

山东蓬莱大黑山岛碱性火山岩地球化学特征*

黄 朋 付永涛 李安春 肖尚斌

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 庙岛群岛中的大黑山岛出露碱性火山岩,对研究壳-幔过程及黄、渤海演化具有重要意义。文中作者对大黑山岛火山岩的常、微量元素、K-Ar 年龄及 Nd-Sr-Pb 同位素体系进行测试确定。结果表明,岩石属钠质碱性玄武岩系列,岩浆岩喷发可分为 8Ma 前和 8Ma 后两个阶段;岩石常量元素含量除 K_2O 、 Na_2O 外差异小;随着火山岩的演化,岩浆源区深度变大;大黑山火山岩 Nd-Sr-Pb 同位素比值与夏威夷洋岛玄武岩相似,其岩浆的地幔端元组分为 PREMA + DM,又以 PREMA 为主,并有 MORB 物质混入。

关键词 大黑山岛,碱性玄武岩,Nd-Sr-Pb 同位素体系,地幔端元

中图分类号 P731

碱性玄武岩具有贫 SiO_2 ,高 ($K_2O + Na_2O$),明显富集 LIL、LREE、HFS 等不相容元素的特征,一般认为它是地幔部分熔融和交代作用的产物,其岩浆来源比较深,岩石中富含地幔岩包裹体。因而碱性玄武岩一直受到地质学家的重视,被认为是了解地幔物质组成、演化和壳-幔过程的宝贵材料。

中国东部新生代碱性玄武岩广泛分布,构成了类似于亚洲东缘安山岩带分布形态的碱性岩浆岩带。山东省位于此新生代岩浆岩带内,有相当数量的碱性玄武岩出露,主要分布在鲁西临朐-沂水地区、鲁东蓬莱-栖霞地区和鲁北无棣地区。在鲁东蓬莱地区,碱性岩出露于五里桥-赤山一带和大黑山岛。其中对五里桥-赤山一带的碱性玄武岩研究程度较高,而对大黑山岛的碱性岩了解甚少,仅有金翔龙等(1964)对它做过少量的工作。本文作者在前人工作的基础上,通过 K-Ar 年龄数据及岩石的 Nd-Sr-Pb 同位素组成,对大黑山岛碱性玄武岩的物质来源和演化过程进行了研究,为进一步揭示渤海新生代碱性火山活动规律提供基础。

1 地质概况

大黑山岛是庙岛群岛的一个组成部分,位于渤海海峡内。研究区内断裂构造发育,断裂延伸方向大致为 NE 向,NWW 向延伸的威海-蓬莱断

裂与它们斜交(图 1)。NE 向断裂中郯庐断裂带规模最大、活动最复杂,对研究区新生代火山活动具有非常重要的作用。威海-蓬莱断裂带是区内又一条重要的断裂构造,它西起渤海湾,经蓬莱与庙岛群岛之间海域登陆后,复进入黄海。蓬莱断裂对区内新生代火山作用同样具有重要意义,它与 NE 向构造的相交部位附近往往是发育新生代火山活动的有利部位。

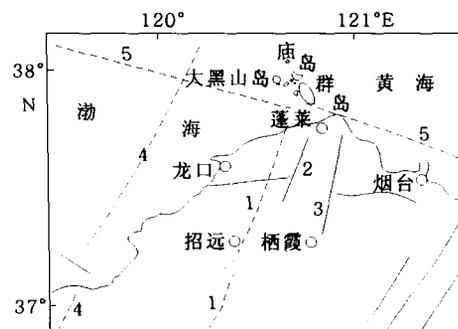


图 1 鲁东地区构造框架图

Fig. 1 The tectonic outline of eastern Shandong Province

1. 招远-北沟断裂; 2. 凤仪店断裂; 3. 五十里堡断裂;
4. 郯庐大断裂; 5. 威海-蓬莱断裂

大黑山岛出露地层大部分为元古界的石英岩和千枚岩,新生代火山岩则出露在岛屿西北部

* 国家重点基础研究发展规划项目, G2000046703 号。黄 朋, 博士, E-mail: Huangpeng@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2005-08-16, 收修改稿日期: 2006-10-04

