

中国东部燕山期火山-岩浆大爆发^{*}

陶奎元 毛建仁 邢光福 杨祝良 赵 宇

(中国地质科学院南京地质矿产研究所, 南京)

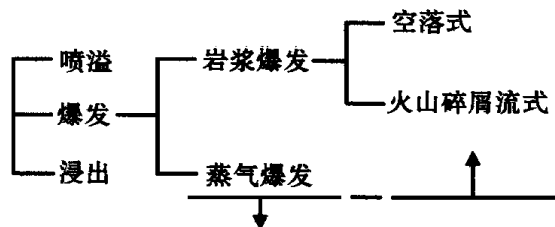
提 要: 中国东部燕山期存在惊天动地的火山-岩浆大爆发, 形成了 7 条火山岩带, 8 种岩石系列和组合, 构成了四大火成岩省。在近 20×10^6 a 内有数百万立方千米的高温岩浆喷出地表, 喷发速率约为 $0.03 \text{ km}^3/\text{a}$, 对全球气候环境变化和生物灭绝产生巨大影响。火山-岩浆大爆发与成矿作用大集中是壳幔物质和能量大循环的必然结果。深部地幔柱对岩石圈的突变机制极大地控制了燕山期地质生态的大变革。

关键词: 火山-岩浆大爆发 地质生态 燕山期 中国东部

燕山运动导致中国东部地质的重大变革, 乃至影响中生代以后地质生态环境。燕山运动表现在构造、岩浆、沉积作用以及它们反映的深部地质作用过程与动力学。地质学的发展迎来了新的世纪, 燕山运动再次成为东部地质学研究的热点。火山-岩浆大爆发是东部燕山运动中惊天动地的地质事件: 它记录了燕山运动的起始以及它与印支运动, 喜山运动的转折与过渡的时间表; 它提供成岩物质来源、壳幔演化和深部作用过程的重要信息; 它为燕山期成矿准备了热源和成矿物质迁移、集中的环境。火山-岩浆大爆发直接或间接地制约中生代乃至中生代以后至今的地质生态环境的变迁。

1 中国东部存在名符其实的燕山期火山-岩浆大爆发

中国东部燕山期火山喷发存在以下几种主要类型:



其中尤以火山碎屑流式爆发为最强, 其次是空落式岩浆爆发, 喷溢活动仅是少量的。就东南沿海火山岩带而言, 火山爆发占绝对主导地位, 火山爆发产物体积约 $480\,000 \text{ km}^3$, 约占火山喷发物体积 ($600\,000 \text{ km}^3$) 的 80 %^[1,2]。除空落式爆发外, 火山爆发方式以普林尼式爆发为主, 即形成高的喷发柱, 当喷发柱塌落时成为高温 (600 以上) 紧贴地面快速流

* 国土资源部重大基础研究项目资助 (编号 950112)

第一作者简介: 陶奎元, 男, 1934 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事火山地质学、岩石学研究, 现任火山地质矿产中心首席科学家。邮政编码: 210016

