与环境重点实验室 & 深海研究中心, 青岛 266071

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 青岛 266071

摘要:雅浦岛弧基本由变质岩组成,与西太平洋的其他岛弧具有显著区别。利用在雅浦岛弧获得的变质岩样品,研究了角闪岩的变质温压条件,并进一步探讨了雅浦岛弧变质岩的构造环境,以及加罗林洋底高原及海山的俯冲侵蚀对雅浦岛弧的影响。雅浦岛弧变质岩的矿物组合结果显示,其变质相为角闪岩相和绿片岩相;对雅浦岛弧变质岩进行了电子探针微区分析,采用角闪石单矿物温度压力计、斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计和角闪石-斜长石 Al-Si 压力计来计算变质 P-T 条件。矿物温压计的估算结果表明,雅浦岛弧角闪岩变质 P-T 条件为 493.6~630°C / 3.8~6 kbar,为中等 P/T 型变质相系。结合矿物组合及温压计估算结果,认为雅浦变质岩可能经历了岛弧区域变质作用。雅浦变质岩代表的构造环境为雅浦岛弧基底。雅浦角闪岩的埋藏深度大约为 15~20 km,雅浦岛弧变质岩的出露是俯冲侵蚀的结果。加罗林洋底高原及海山促进了雅浦岛弧俯冲侵蚀的发育,使得雅浦岛弧的弧前地区甚至岛弧都遭受侵蚀,导致变质岩基底出露于海底。

关键词:雅浦岛弧; 变质岩; 岛弧区域变质作用; 俯冲侵蚀

中图分类号:P736.1 文献标识码:A

Origin and tectonic setting of metamorphic rocks in the Yap Island Arc

ZHANG Ji^{1,2,3,4}, ZHANG Guoliang^{1,2,4}

1. CAS Key Laboratory of Marine Geology and Environment & Center of Deep Sea Research, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory of Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

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

4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: The Yap Island Arc consists largely of metamorphic rocks and thus differs significantly from the most of island arcs of the western Pacific. It is crucial to study the origin and process of the metamorphic rocks in the Yap arc for delineating the tectonic setting of the Yap arc-trench system. In this study, the metamorphic rocks in the Yap arc were analyzed using an electron microprobe(EMP) to research temperature-pressure conditions of the amphibolite rocks. Results of mineral assemblages in metamorphic rocks of Yap arc show that metamorphic facies of Yap metamorphic rocks are greenschist and amphibolite. Temperature-pressure conditions of the Yap amphibolite rocks were calculated by the thermobarometry and barometer on the basis of compositions of mineral pairs. The temperature-pressure results are 493.6~630 °C / 3.8~6 kbar, and the facies series of which belongs to medium P/T series. The medium P/T series is the characteristic of common orogenic belts. Considering the results of mineral assemblages and temperature-pressure conditions, we concluded that the metamorphic rocks in the Yap arc were formed in the setting of a volcanic arcs. Metamorphic rocks in the Yap arc represent the metamorphic basements of Yap arc. The Yap amphibolite rocks were buried in the depth of 15~20 km and the exposure of metamorphic rocks is resulted from subduction erosion of the Caroline plate. Caroline Ridges and seamounts enhanced subduction erosion. The Yap arc basements underwent regional metamorphism, then the uplifted section of volcanic arc were eroded by

资助项目:国家自然科学基金-优秀青年科学基金项目;“海洋岩石学与地幔地球化学”(41522602);中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题“海山的物质组成和底质环境”之专题1:“典型海山的岩石结构和物质组成”(XDA11030103);青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才”优秀青年学者项目(2015ASTP)

作者简介:张吉(1992—),男,硕士生,海洋地质学专业,主要从事大洋岩石学和地球化学研究。

通讯作者:张国良(1981—),男,研究员,主要从事大洋岩石学与地幔地球化学研究,E-mail:zhangguoliang@qdio.ac.cn

收稿日期:2017-07-25; **改回日期:**2017-11-30. 周立君编辑

the subduction erosion. Eventually the metamorphic basements of Yap arc croped out the earth surface.

Key words: Yap island arc; amphibolite; regional metomorphism; subduction erosion

引言

西太平洋是世界上俯冲带高度集中的地区,世界上 60%以上的大洋岛弧皆分布于西太平洋,如伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧(Izu-Bonin-Mariana Arc)、汤加-克马德克岛弧(Tonga-Kermadec Arc)^[1,2]。西太平洋地区以发育有海沟-岛弧-弧后盆地为特征。西太平洋在全球板块构造的演化过程中占有举足轻重的地位,是研究俯冲带发展演化的重要区域。

雅浦岛弧(Yap Arc)系统位于西太平洋菲律宾海板块的南部边界,是菲律宾海板块、太平洋板块和加罗林板块之间的汇聚型板块边界。伊豆-小笠原-马里亚纳、雅浦、帕劳岛弧(Palau Arc)形成了一个连续的岛弧体系,Matsuda 等^[3]研究认为帕劳、雅浦、马里亚纳岛弧可能分别代表岛弧演化三个不同阶段:其中,帕劳岛弧代表岛弧发展的最初始阶段(未出现成熟的弧后盆地),雅浦岛弧代表岛弧从初始向成熟演化的过渡阶段(出现了弧后盆地,岛弧基底在埋藏过程中发生变质),而马里亚纳岛弧代表岛弧发展的成熟阶段(发育了两个阶段的弧后盆地)。

通过与西太平洋的其他成熟岛弧对比,雅浦岛弧具有独特的地质特征:雅浦岛弧基本由变质岩组成,火山岩零星分布,缺乏活动性的岛弧火山活动^[4-6];加罗林洋脊从东侧向雅浦海沟俯冲、碰撞,弧后扩张盆地不发育^[7,8],成熟岛弧的沟弧间距一般为 100~200km^[8,9],而雅浦岛弧的沟弧间距异常短,约为 50km^[10],无明显沉积物发育,增生楔缺失^[11],地震活动性很弱,震源深度不超过 40km^[4]。

20 世纪 70 年代以来,各国学者在雅浦岛弧区域开展了较多的研究工作^[5,6,10,12-15],但雅浦岛弧的成因仍没有一致的结论。McCabe 等人^[15]研究认为在早中新世时,加罗林洋脊的碰撞使雅浦岛弧的火山作用停止,并导致雅浦的弧前地区遭受俯冲侵蚀,俯冲侵蚀造成岛弧的弧前地区遭受破坏并随俯冲作用进入俯冲通道,造成弧前增生楔缺失。Fujiwara^[10]等通过地球物理的结果认为,加罗林洋脊的碰撞,使帕里西维拉海盆的洋壳仰冲在先前形成的雅浦岛弧之上,他认为现今雅浦岛弧的主体部分代表帕里西维拉海盆的洋壳。Ohara^[4]通过研究雅浦海沟的橄榄岩和火山岩认为,雅浦海沟的火山岩为岛弧火山作用的产物,橄榄岩来源于岛弧拉斑玄武

岩浆产生之后的残余地幔物质,是与雅浦弧前环境相关的超基性岩,并不是来自帕里西维拉海盆地或者捕获的洋壳岩石圈物质。

Shiraki^[5]最早在 1971 年对雅浦岛(Yap Islands)的角闪岩和绿片岩进行了岩石学和地球化学的研究。雅浦岛上岩石类型主要以变质岩为主,变质级从西向东由绿片岩相向角闪岩相演变,研究认为雅浦岛的变质岩经历了较低的压力或较高的温度条件,推断雅浦岛的变质岩代表较深层位的洋壳物质。Hawkins^[6]对比研究了雅浦岛和雅浦海沟的变质岩,推断雅浦岛弧的成因模型为“碰撞隆升”,认为变质的洋壳和上地幔岩石组成的岛弧逆冲在先前形成的岛弧上。

