

中国东部燕山期大火成岩省： 岩浆-构造-资源-环境效应

曾普胜¹⁾, 李睿哲^{1, 2)}, 刘斯文¹⁾, 温利刚³⁾, 赵九江¹⁾, 王十安^{1, 2)}

1) 自然资源部生态地球化学重点实验室, 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3) 矿冶科技集团有限公司, 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室, 北京 100160

摘要: 中国东部燕山期的大规模岩浆活动, 即侏罗纪—白垩纪(150—100 Ma)的碱性流纹岩-碱性玄武岩-金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩及其管道系统, 分布于江南造山带内侧和郯庐断裂带南段以西的华北地台内, 累积面积超过 30 万 km²。该期短时限内大规模活动的岩浆事件代表了中国东部地质历史演化中的一次大火成岩省(LIP)事件, 实质控制着中生代以来中国华北—扬子地台的构造格局变化、资源能源形成与地质环境变迁。晚侏罗世—早白垩世(150—100 Ma)的大火成岩省, 是中生代中期古太平洋大火成岩省沿中国克拉通东部边缘活动的一部分, 是包括昂通爪哇(Ongtong-Java)(Mahoney et al., 1993; Ingle and Coffin, 2004)—中国东部在内的超级地幔柱上涌, 在岩石圈板片对流, 挤压地幔物质快速上升, 引起陆域内长英质地壳物质大规模重熔的结果, 形成: (1) 髫髻山组—张家口组碱性流纹质-玄武质双峰式火山岩及其管道系统, 与华北大规模金-多金属矿成矿作用密切相关; (2) 辽宁瓦房店—山东蒙阴—安徽栏杆, 湖南宁乡—贵州镇远一带的金伯利岩—钾镁煌斑岩±碳酸岩±基性超基性杂岩及其管道系统, 与金刚石、金-铂族元素等成矿关系密切; (3) 辽东—胶东半岛、南岭—滇黔桂交界地区的连片花岗岩, 是硅质大火成岩省(SLIP)的管道系统(plumbing systems), 与金刚石矿、金-铂族元素矿、钨锡铌钽矿、锂-钾-铷-铯-铀矿等, 以及油气等战略性关键金属成矿关系密切。同时, 巨型岩浆作用引发的富含钾、磷及稀土等微量元素的基岩形成优质土壤层对生态多样性的助益等有利和/或有害的环境效应, 直接关系到地球家园的生态环境。因此, 中国东部燕山期大火成岩省产生深刻的岩浆-构造-资源-环境效应。

关键词: 大火成岩省; 战略性关键矿产; 岩浆-构造-资源-环境效应; 燕山期; 中国东部

中图分类号: P588.11 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.112602

Yanshanian Large Igneous Provinces in Eastern China: Magmatism-Tectonics-Resources-Environment Effects

ZENG Pu-sheng¹⁾, LI Rui-zhe^{1, 2)}, LIU Si-wen¹⁾, WEN Li-gang³⁾, ZHAO Jiu-jiang¹⁾, WANG Shi-an^{1, 2)}

1) Key Laboratory of Eco-geochemistry, Ministry of Natural Resources, National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037;

2) China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083;

3) BGRIMM Technology Group, State Key Laboratory of Process Automation in Mining and Metallurgy, Beijing 100160

Abstract: The Yanshanian large-scale magmatic activity in eastern China, namely, the Jurassic–Cretaceous (150–100 Ma) alkaline rhyolites, alkaline basalts, kimberlites, lamproites, carbonatites, and their plumbing systems, distributed in the inner part of the Jiangnan Orogenic Belt and the North China Platform to the west of the southern segment of the Tan-Lu Fault Zone, has a cumulative area of more than 300 000 km². The large-scale magmatic event during this period represents a Large Igneous Province (LIP) event in the geological history of

本文由中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: JYYWF20180101)、中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190589; DD20160220; DD20190703)和自然科学基金项目(编号: 41072073)联合资助。

收稿日期: 2021-11-01; 改回日期: 2021-11-25; 网络首发日期: 2021-11-29。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 曾普胜, 男, 1964年生。博士, 教授。主要从事岩石学、矿床学和地球化学研究。E-mail: 646012329@qq.com。

eastern China, which essentially controls the tectonic changes, resources, energy formation, and geological environmental changes in the North China-Yangtze Platforms since the Yanshanian. The Late Jurassic–Early Cretaceous (150–100 Ma) LIP was part of the mid-Mesozoic Paleo–Pacific Large Igneous Province along the eastern margin of the China Craton. It resulted from the upwelling of the super mantle plume, convecting of the lithospheric slabs, and squeezing of the mantle material for rapid uplifting within a huge area covering the Ongtong–Java (Mahoney et al., 1993; Ingle and Coffin, 2004) –eastern China, forming the following: (1) Tiaojishan–Zhangjiakou Formation alkaline rhyolitic basaltic bimodal volcanic rocks, and their plumbing systems are closely related to large-scale gold-polymetallic mineralization in North China; (2) Kimberlites–lamproites ± carbonatites ± mafic-ultrabasic complexes and their plumbing systems distributed in the belts as Wafangdian, Liaoning; Mengyin, Shandong; Langan, Anhui; Ningxiang, Hunan; and Zhenyuan, Guizhou; closely related to the mineralization of diamond, gold–platinum group elements, and other elements; and (3) The Contiguous granites, distributed in the regions as Liaodong Peninsula, Nanling and Dian–Guizhou–Guangxi border area, are the plumbing systems of silicic large igneous provinces, and are closely related to the mineralization of diamond, gold–platinum group element, tungsten, tin, niobium and tantalite, lithium, potassium, rubidium, cesium and uranium, oil–gas, and other strategic key metals. At the same time, the beneficial and/or harmful environmental effects of the formation of high-quality soil layers from the bedrock rich in trace elements, such as potassium and phosphorus, and rare earth caused by giant magmatism are directly related to ecological environment of Earth. Therefore, the Yanshanian LIP in eastern China has produced profound magmatic–tectonic–resources–environmental effects.

Key words: Large Igneous Province(LIP); strategic minerals; magmatic–tectonic–resources–environmental effects; Yanshanian; eastern China

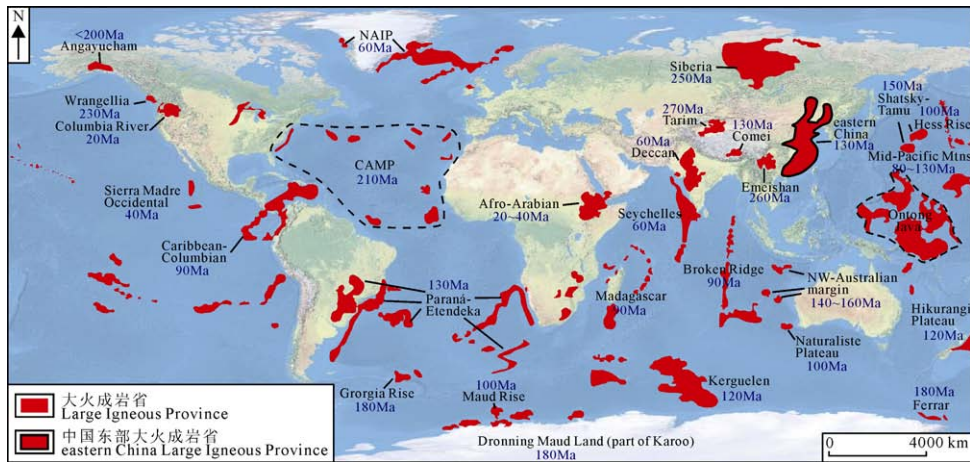
大火成岩省的研究(Coffin and Eldholm, 1991, 1992, 1993a, b, 1994, 2001, 2005)已经有 30 年以上的研究历史了。修订后的大火成岩省定义(Ernst, 2014)为: 大火成岩省(Large Igneous Province, LIP)是主要的镁铁质岩浆岩省, 面积范围 $> 0.1 \text{ Mkm}^2$, 火成岩体积 $> 0.1 \text{ Mkm}^3$, 具有板内特征, 并以短时脉动或多次脉动(小于 1~5 Ma)侵位, 最大持续时间 $< 50 \text{ Ma}$ 。可包括相关的硅质岩浆作用(包括 LIP 规模尺度的硅质岩浆, SLIPs)以及碳酸岩(Carbonatites)和金伯利岩(kimberlites)。大火成岩省因为与全球或区域环境变化(包括灭绝事件)、区域地形变化(穹隆抬升、大陆裂解)的关联大火成岩省还与多种战略性关键矿产、石油/天然气及优质含水层有关, 而引起高度关注。

中国的大火成岩省是全球大火成岩省(图 1)的重要组成部分, 如峨眉山大火成岩省(王登红等, 1998; 王登红, 2001; 宋谢炎等, 2001; 徐义刚和钟孙霖, 2001; 徐义刚等, 2003; 李红阳等, 2002; He et al., 2003, 2006, 2011; Xu et al., 2004; Peate and Bryan, 2009; Xu and He, 2007; Zhou et al., 2005; 何斌等, 2006; 侯增谦等, 2006; Ali et al., 2010; Shellnutt et al., 2012, 2014)、塔里木(杨树锋等, 1996, 2005, 2014; Xu et al., 2004; 陈汉林等, 2009), 特别是近年来新发现的措美(Zhu et al., 2009)、华北(Zhang et al., 2017, 2018; 张拴宏和赵越, 2018; 张拴宏等, 2019)等大火成岩省的补充报道, 为全球大火成岩省研究做出新的贡献。但关于中国东部燕山期大火成岩省却没有报道, 仅少数学者关注了中国东部早白垩世的可能与全球地幔柱上侵有关的巨型

火成事件(Wu et al., 2005)。主要原因是中国东部遭到剧烈的构造变动和剥蚀作用, 加之对大火成岩省的管道系统考虑较少, 因而未关注到中国东部燕山期的面积/体积庞大的大火成岩省。实质上, 中国东部燕山期以来, 板内张性构造背景下的岩浆活动产物分布广泛, 并且岩石组合与传统意义上的挤压俯冲产生的“岛弧型”或“陆缘弧型”的岩石组合——钙碱性系列的火山岩组合不同, 而是以钾玄岩、安粗岩、粗面岩、石英闪长岩、石英二长岩、二长岩、石英正长岩和正长岩为主(邓晋福等, 1996, 2005, 2007a, b)组成的碱性系列的“双峰式”火山岩组合, 并且伴有同期深部来源的金伯利岩(池际尚等, 1996; 褚志远等, 2019)、钾镁煌斑岩(江万, 1995; 池际尚等, 1996; 林玮鹏等, 2009)、含金刚石基性岩(蔡逸涛等, 2019a)等幔源岩浆岩(图 2), 代表了拉张为主的深源构造背景。这套燕山期岩浆岩控制着中新生代以来中国华北—扬子地台的构造格局变化、资源能源形成与地质环境变迁。根据近期对华北、扬子相关岩浆活动的初步研究结果, 对这些巨量板内岩浆活动梳理报道, 供感兴趣的同行参考。

1 中国东部燕山期大火成岩省

中国东部燕山期大火成岩省主要包括浅源为主的岩浆带——长白山—千山岩带①、大兴安岭岩带②、太行山岩带③、鲁东沿海杂岩带④、秦岭—大别岩带⑤、浙闽粤杂岩带⑥, 以及两个深源岩浆带——郯庐断裂金伯利岩—钾镁煌斑岩带⑦和湘黔钾镁煌斑岩带⑧(图 2)。



中国的大火成岩省包括了峨眉山、塔里木、措美、潘佳尔(部分), 而华东大火成岩省(图中带黑线轮廓部分)为本文添加。
In this map, the LIPs in China cover Emeishan, Tarim, Comei and Panjal (part), whereas eastern China (with black outline) is added by this study.

