

中国中-东部地区新生代玄武岩的分布规律与面积汇总

陈霞玉, 陈立辉*, 陈 暘, 曾 罡, 刘建强

南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210023

摘要: 利用图像处理技术, 对中国中-东部地区地质图进行新生代玄武岩的像素提取, 并叠加在高精度地貌图上, 统计了该地区陆地出露的新生代玄武岩的总面积和分区面积。结果表明: (1) 我国中-东部地区新生代玄武岩总面积为 78 525 km²; (2) 以东部新生代盆地为界, 盆地以西的中部地区新生代玄武岩面积为 35 487 km², 盆地以东的东部地区新生代玄武岩面积为 43 038 km², 两边面积比为 45:55; (3) 按时代划分, 中国中-东部新生代玄武岩随时代变新分布面积递增, S_{古近纪}:S_{新近纪}:S_{第四纪} 为 0.36:21.65:77.99; (4) 中部地区的新生代玄武岩主要分布在北方, 由北至南包括三个主要出露区, 分别为松辽盆地以西的大兴安岭地区(7334 km²)、锡林郭勒地区(13 843 km²) 和华北北缘(14 310 km²); (5) 东部地区新生代玄武岩的分布范围更广, 从黑龙江一直到海南岛, 也可以分为三个区, 包括松辽盆地以东的东北地区(33 324 km²)、从山东到福建零星分布的华东地区(1707 km²) 以及位于海南岛和雷州半岛的雷琼地区(8007 km²); (6) 总体看, 我国中-东部地区新生代玄武岩主要分布在北方, 如以山东省为界, 北方玄武岩面积达 69 191 km², 南方玄武岩面积达 9334 km², 北南之比为 88:12。

关键词: 新生代; 玄武岩; 中国中-东部; 时空分布

中图分类号: P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2014)04-0507-13

Distribution Summary of Cenozoic Basalts in Central and Eastern China

CHEN Xiayu, CHEN Lihui*, CHEN Yang, ZENG Gang, LIU Jianqiang

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract: Distribution information of Cenozoic basalts were extracted by pixel from the geological map of central and Eastern China, and overlaid on the high-precision geomorphologic map, utilizing a digital-image processing program. Based on this method, we estimated the total and sub-regional area of Cenozoic basalts exposed in Central and Eastern China. The main observations include: (1) The total area of Cenozoic basalts in Central and Eastern China is 78 525 km². (2) The area of Cenozoic basalts in Central China is 35 487 km², while that in Eastern China is 43 038 km², with a ratio of 45:55. (3) The area of Cenozoic basalts increases along with younger age, and the ratio of which from Paleogene, Neogene, to Quaternary is 0.36:21.65:77.99. (4) Cenozoic basalts of Central China are mainly distributed in the north. Three main regions include: Great Xing'an Range, Xilin Gol region and northern edge of North China, with an area of 7334 km², 13 843 km², and 14 310 km², respectively. (5) In Eastern China, Cenozoic basalts are more widely distributed, from Heilongjiang province in the north to Hainan Island in the south, and they can be divided into three regions: Northeast China to the east Songliao basin (33 324 km²), Eastern China including Shandong, Zhejiang, Jiangsu and Fujian provinces (1 707 km²), and Leiqiong region including Hainan Island and Leizhou Peninsula (8 007 km²). (6) Taken Shandong province as the boundary, Cenozoic basalts in Central and Eastern China are mainly distributed in the north with an area of 69 191 km², while that of the southern part is 9334 km², and their ratio is 88:12.

Key words: Cenozoic; basalts; Central and Eastern China; spatial and temporal distribution

Corresponding author: CHEN Lihui, Professor; E-mail: chenlh@nju.edu.cn

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(41172060; 41372064)资助

作者简介: 陈霞玉, 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; E-mail: 65268229@qq.com

*通讯作者: 陈立辉, 教授, 主要从事火成岩岩石学方面的研究; E-mail: chenlh@nju.edu.cn

1 前言

我国中-东部陆地出露大量的新生代火山岩,主要分布于东北-华北的中、新生代盆地两侧地带,属于大陆板内玄武岩的范畴,一般称为中国东部新生代玄武岩(刘若新等,1992)。由于玄武岩岩浆起源于地幔深处,是地幔深部过程的地表记录,因此了解这些新生代玄武岩的时空分布规律有助于理解新生代时期我国中-东部地区的深部动力学过程(Xu et al., 2005)。同时,硅酸盐风化是调节全球碳循环的一个重要机制,而玄武岩拥有最高的风化速率(Louvat and Allègre, 1997)和较大的分布面积,其对大气CO₂的消耗速率引人注目(吴卫华等,2012)。玄武岩风化一方面作为CO₂的净汇,另一方面玄武岩岩体本身也是CO₂的理想地质储层,已经成为我国碳循环研究工作的重点(马野牧等,2011)。中-东部地区也是我国主要的工业密集分布区,因此对该区的新生代玄武岩面积进行重新统计对我国目前开展的碳循环研究具有参考价值。

目前学者们对中国中-东部新生代玄武岩时空分布有以下三种分类:(1)依据火山活动的方式和喷出岩的岩性分类(尹赞勋,1937);(2)依据火山地貌、分布格局与构造线的关系、喷发物质与性质以及喷发年代分类(张大泉,1986;刘嘉麒,1999);(3)依据火山岩分布的构造环境分类(刘若新等,1992)。然而,这些不一样的学术语言并未提供火山岩分布地区的地貌信息和地理坐标信息,亦缺失齐全精准的面积数据。例如刘嘉麒(1999)总结中国东北地区玄武岩面积给出50 000 km²的数值,而该数据涵盖了行政区划上的内蒙古与河北、山西的北部等多个地区的玄武岩面积,数据指代过于宽泛。另外一些数据相对细化,例如李世超等(2012)通过野外地质踏勘获得莫克河地区火山岩面积数据(80 km²),其获得数据的研究区域与所属行政地理区域之间的对应关系在文中未明确。而直观的地质地貌图件和较为精准的火山岩面积统计数据的获得,对我们认识中国中-东部地区新生代火山岩(以玄武岩为主)的成因、与其相关的深部动力学过程及相关的地表响应等又十分重要。如果没有玄武岩面积数据及地貌信息,硅酸盐碳汇量的统计将难以开展。基于上述