1999-05-20 收稿, 1999-08-11 修改回

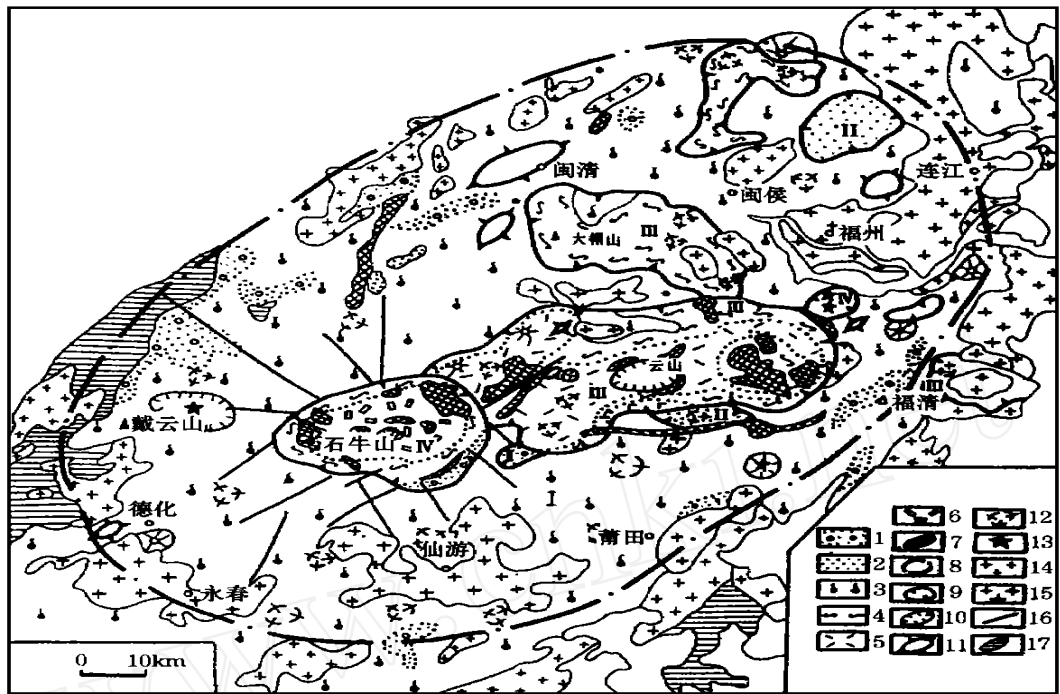


图1 戴云山巨型环形火山构造区

(据文献^[1])

1—喷发沉积相；2—空落相；3—爆溢相；4—火山碎屑流相；5—喷溢相；6—侵出相；7—潜火山岩相；8—环状火山体；9—火山构造洼地；10—破火山；11—火山穹隆；12—性质不明火山机构；13—火山通道；14—燕山早期侵入岩；15—燕山晚期侵入岩；16—断层；17—晚侏罗纪地层

Fig. 1. Deiyunshan huge volcanic ring structures

1—Eruptive-sedimentary facies; 2—Dropping facies; 3—Explosive-overflow facies; 4—Explosive debris flow facies; 5—Eruptive-overflow facies; 6—Extrusive facies; 7—Cryptovolcanic facies; 8—Ringed volcanic body; 9—Volcano-tectonic depression; 10—Caldera; 11—Volcanic dome; 12—Indeterminate volcanic apparatus; 13—Volcanic conduit; 14—Early Yanshanian intrusive rock; 15—Late Yanshanian intrusive rock; 16—Fault; 17—Late Jurassic.

动的火山碎屑流最终成为覆盖面积广泛的未熔结到熔结的凝灰岩。就一个火山带而言，中国东南沿海火山碎屑流的面积和体积在全球火山带中是最大的，体积是 $368\,000\text{ km}^3$ ^[1,2]，俄罗斯鄂霍次克—楚科奇火山岩带的体积约 27.9 km^3 。

就整个东部而言，东南沿海燕山期火山岩面积超过 $500\,000\text{ km}^2$ ，大兴安岭火山岩带面积超过 $1\,000\,000\text{ km}^2$ ，面积如此之大在全球大地构造单元中都是少见。中国东部燕山期火山爆发均为中心式喷发，东南沿海已恢复古火山有153座，其中破火山口有102座。存在巨型环形构造，长轴往往近百公里或超过百公里，其中最大的戴云山巨型环形火山构造长轴近160 km（图1），在环圈内部，火山岩集中分布，一般为区域剩余布格重力低异常区，其深部为巨大花岗岩基，东南沿海这种巨型环形构造有8~9个（图2），代表了火山岩区内更大一级规模的地幔隆起带。

2 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发形成了 7 条火山岩带, 8 种岩石系列和 4 大岩石省

中国东部燕山期火山岩带是环太平洋 4 个巨型火山岩带之一, 它是由 3 条 NE—NNE 向火山岩带 (东南沿海、郅庐、大兴安岭) 和 4 条 EW 向火山岩带 (广西钦州—防城、长江中