研究雅浦岛弧变质岩的成因对于揭示雅浦沟-弧系统的构造演化过程有重要意义,但针对雅浦变质岩的变质过程的研究相对有限,缺少详细的变质矿物组合和变质温压条件的研究。本文研究样品为雅浦岛弧变质岩,从矿物学的角度,利用电子探针对岩石薄片中变质矿物组合进行单矿物成分分析,借助变质矿物温度压力计估算矿物组合形成时的变质温度和压力条件,研究雅浦岛弧变质岩的构造成因,并讨论了俯冲侵蚀对雅浦岛弧变质岩出露的影响,为认识雅浦岛弧变质演化过程和进一步理解西太平洋俯冲带构造演化提供新的依据。

1 区域地质背景

雅浦岛弧系统位于菲律宾海板块的东南边界,是菲律宾海板块、太平洋板块和加罗林板块之间的汇聚型板块边界。在区域构造上,近南北向的九州-帕劳海岭和西马里亚纳弧将菲律宾海分为 3 列海盆:九州-帕劳海岭以西为西菲律宾海盆;以东为四国海盆和帕里西维拉海盆;西马里亚纳弧和活动的马里亚纳弧之间为马里亚纳海槽(如图 1)。

雅浦海沟从 7.5°N 延伸至 11.5°N,长约 700km,最深处为 8946m^[4],是世界最深的海沟之一。雅浦海沟东侧受加罗林洋底高原俯冲,东北部与马里亚纳海沟近直角相交,北连帕里西维拉海盆扩张中心,南接帕劳海沟,构造环境极其复杂。马里亚纳岛弧是西太平洋地区成熟岛弧的典型代表,雅浦岛弧与马里亚纳岛弧相比,在岛弧发育成熟度、岛弧形态、火山活动、岛弧出露岩石类型等方面,具有

明显的差别。马里亚纳岛弧发育完整的“沟-弧-盆”体系,岛弧发育成熟程度高^[9];雅浦岛弧并没有弧后扩张盆地,岛弧发育不成熟。马里亚纳沟弧间距约100~150km,而雅浦岛弧仅为50km。马里亚纳岛弧火山作用比较活跃,弧前地区岩石类型以玻安岩为主^[16,17],海沟内侧沟壁岩石类型以拉斑玄武岩、安山岩为主^[18];雅浦岛弧缺乏活动性的岛弧火山活动^[4-6],雅浦岛弧基本由变质岩组成,仅在北雅浦陡崖(North Yap Escarpment)出露岛弧火山岩,主要类型为玄武岩和玄武安山岩^[4]。

加罗林洋脊从东侧向雅浦海沟俯冲、碰撞,索罗尔海槽将加罗林洋脊分为近似平行的两部分,分别为东加罗林洋脊和西加罗林洋脊,如图1。加罗林板块曾被认为是太平洋板块的一部分,后来Bracey^[19]和Weissel^[20]研究认为,加罗林板块是独立的微板块,相对于太平洋板块发生过逆时针旋转。McCabe^[15]和Hawkins^[6]曾认为早中新世时,加罗林洋脊的碰撞使雅浦岛弧停止俯冲。但后来研究表明

明,雅浦海沟的俯冲作用仍在进行^[10,21,22]。太平洋板块与加罗林板块沿马里亚纳海沟、雅浦海沟向菲律宾板块之下俯冲,海沟北部的太平洋板块的俯冲速度为20mm/a,南部的加罗林板块的俯冲速度为5mm/a,二者俯冲速度有明显差异^[22]。

2 样品

本文研究的5件变质岩样品是由中国科学院海洋研究所“科学”号考察船2015年1—3月,在西太平洋1405航次第二航段Y3站位取得。该站位取样海域为雅浦岛弧区海山,位于雅浦岛以南约70km处,采样区经纬度为8°53.492'N,137°44.673'E,水深1025m。采样方式为岩石拖网。

雅浦岛弧Y3站位取得的变质岩样品主要为角闪岩和绿片岩。代表性的雅浦角闪岩和绿片岩样品的显微图像及背散射电子图像如图2所示。角闪岩

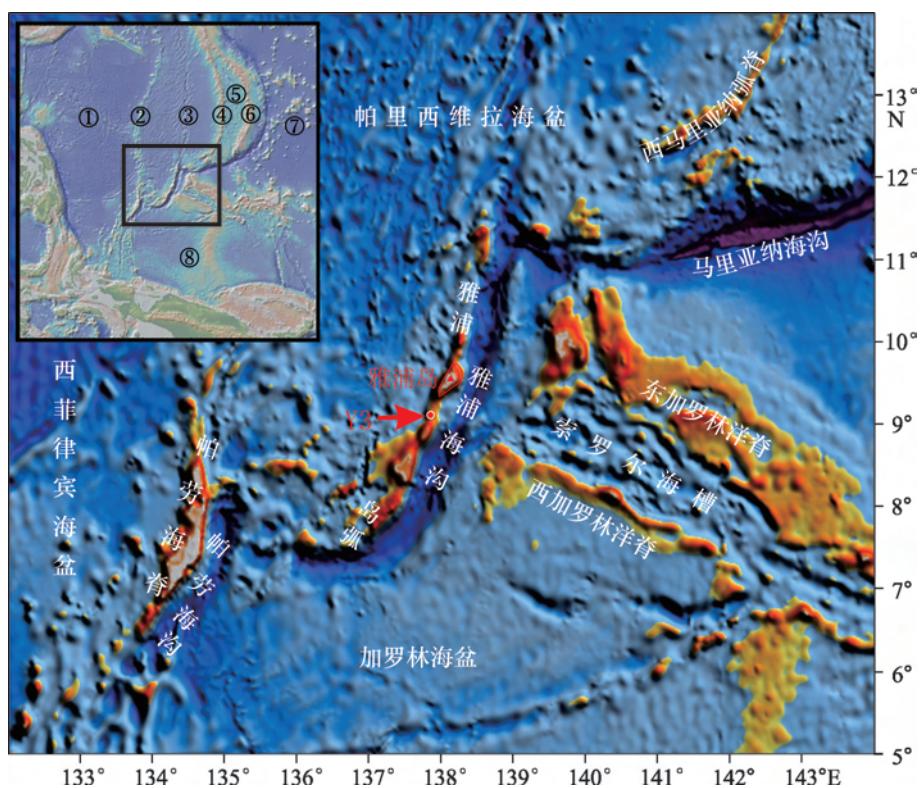


图1 西太平洋雅浦岛弧区域地质概况及雅浦岛与采样区相对位置

缩略图中的构造单元分别为:①西菲律宾海盆,②九州-帕劳海脊,③帕里西维拉海盆,④西马里亚纳弧脊,⑤马里亚纳海槽,⑥马里亚纳弧脊,⑦太平洋板块,⑧加罗林板块。采用GeoMapApp软件制图,水深数据来源于<http://www.geomapapp.org/>,底图修改自Ryan^[23]

Fig.1 Geological-bathymetric map of Yap arc-trench system in the west Pacific, showing location of sampling sites. The geological setting in the thumbnail images respectively are ① West Philippine Basin, ② Kyushu-Palau Ridge, ③ Parece Vela Basin, ④ west Mariana Ridge, ⑤ Mariana Trough, ⑥ Mariana Ridge, ⑦ Pacific plate, ⑧ Caroline plate. Bathymetric data are from <http://www.geomapapp.org/> and map was produced using the GeoMapApp software, basemap was from Ryan^[23]