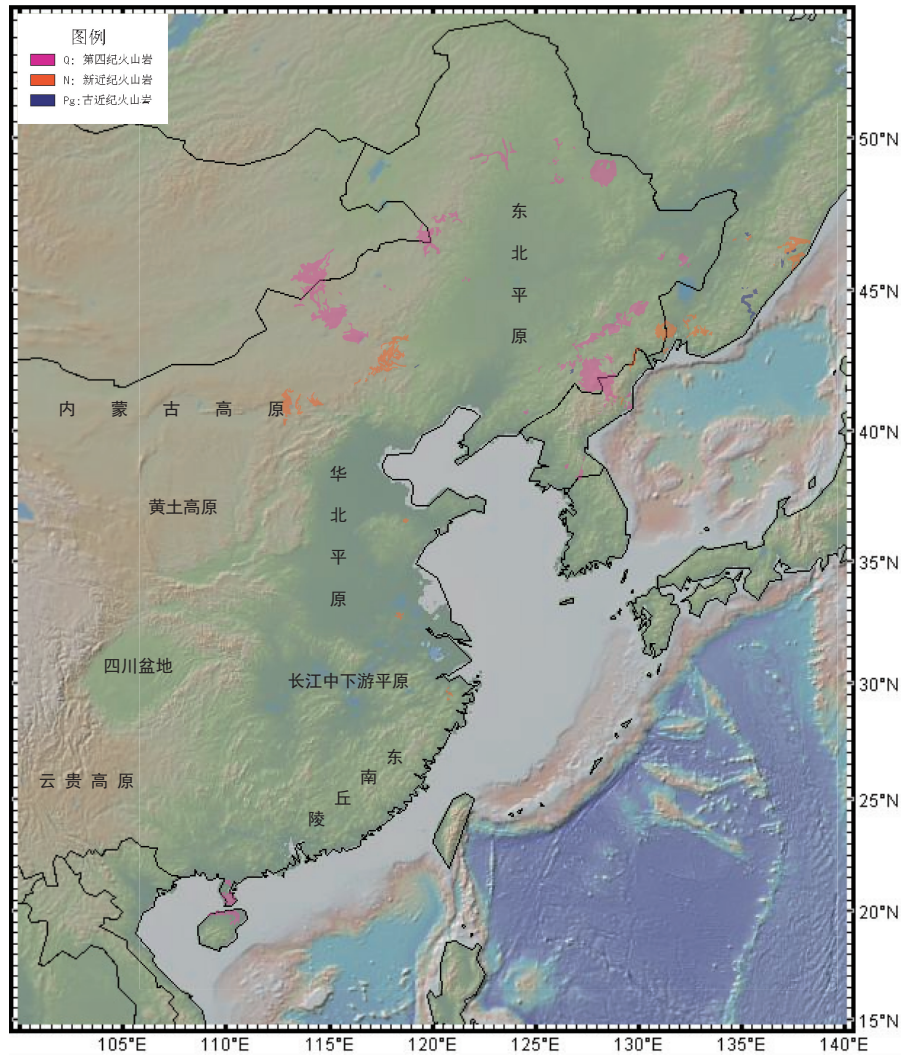
原因,作者希望能够找到一种简单易行的手段来快速、准确地获得中国中-东部地区火山岩分布的可视化图像(图1),并为其附加地理坐标,同时获取相对精准的分布面积数据。而本项工作中应用的图像处理软件,很好地解决了上述问题,为我们理解中国中-东部地区新生代玄武岩的地质成因机制提供了基础,也为我们了解与玄武岩风化有关的碳汇、CO₂地质封存等研究提供了地质依据。

2 统计方法及应用

本次研究对中国中-东部地区新生代玄武岩的统计方式与以往有所不同,首先依据中国地形存在阶梯性的特点,将其划分为中国中部和中国东部两大类,然后依据地理区域将中国东部和中国中部进一步细分。在地质年代上,依据IUGS国际地质年代表2013版将新生代火山岩分为三个纪,其中古近纪与新近纪的年龄分界为23.0 Ma,新近纪与第四纪的年龄分界为2.588 Ma。

2.1 统计方法

本文中面积统计选取的素材包括GeoMapApp应用软件中附带的地质图East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)(以下简称地质图A)和地貌图,以及中亚各国的地质图Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas(以下简称地质图B)。其中GeoMapApp附带的地质图A和地貌图均采用墨卡托投影绘制,因此导出后即可完全重合。由于地质图A的范围为中国东北、东部及南部地区,缺少中国中部的内蒙古地区,因此选择了地质图B中的中国中部内蒙古地区进行相应补充。为了满足计算和观察精度,我们首先通过GeoMapApp应用软件,将其附带的地质图A和地貌图进行等比例的放大(本文采用的放大倍数为32倍),并通过Photoshop软件,将上述放大的中国中-东部地区不同区域的地质图A和地貌图分别进行无缝拼接,从而获得高精度的中国中-东部地区地质图和地貌图各一张。由于地质图B为赤平投影图,与地质图A和地貌图采用的墨卡托投影存在差异(图2),因此我们需要通过Photoshop软件将地质图B进行分割,并将每一个分割的小单元进行软件变形,使其与地质图A和地貌图的经纬度相对应。为了控制误差,本文中地质图B的经纬度分割跨度为1°。最后,根据经纬度将上述地质图



地貌图来自GeoMapApp应用软件(<http://www.geomapapp.org/>)；地质图来自两部分：GeoMapApp应用软件中附带的地质图 East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)和中亚地质图 Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas
Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), and geological map is from two parts: the accessory file of GeoMapApp—East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP) and Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas

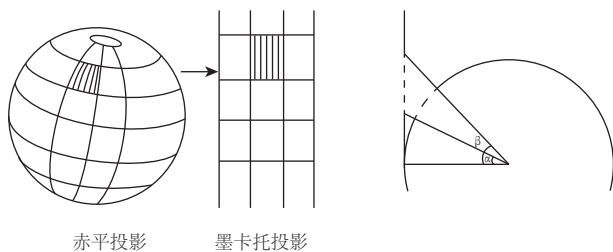
图1 中国中—东部地区新生代玄武岩分布图

Fig. 1 Distribution of Cenozoic basalts in Central and Eastern China

A、地质图B和地貌图进行拼合，同时选取地质图中新生代火山岩的图例颜色，删除其它无关颜色，最终形成可用于面积统计的完整复合图形

(E99°~E137°, N15°~N 55°)。

此外，由于墨卡托投影图是将球面投影至平面，存在面积变形，且变形程度随纬度增加而增大，因而用墨卡托投影制作的图件不能简单地以图面表达的面积的实际面积。但是，在某一特定纬度存在一个墨卡托投影变形参数，而微小的纬度区间内可以近似认为变形系数是不变的，利用面积之比，可以约去此纬度的墨卡托投影变形参数。由于目前计算机硬件条件受限，只能以纬度1°作为基本单元划分。所以，本文统计方法采用的基本原理是：在纬度1°范围内，一定的经度之



赤平投影 墨卡托投影

图2 墨卡托投影变形示意图

Fig. 2 Deformation diagram of Mercator projection

间,玄武岩喷发面积 S_1 与该区域地球表面积 S 之比等于墨卡托投影图形中的玄武岩图像面积 P_1 与该区域图像面积 P 之比。公式如下:

$$\frac{S_1}{S} = \frac{P_1}{P} \quad (1)$$

在该等式中,玄武岩图像面积 P_1 和该区域的图像面积 P 可以通过Photoshop软件计算其像素大小。从纬度 λ_1 到纬度 $\lambda_2(\lambda_2=\lambda_1+1)$,经度 ϕ_1 到经度 $\phi_2(\phi_2 > \phi_1)$ 之间的地球表面积 S 可以利用球面计算公式获得:

$$S = 2\pi R^2(\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1) \cdot \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{360} \quad (2)$$

故最终可以计算出玄武岩喷发面积 S_1 。

$$S_1 = \frac{P_1}{P} \cdot 2\pi R^2(\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1) \cdot \frac{\phi_2 - \phi_1}{360} \quad (3)$$

某区域内玄武岩总面积($S_{\text{总}}$)为各纬度的分面积之和。

$$S_{\text{总}} = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n \quad (4)$$

2.2 统计方法应用验证

由于海岛在图幅上轮廓清晰、较易分辨,且海岛的实际面积资料相对充足,因此我们选取了五个海岛进行面积统计计算,以验证上述统计方法的可行性(表1)。选取的五个海岛按其实际面积由小到大分别为:冲绳岛、济州岛、海南岛、台湾岛和斯里兰卡岛。

表1 海岛计算面积(km²)与实际面积(km²)对比

Table 1 Comparison of computational area with actual area for sea island

海岛	计算面积	实际面积	误差率(%)
冲绳岛	1 257	1208	4.09
济州岛	1 875	1826	2.70
海南岛	34 545	33 839	2.09
台湾岛	36 561	36 191	1.02
斯里兰卡岛	66 687	65 610	1.64