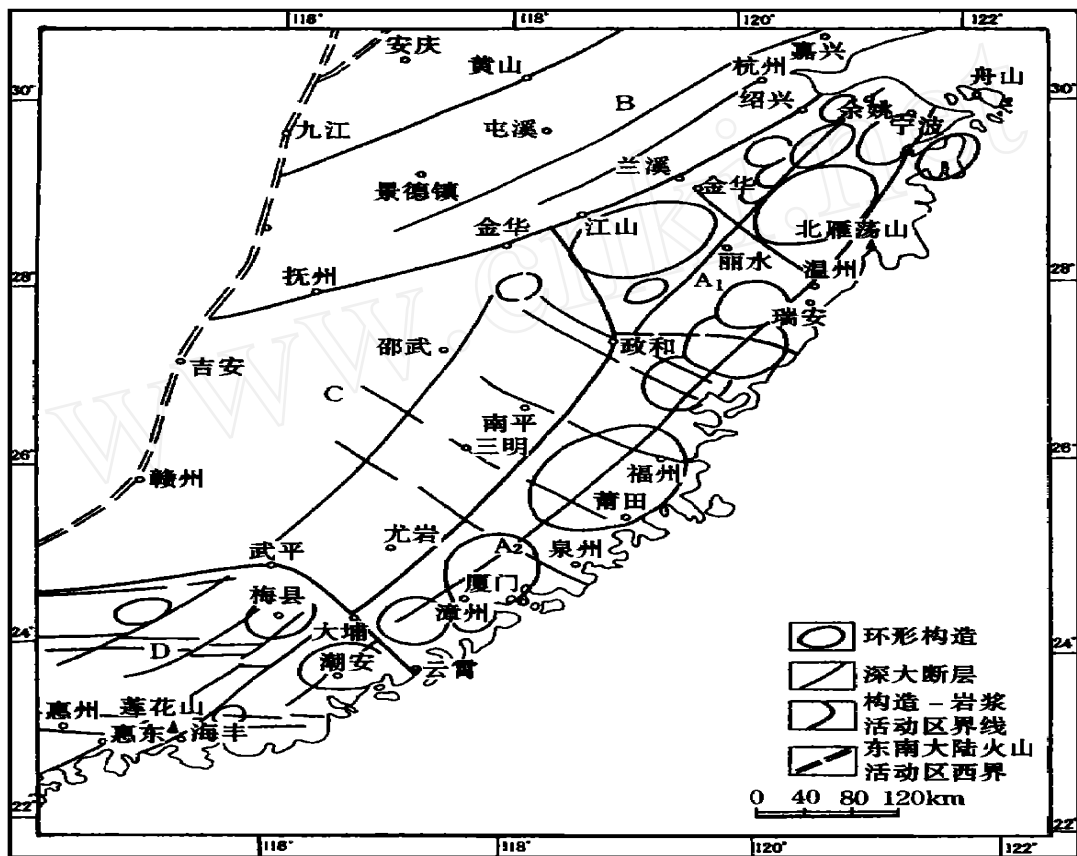


图 2 研究区卫星影像主要环形体图^[1]

Fig. 2. Linear-ring structural framework shown in remote-sensing image of the area.

下游, 大别山北缘和燕辽) 交织复合而成, 显示了中国东部总体上 EW 与 NE 向构造复合框架。火山岩带的总体分布格局, 向大陆延伸及各火山岩带的宽度显然不同于东太平洋安第斯火山岩带^[4]。

燕山期火山岩浆大爆发形成了 8 种岩石系列和组合, 它们是: S 型酸性岩系列的流纹岩-花岗岩组合; 对称型双峰式玄武岩-英安岩、流纹岩组合; 富碱高钾钙碱性系列的高钾 (安山岩) 英安岩-流纹岩组合; 富碱钙碱性系列的玄武粗安岩-粗面岩-流纹岩组合; 高氟流纹岩-黄玉花岗斑岩组合; 橄榄安粗岩系列的粗面安山岩-粗面岩组合;

不对称型双峰式富碱玄武岩-英安流纹岩组合；碱性岩系列的粗面岩-响岩组合，其中分布最广泛的为富碱高钾钙碱性系列的英安岩-流纹岩组合，以东南沿海最具代表性，它不同于安第斯型钙碱性系列，被称为大陆扩张型钙碱性系列火山岩带^[2,4]①。

这 7 条火山岩带和 8 种岩石系列组合构成了四大岩石省（即南岭岩石省、东南沿海岩石省、下扬子—郧庐—大别山岩石省和燕辽—大兴安岭岩石省），叠加在中国东部不同构造单元内，不仅改变了火山喷发前中国东部地质面貌特征，而且反映和记录了东部燕山运动尤其是深部地质的许多信息。

3 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发是在较短的地质历史中发生，无疑是显生宙以来最突变的地质事件