的老黑山山顶,火山岩与下伏变质岩系呈角度不整合接触。火山岩呈球状,直径可达 1m,从内到外具层状构造。露头显示,老黑山火山岩可由砖红色烘烤边分为上下两层:上层致密,下层具气孔构造。火山岩内有黑色岩脉穿插。此外,老黑山玄武岩含地幔岩包裹体,直径最大可达 10cm。

2 样品采集与测试方法

样品 01H-1、3,02H-6 采于老黑山火山岩烘烤边之上的岩石,烘烤边之下岩石风化强烈,未采得新鲜样品。样品 02H-3、4 采于黑色岩脉,02H-2、5 采于烘烤边内。01PW-3 采自赤山碱性岩出露区,用以对比五里桥-赤山与大黑山两区内碱性岩的组成差异。

对样品常量元素和微量元素测试所用的方法、仪器情况及实验条件见 Fu 等(2003)。火山岩年龄的确定采用 K-Ar 同位素稀释法。岩石样品粉碎至 40—60 目,尽量将橄榄石斑晶挑出。01H-1 和 01H-3 号样在中国地质科学院矿床研究所 K-Ar 实验室测试。用电子轰击炉熔样,温度控制在 1400℃,熔样时间为 10min;用海绵钛铁炉在 800℃净化 30min,在 400℃净化 10min;用钛升华泉在 40 安培净化 1min。使用仪器型号为英国 MM1200B 惰性气体质谱仪。 ^{40}Ar 、 ^{38}Ar 的测试精度为 0.01%, ^{36}Ar 测试精度为 0.1%—1%。使用 EBH-25 黑云母标样监视器。K 含量在国家地质测试中心完成,使用 XRF 荧光法精度优于 1%,每样均测两份。02H-4 在中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院实验中心测试,使用仪器为 MM5400 静态真空质谱仪。样品在 1500℃

左右熔化的同时,加入准确定量的 ^{38}Ar 稀释剂,测定混合稀释后的同位素比值($^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$)_m 和($^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$)_m, 求出年龄。

对 01H-1、3 和 01PW-3 的 Nd-Sr-Pb 同位素测试在中国地质科学院地质研究所进行,使用 MAT-261 固体同位素质谱仪。称取小于 200 目的粉末样品置于低压密封溶样杯内,加入 HF + HNO₃ 溶解、蒸干,用 HCl 溶解。样品分为两份,一份用于含量测定,一份用于 Nd、Sr 比值测定。含量测定采用同位素稀释法;同位素比值测定用 HClO₄ 溶解、蒸干,用阳离子交换柱分离,收集 REE 部分并蒸干,再通过 HDEHP 交换柱分离,收集 Nd、Sr 部分、蒸干,用质谱测定。质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 和 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 校正,标准测试结果:J. M. Nd₂O₃ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511125 \pm 8(2\sigma)$, GBW 04419 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512725 \pm 10(2\sigma)$, NBS 987SrCO₃ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71025 \pm 2(2\sigma)$, Sm、Nd、Rb 和 Sr 流程空白分别为 $5 \times 10^{-11}\text{g}$ 和 10^{-9} — 10^{-10}g 。

3 结果与讨论

3.1 火山岩年龄

火山岩形成的年龄数据是研究其演化的基础之一,因此要了解大黑山岛火山岩及其相关岩浆作用首先需要获得年龄数据。大黑山岛火山岩露头显示,致密的火山岩形成年代要老于穿插其中的黑色气孔状火山岩。为了详细研究岩石形成的年代问题,本次研究中选择了对致密的和黑色含气孔的大黑山火山岩进行测年,并同时收集了刘若新(1992)转引陈文寄的大黑山火山岩的年龄数据(表 1)。

表 1 山东蓬莱大黑山岛火山岩 K-Ar 法年龄测试结果

Tab. 1 The K-Ar dating of volcanic rock in Daheishan Island, Penglai, Shandong Province