以济州岛为例,它位于北纬33°到北纬34°之间,而以总图图幅东经90°到东经140°为限,我们以此为区域单位将图件进行分割,地球半径 R 取平均值6371 km。通过Photoshop软件测得,济州岛的像素面积 $P_1=719$ 像素点,从北纬33°到34°,东经90°到东经140°之间矩形区域像素面积 $P=196\ 305$ 像素点。通过公式3计算如下:

$$S_1 = \frac{P_1}{P} \cdot 2\pi R^2(\sin \lambda_2 - \sin \lambda_1) \cdot \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{360}$$

$$= \frac{719}{196305} \times 2\pi \times 6371^2 \times (\sin 34 - \sin 33) \times \frac{(140 - 90)}{360} = 1888(\text{km}^2)$$

即可计算出济州岛为1888 km²。通过查阅资料比对,济州岛的实际面积为1826 km²,误差率为3.4%。

以海南岛为例:它位于北纬18°到北纬21°之间,而以总图图幅东经90°到东经140°为限,我们以1°纬度为单元分割为北纬18°~19°,北纬19°~20°和北纬20°~21°三个区域单元,进行分别计算累加。通过Photoshop软件测得:北纬18°~19°, $P1_1=14\ 868$ 像素点, $P1=54\ 600$ 像素点;北纬19°~20°, $P2_1=25\ 159$ 像素点, $P2=55\ 055$ 像素点;北纬20°~21°, $P3_1=562$ 像素点, $P3=55\ 510$ 像素点。

通过公式3计算可得, $S_1=12\ 772$ km²; $S_2=21\ 304$ km²; $S_3=469$ km²。累加计算得出海南岛面积 $S_{\text{总}}=34\ 545$ km²,而海南岛的实际面积为33 839 km²,误差率为2.1%。

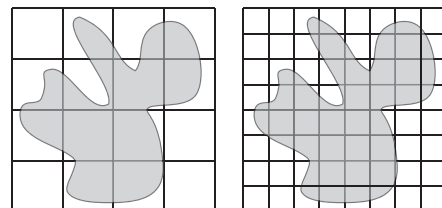
2.3 误差说明

在统计中,由于图像精度、国界划分等客观因素存在,难免存在一定误差(图3,4)。图幅比例尺越大,划分越细,误差越小,计算精度越高(图4)。



图3 框选误差示意图

Fig. 3 Illustration of selection deviation



网格单元划分越精细,单元格内的地球球面越接近平面,球面变形系数和墨卡托投影变形系数都越接近1。

The finer the grid is divided, the closer the spherical earth in each cell is approaching to flat surface, and the spherical deformation coefficient and Mercator projection deformation coefficient are both getting closer to 1.

图4 精度误差说明

Fig. 4 Illustration of accuracy error

首先，在不同的纬度，墨卡托投影变形系数不一样，理论上，纬度单元划分越细，变形系数越接近，误差越小。由于目前计算机硬件条件受限，图像包含的范围太大（北纬15°到北纬69°，东经79°到东经163°），目前只能以纬度1°作为基本单元划分，近似认为变形系数是不变的。而实际上，纬度1°的区间内仍存在微小差异的变形系数，故本文统计存在一定误差。

其次，选取统计区域时，区域边界存在像素精度误差，故统计值会与实际值有部分出入，此误差属客观精度误差，难以避免。在本次统计中，地质图B由于扫描、变形等因素，相对模糊，选取时会产生上述误差。以地质图B为基础的区域玄武岩有：中国中部地区、中国东部东北五大连池地区。需要说明的是，玄武岩统计的地质图A来源为PNG文件，边界清晰，选取时不存在上述误差。以地质图A为制图基础的区域玄武岩有：中国东部的华南地区、华东地区、东北长白山、镜泊湖地区。

第三，地图的国界线与实际国界线存在比例精度误差，也会影响到区分国内外的统计面积。此类区域包括跨越中蒙边境的锡林郭勒与达日甘嘎玄武岩、大兴安岭阿尔山与哈尔沁格尔火山群；跨越中俄边境的东宁火山群；跨越中朝边境的长白山火山群等。

第四，地质图幅来源本身的比例尺过小，致使中国中—东部地区部分玄武岩无法统计上图。例如中国中部的繁峙—昔阳—平定—鹤壁、中国东部华东地区的胶东地区蓬莱火山群、福建玄武岩、广东东部揭阳玄武岩等，会使得本次统计的玄武岩总面积数值偏低。

结合以上情况，我们选取海岛验算中的最大误差4%作为本次整理工作的误差值，输出详细的玄武岩分布面积统计表（表2，表3）。

3 结果与讨论

本文以中国东部新生代盆地的地理位置为界，将中国新生代玄武岩分布区划分为中部地

表2 中国中—东部地区新生代玄武岩分布面积(km²)统计表

Table 2 Statistics of distribution area (km²) of Cenozoic basalts in Central and Eastern China

地 区	地质年代			按地区小计	各区域玄武岩占各 地区之比	合计	中、东区玄武岩 占比	南、北区玄武岩 占比		
	第四纪	新近纪	古近纪							
中国 中部	华北 北缘	张家口—大同		14310 ±233	40%	35487 ±1419	45%			
		赤峰						8403 ±336	89 ±4	
	锡林郭勒		13843 ±554		13843 ±554			39%		
	大兴安岭		7334 ±293		7334 ±293			21%	88%	
中国 东部	东北	五大连池地区		33324 ±1333	77%	43038±1722	55%			
		镜泊湖、长白山 地区						24465 ±979	1074 ±43	194 ±8
	华东	山东		380 ±15				1707 ±68	4%	
		南京		726 ±29						
		浙江		601 ±25				12%		
	雷琼 地区	琼北		4109 ±164		8007 ±320	19%			
		雷州半岛		3898 ±156						
按地质年代小计		61240 ±2450	17002 ±680	283 ±11		78525±3141	100%	100%		
各年代玄武岩占比		77.99%	21.65%	0.36%						

表3 中国相邻地区新生代玄武岩分布面积 (km²) 统计表Table 3 Statistics of distribution area (km²) of Cenozoic basalts in adjacent areas of China

国家	地区	时 代			小计
		第四纪Q	新近纪N	古近纪Pg	
朝鲜	长白山	6213 ± 258	1583 ± 65		8220 ± 336
俄罗斯	长白山		9748 ± 399	2811 ± 115	12 957 ± 530
蒙古	大兴安岭	1466 ± 60			11 087 ± 454
	锡林郭勒	9620 ± 394			
总计		17 400 ± 712	11331 ± 463	2811 ± 115	32 264 ± 1320

区和东部地区。

3.1 中部地区

采用纬度结合行政区域的划分方法, 本文将中国中部的玄武岩分布划分为三个区域, 从北到南依次为大兴安岭、锡林郭勒和华北北缘。

3.1.1 大兴安岭地区

该区玄武岩的主体出露在兴安盟的西侧、大兴安岭的中南段。著名的诺敏河、哈拉哈-柴河、莫克河、五岔沟、沙尔沟等火山群分布于此, 喷发范围跨越中蒙边境, 与蒙古人民共和国的哈尔沁格尔火山群连成一片(刘嘉麒, 1988; 李世超等, 2012)。该地区的玄武岩主要为第四纪玄武岩, 火山喷发具有多期性, 哈拉哈-柴河地区自更新世至全新世均有岩浆活动, 鼎盛时期为晚更新世(白志达等, 2012; 王丽丽等, 2013)。露头下面还存在早期火山岩, 如哈拉哈河河谷底部的玄武岩年龄可以上溯到新近纪(6.7 Ma)(樊祺诚等, 2011)。