图 1 全球显生宙大火成岩省的分布及年龄(据 Coffin and Eldholm, 1994; Ernst, 2014 补充修改)

Fig. 1 Global map showing distribution of the large igneous provinces with ages (modified after Coffin and Eldholm, 1994; Ernst, 2014)

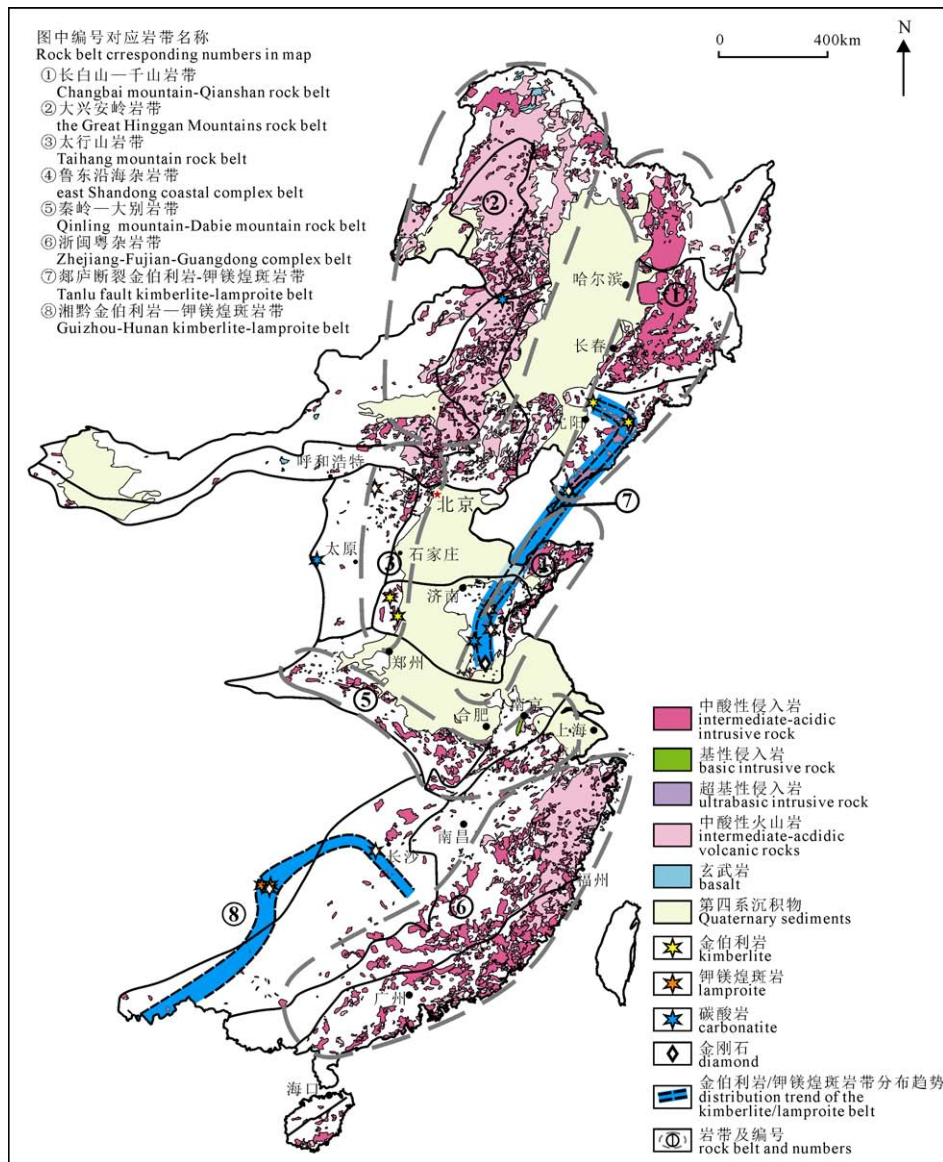


图 2 中国东部燕山期大火成岩省岩浆岩分布图

(侵入岩据邓晋福等, 2015; 喷出岩据邢光福等, 2015; 金伯利岩-钾镁煌斑岩-金刚石据宋瑞祥, 2013)

Fig. 2 Distribution map of magmatic rocks of the Yanshanian large igneous province in eastern China (intrusions after DENG et al., 2015; extrusions after XING et al., 2015; kimberlites-lamproites-diamonds after SONG, 2013)

其中,保留的岩浆岩带火山岩面积华北约 22 万 km², 华南约 11.4 万 km², 合计 33 万 km²(邢光福和冯益民, 2015)。岩性组合以双峰式岩浆岩组合为主, 时代为 174—100 Ma, 高峰期在早白垩世 (~120 Ma) (表 1)。岩浆岩类型则包括超基性岩类的金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩、碱性玄武岩-粗面质火山岩及其管道系统的玢岩或碱性辉绿岩、硅质大火成岩省(即碱性流纹岩-花岗岩)等(图 2)。按传统划分为东北亚省、华北亚省、华南亚省, 侏罗纪主要为高钾钙碱性系列和碱性系列双峰式火山岩组成, 是大火成岩省的开启时期; 而白垩纪时期则以碱性流纹岩-碱性玄武岩组成的双峰式岩浆组合, 伴有部分高钾钙碱性火成岩组合, 沿深断裂还可见到金伯利岩/钾镁煌斑岩/含橄榄岩包体碱性玄武岩(±金刚石)/碳酸岩等, 是典型地深部地幔岩浆活动产物; 沿深断裂展布的幔源岩浆岩+大面积分布的双峰式火成岩与局部高钾钙碱性系列火成岩, 构成了基性-超基性大火成岩省(LIP)与硅质大火成岩省(SLIP)组成的完整系列(Ernst, 2014), 按侏罗纪—白垩纪岩浆岩、深源岩浆岩、硅质大火成岩分述如下(图 2, 表 1)。

1.1 侏罗纪岩浆岩带

侏罗纪时期的岩浆岩遍及整个中国东部, 主要发育中—晚侏罗世的岩浆岩(表 1, 图 3)。

总体看, 火山岩多遭受剥蚀, 而侵入岩剥露后分布较广。仅分布于华南东部和大兴安岭—燕山地区的延庆一带存留有较大面积的中酸性火山岩, 而基性岩火山岩仅有大兴安岭北部存留。侵入体则剥蚀出露较为广泛。

东北地区的(小兴安岭—张广才岭)长白山—千山岩带①和大兴安岭火山岩带②内, 中侏罗统的塔木兰沟组(J₂t)高钾钙碱性玄武岩±安山岩-碱性流纹岩的火山岩组合及其侵入岩, 年龄为 167~160 Ma(邢光福和冯益民, 2015), 相当于中侏罗统巴通阶(Bathonian)至卡洛夫阶(Calloviaian); 晚侏罗统满克头鄂博组(J₃m), 年龄 160~150 Ma(邢光福和冯益民, 2015)的高钾钙碱性流纹岩-英安岩、火山碎屑岩及其侵入岩, 相当于牛津阶—钦莫利阶(Oxfordian-Kimmeridgian); 上侏罗统一下白垩统的玛尼吐组(J₃K₁m)(150—137 Ma), 相当于提塘阶—贝利阿斯阶(Tithonian-Berriasian)的高钾钙碱性系列的流纹岩-英安岩组合及其侵入岩, 以及少部分钾玄岩-安粗岩及其侵入岩。反映为大陆边缘弧的挤压俯冲伴有局部伸展的构造背景(邢光福和冯益民, 2015; 邓晋福等, 2007a, b, 2015)。

华北侏罗纪岩浆岩活动与东北地区相似, 华北北缘岩浆带沿狼山—阴山北侧—康保—赤峰深大断

裂带呈近东西向岩浆带, 即华北地台北缘岩浆带是大兴安岭带②的西延的一部分; 鲁东沿海杂岩带④则是长白山—千山岩浆带①的南延, 进一步相西则有北东向的太行山岩浆带③和近东西向的秦岭—大别岩带⑤两支。中侏罗统的南大岭组(J₂n)的高钾钙碱性系列玄武岩-粗面玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩及相应的火山碎屑岩及其侵入岩, 时代(174 Ma)(赵越等, 2006), 相当于中侏罗统阿林阶(Aallenian); 髻髻山组(J₃t)安山岩、流纹质凝灰岩、安山质火山角砾岩组合, 年龄为 170~153 Ma(李斌等, 2019), 相当于中侏罗统巴柔阶(Bajocian)至上侏罗统钦莫利阶(Kimmeridgian); 晚侏罗统土城子组(J₃tc)碱性流纹质凝灰岩、安山质角砾熔岩, 上部凝灰质砂岩夹粗面岩、安山质角砾熔岩及其侵入岩, 时代为 157.6—157.1 Ma(焦润成等, 2016), 相当于钦莫利阶(Kimmeridgian)。也反映为大陆边缘弧的挤压俯冲伴有局部伸展的构造背景(邢光福和冯益民, 2015; 邓晋福等, 2015)。华南侏罗纪岩浆带(图 2 中的⑥), 中—晚侏罗世属于陆缘弧由俯冲挤压高峰期向挤压后的伸展阶段过渡时期, 以出现南岭地区大面积过铝质花岗岩为特色, 而火山岩仅局部保留, 为高钾钙碱性系列安山岩-英安岩-流纹岩组合, 年代在保留火山岩的闽东北福安社口地区安山岩-流纹岩组合为 150~168 Ma(邢光福等, 2008), 闽粤交界处丰顺盆地兜岭群流纹岩类为 150~168 Ma(Guo et al., 2012), 粤东漳平组晶屑凝灰岩为 (171.8±0.9) Ma(刘鹏等, 2015), 相当于中侏罗统阿林阶(Aallenian)至上侏罗统钦莫利阶(Kimmeridgian)。反映的大地构造背景与东北—华北的中上侏罗统岩浆岩相当, 均为大陆边缘俯冲挤压伴有局部伸展的构造环境。