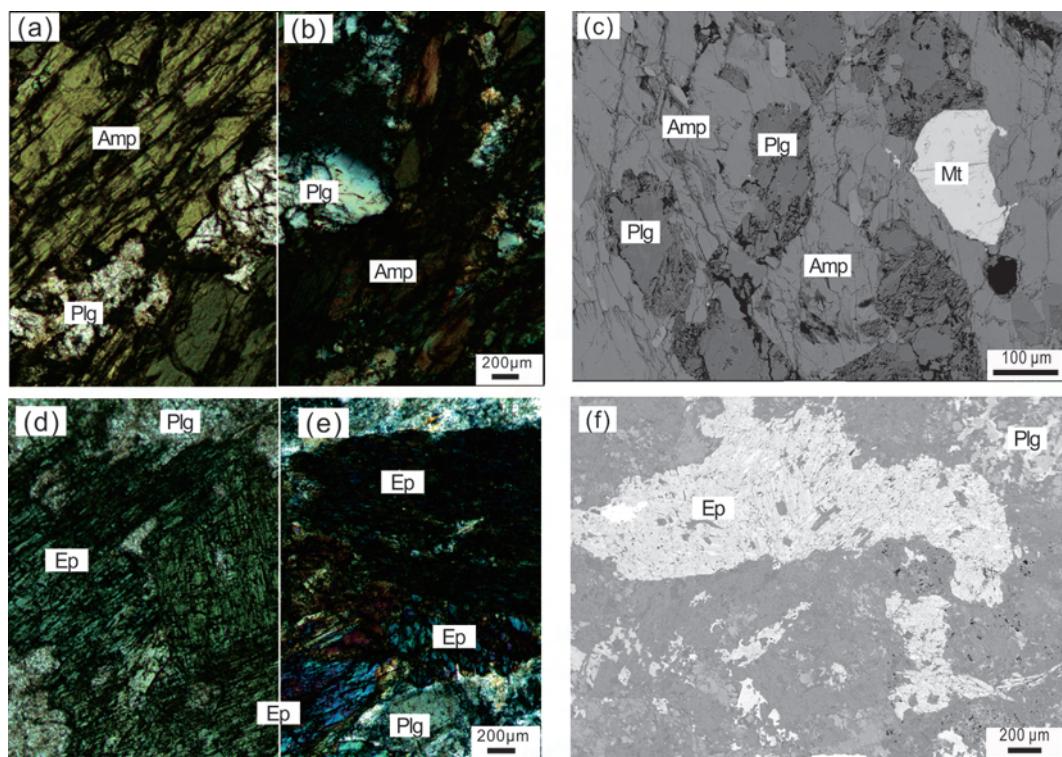


图2 雅浦角闪岩(Y3-9-10)和绿片岩(Y3-9-12)样品的显微图像及背散射电子图像

(a)和(b)分别为Y3-9-10的单偏光和正交偏光下的显微图像;(c)为Y3-9-10的背散射电子图像,角闪岩Y3-9-10呈柱状、粒状变晶结构;(d)和(e)分别为Y3-9-12的单偏光和正交偏光下的显微图像;(f)为Y3-9-12的同一微区的背散射电子图像,绿片岩Y3-9-12呈片状变晶结构。矿物缩写:Amp-角闪石;Plg-斜长石;Ep-绿帘石;Mt-磁铁矿

Fig. 2 Photo micrographs and back scattered electron images of the representative amphibolite sample (Y3-9-10) and greenschist (Y3-9-12) in Yap arc

(a)and(b)are photomicrographs of amphibolite sample (Y3-9-10), plane-polarized light and crossed polarized light, respectively.(c)is back scattered electron images of Y3-9-10. Amphibolite samples have columnar, granular crystal structure. (d)and(e) are photo micrographs of greenschist sample (Y3-9-12), plane-polarized light and crossed polarized light, respectively.(f)is back scattered electron images of Y3-9-12. Greenschist samples have flake crystal structure. Abbreviation: Amp, Amphiboles; Plg, Plagioclase; Ep, Epidote; Mt, Magnetite

呈暗绿色、黑绿色,细粒块状。镜下呈柱状、粒状变晶结构,片状、弱片麻状构造。主要由暗绿色钙质角闪石和斜长石组成,有的含有碱性长石、单斜辉石,部分样品中还见有少量黑云母,副矿物有榍石、磁铁矿、钛铁矿、绿泥石、沸石等。绿片岩呈暗绿色,片状

构造,中等蚀变。镜下呈片状变晶结构,主要矿物组合为草绿色绿帘石、绿泥石、阳起石和斜长石,副矿物为沸石、磁铁矿。雅浦岛弧变质岩样品的岩相学特征详见表1。

表1 雅浦岛弧变质岩样品的岩相学特征及其变质相

Table 1 Mineral assemblages of metamorphic facies at the Yap arc

样品	岩性	岩相学特征	变质相
Y3-9-6	角闪岩	变晶结构,致密块状构造,主要矿物组合:角闪石+斜长石(拉长石);少量钠长石,辉石,褐铁矿	角闪岩相
Y3-9-8	角闪岩	变晶结构,片状至弱片麻状构造,主要矿物组合:角闪石+斜长石(更长石);少量钾长石、钠长石、黑云母、辉石、绿泥石、榍石、磁铁矿、钛铁矿	角闪岩相
Y3-9-10	角闪岩	变晶结构,致密块状构造,主要矿物组合:角闪石+斜长石(中长石、拉长石);少量钾长石、钠长石、辉石、榍石、沸石、磁铁矿、钛铁矿	角闪岩相
Y3-9-12	绿片岩	变晶结构,片状构造,中等蚀变,主要矿物组合:绿帘石+绿泥石+阳起石+斜长石(更、中、拉、倍长石);少量沸石、磁铁矿	绿片岩相
Y30059-1	角闪岩	变晶结构,致密块状构造,主要矿物组合:角闪石+斜长石(中长石);少量钠长石、钛铁矿、榍石、绿泥石、沸石	角闪岩相

3 方法

3.1 电子探针测试方法

对Y3站位代表性的变质岩样品进行了电子探针分析。单矿物成分数据在中国海洋大学海底资源与探测技术实验室 JEOL JXA-8230 电子探针显微分析仪上测试获得。测试条件^[24]如下:加速电压15kV,电子束流20nA,束斑直径为2μm(钾长石、钠长石为10μm)。Na选用的标准样品为钠长石;Mg、Si和Ca选用的标准样品为透辉石;Al选用的标准样品为钠长石;K选用的标准样品为透长石;Ti选用的标准样品为金红石;Fe选用的标准样品为铁铝榴石。分析精度一般为1%~5%,修正方法采用ZAF法。

3.2 温度计、压力计计算方法

针对不同的矿物组合,采用合适的矿物温度计和压力计估算岩石所经历的温度和压力条件。对雅浦岛弧角闪岩Y3-9-6、Y3-9-8、Y3-9-10、Y30059-1四个样品采用角闪石单矿物温度压力计、斜长石-角闪石Na-Ca交换温度计和角闪石-斜长石Al-Si压力计来计算变质温压条件。

3.2.1 角闪石单矿物温度压力计

Gerya^[25]等通过统计分析前人的实验数据,得

$$T(K) = \frac{78.44 + Y_{Ab-An} - 33.6X_{Na}^{M4} - (66.8 - 2.92P)X_{Al}^{M2} + 78.5X_{Al}^{T1} + 9.4X_{Na}^A}{0.0721 - R\ln[27.0X_{Na}^{M4}X_{Si}^{T1}X_{An}^{Pl}/(64.0X_{Ca}^{M4}X_{Al}^{T1}X_{Ab}^{Pl})]}$$