目前已报道的该地区火山岩的面积统计工作包括: 诺敏河玄武岩(820 km², 樊祺诚等, 2011; 600 km², 白志达等, 2012)、五岔沟组玄武岩(700 km², 内蒙古自治区区域地质志)、莫克河地区的新生代玄武岩(80 km²)和哈拉哈-柴河地区新生代玄武岩(2000 km²)(李世超等, 2012)。本次获得的火山岩面积统计结果为7334 km², 其中, 诺敏河地区玄武岩面积达2693 km², 较樊祺诚及白志达等文献报道数值多3倍以上。可能系因本文使用图件的玄武岩显示该区域第四纪玄武岩的坐标范围为E 121°45'~124°15'; N 48°58'~50°, 而樊祺诚一文中的第四纪火山岩范围为E 123°~124°12'; N 49°12'~49°56'。

3.1.2 锡林郭勒地区

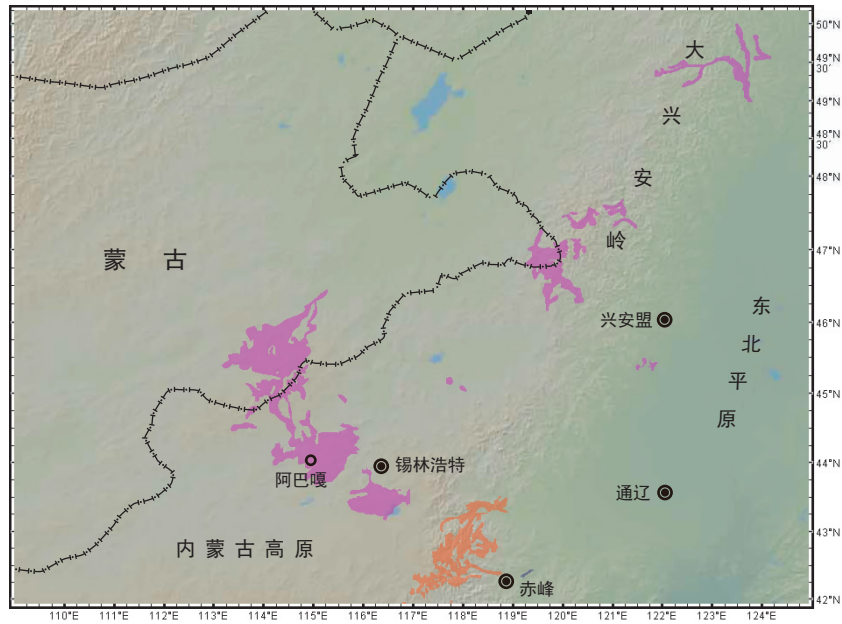
该区玄武岩呈北西方向展布于我国锡林郭勒盟阿巴嘎旗和锡林浩特地区, 并往西北延入蒙古境内与达日甘嘎玄武岩相连, 为亚洲东部面积最大的新生代火山区(Wiechert et al., 1997; Kononova et al., 2002; Ho et al., 2008)(图5)。锡林郭勒地区分布中新世—上新世熔岩台地及第四纪火山群, 其中主要为第四纪岩浆活动的产物。罗修泉和陈启桐(1990), Ho等(2008)以及陈生生(2011)等对该区玄武岩进行了全岩样品的K-Ar年代测定, 并对内蒙地区的新生代火山活动喷溢规律和玄武岩的空间分布做了总结: 岩浆活动始于15 Ma并持续到0.16~0.19 Ma, 其中阿巴嘎台地年龄范围:14.57~2.55 Ma, 灰腾梁台地年龄范围:15.12~0.16 Ma, 东南部有第四纪火山活动。

目前已报道的该地区的火山岩面积工作有: 刘仁民和郝广义^①(1983)估计锡林郭勒地区阿巴嘎玄武岩面积为10 000 km²; 内蒙古地质志(内蒙古自治区地质矿产局, 1991)统计出锡林郭勒地区阿巴嘎组新生代火山岩面积为9300 km²。本文统计结果为: 13 843±554 km²。内蒙地质志等报道阿巴嘎组玄武岩坐标跨度为E114°39'~E116°55', N43°01'~N44°24', 依照本文统计方法来验算该坐标范围, 得出面积为9410 km², 相差1.1%。同时, 作者列出玄武岩喷发连接邻国的总面积以供参考(表3)。

3.1.3 华北北缘(广义的汉诺坝玄武岩)

华北北缘玄武岩(广义的汉诺坝玄武岩, 刘若新, 1992)主要由北区的赤峰玄武岩和南区张家口大同玄武岩组成(图6)。广义汉诺坝玄武岩的北区——赤峰玄武岩的分布形态不同于锡林郭勒玄武岩, 区域跨度虽然不小, 但是岩体与岩体之间分布零散, 似彼此缠绕的条块。赤峰玄武岩主体为新近

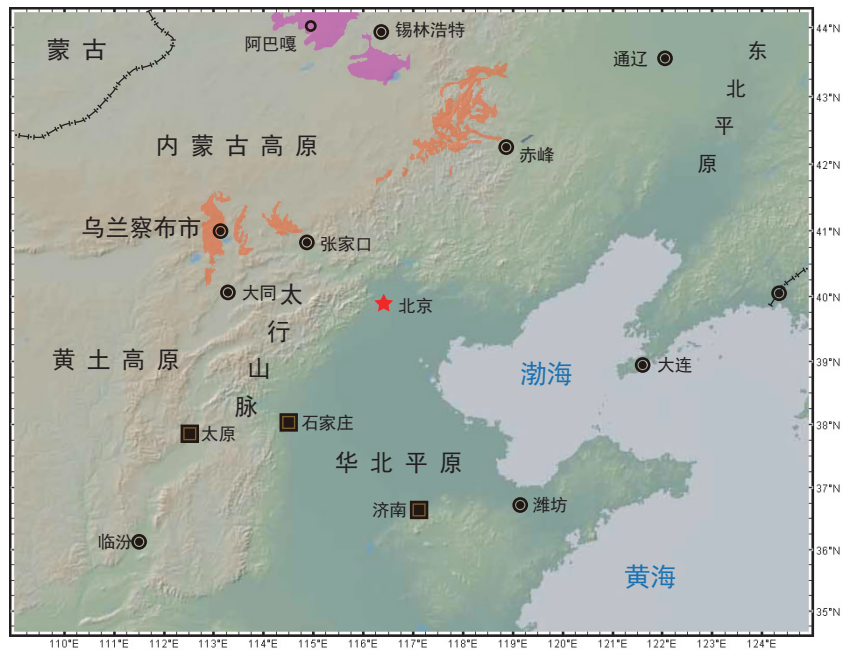
① 刘仁民, 郝广义. 1983. 集方玄武岩, 阿巴嘎玄武岩地质特征及时代确定(工作报告).



地貌图来自GeoMapApp应用软件(<http://www.geomapapp.org/>), 以及地质图来自中亚地质图 Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas
 Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), and geological map is from Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas

图5 大兴安岭地区及锡林郭勒地区新生代玄武岩分布图

Fig. 5 Distribution of Cenozoic basalts in Great Xing'an Range and Xilin Gol region



地貌图来自GeoMapApp应用软件(<http://www.geomapapp.org/>), 以及地质图来自中亚地质图 Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas
 Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), and geological map is from Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas

图6 华北北缘新生代玄武岩分布图

Fig. 6 Distribution of Cenozoic basalts in northern edge of North China

纪玄武岩, 东南部一角分布有小面积的古近纪玄武岩。赤峰玄武岩K-Ar年龄范围为33.2~5 Ma (赵大升等, 1987; Wang et al., 1989; 罗修泉和陈启桐,

1990; Han et al., 1999)。贾文等(2002)将赤峰玄武岩分为四期: 渐新世 (>20 Ma)、晚中新世 (6~10 Ma), 上新世 (~5 Ma) 和更新世 (<1 Ma), Shi