样 品	K ₂ O (Wt%)	Ar 含量	$^{40}\text{Ar}_R$ (mol/g)	$^{40}\text{Ar}_R$ (%)	$^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$	年龄 (Ma)	标准偏差 (Ma)
01H-1	2.12	0.0723	2.322×10^{-11}	13.62	5.079×10^{-4}	8.72	0.17
01H-3	2.37	0.0800	3.458×10^{-11}	22.87	4.888×10^{-4}	8.39	0.15
02H-4	1.24	0.0154	1.666×10^{-11}	30.93	4.505×10^{-4}	7.73	0.59
SM-3*	1.14		1.600×10^{-11}	45.88		8.08	0.16

* 数据来自刘新若,1992

表 1 中的测试结果显示,K-Ar 法所得年龄值与野外火山岩产状相吻合;大黑山火山岩形成于

中新世晚期(8.72—7.73Ma),与金翔龙等(1964)所推测的时间一致。相比之下,大黑山碱性火山

岩形成早于同处蓬莱地区的赤山-五里桥碱性玄武岩(4.39—5.58Ma)(支霞臣等,1990),在时间上相当于刘嘉麒(1988)提出的老爷岭火山幕(12—7Ma),这表明中国东部的新生代碱性火山岩在某种程度上具有继承性、连续性,可作为一个整体加以研究。

年龄测试结果还表明,大黑山火山岩形成过

程是两阶段的,不同阶段的火山岩不但产状有所差异,而且它们的岩石类型和化学组成也有一定的变化,作者将在下面的论述中加以详细讨论。

3.2 地球化学特征

Fu Yongtao(2003)测定了大黑山火山岩样品的常量元素和微量元素,样品常量元素组成见表2。

表2 山东蓬莱大黑山、赤山岩石常量元素含量(Wt%)

Tab.2 Major element composition(Wt%) of volcanic rocks in Daheishan and Chishan, Penglai, Shandong

项 目	01PW-3 霞石碧玄岩	01H-1 橄榄霞石岩	01H-3 橄榄霞石岩	02H-6 橄榄霞石岩	02H-3 霞石碧玄岩	02H-4 霞石碧玄岩	02H-2 烘烤边	02H-5 烘烤边
SiO ₂	42.82	39.09	39.3	40.02	40.7	40.08	44.32	41.24
TiO ₂	2.32	2.71	2.79	2.44	2.46	2.53	2.38	2.07
Al ₂ O ₃	12.89	11.74	11.73	11.24	11.77	11.42	10.67	11.48
FeO	5.86	7.57	6.6					
Fe ₂ O ₃	6.67	7.71	8.42	16.15	15.66	15.66	14.76	16.44
MnO ₂	0.16	0.15	0.18	0.23	0.22	0.22	0.21	0.23
CaO	9.64	11.59	11	10.9	11.18	12.05	10.42	9.94
MgO	9.38	9.02	8.88	9.26	8.17	8.29	8.69	7.66
K ₂ O	1.62	2.69	2.62	2.25	1.62	1.40	0.24	0.09
Na ₂ O	4.84	4.5	4.88	4.71	3.27	3.20	1.02	0.69
P ₂ O ₅	1.19	0.96	1.39	1.25	1.32	1.25	1.51	1.50
AR	1.80	1.89	1.98	1.92	1.54	1.49	1.13	1.08
岩浆房深度 (km)	84.41	59.00	60.11	66.93	84.41	93.58	325.26	650.34

注:01PW-3号样品采自赤山

分析表2数据可以发现,样品的常量元素含量具下述特征:SiO₂含量均小于45%;FeO和Fe₂O₃的含量似乎变化较大,但考虑到FeO易氧化成Fe₂O₃,且从总Fe含量来看变化并不大,所以FeO和Fe₂O₃的含量变化的可靠性值得斟酌;K₂O和Na₂O含量变化大,就大黑山火山岩来说,Na₂O和K₂O含量的差异橄榄霞石岩比霞石碧玄岩要大,这种趋势值得注意。

根据SiO₂和CIPW矿物含量,样品分别被定名为属于超基性岩石的橄榄霞石岩和基性岩石的霞石碧玄岩,而且橄榄霞石岩也含有少量长石。另外,微量元素数据表明,岩石富集Nb、Ta等高场强元素和强不相容元素(Cs、Rb、Ba、Th、U等)。因此,样品虽然SiO₂含量落入超基性岩类,