中国东部燕山期火山-岩浆大爆发从地质年代来说总称为侏罗纪—白垩纪，已有的同位素年龄可分为五大时期^[4]： $240 \times 10^6 \sim 200 \times 10^6$ a (T_3)； $195 \times 10^6 \sim 165 \times 10^6$ a (J_{1-2})； $165 \times 10^6 \sim 150 \times 10^6$ a (J_2)； $150 \times 10^6 \sim 120 \times 10^6$ a ($J_3-K_1^1$)； $120 \times 10^6 \sim 80 \times 10^6$ a ($K_1^2-K_2$)。其中、两个时代的火山岩分布最广，构成了中国东部燕山期火山岩带的主体，如果不考虑花岗岩基冷却定位的年龄，仅从火山喷发产物定年特点考察，火山喷发集中在一个较短的时间范围内。以东南沿海为例，大面积火山岩年龄为 $130 \times 10^6 \sim 120 \times 10^6$ a，其次为 $100 \times 10^6 \sim 90 \times 10^6$ a，在近 20×10^6 a 内造成巨量火山岩浆喷发（约 $600\,000\text{ km}^3$ ）而形成大火成岩省（LIP）并形成巨型环形构造，表明这些巨型环形构造既是构造-岩浆-成矿流体的活动中心，也是热地幔柱在浅部的地质表现，其喷发速率为 $0.03\text{ km}^3/\text{a}$ ，略小于东非 Afar 幔柱活动的喷发速率（ $0.08\text{ km}^3/\text{a}$ ）。

4 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发是一次“惊天动地”的大事件

在近 20×10^6 a 内几百万立方千米的高温岩浆喷出地表，对大气圈、生物圈、水圈产生巨大影响，极大地改变了当时的地质生态环境，通常认为火山地质灾害可分为 6 种类型^[5]：

高温有毒气体，如 HF、H₂S、HCl、CO₂、CO、SO₂、SO₃ 等气体物质，对生物造成极其严重的危害；炽热熔岩流，熔岩喷出地表后，其温度一般在 $700 \sim 1\,300$ 左右，流速为几米/小时到 16 km/h ，熔岩流经地区树木成灰，动物身亡；火山碎屑流，在流动过程火山碎屑流在一定时间内仍能保持 $500 \sim 850$ 高温，其流速比熔岩流要快得多，通常为 $14 \sim 230\text{ km/h}$ ，如此高速、高温及超越障碍物的能力使其具有巨大危害性；空落火山灰，形成高大的火山灰喷发柱，其高度可达 2 km 左右，其大面积掩埋作用可使几十至几百公里内无任何生命幸存；火山泥石流，是火山碎屑物与大量水混合之高密度流，其流速可达 35 km/h ；伴随火山活动之地震、山崩和海啸，可使山裂成两半，陆地沉入海底，生物灭绝。

① 毛健仁、陶奎元、邢光福等，中国南方新生代地幔柱活动的地球化学证据，地质论评待刊

火山事件对全球气候、生态环境造成巨大影响,特别是普林尼式火山爆发时形成火山灰、 CO_2 、硫化物气体和水蒸汽等物质组成的喷发柱高度达 2 km 左右,细小的火山灰高度可达 20 km,进入大气平流层。直径仅为 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 的火山灰尘长期悬浮于大气中,直接降低大气透明度,改变大气环流的正常动力学系统,对大气的辐射和环流、冰川的进退、气温和降水量变异产生具全球性的影响。 F 、 Cl 、 S 化合物形成酸性水蒸汽对大气圈、生物圈和水圈污染,空落火山灰掩埋、火山碎屑流冲刷、火山气体中毒窒息,对当时动植物而言都是灭顶之灾,辽宁中华龙鸟、孔子鸟极可能死于火山周边低洼处和有毒气体浓集构成的“死塘”。据中华龙鸟、孔子鸟赋存地层的 Ar-Ar 法定年为 $147 \times 10^6 \text{ a}$,赋于侵入岩体中岩石定年为 $122 \times 10^6 \text{ a}$,都与火山-岩浆喷发热事件时代一致。

5 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发和成矿作用大集中是壳幔物质和能量大循环的必然结果

燕山期如此大体积的岩浆物质喷发是壳幔物质大循环和以热为主的物理能量大转移,造成了中国地质历史中最具特色的一幕成矿事件。中国东部 85% ~ 90% 的矿床出现于燕山期,成矿时代测定表明主要为 $140 \times 10^6 \sim 100 \times 10^6 \text{ a}$ ^[1~3]。成矿时代与成岩时代大体一致,决不是巧合,而是反映了火山-岩浆活动 壳幔物质与热能大迁移 矿床定位的构造运移四者间的内在联系。