等(2002)将赤峰东南部的新店玄武岩分为晚渐新世和早中新世两期(22~24 Ma)。

张家口大同地区—广义汉诺坝玄武岩的南区,包括河北省张家口、山西省大同、内蒙古地区的乌兰察布市(集宁区)等地的玄武岩。汉诺坝玄武岩由Barbour(1929)命名,国内外地球科学家以汉诺坝玄武岩作为研究对象,获得了针对该地区玄武岩浆成因及深部动力学等方面的丰硕成果。张家口大同玄武岩以新近纪为主,其中大同为第四纪玄武岩,年龄范围为0.88~0.23 Ma;河北汉诺坝玄武岩的年龄为13.6~24.5 Ma(Wang et al., 1989; 刘若新, 1992);集宁玄武岩的K-Ar定年结果显示岩浆活动时间范围为36.4~0.11 Ma(Ho, et al., 2011),这意味着中国中部新生代岩浆活动的启动时间为始新世而不是之前认为的渐新世。

目前已报道的广义汉诺坝地区的火山岩面积工作有:Han等(1999)给出赤峰地区玄武岩覆盖面积约3000 km²,张文慧和韩宝福(2006)报道集宁玄武岩面积大于8000 km²,Ho等(2011)报道集宁玄武岩面积大于5000 km²。

采用本文研究方法获得的火山岩面积统计结果为:赤峰玄武岩新近纪玄武岩8403±344 km²,古近纪玄武岩89±4 km²,共计8492±348 km²;张家口大同地区5818±238 km²,与Han等(1999)一文中的赤峰玄武岩面积数据相异的原因为:该文面积统计区域为赤峰地区向西至E118°止,Ho等(2011)中引用Han等(1999)文中的赤峰玄武岩面积数据,认为集宁玄武岩的喷发面积大于赤峰地区,该认识并不全面。

其它未在本文地质图上显示的玄武岩由北往南依次包括:a.繁峙玄武岩(系山西地堑北部繁峙、阳原、蔚县一带玄武岩的统称),喷发面积为550 km²,最大厚度800 m(吴雅颂和王兴武, 1978; 刘若新, 1992),始新世末期至渐新世末期喷发,玄武岩K-Ar年龄为26.3~24.3 Ma(Tang et al., 2006); b.昔阳—平定玄武岩,喷发面积为20 km²(吴雅颂和王兴武, 1978),玄武岩K-Ar年龄为7.9~7.3 Ma(渐新世)(Tang et al., 2006); 鹤壁玄武岩,玄武岩的K-Ar年龄为4.0~4.3 Ma(刘若新, 1992)。

我国地势西部高而东部低,形成了一个以青藏高原向东逐级降低的阶梯状斜面,可以划分为

三个梯级(中国自然地理编辑委员会, 1985)。中国中部玄武岩的分布与我国特有的三级阶梯地带有密切的关系,大兴安岭—太行山—列为我国北东走向的主要山脉,是我国地貌格局的三纵向骨架之一,同时为中国的二三级阶梯分界线,中国中部玄武岩均分布在此纵向山脉的两侧,喷发区域在地貌上属于第二阶梯内部的内蒙古高原和黄土高原。

3.2 东部地区

本文采用纬度结合行政区域的划分方法将中国东部的玄武岩划分为三个区,从北到南依次为东北地区、华东地区和华南地区。

3.2.1 东北地区

东北地区的新生代玄武岩在松辽盆地(东北平原)北部和东南部的东三省(黑龙江省、辽宁省和吉林省)均有分布,由北向南依次为科洛—五大连池—二克山—逊克火山群、镜泊湖火山群和长白山火山群。科洛—五大连池—二克山—逊克火山群的主体为逊克玄武岩。五大连池火山群的喷发年代为第四纪,喷发高峰为中更新世(李齐等, 1999),还以富钾碱性玄武岩为突出标志。逊克地区的玄武岩研究程度较低。

镜泊湖火山岩位于东北地区吉林和黑龙江省的老爷岭—牡丹江—鸡西地区,为一北东向火山带,东南部的东宁火山岩覆盖跨越中俄两国。刘嘉麒(1988)将镜泊湖地区的玄武岩按产状分为两类:高位玄武岩和河谷玄武岩。前人对镜泊湖玄武岩进行了大量的分期和定年工作(刘北玲等, 1989; Zhang et al., 2002; 秦秀峰等, 2008)。镜泊湖玄武岩的形成年代主要为第四纪,由西往东自东宁玄武岩到俄罗斯境内达利涅戈尔斯克地区玄武岩喷发年代呈现第四纪—新近纪—古近纪的变化规律。

长白山跨越中朝边境,号称“盖马高原”,西南为辽宁的宽甸火山群,西北为吉林的龙岗火山群。该区的火山岩喷发年代为第四纪,其中长白山天池为全新世活火山。樊祺诚等(2002)结合K-Ar法和¹⁴C将龙岗第四纪火山活动分为3期,小椅山期(早更新世:2.15~0.75 Ma),龙岗期(中—晚更新世:0.68~0.05 Ma)和金龙顶子期(全新世:1600~1500ayrBP)。刘嘉麒(1987; 1988)将长白山火山群从早中新世到近代共分为七期火山活

动。其中天池地区以第四纪更新世玄武岩为主，分为4个喷发阶段（Wei et al., 2007; Kuritani et al., 2009）。

目前已报道的该地区火山岩的面积工作有：

科洛—长白山—逊克地区：刘嘉麒（1999）列出东北科洛火山群(由南山、大椅山、嘎丛山组成)玄武岩面积达80 km²，黑龙江地质志（1993）报道逊克多宝山区大熊山出露3000 km²。

镜泊湖地区：刘嘉麒（1999）列出镜泊湖高位玄武岩的总面积约10 000 km²，东宁玄武岩面积约1000 km²；Zhang等（2002）给出的镜泊湖玄武岩面积约15 000 km²。

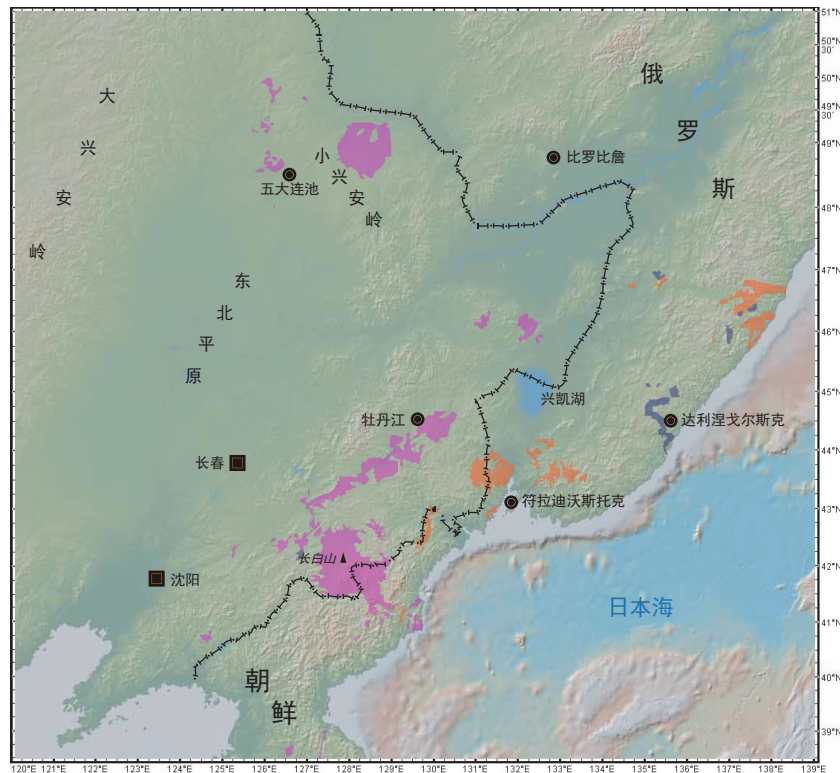
长白山地区：较早的文献报道长白山与龙岗地区面积共13 000 km²（刘祥等，1989），而刘嘉麒（1999）报道长白山台地面积约15 000 km²，长白山西南宽甸火山群面积为220 km²。老爷岭西南长白山西北的龙岗火山群面积约1700 km²（樊祺诚等，2002）。