但实际上把它们归于超基性和基性岩石的过渡类型应该更为合理。而碱度率值(Alkalinity ratio,简化为AR)及邱家骧(1985)给出的划分碱性和亚碱性岩石系列的界线表明,样品落入碱性岩石系列范围内。根据碱性玄武岩系列所含的岩石类型,碧玄岩和霞石岩都包含在内(邱家骧,1985),因此可将大黑山火山岩作为碱性玄武岩进行研究。

对于碱性玄武岩系列,可由K₂O和Na₂O含量进一步将岩石系列分为钠质碱性玄武岩和钾质碱性玄武岩两大类:K₂O > Na₂O为钾质碱性玄武岩,K₂O < Na₂O为钠质碱性玄武岩。大黑山火山岩K₂O和Na₂O含量虽有比较大的变化,却都属于钠质碱性玄武岩;而K₂O和Na₂O含量的明显变

化暗示火山岩物质来源可能有所变化。碱性玄武岩中 K_2O 的含量变化还指示了岩浆房深度的改变(王锡魁等, 1993), 两者间关系见(1)式。

$$H = 118.69C^{-0.7064} \quad (1)$$

式中, H 表示岩浆房深度, C 表示 K_2O 含量。

岩浆房深度计算结果见表 2。结果表明, 随着岩浆的演化岩浆房深度变大, 其中 02H-2 和 02H-5 两个样品所算出的深度虽然与俯冲板块通常的堆积熔融深度相吻合, 但考虑到烘烤边的样品容易受到外界因素的影响, 故此不作进一步讨论。对上述房深度变大的现象有两种可能的解释: 一是岩石圈变厚; 另一种是岩浆房向下迁移。

作者认为第一种解释更合理一些, 因为随着岩浆对上覆地层的侵蚀, 岩浆房应向上移动。此外, 大黑山岛所属庙岛群岛处在隆起带上, 成因上和日本海形成有关, 并与东海东缘的冲绳海槽的发育同期(中新世晚期), 因而老黑山火山岩可能是太平洋板块向西俯冲所引起的。

3.3 Nd-Sr-Pb 同位素

为了了解大黑山碱性玄武岩源区特征, 特别测试了大黑山火山岩样品的 Nd-Sr 同位素比值。另外, 为了与山东省内另一处研究程度较高的赤山新生代碱性玄武岩进行对比, 也测试了一件赤山的样品, 数据见表 3。

表 3 大黑山和赤山火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素测试结果

Tab. 3 The data of Sr-Nd-Pb isotopic series for Daheishan and Chishan volcanic rocks

测试项目	大黑山		赤山
	01H-1	01H-3	01PW-3
Rb/Sr	0.0185	0.0171	0.0266
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	0.703427 \pm 12	0.703482 \pm 10	0.703895 \pm 13
Sm/Nd	0.1821	0.1884	0.1962
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	0.51291 \pm 9	0.513074 \pm 12	0.513014 \pm 9
ϵ_{Nd}^1	5.4	8.59	7.39
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$	18.0289 \pm 43	17.9728 \pm 16	18.2401 \pm 43
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$	15.4358 \pm 22	15.4022 \pm 14	15.5645 \pm 37
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \pm 2\sigma$	38.0876 \pm 54	37.9975 \pm 33	38.535 \pm 9

从表 3 中可以看到, Rb/Sr 比值在 0.0171—0.0266 范围内变化, 赤山火山岩 Rb/Sr 比值要大于大黑山, 但总的来说, 两地火山岩测得的 Rb/Sr 比值低。这种比值特征表明形成岩石的岩浆来自地球深部, 岩浆源区应位于下地壳-上地幔部位。样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值也比较低, 在 0.703427—0.703895 之间, 与夏威夷洋岛玄武岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7032—0.7041)相近。其中, 赤山的比值高于大黑山, 但都低于全球数值 0.7047—0.7052 (Taloy *et al.*, 1985; DePaolo, 1982; Zindler *et al.*, 1982), 落入下地壳-上地幔 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围内。