1.2 白垩纪岩浆岩带

到白垩纪时期, 中国东部大火成岩省达到鼎盛时期。与侏罗纪时期的岩浆岩分布情况对比, 白垩纪的岩浆岩规模大得多, 成为燕山期岩浆岩的主体(图 4)。从火山岩-侵入岩的保留情况看, 华北东部—秦岭(图 3 中①④⑤)、太行山③一带隆升剥蚀强烈, 喷出岩波流相对保留较少, 侵入相出露较多; 而大兴安岭(②)成为火山岩连片分布区, 规模宏大, 局部地区剥露出浅成相的斑岩体。华南的东南沿海的粤—闽—浙—赣地区(⑥)保留较多的火山岩, 局部剥露出浅成相甚至深成相的侵入岩, 岩浆岩出露相齐全, 成为研究大火成岩省的理想地区之一。岩性包括金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩等超基性岩, 以及碱性玄武岩/辉绿岩-粗面岩/碱性花岗岩组成的双峰式火山岩(图 4)。

1.2.1 金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩

金伯利岩主要分布在克拉通地区的太古代克拉通和古元古代活动带中, 它们还被解释为圈闭在岩石圈根部下方的玄武岩的深源等价体(例如 Campbell, 2001; Arndt, 2003), 金伯利岩事件与超大陆破裂有关的超级地幔柱事件有关(例如, Ernst, 2014; Haggerty, 1986, 1999; Heaman et al., 2003; Kerrich et al., 2005), 是金刚石的主要寄主岩石; 钾镁煌斑岩是一些富钾和富钛的矿物的深源岩石, 也可含金刚石; 许多碳酸岩与裂谷有关, 也与跨石圈破裂有关。这几类岩石均为深源岩石的典型代表, 是大火成岩省的重要组成部分(Ernst, 2014)。

中国东部的金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩带

(图 5), 主要分布于华北地块东侧的郯庐断裂带、扬子地台的湘—黔钾镁煌斑岩带沿线, 独立的碳酸岩主要分布于内蒙巴尔哲和山东微山。另有零星的金伯利岩和钾镁煌斑岩零星分布于河南鹤壁—山西大同的太行山岩带(侯广顺等, 2015; 张连昌等, 1998)(图 5)。

(1)金伯利岩

按照国际地科联(IUGS)火成岩系统学分委会(Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks)推荐的《火成岩: 分类与术语》(第二版)(Le Maitre, 2002; Robin, 2010)的分类原则, 金伯利岩分为两类: I 型(Group I): 对应于南非金伯利地区的原型(Wagner, 1914), 称为“玄武质金伯利岩”;

表 1 中国东部燕山期大火成岩省火山岩层序对照表(据 Niu et al., 2004; 赵越等, 2006; 邢光福和冯益民, 2015 整理)
Table 1 Comparison of Yanshanian volcanic sequences of large igneous provinces in eastern China
(compiled after Niu et al., 2004; ZHAO et al., 2006; XING and FENG, 2015)

时代	东北($12\times 10^4\text{ km}^2$)		华北($10\times 10^4\text{ km}^2$)		华南($11.4\times 10^4\text{ km}^2$)	
	火山岩层序 (代号) (年龄/Ma)	岩性	火山岩层序 (代号) (年龄/Ma)	岩性	火山岩层序 (代号) (年龄/Ma)	岩性
白 垩 纪	光华组 (K_1g) (120 ~ 110 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	高钾钙碱性系列 流纹岩-英安岩组 合、玄武岩-流纹 岩双峰式组合及 其侵入岩	义县组/ 莱阳群/青山群 (K_1L)/(K_1Q) (128.8 ~ 121.9 Ma) (Niu et al., 2003)	高钾钙碱性系列玄 武岩-英安岩-流纹 岩双峰式火山(凝 灰)岩及其侵入岩; 局部地区金伯利岩- 钾镁煌斑岩-碳酸岩	永康群/天台群 ($K_{1-2}YK$)/($K_{1-2}T$) (113 ~ 85 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	高钾钙碱性系列 玄武岩-流纹岩 双峰式组合; 后造山火山岩或 侵入岩组合
	梅勒图组 (K_1ml) (134 ~ 124 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	高钾钙碱性系列 玄武岩-安山岩-粗 面岩双峰组合及 其侵入岩	张家口组 (K_1z) (136.3~133.9 Ma) (Niu et al., 2003)	高钾钙碱性系列粗 安岩、粗面玄武岩、 玄武粗安岩、安山 岩、英安岩、流纹 岩及相应的火山碎 屑岩及其侵入岩	建德群/武夷群 (K_1J)/(K_1WY) (141 ~ 120 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	玄武岩-流纹质 火山岩双峰式组 合; 英安质-流 纹质火山岩组合 及其侵入岩
	白音高老组 (K_1b) (141 ~ 139 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	中高钾钙碱性系 列陆缘弧流纹质- 英安质熔岩和火 山碎屑岩组合及 其侵入岩				
	玛尼吐组 (J_3-K_1m) (150 ~ 137Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	为高钾钙碱系列 陆缘弧流纹质-英 安质火山岩及其 侵入岩, 少量钾 玄岩系列玄武岩- 安山岩-粗面岩- 英安岩组合 及其侵入岩	土城子组 (K_1tc) (157.6 ~ 157.1 Ma) (焦润成等, 2016)	碱性流纹质凝灰 岩、安山质角砾熔 岩, 上部凝灰质砂 岩夹粗面岩、安山 质角砾熔岩及其 侵入岩	兜岭群/ 吉岭湾组/ 安塘组 (J_2d)/(J_2j)/(J_2a) (171.8~150 Ma) (邢光福等, 2008; 邢光福和冯益民, 2015; Guo et al., 2012; 刘鹏等, 2015)	高钾钙碱性系列 安山岩-英安岩- 流纹岩组合及其 侵入岩; 橄榄 玄武岩
侏 罗 纪	满克头鄂博组 (J_3m) (160 ~ 150 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	中高钾钙碱性系 列陆缘弧流纹质- 英安质熔岩和火 山碎屑岩及其 侵入岩	髻髻山组 (J_3t) (170~153 Ma) (李斌等, 2019)	主要分布于燕辽地 区的冀北和蒙南一 带, 岩性主要为高 钾钙碱性系列玄武 岩、粗面玄武岩、 安山岩、英安岩、 流纹岩及相应的火 山碎屑岩及其 侵入岩		
	塔木兰沟组 (J_2t) (167~160 Ma) (邢光福和冯益民, 2015)	中高钾钙碱性玄武 安山质-安山质火 山岩组合和流纹质 -英安质火山岩 组合及其侵入岩	南大岭组/兴隆沟组 (J_2n)/(J_2xl) (174 Ma) (赵越等, 2006)			

II型(Group II): 对应于云母质或煌斑岩质金伯利岩(Wagner, 1914; Dawson and Stephens, 1975; Dawson, 1980; Mitchell and Bergman, 1991; Mitchell, 1995; 张安棣, 1991; 路凤香, 2008)。

中国东部安徽栏杆地区的含金刚石的玄武质岩石(蔡逸涛等, 2019a, b, 2020)类似于I型, 在中国东部少见, 且含金刚石量发现较少, 是一类目前研究不多的“金伯利岩”, 但岩石学意义重大, 标志着中国的含金刚石的岩石类型除金伯利岩-钾镁煌斑岩外, 还有玄武岩。金伯利岩、钾镁煌斑岩在空间上沿同一岩带可交替出现, 如蒙阴金伯利岩带(图5中5号)与大井头钾镁煌斑岩(6)交替出现, 并且均含有金刚石(王玉峰等, 2019); 黔湘钾镁煌斑岩带内也有望城麻田发现的含微粒金刚石的基性火山岩出露(董斌等, 2006);

超基性的金伯利岩/钾镁煌斑岩带延伸的空间上, 还会有碳酸岩出露, 如华北地台的金伯利岩带上北部有燕山期内蒙巴尔哲(图5中13号, 127 Ma)(赵一鸣等, 1994)、山东郯山(12号, 125.8 Ma,)。

金伯利岩带主要产于华北, 其中, 辽宁瓦房店金伯利岩带和山东蒙阴金伯利岩带是中国最重要含金刚石金伯利岩(池际尚等, 1996; 梅厚钧等, 1998; 付海涛, 2020), 也是世界金伯利岩带的重要组成部分(Shirey et al., 2013)。瓦房店金伯利岩带50号岩管是世界上含金刚石较富且含宝石级金刚石较多的岩管(宋瑞祥, 2013)。河南鹤壁—山西大同的太行山带也有金伯利岩带产出, 间杂钾镁煌斑岩(如饮牛沟, 李佑国等, 1991), 因其金刚石含矿性稍差, 而研究资料性对较少, 但其深部探测意义很大。

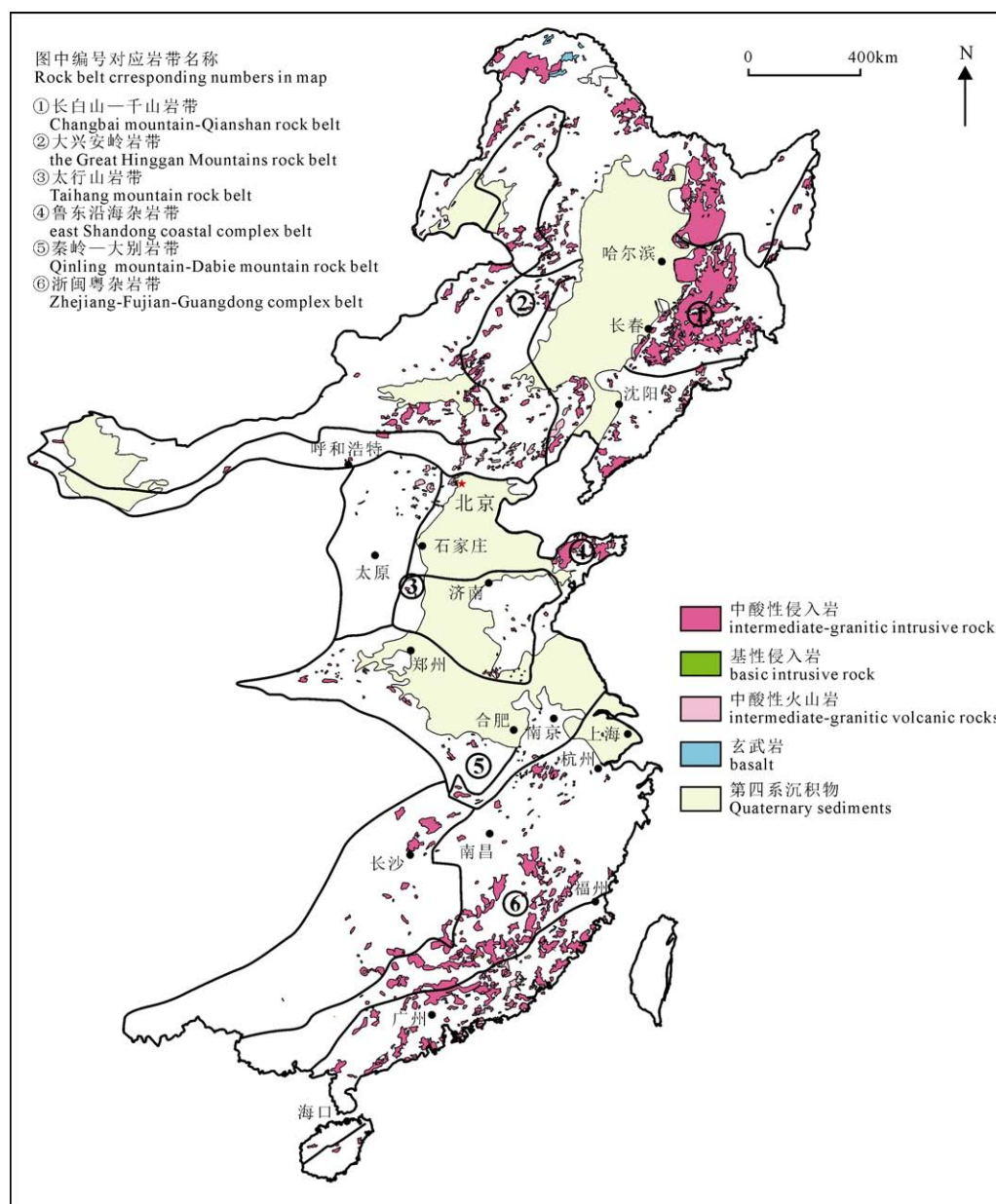


图3 中国东部燕山期大火成岩省侏罗纪岩浆岩分布图(侵入岩据邓晋福等, 2015; 喷出岩据邢光福和冯益民, 2015)
Fig. 3 Distribution map of Jurassic magmatic rocks of the Yanshanian large igneous province in eastern China
(intrusions after DENG et al., 2015; extrusions after XING and FENG, 2015)