采用本文研究方法获得的中国东北地区火山岩面积统计结果为33 324±1333 km²，其中包括五大连池地区（7591±304 km²）、镜泊湖地区和长白山地区两地共计25 733±1029 km²（图7）。

3.2.2 华东地区

山东地区新生代玄武岩以郯庐断裂带为界，西部被称为鲁西玄武岩，包括潍坊玄武岩、沂水玄武岩两个火山群，东部被称为胶东玄武岩，即蓬莱火山群。三个火山群的展布线均为北东向（陈立辉等，2012）。罗丹等（2009）对山东玄武岩做了年代学统计工作，发现鲁西玄武岩喷发早，分布连续，启动时间为24.0~10.27 Ma，胶东玄武岩喷发时间晚，喷发时期为8.72~0.33 Ma，零散分布于胶东北部地区。

南京周边地区新生代玄武岩主要由两个火山群组成（刘嘉麒，1999；Zeng et al., 2013），一个是位于安徽省嘉山县境内的嘉山火山群，处于郯庐断裂南端，地貌上呈桌状熔岩台地，岩性以碱性



地貌图来自 GeoMapApp 应用软件(<http://www.geomapapp.org/>)；以及地质图来自两部分：北纬48°以南来自应用软件中自带的地质图 East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)、纬度N48°以北岩性分布地质图来自中亚地质图 Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas

Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), and geological map is from two parts: the accessory file of GeoMapApp—East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP) for the southern region of N 48°, and Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas for the northern region of N 48°

图7 东北地区新生代玄武岩分布图

Fig. 7 Distribution of Cenozoic basalts in Northeast China

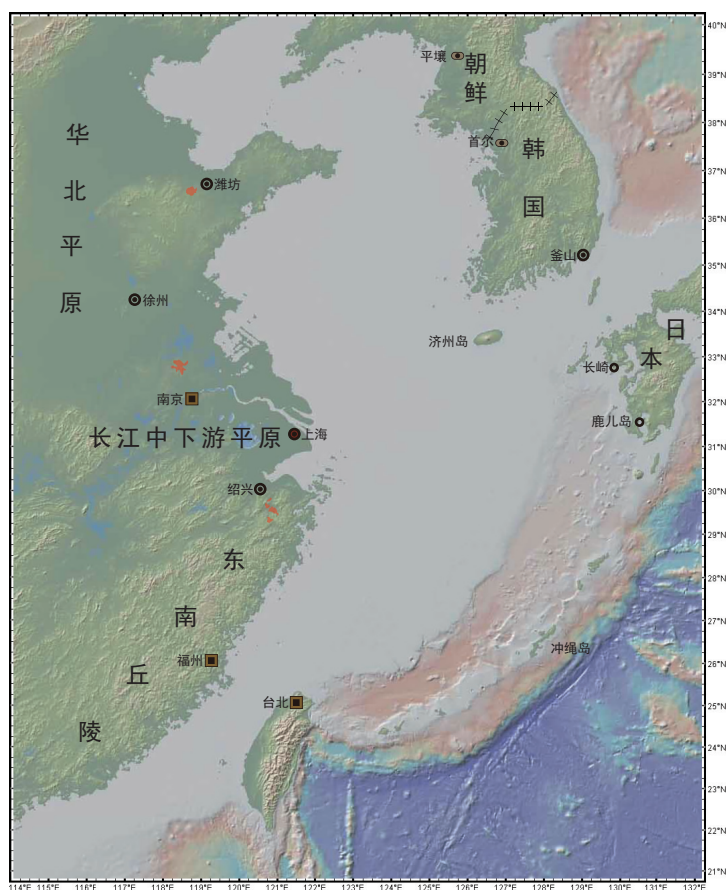
橄榄玄武岩和拉斑玄武岩为主。另一个是位于南京附近的六合—仪征火山群,由10余座火山锥和平顶、桌状的方山状熔岩台地组成。邵家骥等(1989)通过地层关系将南京地区的期次划分为5次,岩浆活动集中在古新世到中新世(刘若新等,1992)。刘嘉麒(1999)总结了该地区的一系列年龄工作,将嘉山火山群自晚白垩世—更新世早期分为四期;而六合—仪征火山群可根据同位素年龄自古新世末至中新世晚期分为三期。位于南京北部苏皖交界的安徽女山代表该区最年轻的火山喷发,刘若新(1992)报道女山玄武岩的年龄为0.73~0.55 Ma。

浙江地区新生代玄武岩主要为古近纪始新世中期(47.1 Ma)到更新世晚期(王人镜和杨淑荣,1987;刘若新,1992)的嵊县群玄武岩。

福建地区火山群(受限于地图比例尺,本次

统计工作未附)分布于松溪—明溪—长汀、福鼎—闽清—漳平—永定以及乳山—流会—龙海—佛县三个近于平行的北东向构造带上。Ho等(2003)建议将福建玄武岩据此划分为三个火山带,且喷出时代具有从沿海到内陆逐渐变新的特征,龙海—闽清—明溪的年龄依次为17~15 Ma, 12 Ma, 2.2~0.9 Ma。

目前已报道的该地区火山岩的面积工作有:刘嘉麒(1999)报道嵊县—新昌火山岩的分布面积为500 km²,高华喜等(2004)详细报道了浙江玄武岩的分布:总面积达887.33 km²,其中绍兴地区面积达410.27 km²,金华地区为152.47 km²,余下的分散在宁波、衢州、丽水、台州等地区。绍兴地区又以新昌县(161.39 km²)和嵊州市(151.08 km²)面积最大。采用本次研究方法获得的火山岩(图8)面积统计结果为:首次获得山东玄武岩面积为380±



地貌图来自GeoMapApp应用软件(<http://www.geomapapp.org/>), 以及地质图来自该应用软件中自带的地质图 East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)
Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapapp.org/>), and geological map is from the accessory file
of GeoMapApp—East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)

图8 华东地区新生代玄武岩分布图

Fig. 8 Distribution of Cenozoic basalts in middle Eastern China

16 km²、南京周边地区新生代玄武岩为726±30 km²，浙江玄武岩面积为601±25 km²。浙江新生代玄武岩的统计面积较高华喜(2004)报道的数值少，与我们本次地质图的比例尺过小使得零散分布的玄武岩无法显示上图有关系，而比刘嘉麒(1999)统计值多则缘于地质图资料的来源不同和获得的新旧程度不同有关。