如果 $X_{ab} > 0.5$, 则式中 $Y_{ab-an} = 3.0$; 否则 $Y_{ab} = 12.0(2X_{ab}-1)+3.0$ kJ。

3.2.3 斜长石-角闪石 Al-Si 压力计

Molina 等^[28]通过研究 Al-Si 在角闪石和斜长石中的分配,提出了新的压力计模型。角闪石-斜长石压力计适用于含有角闪石和斜长石矿物组合的火成岩和变质岩(角闪岩和基性麻粒岩),角闪石中 Ti > 0.02apfu 且 Al^{VI} > 0.05apfu(23O),其适合的温度范围为: $T > 650^\circ\text{C}$ 。计算公式如下:

$$P(\text{kbar}) = (8.3144T(\text{K})\ln D_{Al/Si}^{\text{plg/amp}}) - 8.7T(\text{K}) + 23377X_{Al}^{T1} + 7579X_{Ab} - 11302)/(-274)$$

$$D_{Al/Si}^{\text{plg/amp}} = (X_{Al}^{\text{plg}}/X_{Si}^{\text{plg}})/(X_{Al}^{\text{amp}}/X_{Si}^{\text{amp}})$$

$$X_{Ab} = \text{Na}/(\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$$

出了钙质角闪石单矿物温度计和压力计表达式:

$$T(\text{K}) = [6119.0 - 28.4P(\text{kbar}) + 114.0X_{Mg}^{\text{bb}}]/8.181 - R\ln(8.489 - \text{Si})$$

$$P(\text{kbar}) = [2543.0 - 4.744T(\text{K}) + 175.0X_{Mg}^{\text{bb}} + RT\ln(A1 + 1.433)]/148.1$$

Zenk 等^[26]考虑了天然角闪石中 Fe³⁺离子的影响,对 Gerya 等人的温度计和压力计表达式做了修正,得出如下的表达式。本文采用 Zenk 等的计算方法,误差为±40°C 和±0°C 法表达式。

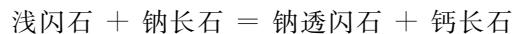
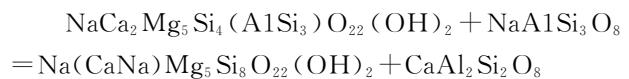
$$T(\text{K}) = 4701.0/[1.825 - 1.987\ln(8/15.5 - \text{Si}/\text{sum}_{\text{kat}} + 0.07531)]$$

$$P(\text{kbar}) = \{-425 - 1719 \times [X_{Al}^M/(X_{Al}^M + \text{Fe}^{3+}/2 + 0.763)] + 2.75 \times T(\text{K}) + 1.987 \times T(\text{K}) \ln(X_{Al}^M)/0.2 + 1.0\}/1000.0$$

其中, $X_{Al}^M = (\text{Si} + \text{A1} - 8)/2 + 0.763$, sum_{kat} 指角闪石中全部阳离子数总和。

3.2.2 斜长石-角闪石 Na-Ca 温度计

Holland 等^[27]根据斜长石-角闪石之间的相平衡关系,采用经验标定方法,深入研究了角闪石活度,重新提出了斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计。斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计适用于基性变质岩,适用的温压条件为:1~15kbar、430~950°C, 平均偏差为±40°C。



4 结果

4.1 矿物化学成分特征

利用电子探针对岩石薄片进行微区分析,确定雅浦变质岩样品的矿物组成和成分特征,其主要矿物组成见表 1。根据样品的显微镜下特征及电子探针测定结果,雅浦变质岩的变质相主要为角闪岩相和绿片岩相。雅浦变质岩主要矿物的代表性电子探针数据和相应的离子数见表 2。具体矿物化学成分特征表述如下。

角闪石成分较为均一,化学成分显示以下特征:富镁(10.96%~13.95%)、富钙(10.71%~12.12%)和贫钾、富钠($\text{K}_2\text{O} = 0.5\% \sim 1.5\%$,

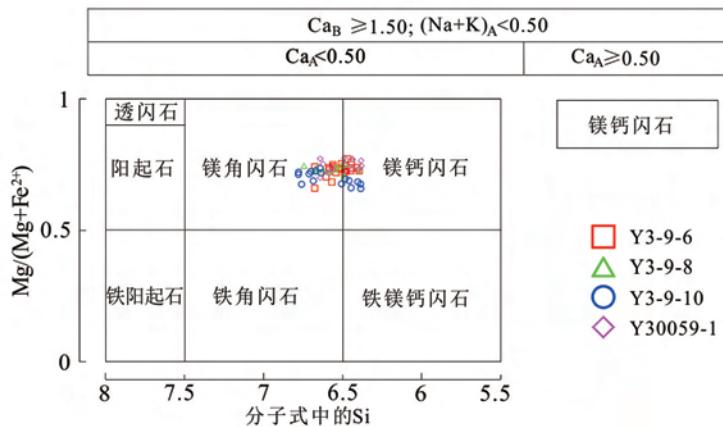


图3 钙质角闪石化学分类及定名

Fig.3 Classification and Nomenclature of the calcicamphiboles in Yap samples.

$\text{Na}_2\text{O}=2.0\% \sim 3.0\%$)。其 TiO_2 含量主要分布在 $0.7\% \sim 1.94\%$ 之间, Al_2O_3 含量主要在 $8.04\% \sim 12.04\%$ 之间。根据角闪石化学分子式, 角闪石阳离子特征为: $\text{Ca}_B > 1.5$ ($1.531 \sim 1.901$), 属钙质角闪石系列。样品中角闪石 $\text{Si}=6.36 \sim 6.78$, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})=0.66 \sim 0.85$, $(\text{Na} + \text{K})_A=0.179 \sim 0.498$, 按钙质角闪石的分类命名原则^[29,30], 如图3所示, 定名为镁闪石、镁钙闪石, 个别为镁绿钙闪石 ($(\text{Na} + \text{K})_A > 0.50$)。

样品中的长石包括斜长石和碱性长石。长石的化学分类详见图4, 其代表性样品电子探针成份见

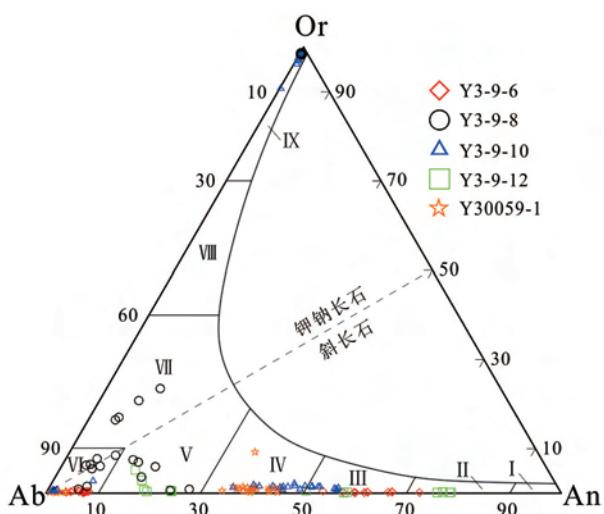


图4 斜长石及钾钠长石化学分类

- I. 钙长石; II. 倍长石; III. 拉长石; IV. 中长石; V. 更长石;
- VI. 钠长石; VII. 歪长石; VIII. 钠透长石; IX. 透长石

Fig.4 Classification and nomenclature of plagioclases and alkali-feldspars in Yap samples

I. Anorthite; II. Bytownite; III. Laboratories; IV. Andesine; V. Oligoclase; VI. Albite; VII. Anorthoclase; VIII. Natronsanidine; IX. Sanidine

表2. 样品Y3-9-6中, 斜长石An范围为1.29~72.41, 主要为钠长石和拉长石, 少量倍长石; 样品Y3-9-8中, 主要为钾长石、钠长石、歪长石和更长石。样品Y3-9-10中, 主要为钾长石、钠长石、中长石、拉长石。样品Y3-9-12中, 主要为更长石、中长石、拉长石和倍长石。样品Y30059-1中, 主要为钠长石和中长石。

4.2 温度计、压力计结果

文中采用角闪石单矿物温度压力计、斜长石-角闪石Na-Ca交换温度计和角闪石-斜长石Al-Si压力计来计算雅浦岛弧角闪岩的变质温压条件。样品Y3-9-6、Y3-9-8、Y3-9-10、Y30059-1皆采用角闪石单矿物温度压力计计算。样品Y3-9-10、Y30059-1应用了斜长石-角闪石Na-Ca交换温度计和角闪石-斜长石Al-Si压力计。