样品 Sm/Nd 比值在 0.1821—0.1962 之间, 赤山火山岩比值要大于大黑山。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在 0.51291—0.513074 之间, 比值较高, 高于全球数值 0.51264 (Zindler *et al.*, 1982), 与夏威夷洋岛玄武岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值(0.51270—0.51306)相近。

样品 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 17.9728—18.2401 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 15.4022—15.5645 之间, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值在 37.9975—38.535 之间, 比值较低, 略小于全球数值 18.4, 15.58, 38.9。大黑山火山岩除 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值稍高外, 其它两组铅同位素比值与夏威夷洋岛玄武岩重合, 赤山火山岩比值要大于大黑山, 三组铅同位素比值都比夏威夷洋岛玄武岩高。

大黑山火山岩的同位素比值与洋岛玄武岩的相似性, 表明岩浆来源较深, 在成岩过程中未明显受到地壳物质的混染。将有关同位素数据作图(图 2a, b, c)。由图 2a 可知, 大黑山火山岩与赤山火山岩位于 PREMA 地幔源区附近。其中, 大黑山火山岩与 PREMA、HIMU 和 DM 地幔源区关系较密切; 而赤山火山岩岩浆源区组成则有从 PREMA 到 BSE 演化的趋势。由此可见, 大黑山与赤山的火山岩源区组成有所差异。而从

图 2b、c 可以看到,大黑山火山岩紧靠 PREMA 地幔源区左侧,赤山火山岩则位于 PREMA 地幔源区内,表明岩浆应主要来源于 PREMA 和 DM 地幔源区。HIMU 地幔组分以两地火山岩不具备的高 U/Pb 、 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 比值为特征,所以作者认为 HIMU 地幔组分实际上与大黑山和赤山火山岩源区的关系并不密切,因而可以初步判定大黑山和赤山的火山岩的岩浆地幔源区组分是 PREMA + DM,又以前者为主。另外,在图 2b、c 上可以看到样品点与 MORB 的关系也比较密切,可能暗示熔融的 MORB 为岩浆源区提供了一定数量的物质,这为太平洋板块俯冲引起大黑山

碱性火山岩形成的观点提供间接的依据。

4 结论

(1)大黑山火山岩喷发可分为 8Ma 前和 8Ma 后两个阶段,前一阶段以橄榄霞石岩为主;后一阶段以霞石碧玄岩为主。岩性有由超基性向基性过渡的趋势,岩石碱性强,属钠质碱性玄武岩系列。

(2)岩石常量元素含量除 K_2O 、 Na_2O 外差异小。

(3)随着火山岩的演化岩浆的源区变深,太平洋板块的俯冲可能是原因之一。

(4)大黑山火山岩的 Nd-Sr-Pb 同位素比值普遍低于赤山,与夏威夷洋岛玄武岩的同位素比值相似。通过同位素相关图解分析,认为岩浆地幔源区的组分为 PREMA + DM,又以 PREMA 为主。另外,岩浆源区可能有熔融的太平洋俯冲板块物质混入。

参 考 文 献

支霞臣,1990. 山东蓬莱、临朐新生代碱性玄武岩的微量元素和岩石成因. 地质论评,36(5):385—393

王锡魁,赵 莉,隋维国等,1993. 吉东碱性玄武岩 K_2O 含量与岩浆来源深度、岩石年龄的相关性分析. 长春地质学院院报,23(4):416—422

刘新若,陈文奇,孙建中等,1992. 中国新生代火山岩的年代学与地球化学. 北京:地震出版社,1—43

刘嘉麒,1988. 中国东北地区新生代火山幕. 岩石学报,4(1):1—10

邱家骧,1985. 岩浆岩石学. 北京:地质出版社,111—120,210—212

金翔龙,郑开云,1964. 庙岛群岛地质的初步观察. 海洋与湖沼,6(4):364—370

DePaolo D J, 1982. Sm-Nd, Rb-Sr and U-Th-Pb systematics of granulites facies rocks from Fyfe Hills, Enderby Land, Antarctica. Nature, 298:189—202

Fu Yongtao, Li Anchun, 2003. Petrology, geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopic properties of volcanic rocks in Daheishan Island, Penglai, Shandong Province. Marine Science Bulletin, 5(2):29—39