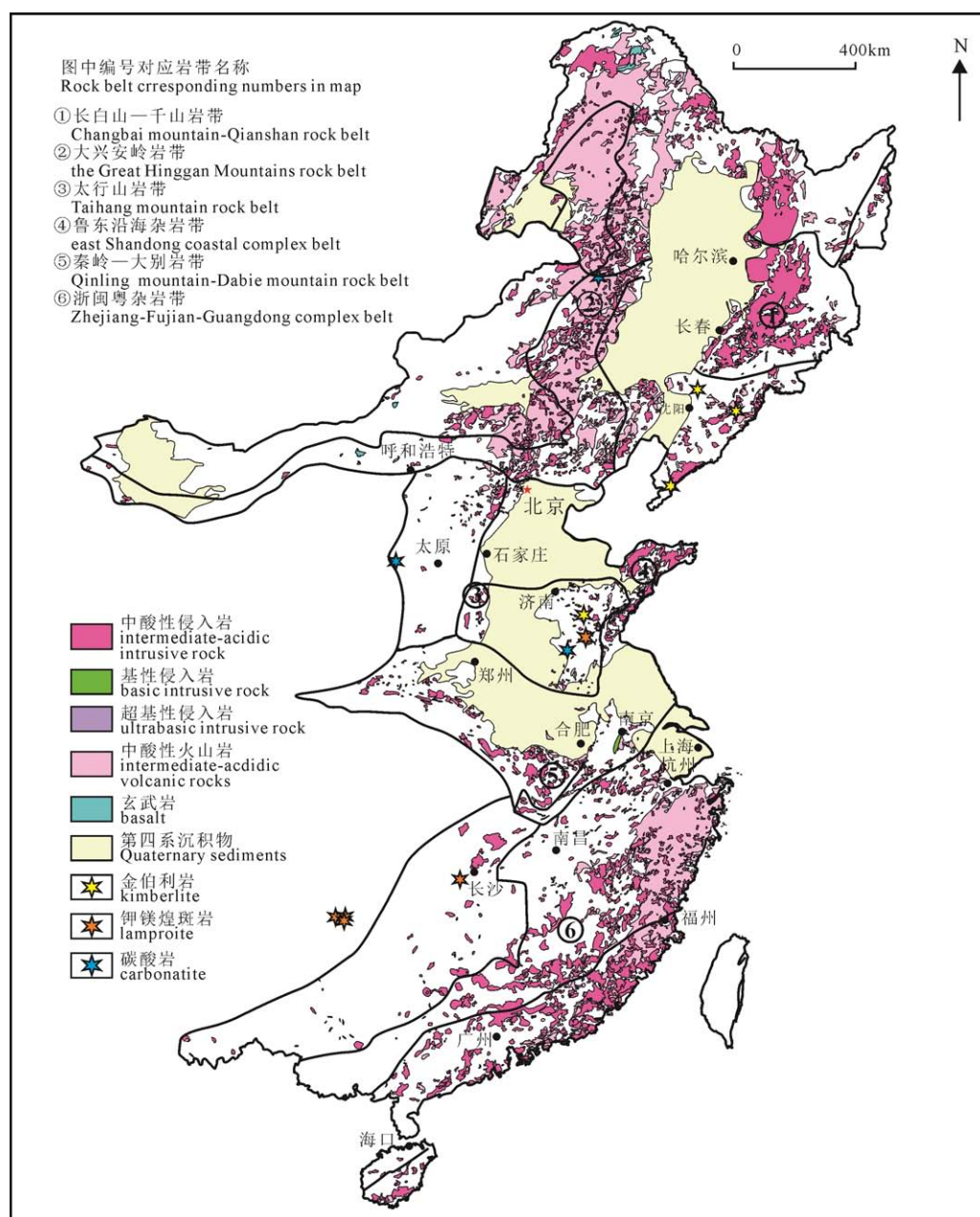


图4 中国东部燕山期大火成岩省白垩纪岩浆岩分布图

(侵入岩据邓晋福等, 2015; 喷出岩据邢光福和冯益民, 2015; 金伯利岩-钾镁煌斑岩-金刚石据宋瑞祥, 2013)

Fig. 4 Distribution map of Cretaceous magmatic rocks of the Yanshanian large igneous provinces in eastern China (intrusions after DENG et al., 2015; extrusions after XING and FENG, 2015; kimberlites-lamproites-diamonds after SONG, 2013)

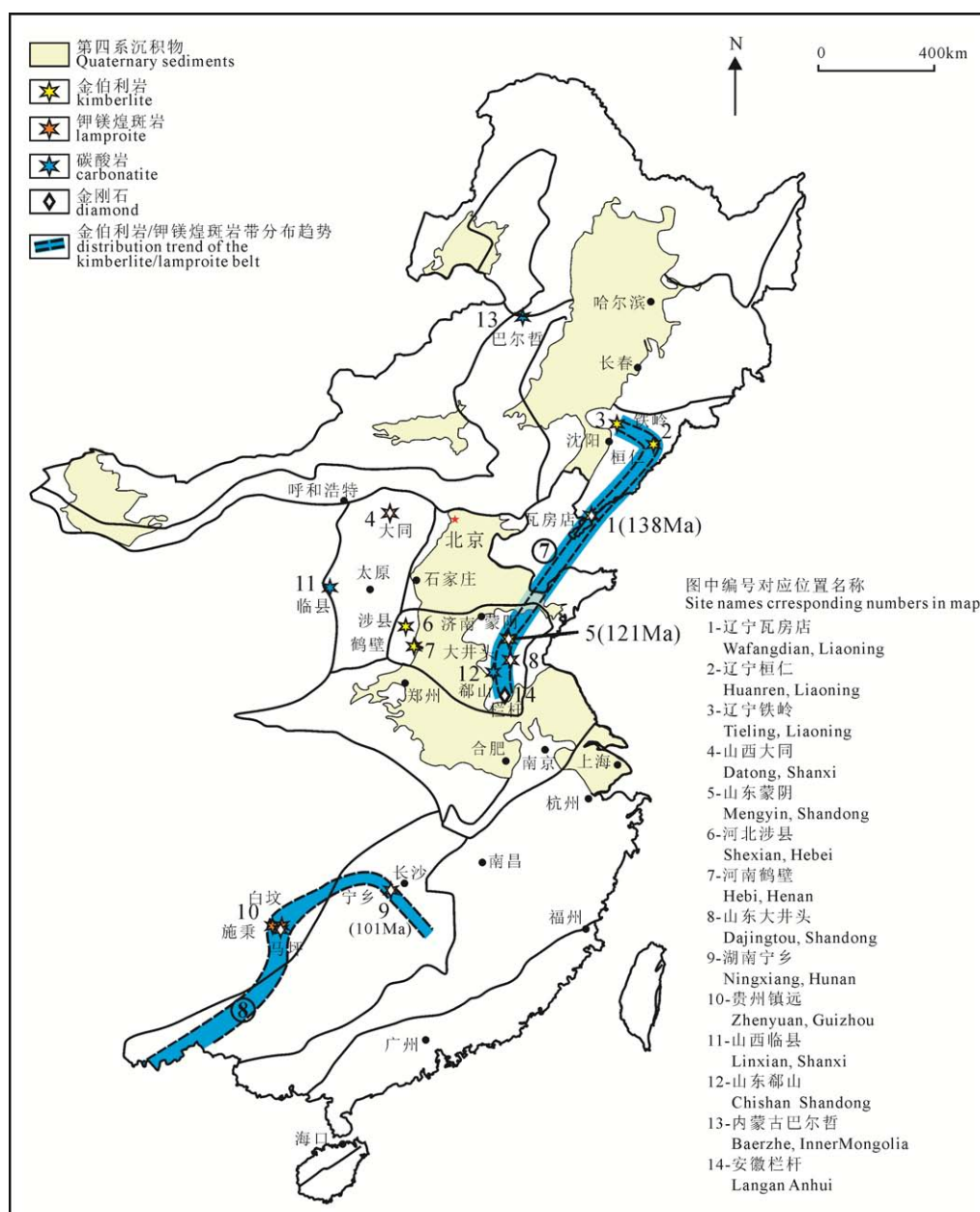
(2) 钾镁煌斑岩

中国钾镁煌斑岩主要分布于黔东南、湖南宁乡、山西饮牛沟、山东大井头、湖北大洪山和西昆仑克里阳地区(池际尚等, 1996; 梅厚钧等, 1998; 李睿哲等, 2021)。其中, 湘黔钾镁煌斑岩带是中国最先发现原生金刚石的岩带——贵州马坪钾镁煌斑岩(10号)——东风I号岩管(池际尚等, 1996), 成为中国金刚石早期研究的人才成长基地, 为后来的山东蒙阴、辽宁复县(瓦房店)金刚石矿床勘查输送了多为金刚石勘查专业人员(宋瑞祥, 2013); 湖南宁乡云影窝(9号)是湘黔钾镁煌斑岩带中另一个见到原生金刚石的岩管(李子云和马文运, 1993), 时代为白垩

纪((101.6±5.1) Ma, 林伟鹏等, 2011)与湖南常德的理公港地区原生金刚石凝灰质角砾岩的地层时代——白垩纪相当(杨献忠等, 2019)。这些钾镁煌斑岩早期获得的年龄多被认为是加里东期(503—435 Ma, 方维萱等, 2002)的产物, 实际上极有可能是先在岩石圈龙骨底部生成, 而白垩纪时期才就位的。

(3) 基性-超基性岩(玢岩)

中国东部燕山期的基性超基性岩分早、晚两期, 早期的侏罗纪的碱性橄榄玄武岩主要分布华北的燕山地区; 晚期的白垩纪双峰式火山岩的基性超基性端元在长江中下游的宁芜盆地山东的沂沭断裂带内尚有保留(邓晋福等, 2015)。



原生金刚石分布据宋瑞祥(2013), 括号内为金伯利岩和钾镁煌斑岩带年龄(林玮鹏等, 2011; 丁俊英等, 2016; 褚志远等, 2019)。

The distribution of primary diamond after SONG(2013), and the ages in brackets of kimberlite or lamproite after LIN et al. (2011), DING et al.(2016), and CHU et al.(2019).