3.2.3 雷琼地区

本区玄武岩产于广东东南部三水盆地、揭阳地区和雷琼地区等地(见图9)，以雷琼玄武岩为分布主体。

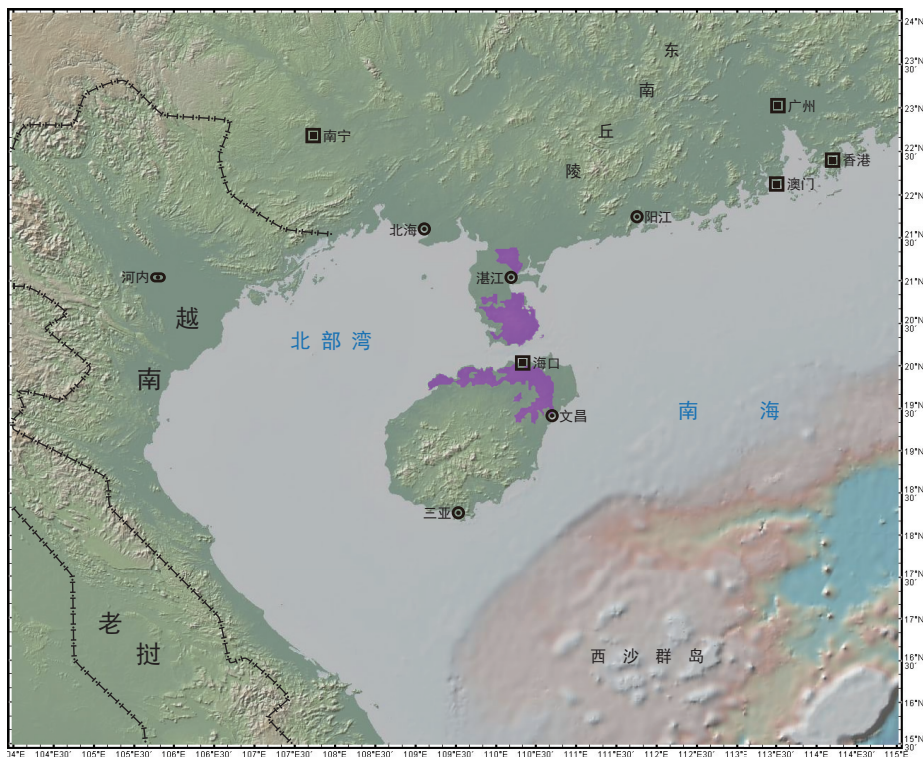
雷琼地区新生代玄武岩系指分布于广东省雷州半岛与海南省地区玄武岩的简称。雷琼地区的玄武岩始于晚渐新世并逐渐过渡到中新世、上新世，到更新世达到喷发高峰，全新世岩浆活动基本归于平静(孙嘉诗, 1991; Ho et al., 2000; 韩江伟等, 2009; Wang et al., 2012)。

广东三水火山群及揭阳地区玄武岩出露量少，由于本次采用图件比例尺过小，故未在图上

显示。刘嘉麒(1999)、朱炳泉等(1991)、刘若新(1992)对产于广东三水盆地内的基性-酸性火山岩(拉斑玄武岩、安山岩、粗面岩、流纹岩和流纹斑岩)做了年龄工作，得出年龄范围63.9~43.1 Ma，集中于59~49 Ma之间。Huang et al., (2013)给出广州东部揭阳市韭菜地、鸡笼山、麒麟三地新生代火山岩的Ar-Ar年龄分别是：20.8 Ma, 6.64 Ma和35.5 Ma。

目前已报道的该地区火山岩的面积工作有：韩中元等(1987)、黄镇国(1993)、刘嘉麒(1999)、Flower等(1992)给出的雷琼火山群的火山岩面积为7300 km²，其中雷州半岛及附近岛屿为3140 km²，琼北地区为4160 km²，Ho等(2000)给出的雷琼地区的玄武岩面积为7000 km²。Zou和Fan(2010)给出琼北玄武岩面积为5000 km²。

本次依图件测量获得的火山岩面积统计结果为：雷琼地区玄武岩总面积为8007±320 km²，其中琼北地区4109 km²，雷州半岛3898 km²，与前人给出的琼北地区玄武岩面积4160 km²数据相差1.2%。



地貌图来自GeoMapApp应用软件(<http://www.geomapp.org/>)，以及地质图来自该应用软件中附带的地质图East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP) Geomorphological map is from GeoMapApp (<http://www.geomapp.org/>), and geological map is from the accessory file of GeoMapApp—East Asia Bedrock Age and Rock Types(CCOP)

图9 雷琼地区新生代玄武岩分布图

Fig. 9 Distribution of Cenozoic basalts in Leiqiong area

4 结论

本次工作通过软件进行图像处理的手段,快速、准确地获得了中国中-东部地区火山岩分布的可视化图像,并将其与直观的地貌图件进行了结合,同时获取了相对精准的分布面积数据。主要结果如下:

1) 我国中-东部地区新生代玄武岩的分布总面积达到 $78\ 525 \pm 3141\ \text{km}^2$ 。以东部新生代盆地为界,盆地以西的中部地区新生代玄武岩面积为 $35\ 487 \pm 1419\ \text{km}^2$, 占总面积的45%;盆地以东的东部地区新生代玄武岩面积为 $43\ 038 \pm 1722\ \text{km}^2$, 占总面积的55%。

2) 中国中-东部新生代玄武岩的面积分布情况与玄武岩的喷发时代之间存在一定规律。随时代由老变新,其分布面积逐渐递增,其中古近纪玄武岩的面积分布比例为0.36%,新近纪玄武岩为21.65%,而第四纪玄武岩分布面积最广,达到总面积的77.99%。

3) 中部地区的新生代玄武岩主要分布在北方,由北至南包括三个主要的新生代玄武岩出露区,分别为松辽盆地以西的大兴安岭地区 ($7334 \pm 293\ \text{km}^2$)、锡林郭勒地区 ($13\ 843 \pm 554\ \text{km}^2$) 和华北北缘 ($14\ 310 \pm 572\ \text{km}^2$)。东部地区新生代玄武岩的分布范围更广,从黑龙江一直到海南岛,也可以分为三个区,包括松辽盆地以东的东北地区 ($33\ 324 \pm 1333\ \text{km}^2$)、从山东到福建零星分布的华东地区 ($1707 \pm 68\ \text{km}^2$) 以及位于海南岛和雷州半岛的雷琼地区 ($8007 \pm 320\ \text{km}^2$)。

4) 总体来说,我国中-东部地区新生代玄武岩主要分布在北方,以山东省为分界的北方玄武岩面积达 $69\ 191\ \text{km}^2$, 占总面积的88%,而南方玄武岩面积达 $9334\ \text{km}^2$, 占总面积的12%。

致谢: 耿树方老师无偿提供《1:250万亚洲中部及邻区地质图》,两位审稿人提供了有价值的审稿意见,在此一并感谢!

参考文献 (References) :

白志达,谭庆伟,许桂玲,等. 2012. 内蒙东部晚第四纪火山活动与构造[J]. 岩石学报, 28(4): 1099-2007.
陈立辉,曾罡,胡森林,等. 2012. 地壳再循环与大陆碱性玄武岩的成因: 以山东新生代碱性玄武岩为例[J]. 高校地质学报, 18(1): 16-27.
陈生生,樊祺诚,赵勇伟,等. 2011. 内蒙古贝克力玄武岩台地火山地