雅浦岛弧角闪岩变质温压条件的计算结果详见表3。根据角闪石单矿物温度压力计的计算结果, 样品Y3-9-6的变质温压条件为566.6~611.6°C/4.7~5.8kbar; 样品Y3-9-8的变质温压条件为572.2~630.1°C/5.0~6.0kbar; 样品Y3-9-10的变质温压条件为493.6~620.6°C/3.8~5.7kbar; 样品Y30059-1的变质温压条件为582.4~625.6°C/4.6~5.5kbar。根据斜长石-角闪石Na-Ca温度计和角闪石-斜长石Al-Si压力计的计算结果, 样品Y3-9-10的变质温压条件为721~851°C/1.4~5.9kbar; 样品Y30059-1的变质温压条件为742~822°C/2.3~4.8kbar。

表2 雅浦岛弧角闪岩样品代表性角闪石、单斜辉石和长石电子探针数据及相应离子数

Table 2 Representative mineral chemical composition of amphiboles,
clinopyroxenes and feldsparsin amphibolites samples of Yap arc

角闪石	Y3-9-6	Y3-9-8	Y3-9-10	Y30059-1	单斜辉石	Y3-9-6	Y3-9-8	Y3-9-10						
	N=25	N=14	N=16	N=12		N=1	N=2	N=9						
SiO ₂	45.24	44.92	45.02	44.59	SiO ₂	51.70	45.50	52.33						
TiO ₂	1.20	0.82	0.88	1.74	TiO ₂	0.25	0.78	0.12						
Al ₂ O ₃	10.45	10.62	9.53	9.95	Al ₂ O ₃	2.75	9.53	1.45						
Cr ₂ O ₃	0.13	0.08	0.07	0.05	Cr ₂ O ₃	0.03	0.12	0.02						
FeO	15.93	13.35	15.74	13.70	FeO	10.49	12.92	8.48						
MnO	0.29	0.26	0.34	0.31	MnO	0.35	0.24	0.42						
MgO	12.11	13.14	12.34	13.23	MgO	12.84	13.65	13.22						
CaO	10.97	11.79	11.85	11.42	CaO	21.37	11.91	23.25						
Na ₂ O	1.86	1.68	1.30	1.66	Na ₂ O	0.58	1.65	0.44						
K ₂ O	0.08	0.81	0.69	0.86	K ₂ O	0.03	0.71	0.02						
Total	98.26	97.47	97.76	97.50	Total	100.40	97.00	99.75						
T位	Si	6.52	6.55	6.59	Si	1.93	1.76	1.96						
	Al ^{IV}	1.48	1.45	1.41	Al ^{IV}	0.07	0.24	0.04						
	Ti ^(IV)	0.00	0.00	0.00	Al ^{VI}	0.06	0.19	0.03						
C位	Al ^{VI}	0.30	0.38	0.23	Ti	0.01	0.02	0.00						
	Ti	0.13	0.09	0.10	Cr	0.00	0.00	0.00						
	Cr	0.01	0.01	0.01	Fe ³⁺	0.06	0.24	0.05						
	Fe ³⁺	0.98	0.56	0.76	Fe ²⁺	0.27	0.17	0.21						
	Fe ²⁺	0.94	1.07	1.17	Mn	0.01	0.01	0.01						
	Mg	2.60	2.86	2.69	Mg	0.72	0.79	0.74						
	Mn	0.04	0.03	0.04	Ca	0.86	0.49	0.93						
B位	Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	Na	0.04	0.12	0.03						
	Ca	1.70	1.84	1.86	K	0.00	0.04	0.00						
	Na	0.30	0.16	0.14										
A位	Na	0.21	0.32	0.23	Wo	44.82	29.06	47.86						
	K	0.01	0.15	0.13	En	37.49	46.36	37.89						
	Total	0.23	0.47	0.36	Fs	17.69	24.58	14.25						
	Y3-9-6	Y3-9-8	Y3-9-10	Y3-9-12	Y30059-1									
长石	钠长石 N=7	拉长石 N=7	钾长石 N=5	钠长石 N=11	更长石 N=6	钾长石 N=15	钠长石 N=2	中长石 N=11	拉长石 N=7	更长石 N=7	中长石 N=2	拉长石 N=2	倍长石 N=4	中长石 N=23
SiO ₂	59.78	52.51	63.54	65.58	62.56	64.27	64.25	56.72	54.32	64.03	61.41	53.21	48.63	57.89
Al ₂ O ₃	32.04	29.94	17.93	21.71	23.25	18.31	25.24	27.17	28.21	23.48	26.16	29.06	32.40	26.15
FeO	0.07	0.29	0.16	0.18	0.24	0.06	0.16	0.24	0.27	0.22	0.16	0.20	0.31	0.28
CaO	0.81	12.83	0.04	1.32	3.96	0.04	0.77	9.07	11.01	4.24	7.62	11.90	15.84	8.38
Na ₂ O	6.94	4.30	0.16	9.52	8.92	0.30	8.58	6.16	5.17	8.88	4.89	4.74	2.54	6.78
K ₂ O	0.02	0.03	17.05	1.45	0.74	17.25	0.23	0.23	0.21	0.25	0.08	0.03	0.03	0.21
Total	99.67	99.90	98.88	99.75	99.66	100.22	99.22	99.60	99.18	101.09	100.32	99.13	99.75	99.68
Si	2.60	2.39	2.99	2.89	2.78	2.98	2.82	2.56	2.47	2.80	2.70	2.43	2.23	2.60

续表 2

Al	1.64	1.60	0.99	1.13	1.22	1.00	1.30	1.44	1.51	1.21	1.35	1.56	1.75	1.39
Fe	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.04	0.62	0.00	0.06	0.19	0.00	0.04	0.44	0.54	0.20	0.36	0.58	0.78	0.40
Na	0.59	0.38	0.01	0.81	0.77	0.03	0.73	0.54	0.46	0.75	0.42	0.42	0.23	0.59
K	0.00	0.00	1.02	0.08	0.04	1.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	4.87	5.00	5.03	4.99	5.01	5.04	4.90	5.00	5.00	4.98	4.84	5.00	5.00	5.01
An	6.07	62.14	0.18	6.51	18.86	0.20	4.62	44.28	53.42	20.57	46.02	58.03	77.37	40.09
Ab	93.71	37.68	1.37	84.99	76.94	2.57	93.75	54.37	45.37	77.97	53.41	41.82	22.45	58.73
Or	0.22	0.18	98.46	8.50	4.20	97.23	1.63	1.35	1.22	1.46	0.57	0.15	0.17	1.18

注:角闪石中的 Fe^{3+} 由 Holland 等^[27]方法计算;单斜辉石中的 Fe^{3+} 通过化学计量平衡和电价平衡规则^[31,32]估算。

5 讨论

5.1 变质作用 P-T 条件

研究雅浦岛弧变质岩的变质作用的 P-T 条件,对于认识雅浦岛弧的构造背景具有重要意义。借助变质矿物温度压力计,可以估算矿物组合形成时的温度和压力条件,确定雅浦角闪岩经历的变质过程,在此基础上可以进一步讨论雅浦岛弧变质岩的构造成因。

一种温度计或压力计,适用于特定化学成分的岩石。根据电子探针的测试结果,雅浦岛弧角闪岩样品中的角闪石属钙质角闪石系列,角闪石单矿物温度计-压力计适用于钙质角闪石,误差为 $\pm 40^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1.2 \text{ kbar}$ ^[33]。斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计适用于基性变质岩,适用的温压条件为:1~15 kbar、430~950°C,平均偏差为 $\pm 40^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1.1 \text{ kbar}$ ^[27]。角闪石-斜长石 Al-Si 压力计适用于含有角闪石和斜长石矿物组合的火成岩和变质岩(角闪岩和基性麻粒岩)^[28]。斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计和角闪石-斜长石 Al-Si 压力计等矿物对温度、压力计使用的前提是角闪石和斜长石平衡共生,因此在选择参与计算的角闪石-斜长石矿物时应尽量保证角闪石与斜长石之间直接接触、界线平直^[27,28]。