中国东部中生代火山岩带的不同阶段都有玄武岩浆活动。在东南沿海岩石省与南岭岩石省叠加性边缘地带,于早中侏罗世,就有玄武岩喷发。东南沿海岩石省早期的基性岩脉角闪石 K-Ar 定年数据为 $142.6 \times 10^6 \sim 139.0 \times 10^6 \text{ a}$,角闪石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄数据为 $139.6 \times 10^6 \text{ a}$ (据李献华私人通讯)。于 $120 \times 10^6 \text{ a}$ 、 $110 \times 10^6 \sim 90 \times 10^6 \text{ a}$ 分别有两期玄武岩喷发^[3],这就表明中国东部燕山期火山-岩浆大爆发一开始就有地幔组分的贡献,大面积分布的酸性火山岩-花岗岩(东南沿海占 80% ~ 90%,大兴安岭占 60% ~ 70%)是在地幔热驱动下地壳熔融的产物。从广义上讲软流圈抬升或热幔柱效应造成岩石圈大面积减薄(145 ± 5) $\times 10^6 \text{ a}$,岩石圈地幔源区的玄武质岩浆少量喷出地表,大部分受到韧性地壳的阻挠而注入下地壳底部,形成下地壳高密度的玄武质底侵层,玄武质岩浆底侵的热能引起中下地壳广泛部分熔融,形成中酸性岩石为主的大火成岩省。

岩石圈减薄及其与火山-岩浆和成矿作用大爆发的耦合关系是近十几年来深部研究中所取得的重要认识,也是大规模成矿作用和大型矿床与深部构造研究方面的前沿课题。华北岩石圈曾发生过大面积转型和减薄,即由古生代时大于 200 km 厚度和方辉橄榄岩为主的物质组成演化为现今 100 km 左右厚度和二辉橄榄岩为主的组成^[6~8],华南南海海盆,海南岛、雷琼和龙海—明溪地晚新生代玄武岩富集高场强元素(HFSE),尤其是富集 Nb、Ta、U、Ti,其可能的解释是,下地壳成因的超地幔柱上升致岩石圈地幔物质加入^①,可以认为下地幔源的地幔柱在中国东部新生代玄武岩成因中的意义。探讨火山-岩浆大爆发和成矿作用大

① 毛健仁等,中国南方新生代地幔柱活动的地球化学证据,地质论评待刊

集中与深部构造的关系必须考察地幔的贡献。上涌软流圈的热传导“烘烤”会使岩石圈最底部物质发生软化，在软流圈水平流动产生的水平方向剪切应力作用下，软化的物质会转变为软流圈的一部分，这种剥蚀会加剧软流圈向上覆岩石圈的热-机械侵蚀而减薄^[9,10]，这是大陆裂解发育早期岩石圈减薄的最重要机制之一。同时，由于软流圈的上升必然会伴随岩石圈力学边界（MBL）的初始熔融，而软流圈深部熔体也以渗透反应孔隙流的方式通过软流圈/岩石圈界面进入岩石圈地幔并发生岩石圈化学侵蚀^[11,12]。熔体迁移的方式可介于裂隙和孔隙之间，而大体积岩浆一般在裂隙中迁移，熔体-岩石反应改变了岩石圈地幔的矿物组成，渗透率和流变学性质并导致岩石圈底部的重力不稳定性，热-机械侵蚀和化学侵蚀的耦合必定加速岩石圈减薄的进程。这一过程对于解释中国东部燕山期起源于下地幔的地幔柱上升对大陆裂解，玄武质岩浆底侵，地壳广泛熔融，大火成岩省形成、大规模成矿作用和巨型矿床形成所造成的惊天动地的地质和生态大变革将有重要指导意义。

地幔活动与全球性基准面变化、全球气候环境变异、生物灭绝与繁衍、冈瓦纳大陆漂移、地震发生、磁极倒转、短时期内巨量火山物质喷发大火成岩省的形成以及成矿作用大集中等的时代大体一致^[13~15]，越来越引起地质学家们的强烈兴趣，已有大量证据表明南太平洋地幔柱活动始于晚侏罗纪（ 150×10^6 a）^[16,17]。通常认为上升的热地幔柱来自核幔边界，柱体具有较窄的中央通道，但在 40~60 km 深度，其直径可达 400~1 000 km^[18]，这些柱体之上的岩石圈上隆可达 1~2 km^[19]。在大陆边缘，上升幔柱之上的岩石圈板块通常是向洋盆扩张运移，而柱体本身下伏在大陆岩石圈之下固定不变，因而幔柱体对岩石圈作用形成大火成省和不同构造岩石省深部幔柱体的构造形态及其迁移方式等是尚待进一步深入研究的课题。