质及成因探讨[J]. 地震地质, 33(2): 430-439.
樊祺诚,隋建立,刘若新,等. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期[J]. 岩石学报, 18(4): 495-500.
樊祺诚,赵勇伟,李大明,等. 2011. 大兴安岭哈拉哈河—绰尔河第四纪火山分期: K-Ar年代学与火山地质特征[J]. 岩石学报, 27(10): 2827-2832.
高华喜,黄克玲,刘成东. 2004. 浙江嵊州风火岗玄武岩台地滑坡成因分析及防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 15(3): 141-143.
韩江伟,熊小林,朱照宇. 2009. 雷琼地区晚新生代玄武岩地球化学: EM2成份来源及大陆岩石圈地幔的贡献[J]. 岩石学报, 025(12): 3208-3220.
韩中元,张仲英,刘瑞华. 1987. 海南岛北部火山地貌[J]. 热带地理, 7(1): 43-53.
黑龙江地质矿产局. 1993. 黑龙江区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
黄镇国. 1993. 雷琼第四纪火山[M]. 北京: 科学出版社.
贾文,朱慧忠,邵济安. 2002. 内蒙古赤峰地区新生代玄武岩的时空分布[J]. 地质论评, 48(3): 267-272.
李世超,李廷栋,刘正宏,等. 2012. 大兴安岭中段莫克河地区新生代火山活动[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 410-421.
李齐,陈文奇,李大明,等. 1999. 五大连池地区火山岩年代学研究[J]. 地质论评, 45: 393-399.
刘北玲,陈毓蔚,朱炳泉. 1989. 东北镜泊湖新生代玄武岩的成因及其地幔源化学特征: Sr-Nd-Pb同位素与微量元素证据[J]. 地球化学(1): 9-19.
刘若新. 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学[G]. 北京: 地震出版社.
刘祥,向天元,王锡魁. 1989. 长白山地区新生代火山活动分期[J]. 吉林地质, (1): 30-41.
刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究[J]. 岩石学报, 4: 21-31.
刘嘉麒. 1988. 中国东北地区新生代火山岩[J]. 岩石学报, (1): 1-10.
刘嘉麒. 1999. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社.
马野牧,陆现彩,张雪芬,等. 2011. 玄武质火山机构火山岩的储集性能分析—来自福建漳州牛头山古火山机构的类比研究[J]. 地质论评, 57(3): 398-408.
罗丹,陈立辉,曾罡. 2009. 陆内强碱性火山岩的成因: 以山东无棣大山霞石岩为例. 岩石学报[J], 25(2): 311-319.
罗修泉,陈启桐. 1990. 内蒙古新生代玄武岩年代学初步研究[J]. 岩石矿物学杂志, 9(1): 37-68.
内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
秦秀峰,徐义刚,张辉煌,等. 2008. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化—密山和东宁火山岩带为例[J]. 岩石学报, 24(11): 2501-2514.
邵家骥,黄姜依,杨忠元,等. 1989. 南京地区新生代玄武岩的期次、层序及时代[J]. 地质论评, 35(2): 97-106.
孙嘉诗. 1991. 南海北部及广东沿海新生代火山活动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 11(3): 45-76.
王丽丽,田明中,白志达. 2013. 内蒙古阿尔山—柴河火山地质遗迹类型及其特征[J]. 资源与产业, 15(1): 89-95.
王人镜,杨淑荣. 1987. 浙江嵊县—新昌新生代玄武岩及包体的研究[J]. 地球科学, 12(3): 241-248.

- 吴雅颂, 王兴武. 1978. 山西的近期玄武岩[J]. 山西省地质局区域地质调查队: 1-136.
- 吴卫华, 郑洪波, 杨杰东, 等. 2012. 硅酸盐风化与全球碳循环研究回顾及新进展[J]. 高校地质学报, 18(2): 215-224.
- 尹赞勋. 1937. 中国近期火山[M]. 中国地质学会.
- 朱炳泉, 王慧芬, 毛存孝, 等. 1991. 广东三水盆地古俯冲带地幔源岩石的年代学与Nd-Sr-Pb同位素证据[J]. 地球化学, (01): 27-32.
- 张大泉. 1986. 中国第四纪火山[J]. 西南师范大学学报, (3): 111-119.
- 张文慧, 韩宝福. 2006. 内蒙古集宁新生代玄武岩的K-Ar年代学和地球化学及其深部动力学意义[J]. 岩石学报, 22(6): 1597-1606.
- 赵大升, 郑学正, 鄂莫岚. 1987. 华北地区新生代玄武质火山岩及超镁铁岩包体[G]//中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社: 133-268.
- 中国科学院《中国自然地理》编辑委员会. 1985. 中国自然地理总论[M]. 北京: 科学出版社.
- Barbour G B. 1929. Geology of the Kalgan Area [A]//Memoir of the Geological Survey of China, 6: 1 - 148.
- Flower M F, Zhang M, Chen C Y, et al. 1992. Magmatism in the South China Basin 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, south China [J]. Chemical Geology 97: 65 - 87.
- Han, B F, Wang, S G, Kagami H. 1999. Trace element and Nd-Sr isotope constraints on origin of the Chifeng flood basalts, North China [J]. Chemical Geology, 155(3-4): 187-199.
- Ho K S, Chen J C, Lo C H, et al. 2003. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and geochemical characteristics of late Cenozoic basaltic rocks from the Zhejiang-Fujian region, SE China: eruption ages, magma evolution and petrogenesis [J]. Chemical Geology, 197(1): 287-318.
- Ho K S, Liu Y, Chen J C, et al. 2008. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of late Cenozoic Abaga basalts, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and mantle process [J]. Geochemical Journal, 42(4): 339-357.
- Ho K S, Liu Y, Chen J C, et al. 2011. Geochemical characteristics of Cenozoic Jining basalts of the Western North China craton: Evidence for the role of the lower crust, lithosphere, and asthenosphere in petrogenesis [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 22(1): 15-40.
- Ho K S, Chen J C, Juang W S. 2000. Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 18(3): 307-324.
- Huang X L, Niu Y L, Xu Y G, et al. 2013. Geochronology and geochemistry of Cenozoic basalts from eastern Guangdong, SE China: constraints on the lithosphere evolution beneath the northern margin of the South China Sea [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 165(3): 437-455.
- Kononova V A, Kurat G, Embey-Isztin A, et al. 2002. Geochemistry of metasomatised spinel peridotite xenoliths from the Dariganga Plateau, South-eastern Mongolia [J]. Mineralogy and Petrology, 75(1): 1-21.
- Kuritani T, Kimura J-I, Miyamoto T, et al. 2009. Intraplate magmatism related to deceleration of upwelling asthenospheric mantle: Implications from the Changbaishan shield basalts, northeast China [J]. Lithos, 112(3-4): 247-258.
- Louvat P and Allègre C J. 1997. Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(17): 3645-3669.
- Shi R P, Zhu R X, Pan Y X, et al. 2002. Paleointensity study of Early Miocene lavas from Pingzhuang, Inner Mongolia, China [J]. Geophysical research letters, 29(21): 21-22.
- Tang Y J, Zhang H F, Ying J F. 2006. Asthenosphere-lithospheric mantle interaction in an extensional regime: implication from the geochemistry of Cenozoic basalts from Taihang Mountains, North China Craton [J]. Chemical Geology, 233(3): 309-327.
- Wang H F, Yang X C, Zhu B Q, et al. 1989. K-Ar geochronology and evolution of Cenozoic volcanic rocks in eastern China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 8(1): 1-14.
- Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. 2012. Temperature, Pressure, and composition of the mantle source region of Late. Cenozoic Basalts in Hainan Island, SE Asia: a consequence of a young thernol mantle plume close to subduction Zones? [J]. Petrology, 53: 177-233.
- Wei H Q, Wang Y, Jin J Y, et al. 2007. Timescale and evolution of the intracontinental Tianchi volcanic shield and ignimbrite-forming eruption, Changbaishan, Northeast China [J]. Lithos, 96(1-2): 315-24.
- Wiechert U, Ionov D A, Wedepohl K H. 1997. Spinel peridotite xenoliths from the Atsagin-Dush volcano, Dariganga lava plateau, Mongolia: A record of partial melting and cryptic metasomatism in the upper mantle [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 126(4): 345-364.
- Xu Y G, Ma J L, Frey F A, et al. 2005. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton [J]. Chemical Geology, 224(4): 247-271.
- Zeng G, Chen L H, Hu S L, et al. 2013. Genesis of Cenozoic low-Ca alkaline basalts in the Nanjing basaltic field, eastern China: The case for mantle xenolith-magma interaction [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14(5): 1660-1677.
- Zhang Z C, Feng C Y, Li Z N, et al. 2002. Petrochemical study of the Jingpohu Holocene alkali basaltic rocks, northeastern China [J]. Geochemical Journal, 36(2): 133-153.
- Zou H B and Fan Q C. 2010. U-Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island [J]. Lithos, 116(1-2): 145-152.