图5 中国东部燕山期金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩及原生金刚石矿分布(据邓晋福等, 2015; 池际尚等, 1996 编制)

Fig. 5 Distribution of Yanshanian kimberlites-lamproites-carbonatites in eastern China (compiled after DENG et al., 2015 and CHI et al., 1996)

早期的侏罗纪碱性玄武岩, 在北京延庆一带保留相对完整, 其他地区因隆升剥蚀和构造变化, 只保留通道相的辉绿岩或辉绿辉长岩(图 2)(邓晋福等, 2015), 早期这套基性-超基性岩目前尚无金刚石的报道, 但可见较多的地幔橄榄岩包体, 如北京延庆地区(邓晋福等, 2015; 赵越等, 2006)。金刚石意义不大, 但深部探测研究重要, 尤其对于探索大火成岩省的启动阶段意义显著。

晚期的白垩纪的橄榄玄武岩、碱性玄武岩(局部有安粗岩)也被剥蚀较多, 仅在长江中下游的宁芜盆地、山东的沂沭断裂带内保留相对完整(邓晋福等,

2015; 邢光福和冯益民, 2015)。这套岩石与碱性流纹岩组成的双峰式火山岩是燕山期伸展主要标志之一(邢光福和冯益民, 2015; 邓晋福等, 2015), 通道相的玢岩是重要的铁矿类型——“宁芜玢岩铁矿”(图 2)的成矿母岩(陈毓川, 1986; 余金杰和毛景文, 2002a, b; 余金杰等, 2007; 段超等, 2010; 胡劲平和蒋少涌, 2010), 也是中国东部研究深部来源构造-成矿的最佳窗口之一(毛景文等, 2005)。最值得注意的是, 近年来, 苏皖地区的碱性橄榄玄武岩(图 5 中 14 号)中有金刚石被发现(蔡逸涛等, 2019a, b; 黄友波等, 2019)。

(4)碳酸岩-碱性杂岩

金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩及其管道系统通常紧密共生,成为大火成岩省的标志之一(Ernst, 2014),中国燕山期的碳酸岩有类似的特征,分布于中国东部郯庐断裂带以西的华北地台内,与金伯利岩-钾镁煌斑岩在同一构造带上交替产出,如山东郯山(图5的12号)、内蒙古巴尔哲(图5中的13号),是早白垩世(138—100 Ma)的大火成岩省深源岩浆作用的一部分,与华北大规模金-多金属矿成矿作用密切相关,特别是与稀土矿床关系最为密切。典型地碳酸岩有郯山、巴尔哲碳酸岩-碱性杂岩稀土-稀贵-稀有金属矿床。

山东郯山稀土矿位于微山县韩庄镇微山湖东岸,北距县城20 km。矿床的形成与中国东部大火成岩省岩浆活动有关,并伴有金和稀土元素(REE)多金属矿化(曾普胜等, 2020),特别是130—120 Ma期间的剧烈岩浆活动控制了大量矿床的形成(Mao et al., 2011)。郯山碱性杂岩体与稀土矿化有关的矿脉主要有含稀土石英重晶石碳酸盐脉和含稀土霓辉石脉。矿脉中含有氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、独居石等矿物,并伴有黄铁矿产出。其中稀土矿为山东省最大规模的中型稀土矿床,平均厚度2.16 m,平均品位 RE_2O_3 4.61%;其中的黄铁矿均含较高的金(Au)和铂族元素(Pt、Os、Ir、Ru)、亲铁元素Mn、Cr、Ti和分散元素Re。其中,黄铁矿中Au平均含量为 4900×10^{-6} , Pt、Ru、Os、Ir平均分别为 $14\,000 \times 10^{-6}$, $22\,000 \times 10^{-6}$, $26\,300 \times 10^{-6}$, 2600×10^{-6} ;含Re平均 $20\,400 \times 10^{-6}$ (曾普胜等, 2020)。这些亲铁元素在黄铁矿中的局部富集,表明该期黄铁矿为深源成因。为碳酸岩-碱性杂岩分布区寻找贵金属和分散元素铼(Re)等关键金属提供线索。

巴尔哲超大型矿床位于内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内,巴尔哲矿床是一个典型的与碳酸岩-碱性杂岩有关的超大型稀有稀土矿床(赵一鸣等, 1994; 陈金勇等, 2019a, b),也属于中国东部燕山期大火成岩省的一部分,其形成时代为(127.2±1.3)—(122.7±1.8) Ma(赵一鸣等, 1994; 丘志力等, 2014; Su et al., 2021)。巴尔哲矿床为稀土-锆-铍-铌钽(REE-Zr-Be-Nb-Ta)多金属矿床(Yang et al., 2021),主要矿石矿物为兴安石(硅铍钇矿)、氟碳钙铈矿、独居石、烧绿石、铌铁矿和锆石等。巴尔哲矿床已探明金属储量为 RE_2O_3 储量近百万吨、 ZrO_2 数百万吨、 Nb_2O_5 数十万吨、 Ta_2O_5 数万吨、BeO数万吨,其中锆和稀土元素的储量已达超大型矿床规模(王一先和赵振华, 1997)。

中国东部燕山期大火成岩省中的碳酸岩,成为中国东部燕山期大火成岩省的重要组成部分,与全

球其他地区的大火成岩省中碳酸岩(如西伯利亚、德干等地)可以比较(Ernst, 2014)。

1.2.2 白垩纪双峰式火山岩

白垩纪双峰式火山岩是中国东部燕山期大火成岩省鼎盛时期的产物,在侏罗纪火山岩的基础上活动面积进一步扩大,构成中国东部燕山期岩浆岩的主体(图2,图4)。在构造强烈隆起区,即长白山—千山岩带①、太行山岩带③、鲁东沿海杂岩带④、秦岭—大别岩带⑤,主要保留侵入相,岩性以碱性花岗岩—二长花岗岩等(A型花岗岩)为主(邓晋福等, 2015);而构造隆升性对较弱的地区,即大兴安岭岩带②和浙闽粤杂岩带⑥,则侵入相与火山岩相伴产出,侵入相岩性同构造隆起区的相似,也以碱性花岗岩—二长花岗岩等(A型花岗岩)为主,仅局部地区(如宁芜盆地、沂沭盆地)有富钠质辉长闪长玢岩—辉长闪长岩等次火山岩(陈毓川, 1986; 邓晋福等, 2015; 邢光福和冯益民, 2015; 余金杰和毛景文, 2002a, b),而喷出相在火山岩盆地中的以保留,岩性以碱性流纹岩、粗面岩、粗安岩等为主,宁芜盆地—庐枞盆地、沂沭地区中有碱性玄武岩—安山岩(陈毓川, 1986; 邢光福和冯益民, 2015),构成中国东部重要的双峰式火山岩(邢光福等, 2015)。

华北的松辽盆地(尤其是开鲁盆地、大庆盆地等次级盆地)、二连盆地、巴音戈壁盆地(向西可达吐哈盆地),以及华南的吉泰盆地、南雄盆地、麻沅盆地等保留了较完整的白垩纪的双峰式火山岩(邢光福等, 2015),为铀-煤-钾-锂共存的盆地,是中国东部战略性关键金属集中赋存的重要地区。

1.3 硅质大火成岩省(SLIPs)

硅质大火成岩省是指与大火成岩省(LIPs)潜在相关的板内和大陆裂谷系统中的硅质岩浆作用,与以硅质为主,非俯冲成因的大面积(>10万 km^2)分布的岩浆省,称其为硅质大火成岩省(SLIP)(Pankhurst and Rapela, 1995; Bryan et al., 2000; Ernst, 2014)。

中国的硅质大火成岩省讨论甚少。Peng(2010, 2015)讨论了华北地台熊耳—太行地区元古代(1.7 Ga)与放射状岩墙有关的硅质大火成岩省;桂北地区四堡群和中生代与玄武岩有关的酸性大火成岩省已有部分关注(Li et al., 2014)。张旗等(2009)曾对中国东部燕山期岩浆岩与大火成岩省的有讨论,但在中国,酸性大火成岩省讨论还很少,特别是燕山期的内容关注的显著不足。

本次涉及的硅质大火成岩省包括了侏罗纪—白垩纪(150—100 Ma)大火成岩事件由碱性流纹岩—碱性玄武岩—金伯利岩—钾镁煌斑岩—碳酸岩及其管道系统,分布于江南造山带西侧和郯庐断裂带南段以西的华北地台内,包括管道系统和喷出岩,累积面

积超过 30 万 km²(图 6)。其规模甚大, 以往关注甚少, 是中国东部燕山期壳幔相互作用的重要产物。

从侏罗纪中晚期开始有主要为高钾高钾钙碱性系列为主, 局部伴有双峰式火山岩组合的岩浆岩, 代表了陆缘弧俯冲伴有局部拉张的大陆边缘俯冲环境, 与俯冲作用有一定的关联; 但到早白垩世早一中期开始出现强烈的双峰式火山岩组合, 伴有超基性的金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩组合, 代表了一种陆内环境的强烈拉张的构造背景, 与俯冲作用关系不大。这种大陆边缘俯冲环境向大陆内部拉张的转换, 正是中国东部燕山期大火成岩省直接作用的结果, 这与以往燕山期一直是大陆边缘俯冲的构造配置的认识有显著不同。

这种岩浆的分布格局显示出中国东部燕山期为一个酸性大火成岩省, 与全球著名的硅质大火成岩省(Silicic LIPs)(Ernst, 2014)(图 1)(如美国西海岸的马德雷山(Sierra Madre)、非洲与阿拉伯半岛之间的阿法尔(Afro-Arabian, AFAR)、西非南部的伊登戴卡(Etendeka)、印度的马拉尼(Malani)、澳大利亚南部的高乐(Gawler)及东部的肯尼迪—康纳斯—奥本(Kennedy-Connors-Auburn)的大陆区的大火成岩省的情形基本一致(Ernst, 2014)。其特点是, 酸性或双峰式火山作用占优势, 流纹岩/花岗岩特别发育, 并有同期的基性岩墙、超基性岩(金伯利岩-钾镁煌斑岩-碳酸岩)发育, 部分含有金刚石, 与俯冲作用形成的安山岩/闪长岩等中性岩浆作用关系不密切,