表 3 展示了不同温度压力计对雅浦岛弧角闪岩变质温压条件计算结果。相对于角闪石单矿物温度压力计计算的温度结果,斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计对于样品 Y3-9-10 和 Y30059-1 计算的温度明显偏高,其计算结果可达到麻粒岩相,然而我们在显微镜下和电子探针分析中并没有出现麻粒岩相的矿物组合,因此本文认为该结果可能不具意义,应予以舍弃。出现该结果的原因可能在于:(1)针对同一

个样品,不同温压计之间的计算结果必然会产生差异,对于同一样品产生的计算结果的不一致现象是由温度计-压力计的系统误差引起的;(2)雅浦岛弧角闪岩从深埋于岛弧基底到如今出露于地表,可能经历了压力降低的退变质过程。在构造变动的影响下,原本角闪岩相中平衡共生的角闪石和斜长石矿物对可能不再平衡。因此,部分参与计算的角闪石-斜长石矿物对可能受构造变动的影响不再是热力学平衡状态,使斜长石-角闪石 Na-Ca 交换温度计产生较大的误差。

表 3 雅浦岛弧角闪岩变质温压条件计算结果

Table 3 P-T estimates for the metamorphism of amphibolite samples in Yap arc

P-T	角闪石单矿物温度压力计		斜长石-角闪石 Na-Ca 温度计/°C	角闪石-斜长石 Al-Si 压力计/kbar
	温度/°C	压力/kbar		
Y3-9-6	566.6~611.6	4.7~5.8	—	—
Y3-9-8	572.2~630.1	5.0~6.0	—	—
Y3-9-10	493.6~620.6	3.8~5.7	721~851	1.4~5.9
Y30059-1	582.4~625.6	4.6~5.5	742~822	2.3~4.8

因此,本文舍弃了矿物对温度压力计的计算结果,着重讨论角闪石单矿物温度压力计的计算结果。图 5 中的数据为角闪石单矿物温度压力计的计算结果。综上,雅浦岛弧角闪岩的变质温压条件为 493.6~630°C/3.8~6 kbar,属于角闪岩相,为中等 P/T 型变质相系。

5.2 雅浦角闪岩 P-T 条件的构造指示意义

雅浦角闪岩经历的变质作用对于理解雅浦岛弧的构造环境具有非常重要的作用。根据前人在雅浦岛(Yap Islands)的研究结果^[12,34],雅浦岛上岩石类

型主要以变质岩为主,变质级从西向东由绿片岩相向角闪岩相演变,上覆少量中新世的火山岩碎屑沉积物,火山岩仅分布于雅浦岛北部的 Map 和 Tomil 两个区域^[5,12],分别为安山岩和中酸性侵入岩(如闪长岩、英云闪长岩、石英质岩石)。雅浦岛主要出露绿片岩,角闪岩出露于东侧靠近海沟的较小区域。Shiraki^[5]最早在 1971 年对雅浦岛(Yap Islands)的角闪岩和绿片岩进行了岩石学和地球化学的研究,认为雅浦岛的变质岩经历了较低的压力或较高的温度条件,推断雅浦岛的变质岩代表较深层位的洋壳物质。Hawkins^[6]对比研究了雅浦岛和雅浦海沟的变质岩,推断雅浦岛弧的成因模型为“碰撞隆升”,认为变质的洋壳和上地幔岩石组成的岛弧逆冲在先前形成的岛弧上。

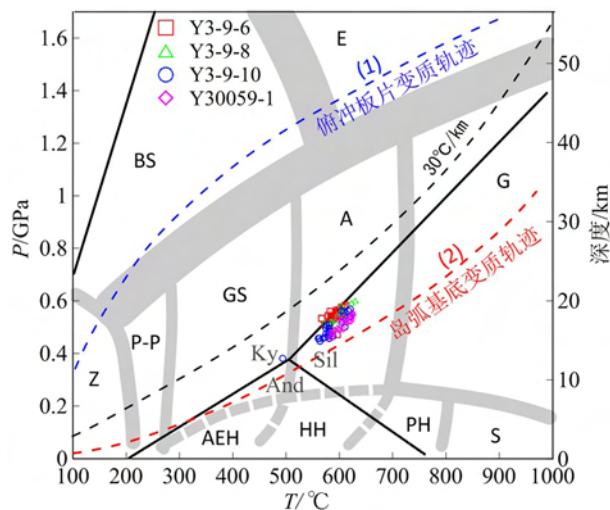


图 5 不同构造背景下变质相的 P-T 图解

Z—沸石相,P-P—葡萄石绿纤石相,BS—蓝片岩相,E—榴辉岩相,GS—绿片岩相,A—角闪岩相,AEH—钠长绿帘角岩相,HH—普通角闪石角岩相,PH—辉石角岩相,S—透长岩相。图中数据为角闪石单矿物温度压力计的计算结果

Fig.5 Temperature-pressure diagram showing the generally accepted limits of the various metamorphic facies under different tectonic conditions
Z—Zeolite, P-P—Prehnite-Pumpellyite, BS—Blueschist, E—Eclogite, GS—Greenschist, A—Amphibolite, AEH—Ab-EpHornfels, HH—Hornblende Hornfels, PH—Pyroxene Hornfels, S—Sanidinite. The data plotted in the diagram are the results of amphibole thermobarometry

板块构造和变质作用之间具有密切的联系,一般认为,发生区域变质作用的构造环境为岛弧(如西太平洋)、洋-陆俯冲带(如安第斯山)、陆-陆碰撞带(如阿尔卑斯山、喜马拉雅山)^[35]。板块运动会使岩石所处的温度和压力发生显著的变化,从而使岩石

发生变质作用。一般情况下,构造运动越剧烈,温压变化对岩石的影响程度越高,岩石发生变形和变质程度越高^[34]。俯冲带的构造运动会影响岩石的地温梯度和埋藏深度,从而影响岛弧区岩石的变质过程。板片在俯冲过程中,由于俯冲的大洋板块相对较冷,导致俯冲带中地热梯度相对较低,约为 10~15°C/km。随俯冲的深度加大,温度上升相对较慢。因此,俯冲板片会发生高压低温型变质作用,即高 P/T 型变质相。俯冲板片变质过程沿低地温梯度方向演化,变质相依次为蓝片岩相和榴辉岩相^[36-38],如图 5 中蓝色虚线(1)所示。蓝色虚线(1)为俯冲带的地温梯度约 10~15°C/km,指示俯冲板片沿俯冲带的进变质轨迹^[39,40]。洋壳俯冲过程中释放出大量的流体,导致上覆板块地幔楔部分熔融,从而产生岛弧岩浆^[41]。岩浆侵入到较浅深度的岛弧地壳时,引起岛弧地壳地热梯度升高。岛弧区地温梯度范围约为 40~50°C/km^[36]。在岛弧基底之下的 10km 深度处,温度范围为 400~500°C。因此,在岛弧基底区域,随埋藏深度的增加,岩石可能经历的变质相为沸石相、葡萄石-绿纤石相、绿片岩相、角闪岩相和麻粒岩相^[40]。红色虚线(2)为岛弧区地温梯度(40~50°C/km),指示岛弧区域变质作用^[39,40]。

雅浦变质岩矿物组合指示雅浦岛弧变质岩的变质相为角闪岩相和绿片岩相;对角闪岩进行温度压力计算结果表明,雅浦角闪岩的变质相为角闪岩相,中等 P/T 型变质相系。因此,我们认为雅浦变质岩很有可能经历了岛弧区域变质作用,雅浦变质岩代表的构造环境为雅浦岛弧基底。