Taloy S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: balckwell, 69—121

Zindler A, Jagoutz E, Goldstein S, 1982. Nd, Sr and Pb isotopic systematics in a three-component mantle: a new perspective. Nature, 298:519—523

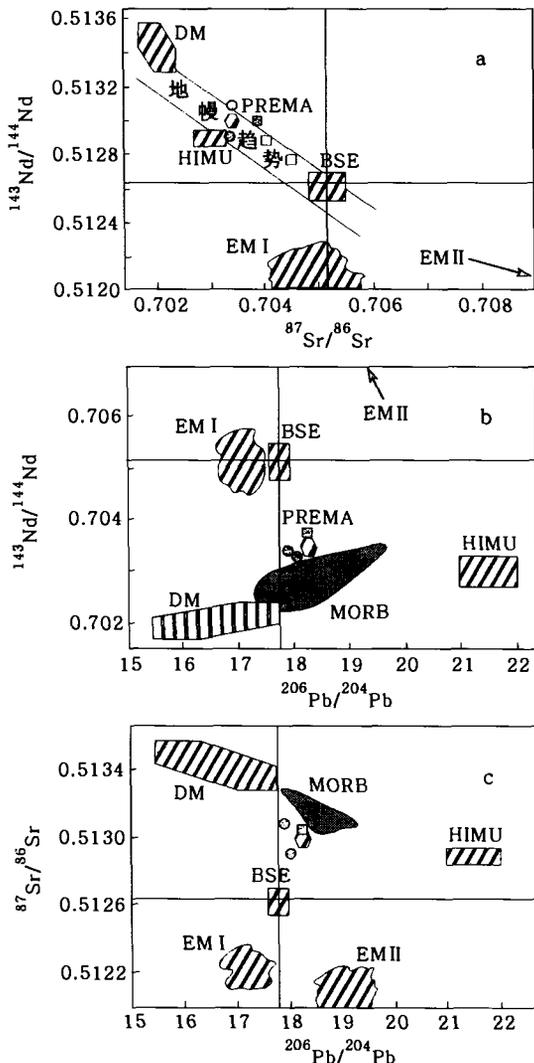


图 2 大黑赤山 Nd-Sr-Pb 体系同位素相关图

Fig. 2 Correlation diagram of Nd-Sr-Pb isotopic series

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF DAHEISHAN ISLAND ALKALIC VOLCANIC ROCKS FROM PENGLAI, SHANDONG PROVINCE

HUANG Peng, FU Yong-Tao, LI An-Chun, XIAO Shang-Bin
(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract The Daheishan Island ($37^{\circ}58'10''\text{N}$, $120^{\circ}37'13''\text{E}$) is a small island of the Miaodao Archipelago in Bohai Sea of China. The island features with alkalic volcanic rocks. These rocks bear important information of the interaction between the crust and the mantle in the area and of the geological evolution of Chinese marginal seas. However, the rocks are poorly studied with no citable reference. In this case, the fresh volcanic rocks were sampled from outcrop at the northwest of Daheishan Island on 2001. The contents of major elements and isotopic compositions, and K-Ar ages were analyzed with the Philips PW 1400 X-Ray fluorescence spectrometry (XRF), Finnigan-MAT261 mass spectrometer and MM1200B inert gases mass spectrometer, at the Institute of Geology and Geophysics (IGG), Chinese Academy of Sciences (CAS), on 2002. Geological data of chemical composition, K-Ar age and Nd-Sr-Pb imprints were obtained from these rocks. By analyzing these data, the authors concluded that: the volcanic formation of Daheishan Island belongs to the petrological series of sodic-alkalic basalt, and the volcanism can be divided into two phases ($>8\text{Ma}$ and $<8\text{Ma}$). Difference in chemical composition is small except for K_2O and Na_2O . The depth of magma chamber became deeper as magmatism developed. Mantle composition of the chamber area included end members of mainly PREMA and then DM in mantle composition. Furthermore, the melting of MORB of the Pacific Plate probably provided the magmatic matter in the chamber area.

Key words Daheishan Island, Alkalic basalt, Nd-Sr-Pb isotopic series, Mantle type