参 考 文 献

- 1 谢家莹, 陶奎元, 尹家衡等. 中国东南大陆中生代火山地质及火山侵入杂岩. 北京: 地质出版社, 1996, 72~93.
- 2 陆志刚, 陶奎元, 谢家莹等. 中国东南大陆火山地质. 北京: 地质出版社, 1997.
- 3 陶奎元, 陆志刚, 高天钧等. 中国东南沿海火山岩基底构造及火山侵入作用与成矿关系. 北京: 地质出版社, 1998.
- 4 陶奎元, 杨祝良, 毛建仁等. 中国东部火山岩带特性与地球动力学讨论. 地质研究论文集. 北京: 中国经济出版社, 1996.
- 5 陶奎元, 赵宇. 火山学与环境. 火山岩地质与矿产, 1997, 17 (1): 1~12.
- 6 Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In: Prichard H M, Alabaster T, Harris N B. W et al. eds. Magmatic processes and plate tectonics. Geol. Soc. Spe. Pub, 1993, (76): 71~78.
- 7 Griffin W L, Zhang A D, O' Reilly S Y et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M, Chung S. L, Lo C. H, et al. eds. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia. Am. Geophys. Union Geodyn. Ser, 1998, 27: 107~126.
- 8 Tatsumi Y, Shinjoe H, Ishizuka H, et al. Geochemical evidence for a mid-Cretaceous superplume. Geology, 1998, 26, 151~154.
- 9 Monnerau M, Rabinowicz M, Arquís E. Mechanical erosion and reheating of the lithosphere: a numerical for hot spot swells. J. Geophys. Res., 1993, 98: 809~823.
- 10 Ruppel C. Extensional processes in continental lithosphere, J. Geophys. Res, 1995, 100: 24187~24215.
- 11 Van der Wal D, Bodinier J L. Origin of the recrystallization front in the Ronda peridotites by km-scale pervasive porous melts flow. Contrib. Mineral. Petrol., 1996, 122: 387~405.

- 12 Bedini R M, Bodinier J L, Dautria J M. Evolution of LILE-enriched small melt fractions in the lithosphere mantle: a case study from the East Africa Rift. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 153: 67 ~ 83.
- 13 Coutrillot V, Besse J. Magnetic field reversals, polar wander and core-mantle. *Science*, 1987, 237: 1140 ~ 1147.
- 14 Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 1991, 19: 547 ~ 550.
- 15 Coffin M F, Eidhoim O. Large igneous province, crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 1994, 32: 1 ~ 36.
- 16 Larson R L. Geological consequences of superplume. *Geology*, 1991, 19: 963 ~ 966.
- 17 Harland W B, Armstrong R L, Cor. A V. A geological time scale. 1989, Cambridge University Press, 1990, 263.
- 18 Sleep N H. Hotspots and mantle plume: Some phenomenology. *J. Geophy. Res.* 1990, 95: 6715 ~ 6736.
- 19 Richards M A, Hagar B H, Sleep N H. Subducted lithosphere, hotspots and the geoid. *J. Geophy. Res.* 1988, 93: 7690 ~ 7708.
- 20 , , , “ ” , 1984.

STRONG YANSHANIAN VOLCANIC-MAGMATIC EXPLOSION IN EAST CHINA

Tao Kuiyuan, Mao Jianren, Xing Guangfu, Yang Zhuliang and Zhao Yu

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Nanjing 210016)

key words: strong volcanic/ magmatic explosion, geological ecology, Yanshanian, East China

Abstract

The extremely strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China formed seven volcanic belts and eight rock series or associations which constitute four igneous provinces. In a period of nearly 20×10^6 a, millions of cubic kilometers of high-temperature magmas were erupted to the surface, which exerted notable impact on the global climatic environment and the extinction of living beings. The strong volcanic-magmatic explosion and the concentration of mineralization were inevitable outcomes of the great cycle of the crust-mantle materials and energies. The relationship of the deep mantle plume to the sudden change mechanism of lithosphere and the great change of Yanshanian ecology is a subject which deserves thorough study and investigation in future.