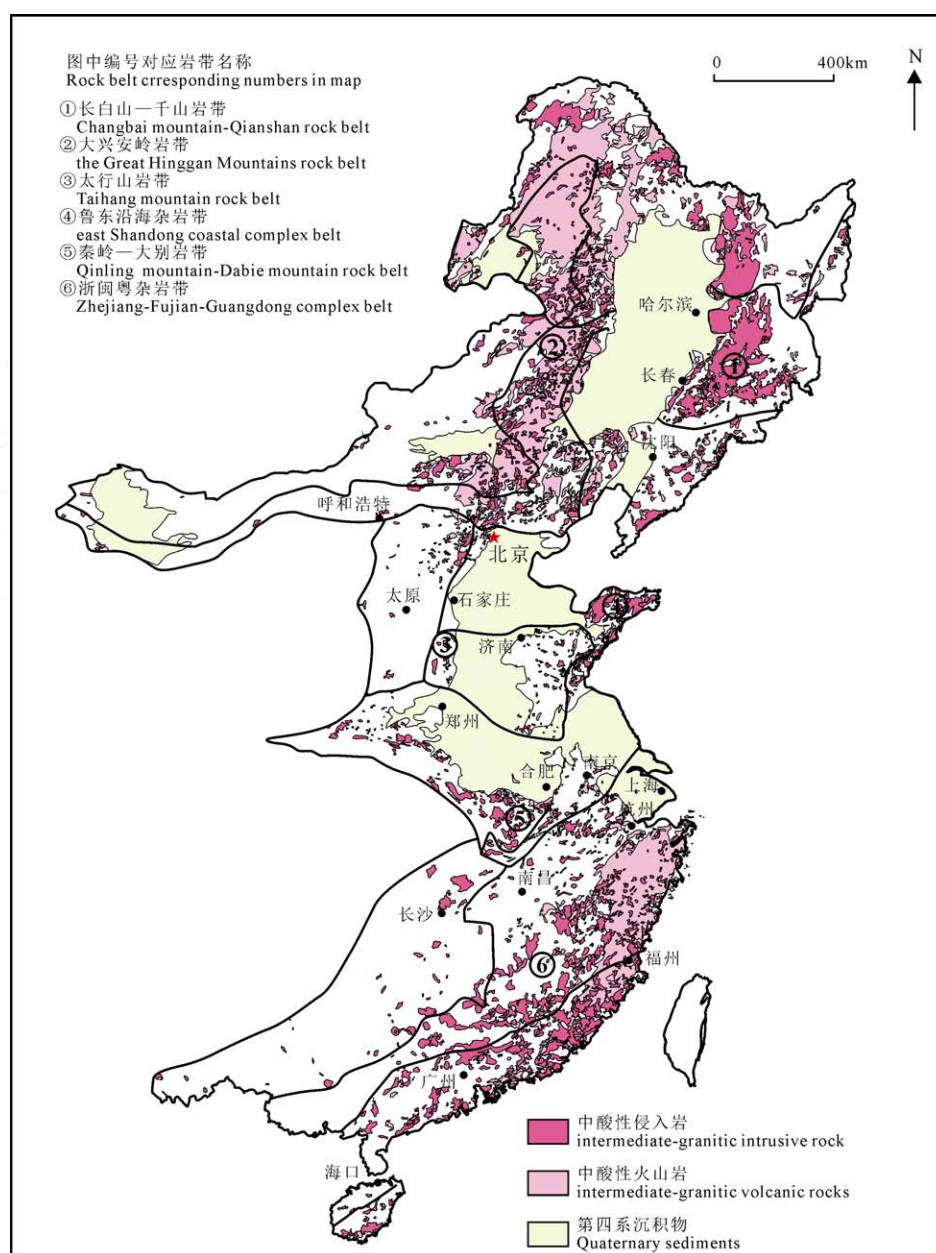


图 6 中国东部燕山期硅质大火成岩省岩浆岩分布图
(侵入岩据邓晋福等, 2015; 喷出岩据邢光福和冯益民, 2015)

Fig. 6 Distribution map of magmatic rocks of the Yanshanian silicic large igneous provinces (SLIPs) in eastern China (intrusions after DENG et al., 2015; extrusions after XING and FENG, 2015)

是大火成岩省的一部分,也是全球规模较大的硅质大火成岩省。这群大火成岩省,对于理解中国东部的各类构造-成矿作用十分关键。

2 中国东部燕山期大火成岩省的构造效应

中国东部燕山期大火成岩省对中国的构造格局产生了深刻的影响。包括东部高原的塑造、构造-岩浆带对中国地形地貌的格架影响等。

2.1 燕山期中国东北部高原

燕山期大火成岩省不仅造就了巨量的岩浆,同时还使中国东部大规模隆升成为“东部高原”(张旗等, 2007, 2008)。峨眉山大火成岩省的地壳隆起幅度在 1000 m 以上(何斌等, 2005), 与此类似, 早白垩世(~120 Ma)持续的中国东部的大火成岩省的岩浆作用, 必然使岩浆作用区逐渐隆起, 形成与岩浆喷发范围相适应的大幅隆起, 前人已注意到中国东部的“面型”隆起覆盖华北地台大部分和华南东部(张旗等, 2007, 2009), 与本次根据燕山期火成岩编图资料(邓晋福等, 2015; 邢光福和冯益民, 2015)编绘的硅质大火成岩省范围(图 6)基本相当。因此, 大火成岩省对中国东部的地形地貌的塑造起到决定性的作用。新生代的构造作用在这个“高原”的基础上进行改造和破坏, 塑造的现今中国东部的地貌和地理格局。

2.2 燕山期中国东部的构造变形与构造轮廓的形成

中国东部燕山期大火成岩省包括了金伯利岩-钾镁煌斑岩±碱性橄榄玄武岩±碳酸岩的深源岩石组合, 也包括更大面积花岗岩类岩石组合。这些深源岩石组合可代表一个大火成岩省事件的边界(Ernst, 2014), 应与其南部太平洋区域内同期(高峰在 130—120 Ma)的规模巨大的大火成岩省, 如昂通爪哇(Ongtong-Java)(Mahoney et al., 1993; Ingle and Coffin, 2004)等有对应关系。金伯利岩-钾镁煌斑岩等作为快速上升的大火成岩省或地幔柱边界(Mao and Mao, 2020)的一部分, 上升足够快的就可已形成含金刚石金伯利岩(Shiery et al., 2013)(如瓦房店、蒙阴等地), 稍慢些的金刚石含矿性差些(如辽宁铁岭、河南鹤壁等地)。如此, 这类直达地幔深处的深断裂, 即成为大火成岩省岩浆上升通道, 并为了后期挥发分流体(H_2O 、 CO_2 、H、烃类、F 等及其络合的深源金属 PGE-Re、Au-Ag、Co-Ni-V-Ti-Mn 等)上升保留通道。这类通道(如郯庐断裂带)成为后期可能继续活动的边界大断裂控制着整个中国东部的构造活动与成矿事件, 乃至地震灾害等, 改造着华北(Davis, 2011a, b; Davis and Darby, 2010; Davis and Xia, 2013; 王洪浩, 2016)、扬子等稳定地台的演化

(Farnetani and Richards, 1994), 甚至拉开渤海湾(李三忠等, 2010), 深刻地影响着中国东部的岩浆-构造-成矿格局, 并涉及更大范围, 如北部的蒙古—鄂霍茨克带(Kravchinsky et al., 2002)。

3 中国东部燕山期大火成岩省的资源效应

中国东部燕山期大火成岩省不仅控制着同期的岩浆作用和构造格局, 还深刻地影响着同期的成矿事件, 特别是与深源岩浆作用关系密切的战略性关键矿产。中国东部的重要矿产主要形成与燕山期且沿郯庐断裂带及其南延部分密集分布(图 7, 表 1), 这种短时限高密度的矿产形成正是大火成岩省及其边界深断裂控制的必然结果(Shiery et al., 2013; Ernst and Jowitt, 2013; Ernst, 2014)。按成矿有关的岩浆岩类型不同, 可以将燕山期有关的中国东部的战略矿产资源分为两种亚类, 即与深源岩浆作用(金伯利岩-钾镁煌斑岩±碳酸岩)有关的战略矿产——稀贵(PGE+Au、Ag、Co)、稀土(REE)、稀有(Nb-Ta-Zr-Hf)、稀散(Li-Be-Rb-Cs)等“四稀”金属;(碱性)花岗岩类有关的战略矿产——稀有金属(W-Sn-Be-Nb-Ta)、新能源矿产(Li-U-Rb-Cs)、新材料矿产(F/萤石)、大宗战略矿产(Cu)等。

3.1 金伯利岩-钾镁煌斑岩-基性岩-碳酸盐有关的矿产

与金伯利岩-钾镁煌斑岩-基性岩-碳酸盐有关的矿产多属于深源成因, 成矿地质体通常与深断裂有关, 并且在两组断裂交汇处成矿显著增强。金伯利岩有关的矿床主要是金刚石矿床, 以郯庐断裂带两侧的辽宁瓦房店金伯利岩群(丁俊英等, 2016; 付海涛, 2020)、山东蒙阴金伯利岩群(褚志远等, 2019)(间夹有大井头钾镁煌斑岩含金刚石, 王玉峰等, 2019)达到工业品位, 是中国最重要的金刚石矿床(Shiery et al., 2013; 宋瑞祥, 2013); 钾镁煌斑岩有关的矿床主要有贵州镇远马坪(东风 I 号)岩管(罗会文和杨光树, 1989; 杨光忠, 2013; 杨光忠等, 2019; 饶红娟等, 2019)、湖南 2013 宁乡云影窝岩管(李子云和马文运, 1993)发现原生金刚石, 湘黔钾镁煌斑岩带内有金伯利岩产出(童潜明, 1996; 饶家荣, 1999; 董斌等, 2006), 向北可影响到湖北大洪山一带(王留海和廖其放, 1989; 王留海, 1991; 叶德隆等, 1991; 刘观亮等, 1993); 南部江西安远莲花塘白榴黄长煌斑岩出露(王取义, 1995); 基性岩或碱性橄榄玄武岩含金刚石的例子在郯庐断裂的苏皖地区存在(蔡逸涛等, 2019a, b; 黄友波等, 2019), 山东的归来庄金矿也与基性岩有着密切的关系(于学峰等, 2010), 同期的宁芜玢岩铁矿带(陈毓川, 1986; 余金杰和毛景文, 2002a, b; 余金杰等, 2007; 段超等,

2010)是最重要的基性岩有关的矿床;碳酸岩有关的矿床则以内蒙古巴尔哲含稀土铌钽碱性岩矿床(Qiu et al., 2019)、山东郯山(微山)碳酸岩-碱性杂岩稀土矿床(梁雨薇等, 2017)最为著名。实质上,这套与深源成因有关的岩浆作用,与金和铂族元素-铼的富集有着不同程度的关系,山东郯山碱性杂岩中的黄铁矿富集铂族元素等(曾普胜等, 2020)、归来庄基性岩脉中不仅富金,还含极高的碲(Te)(于学峰等, 2010),均有幔源流体的属性。

3.2 硅质大火成岩省有关的矿产

中国东部燕山期硅质大火成岩省(SLIPs)是中国东部燕山期成矿的摇篮。简要归纳前人所做的有关燕山期的岩石学-矿床学工作,按①长白山—千山岩带、②大兴安岭岩带、③太行山成矿带、④鲁