5.3 俯冲侵蚀对雅浦岛弧的影响

俯冲侵蚀是指在板块俯冲作用下,岛弧的弧前地区遭受破坏并随俯冲作用进入俯冲通道,造成弧前增生楔缺失的地质过程^[42-44]。俯冲侵蚀普遍出现在俯冲带中,全球至少 50% 的汇聚板块边界都是侵蚀型边界^[45,46],尤其在西太平洋地区,伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧(Izu-Bonin-Mariana Arc)、汤加-克马德克岛弧(Tonga-Kermadec Arc)等都为侵蚀型边界^[42]。ODP125 航次位于马里亚纳岛弧的弧前位置,其钻探成果^[47,48]验证了马里亚纳弧前区存在俯冲侵蚀:Johnson^[47]等研究发现,弧前区钻遇的岩石是岛弧岩浆活动成因;Bloomer^[48]等研究发现,位于海沟内壁深部的岩石类型也以岛弧玄武岩为主,弧前的构造侵蚀作用使得岛弧火成岩暴露于海沟内壁。马里亚纳海沟附近的太平洋板块,因具有较大的弯曲而形成大量的地堑构造^[49],减弱了板块的耦

合性,在一定程度上促进俯冲侵蚀的发生。

俯冲板片上的海山和无震海脊的俯冲会加剧俯冲侵蚀^[45,50]。当板片上的高地形俯冲时,上覆板块隆起并遭受拉张作用,可能导致上覆板块强度减弱并产生断层。当海山和洋脊继续向下俯冲,发生隆升拉张的弧前地区,可能由于失稳而发生快速的沉降,进一步加剧弧前地区的侵蚀作用。洋脊和海山

的俯冲会造成弧前区域的隆起和沉降,从而加速俯冲侵蚀速率^[43,51]。

图6表示了雅浦岛弧变质基底的模式图。加罗林洋脊以及海山从东侧向雅浦海沟俯冲,是造成雅浦岛弧发生俯冲侵蚀的重要影响因素。已经发生俯冲的加罗林板块之上,发育众多海山,增加了俯冲洋

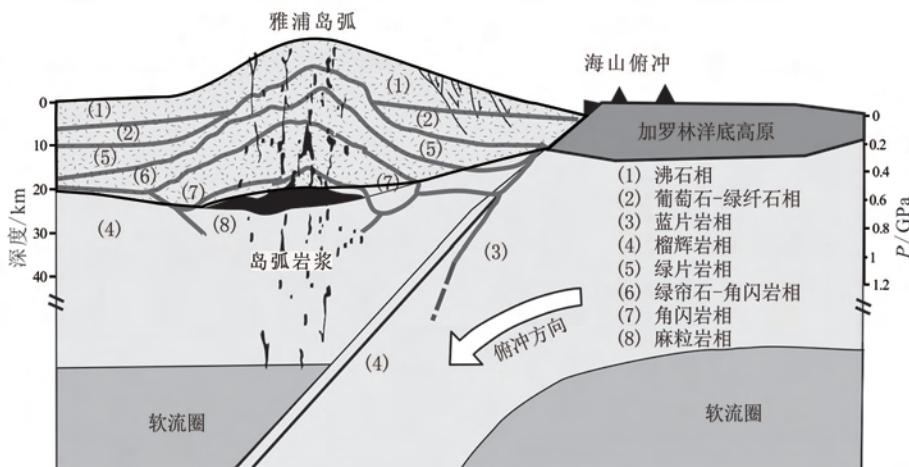


图6 雅浦岛弧变质基底及俯冲侵蚀模式图(据文献[40]修改)

Fig.6 Schematic illustration of the metamorphic basements of Yap island arc and generic model of subduction erosion

壳的基底起伏程度。加罗林洋脊以及海山的俯冲,一方面会强烈摩擦上覆板块,导致雅浦弧前物质的缺失;另一方面会造成弧前岩石格架的破坏,减弱雅浦弧前地壳的强度^[11,52]。洋脊和海山的高地形使原本的伸展应力状态加剧,发育大量正断层,如图6所示。因此,加罗林洋底高原上的海山促进了雅浦岛弧俯冲侵蚀的发育,使得雅浦岛弧的弧前地区甚至岛弧主体都遭受侵蚀,导致变质岩基底出露于海底。

雅浦岛弧的沟弧间距异常短,约为50km^[10];雅浦海沟无明显沉积物发育,增生楔缺失^[11]等现象说明雅浦岛弧遭受了俯冲侵蚀。另外,Y3站位与海沟的垂直距离约为15km,与雅浦岛距海沟的距离大致相同。加罗林洋脊以及海山从东侧向雅浦海沟俯冲,雅浦岛弧遭受俯冲侵蚀。Y3站位与雅浦岛距海沟的位置相近,二者俯冲侵蚀的程度也大致相同,出露的变质岩类型也应相同。雅浦岛弧Y3站位取得的变质岩样品主要为角闪岩和绿片岩。根据前人研究结果,雅浦岛(Yap Islands)变质岩的变质级自西向东由高绿片岩相升高至低角闪岩相,雅浦岛大部分为绿片岩,角闪岩出露于靠近海沟的较小区域^[5]。Y3站位和雅浦岛出露的变质岩类型相同,都为角闪

岩和绿片岩,变质岩的出露情况与俯冲侵蚀的模式相符。

根据压力计的计算结果,雅浦角闪岩的埋藏深度大约为15~20km。我们认为,雅浦岛弧岩石在地表一定深度之下发生变质作用,岛弧隆起的部分遭受俯冲侵蚀作用,而使变质岩基底暴露于地表。最终,雅浦岛弧的弧前地区甚至岛弧主体都遭受侵蚀,导致变质岩基底出露于海底。

6 结论

本文利用在雅浦岛弧获得的变质岩样品,研究了角闪岩的变质温压条件,并进一步探讨了雅浦岛弧变质岩的构造环境,以及加罗林洋底高原的俯冲侵蚀对雅浦岛弧的影响,得出以下结论:

雅浦变质岩的变质相主要为角闪岩相和绿片岩相。对角闪岩进行温度压力计算,结果表明,角闪岩的变质温压条件为493.6~630℃/3.8~6kbar,属于角闪岩相,为中等P/T型变质相系。雅浦变质岩经历了岛弧区域变质作用,代表雅浦岛弧基底部分。雅浦角闪岩的埋藏深度大约为15~20km,雅浦岛弧变质岩的出露是俯冲侵蚀的结果。加罗林洋

底高原上的海山促进了雅浦岛弧俯冲侵蚀的发育,使得雅浦岛弧的弧前地区甚至岛弧主体都遭受侵蚀,导致变质岩基底出露于海底。

致谢:感谢执行雅浦海域2015年度航次的全体船员及科学家。感谢中国海洋大学海底资源与探测技术实验室来志庆老师在电子探针测试过程中给予的帮助。

参考文献(References)