东沿海杂岩带、⑤秦岭—大别成矿带、⑥浙闽粤杂岩带和⑦湘黔桂钾镁煌斑岩-碱性杂岩成岩成矿带等七个成岩成矿带(表2)统计典型矿床(岩体)的时代,可以发现,燕山期岩浆活动的时代跨度从~150 Ma开始,延续到~100 Ma,延续时段在50 Ma以上,向西部滇黔桂一带甚至延续到~80 Ma(毛景文等, 2005)。但出现两个成矿的峰期,即139 Ma和121 Ma(图8)。从表2统计可以发现,尽管各个成岩-成矿带的时代均为燕山期,并且与同期的岩浆岩类有关,其中硅质大火成岩省(图6)占据更大的空间范围,远大于深源岩浆的金伯利岩-钾镁煌斑岩-橄榄岩-碳酸岩带(图5)。不同成矿带因基底性质、剥蚀程度等因素差异,各带内的优势矿种有所不同,多数矿床都产于大火成岩省岩浆作用的管道

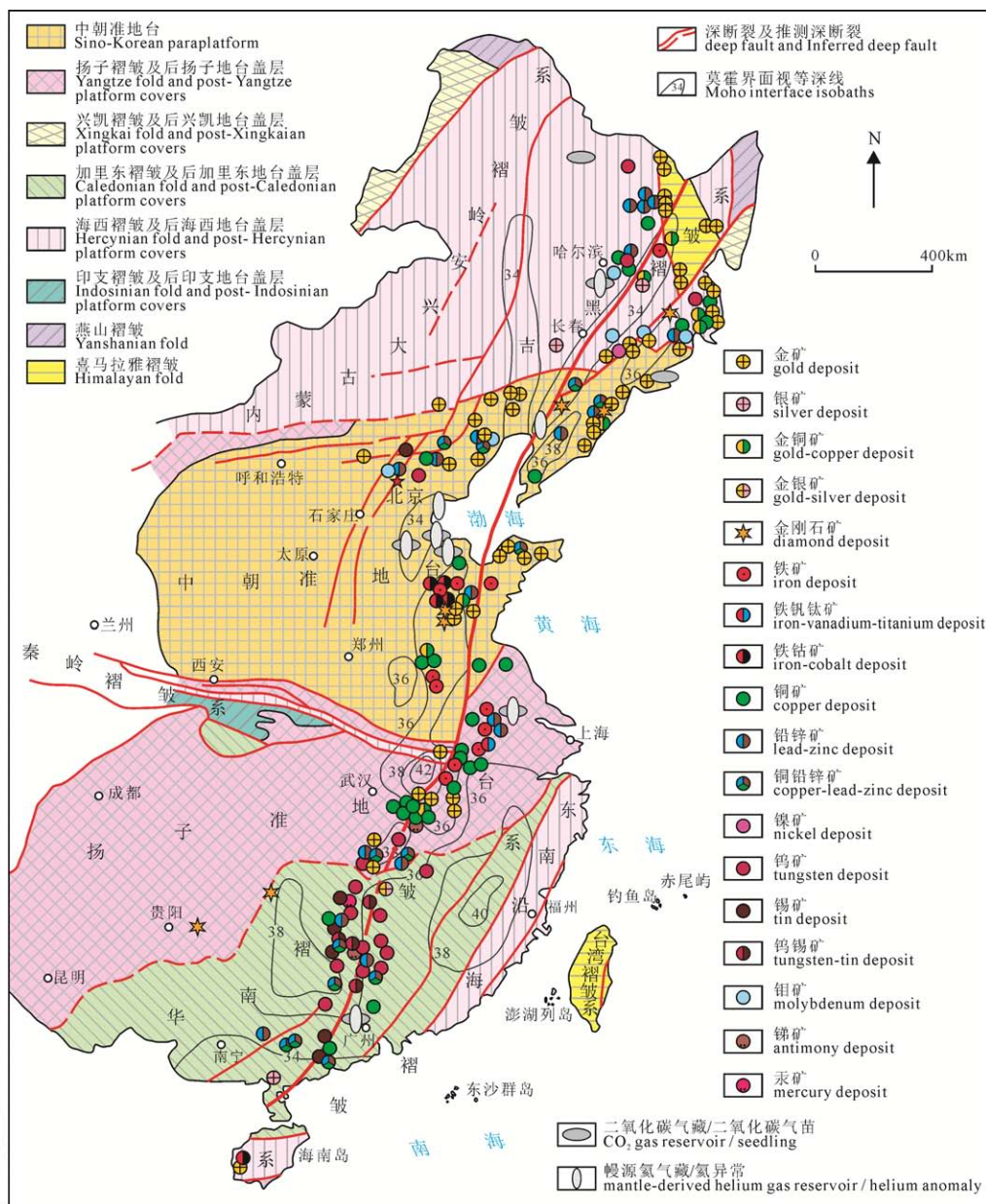


图7 郯庐断裂两侧矿产分布略图(据郭文魁等, 1982; 赫英等, 2002; 曾普胜等, 2020 综合编制)
Fig. 7 Simplified map showing the distribution of mineral resources of the Tan-Lu fault belt (compiled from GUO et al., 1982; HE et al., 2002; ZENG et al., 2020)

表 2 中国东部燕山期岩浆岩和矿产形成时代一览表
Table 2 Consensus of the forming ages of the igneous rocks and mineral resources in eastern China

序号	岩(矿)带	岩体(矿体)名称	测年对象	形成时代/Ma	资料来源
1	长白山—千山岩带 ①	二道沟金矿	绢云母	140.6±2.8	庞奖励和裴榆卓, 1997
2		瓦房店金伯利岩管	金伯利岩	138.1±1.9	丁俊英等, 2016
3		宝盖沟锡矿	云母	138.6	王国政, 2002
4		大井锡多金属矿	绢云母	138.3	毛景文等, 2005
5		黄岗锡铁矿	钾长石	137±3	Ishihara et al., 2001
6		小寺沟铜(钼)矿	辉钼矿	134±3	黄典豪等, 1994
7	大兴安岭岩(矿)带 ②	巴尔哲稀土矿	含矿花岗岩	127	赵一鸣等, 1994
			Ia 型锆石(振荡环带)	127.2±1.3	Qiu et al., 2019
			Ib 型锆石(CL 更暗, 分带不规则)	125.4±0.7	Qiu et al., 2019
			II 型锆石 (岩浆-热液转换期)	124.9±0.6	Qiu et al., 2019
			热液独居石	122.8±0.6	Qiu et al., 2019
8	太行山成矿带③	排山楼金矿	黑云母	124.2±0.4	骆辉和赵运起, 1997
9		五龙金矿	石英	120±3	魏俊浩等, 2001
10		排山楼金矿	金矿	120	王时麒和汤葵联, 1994
11		蔡家营铅锌矿	伴生石英脉	119.1	黄典豪等, 1992
12		堡子湾铜矿	石英	142.5±0.5	朱翠伊等, 2002
13		熊耳山金矿	金矿	120.8	陈衍景和富士谷, 1992
14		铜井金矿	金矿	128.6±3.6	李洪奎等, 2011
15		玲珑金矿	黄铁矿流体包裹体	123±4	Yang and Zhou, 2001
16		仓上金矿	绢云母	121.3±0.2	张连昌等, 2002
17		蒙阴	金伯利岩	121~79	褚志远等, 2019
18		新城金矿	绢云母	120.7±0.3	李厚民等, 2003
19	鲁东沿海杂岩带④ (含蒙阴金伯利 岩带⑦)	望儿山金矿	绢云母	120.6±0.7	李厚民等, 2003
20		焦家金矿	绢云母	120.5±0.3	李厚民等, 2003
21		乳山金矿	绢英岩	118±0.6	张德全等, 1995
22		彭家奋金矿	石英	118.4±0.6	张连昌等, 2002
23		邓格庄金矿	金矿	117.5	应汉龙, 1994
24		大庄子金矿	石英	117.4±0.6	张连昌等, 2002
25		东季金矿	钾长石	116.1±0.3	李厚民等, 2003
26		郗山含霓辉石石英正长 岩碳酸岩稀土矿	锆石	122.4±2.0	梁雨薇等, 2017
27	秦岭—大别成矿带 ⑤	上房沟钼矿	辉钼矿	143.8±2.1	毛景文等, 2005
28		南泥湖钼矿	辉钼矿	141.8±2.1	毛景文等, 2005
29		铜矿里铜钼矿	辉钼矿	141.1±1.6	毛景文等, 2005
30		金堆城钼矿	辉钼矿	131±4	黄典豪等, 1994
31		雷门沟钼矿	辉钼矿	131.9±2.0	毛景文等, 2005
32		小秦岭金矿	黑云母	128.3±0.3	王义天等, 2002
33		祁雨沟金矿	钾长石	125±3	王义天等, 2001
35	闽粤赣浙苏皖岩带 ⑥	朱溪钨铜矿	白钨矿	144±5	刘善宝等, 2017
36		沙滩角铜钼矿	辉钼矿	140.7±1.6	毛景文等, 2005
37		城门山铜矿	辉钼矿	139±3	吴良士和邹晓秋, 1997
38		南阳山铜矿	辉钼矿	139.3±1.6	毛景文等, 2005
39		大团山铜矿	辉钼矿	139.1±2.7	毛景文等, 2005
40		龙虎山铜矿	辉钼矿	139.0±0.3	毛景文等, 2005
41		老鸦岭铜矿	辉钼矿	139.0±0.3	谢智等, 2002
42		月山铜矿	辉钼矿	138.0±2.5	毛景文等, 2005
43		安庆铜矿	辉钼矿	137.9±1.5	毛景文等, 2005
44		金口岭铜矿	辉钼矿	137.0±1.7	蒙义峰等, 2004
45		大湖塘钼矿	辉钼矿	140.9±3.6	丰成友等, 2012

续表 2

序号	岩(矿)带	岩体(矿体)名称	测年对象	形成时代/Ma	资料来源
46	闽粤赣浙苏皖岩带 ⑥	西华山钨矿	黑钨矿	139.2±2.8	李华芹等, 1992
47		岩背锡矿	含矿花岗斑岩	128.1±3.3	梅玉萍等, 2007
48		桃村铁矿	钠长石	124.9±0.3	余金杰和毛景文, 2002a
49		梅山铁矿	钠长石	122.9±0.2	余金杰和毛景文, 2002a
50		鹿井铀矿	铀矿	116.4	张万良等, 2007
51		相山铀矿	铀矿	115±0.6	范洪海等, 2003
52		银山多金属矿	辉钼矿	112.6±1.3	徐晓春等, 2009
53		安基山铜矿	辉钼矿	108±2	王立本等, 1997
54		铜山铜矿	辉钼矿	106±3	王立本等, 1997
55		紫金山	似斑状花岗闪长岩	101.8±1.5	黎敦朋等, 2016
56	湘黔桂钾镁煌斑岩- 碱性杂岩成岩 成矿带⑧	宁乡云影窝岩管	钾镁煌斑岩	101.6±5.1	林玮鹏等, 2011
57		马坪岩体	钾镁煌斑岩	192~147	杨毓红等, 2021
58		水银洞金矿	金矿	134~136	Su et al., 2009
59		泥堡金矿	金矿	122~126	刘平等, 2006