- [1] Leat P T, Larter R. Intra-oceanic subduction systems: introduction[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 219 (1): 1-17.
- [2] Stern R J, Smoot N C, Rubin M. Unzipping of the volcano arc, Japan[J]. Tectonophysics, 1984, 102 (1-4): 153-174.
- [3] Matsuda J-I, Zashu S, Ozima M. Sr isotopic studies of volcanic rocks from island arcs in the western pacific [J]. Tectonophysics, 1977, 37 (1-3): 141-151.
- [4] Ohara Y. Peridotites and volcanics from the Yap arc system: implications for tectonics of the southern Philippine Sea Plate [J]. Chemical Geology, 2002, 189 (1) :35-53.
- [5] Shiraki K. Metamorphic basement rocks of Yap Islands, Western Pacific: possible oceanic crust beneath an island arc [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1971, 13 (1): 167-174.
- [6] Hawkins J and Batiza R. Metamorphic rocks of the Yap arc-trench system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1977, 37 (2): 216-229.
- [7] Kobayashi K. Origin of the Palau and Yap trench-arc systems [J]. Geophysical Journal International, 2004, 157 (3): 1303-1315.
- [8] Sato T, Matsu'ura M. A kinematic model for evolution of island arc-trench systems [J]. Geophysical Journal International, 1993, 114 (3): 512-530.
- [9] Kim Y-M, Lee S-M, Okino K. Comparison of gravity anomaly between mature and immature intra-oceanic subduction zones in the western Pacific [J]. Tectonophysics, 2009, 474 (3-4): 657-673.
- [10] Fujiwara T, Tamura C, Nishizawa A, et al. Morphology and tectonics of the Yap Trench [J]. Marine Geophysical Researches, 2000, 21 (1): 69-86.
- [11] 张正一,董冬冬,张广旭,等. 板块俯冲侵蚀雅浦岛弧的地形制约 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37 (1): 41-50.
[ZHANG Zhengyi, DONG Dongdong, ZHANG Guangxu, et al. Topgraphic constraints on the subduction erosion of the Yap arc, west Pacific [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2017, 37 (1): 41-50.]
- [12] Shiraki K, Kuroda N, Maruyama S, et al. Evolution of the tertiary volcanic rocks in the Izu-Mariana arc [J]. Bulletin Volcanologique, 1978, 41 (4): 548-562.
- [13] Beccaluva L, Macchiotta G, Savelli C, et al. Geochemistry and K/Ar ages of volcanics dredged in the Philippine Sea (Mariana, Yap, and Palau trenches and Parece Vela basin) [J]. 1980, 23:247-268.
- [14] Crawford A J, Beccaluva L, Serri G, et al. Petrology, geochemistry and tectonic implications of volcanics dredged from the intersection of the Yap and Mariana trenches [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 80 (3): 265-280.
- [15] McCabe R, Uyeda S. Hypothetical model for the bending of the Mariana Arc [C]//The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands: Part 2. 1983:281-293.
- [16] Pearce J A, Reagan M K, Petronotis K, et al. Izu-Bonin-Mariana fore arc: Testing subduction initiation and ophiolite models by drilling the outer Izu-Bonin-Mariana fore arc; 30 July-29 September 2014[J]. Integrated Ocean Drilling Program: Preliminary Reports, 2015:352.
- [17] Lapierre H, Taylor R N, Rouer O, et al. Mineral Chemistry of Forearc Volcanic Rocks From the Izu-Bonin Arc, Holes 792E and 793B1[J]. 1992, 126:431-447.
- [18] Stern R J, Fouch M J, Klemperer S L. An Overview of the Izu-Bonin-Mariana Subduction Factory [C]//Inside the Subduction Factory. American Geophysical Union, 2013:175-222.
- [19] Bracey D R. Reconnaissance Geophysical Survey of the Caroline Basin[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86 (6): 775-784.
- [20] Weissel J K, Anderson R N. Is there a Caroline plate? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 41 (2): 143-158.
- [21] Sato T, Kasahara J, Katao H, et al. Seismic observations at the Yap Islands and the northern Yap Trench[J]. Tectonophysics, 1997, 271 (3-4): 285-294.
- [22] Seno T, Stein S, Gripp A E. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98 (B10): 17941-17948.
- [23] Ryan W B F, Carbotte S M, Coplan J O, et al. Global Multi-Resolution Topography synthesis [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2009, 10, Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332
- [24] Lai Z, Zhao G, Han Z, et al. The magma plumbing system in the Mariana Trough back-arc basin at 18° N[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180:132-139.
- [25] Gerya T, Perchuk L, Triboulet C, et al. Petrology of the Tumanshet zonal metamorphic complex, eastern Sayan[J]. Petrology, 1997, 5 (6): 503-533.
- [26] Zenk M, Schulz B. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland[J]. Mineralogical Magazine, 2004, 68 (5): 769.
- [27] Holland T and Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1994, 116 (4): 433-447.
- [28] Molina J, Moreno J, Castro A, et al. Calcic amphibole thermobarometry in metamorphic and igneous rocks: New cali-

- brations based on plagioclase/amphibole Al-Si partitioning and amphibole/liquid Mg partitioning[J]. *Lithos*, 2015, 232: 286-305.
- [29] Leake B E, Woolley A R, Birch W D, et al. Nomenclature of amphiboles: additions and revisions to the International Mineralogical Association's amphibole nomenclature[J]. *Mineralogical Magazine*, 2004, 68 (1): 209-215.
- [30] Leake B E, Woolley A R, Arps C E, et al. Report. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association commission on new minerals and mineral names[J]. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61 (2): 295-321.
- [31] Droop G. A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria[J]. *Mineralogical Magazine*, 1987, 51 (361): 431-435.
- [32] Lepage L D. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29 (5): 673-678.
- [33] Zenk M, Schulz B. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland[J]. *Mineralogical Magazine*, 2004, 68 (5): 769-786.
- [34] Earle S. Physical Geology[M]. USA: Create Space Independent Publishing Platform, 2016: 171-174.
- [35] Brown M. P-T-t evolution of orogenic belts and the causes of regional metamorphism [J]. *Journal of the Geological Society*, 1993, 150 (2): 227-241.
- [36] Peacock S M. Thermal and Petrologic Structure of Subduction Zones [C]//Subduction top to bottom. American Geophysical Union, 1996: 119-133.
- [37] Rondenay S, Abers G A, van Keken P E. Seismic imaging of subduction zone metamorphism[J]. *Geology*, 2008, 36 (4): 275-278.
- [38] Wei C and Zhang Y. Phase transition in the subducted oceanic lithosphere and generation of the subduction zone magma[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (23): 3603-3614.
- [39] Cloos M. Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105 (6): 715-737.
- [40] Winter John D. Principles of Igneous and Metamorphic Petrology[M]. USA: Pearson, 2010: 563-565.
- [41] Zheng Y, Chen R, Xu Z, et al. The transport of water in subduction zones[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59 (4): 651-682.
- [42] Clift P, Vannucci P. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42, RG2001, doi: 10.1029/2003RG000127.
- [43] von Huene R, Ranero C R, Vannucci P. Generic model of subduction erosion[J]. *Geology*, 2004, 32 (10): 913-916.
- [44] Kopp H, Flueh E R, Petersen C J, et al. The Java margin revisited: Evidence for subduction erosion off Java[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242 (1): 130-142.
- [45] Kukowski N, Oncken O. Subduction Erosion — the “Normal” Mode of Fore-Arc Material Transfer along the Chilean Margin? [C]//The Andes: Active Subduction Orogeny. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 217-236.
- [46] Stern C R. Subduction erosion: Rates, mechanisms, and its role in arc magmatism and the evolution of the continental crust and mantle[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20 (2-3): 284-308.
- [47] Johnson L, Fryer P. Oceanic plate material on the Mariana forearc [J]. *Eos*, 1988, 69: 1471.
- [48] Bloomer S H. Distribution and origin of igneous rocks from the landward slopes of the Mariana Trench: Implications for its structure and evolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88 (B9): 7411-7428.
- [49] Hilde T W C. Sediment subduction versus accretion around the pacific[J]. *Tectonophysics*, 1983, 99 (2-4): 381-397.
- [50] Lallemand S E, Schnürle P, Malavieille J. Coulomb theory applied to accretionary and nonaccretionary wedges: Possible causes for tectonic erosion and/or frontal accretion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99 (B6): 12033-12055.
- [51] Loveless J P, Pritchard M E, Kukowski N. Testing mechanisms of subduction zone segmentation and seismogenesis with slip distributions from recent Andean earthquakes[J]. *Tectonophysics*, 2010, 495 (1-2): 15-33.
- [52] Keating B H, Matthey D P, Helsley C E, et al. Evidence for a hot spot origin of the Caroline Islands[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89 (B12): 9937-9948.