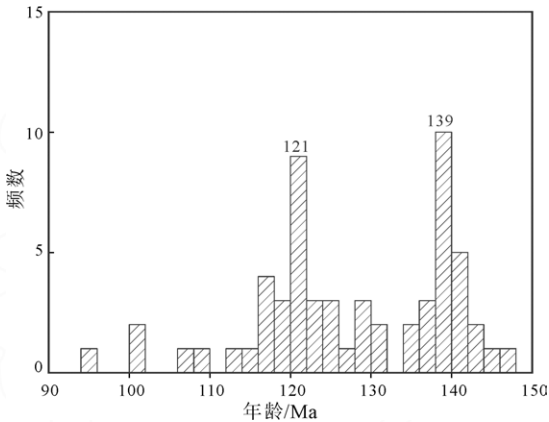


图 8 燕山期岩浆活动与成矿事件年龄统计直方图
(数据来自于表 2)

Fig. 8 Statistical histogram showing age of Magmatic activity and ore-forming event in Yanshanian (data from Table 2)

系统(plumbing systems)中, 且浅成相占多数, 仅个别(如山东郯山稀土矿)产出于深成相中。各成岩-成矿带优势矿种如下:

长白山—千山岩浆成矿带①: 优势矿种为金-多金属、铀-油气。其南部辽南瓦房店金伯利岩带是中国金刚石资源主要集中区(付海涛, 2020)。应当指出, 该带西侧的松辽盆地(含开鲁盆地)因覆盖而岩体出露较少, 恰好成为铀、锂、钾等战略性新兴矿产和油气的聚集区。

大兴安岭岩带②: 大兴安岭岩带内的优势矿种为金-铜-钼-多金属矿和铀-锂-钾等新能源矿产。大兴安岭北坡以乌奴格吐山钼矿、迪彦钦阿木钼矿、甲乌拉银铅锌矿等为代表, 二连盆地的铀-油气资源也很重要, 该带断续可以延续到北山—吐哈盆地(聂逢君等, 2015; Nie et al., 2020); 其南坡东南侧开鲁盆地内有碱性火山(凝灰)岩-辉绿岩脉等出露的地区的铀-锂-钾具有重要意义(聂逢君等, 2017)。

太行山成矿带③: 优势矿种为金-铜矿。太行山

金矿带是我国重要的金矿产区, 河南上宫金矿、熊耳金矿、河北土岭-石湖金矿等为代表。该带内的金伯利岩-钾镁煌斑岩分布相对密集, 从山西大同-河南鹤壁的广大空间内, 对寻找金-铂族元素有指示意义。

鲁东沿海杂岩带④(含蒙阴金伯利岩带⑦): 优势矿产为金-铀-稀土-铂族元素、金刚石。燕山期最重要的当属金矿, 胶东金矿带(宋明春等, 2020)、鲁西归来庄金矿带(于学峰等, 2010)等为代表, 鲁西郯山稀土矿(铂族元素)(梁雨薇等, 2017; 曾普胜等, 2020)也很具代表性。蒙阴含金刚石金伯利岩带的资源量在中国仅次于辽宁瓦房店岩带的金刚石集中区。

秦岭—大别成矿带⑤: 最优势矿种是钼-金-铜。金堆城、南泥湖等钼矿(黄典豪等, 1994, 1996; 毛景文等, 2005)最具的代表性。小秦岭、祁雨沟等金矿(王义天等, 2001, 2002)也很重要。该带内的与钼矿紧密共生的铼最具价值。

浙闽粤杂岩带⑥: 优势矿种钨-锡-铋钼-铜-金-银, 及锂铷铯-萤石(王登红等, 2004)。南岭钨锡成矿带是全球最重要的钨锡矿产区, 该带内钨锡-共(伴)生的铋钼战略地位重要。福建紫金山等铜金矿(黎敦朋等, 2016)闽赣苏浙地区的云母-伟晶岩型铷铯矿产以及广泛分布的萤石矿战略地位极为重要, 是中国工业企业“就地取材”重要原材料基地。铷矿主要分布在江南隆起东段、武功山—北武夷山、南岭中段、浙中-武夷山等稀有金属成矿带(孙艳等, 2019)。该带内新兴产业矿产萤石也极为重要(方乙, 2014; 成功和邱献引, 2013)。

湘黔桂钾镁煌斑岩-碱性杂岩成岩成矿带⑧: 该带位于东南沿海成矿带的西侧, 是被新生代太平洋构造域向北西挤压逆冲推覆的部分, 其成矿优势矿种保持整个热液系统顶部的低温系统部分。燕山

期优势矿种为深断裂控制金刚石、金(-汞-铊)等。马坪岩管、宁乡云影窝岩管等仍是金刚石突破的指示(宋瑞祥, 2013; 黄远成等, 2015)。最值得注意的是, 该带内从湘西到黔西南的深断裂带及其两侧, 金矿的成矿潜力巨大, 水银洞金矿(Su et al., 2009; 邱小平等, 2021)、泥堡金矿(刘平等, 2006)等金(伴生汞铊)“低温热液”成矿带潜力巨大(涂光炽, 2002), 并且一些“分散元素”铊、镉、锗等可以在这个低温系统中超常富集成独立矿床(涂光炽, 2004)。

需注意的是, 以深源岩浆岩为中心, 通过硅质大火成岩省向两侧过渡到(火山岩)盆地, 是油气资源、锂钾(卤水)、煤等能源矿产聚集的理想地段。从南岭火山岩盆地、江汉盆地、渤海湾盆地、松辽盆地, 再转现近东西向的二连盆地(甚至可延续到北山—吐哈盆地), 均是铀矿、钾锂(卤水)、油气、煤成矿的主要聚集区带(张万良, 2007; 李延河等, 2016; Nie et al., 2020), 对中国具有重要的战略价值。

4 中国东部燕山期大火成岩省的环境效应——优质的成土母岩

除了控制中国东部的构造轮廓和地形地貌之外, 燕山期大火成岩省形成的面型分布的硅质大火成岩省(SLIPs), 经后期剥蚀, 上部地层(包括曾经覆盖的碱性流纹岩等)均被去除, 露出大面积分布的花岗岩分布区, 集中分布在南岭的东南丘陵地区、胶东地区、辽东—长白山、小兴安岭、大兴安岭、二连浩特(向西延至北山—东天山)地区, 由于这些花岗岩类本身富含 K_2O 、 P_2O_5 等主量元素钾平均为 4.14%, 磷平均为 0.073%(原始数据据迟清华和鄢明才, 2007), 分别是地壳平均值(K_2O 2.45%, P_2O_5 0.06%, 鄢明才等, 1997)的 1.7 倍和 1.22 倍, 稀土元素(总量 209×10^{-6})等也显著高于中国东部上地壳平均值。因此, 对于新形成的土壤, 保持着较高的钾、磷、稀土等营养元素, 适合植被生长, 有利于生物多样性的保持和维护, 作为农产品种植区则是优质农产品的基础条件之一。

5 讨论

5.1 中国东部燕山期大火成岩省与全球的一致性

中国东部燕山期大火成岩省处于太平洋西北岸, 活动高峰时代为 139 Ma 和 121 Ma(图 8), 时代上与昂通—爪哇、凯尔盖伦等大洋高原及非洲南部陆上的大火成岩省(图 9)可以对比, 金刚石的形成可与南非的含金金刚石金伯利岩群对比(Larson and Kincaid, 1996)。前人已经注意到(Larson and Kincaid, 1996; 王登红, 1998), 太平洋西岸的南非地区的 ~120 Ma 大规模岩浆作用及非洲金伯利岩的形成与

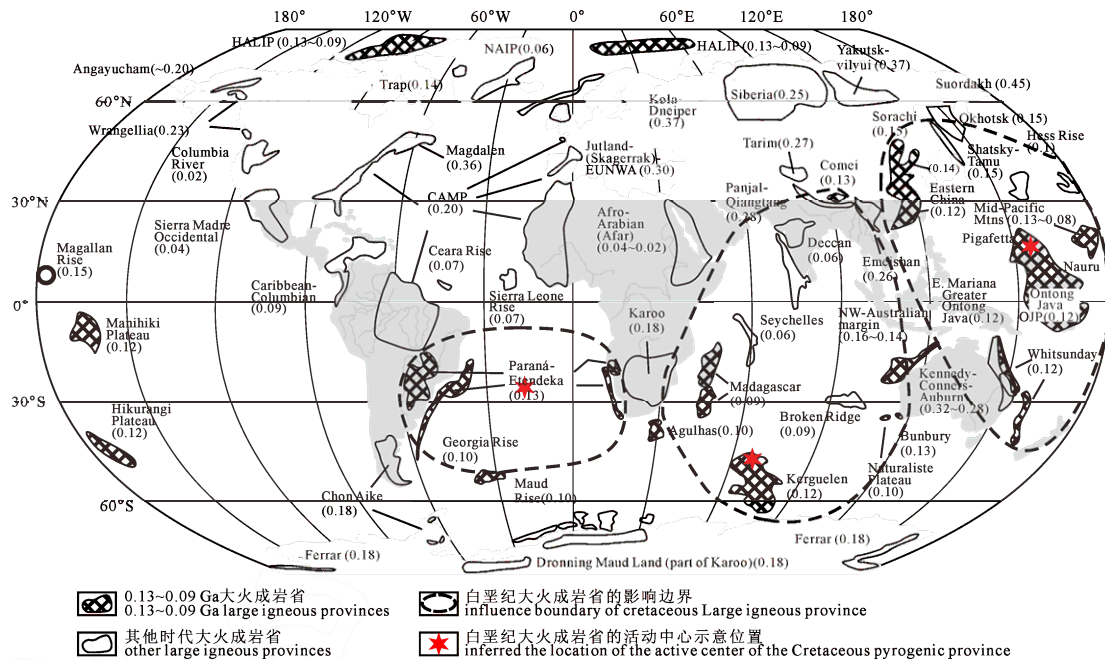
太平洋中部昂通—爪哇和南印度洋凯尔盖伦的 ~120 Ma 大火成岩省活动有关。与此相同的是, 中国东部郯庐断裂带内也存在 ~120 Ma 的含金金刚石金伯利岩群(褚志远等, 2019)。据此分析, 南非东侧 ~120 Ma 的含金金刚石金伯利岩, 与中国东部燕山期 ~120 Ma 的大火成岩省及其含金金刚石金伯利岩-钾镁煌斑岩-硅质大火成岩省, 均应属与围绕早期的太平洋内的昂通-爪哇/凯尔盖伦大火成岩省(海底高原)的边缘标志部分——具有金伯利岩-钾镁煌斑岩产出部分(Ernst, 2014)。包括南非东侧—中国东部在内的太平洋大火成岩省, 在全球尺度, 与此相对的大火成岩省则是非洲与南美之间的帕兰纳—伊登德卡(Paranna-Etendeka)大火成岩省, 也是南美从非洲大陆分离出来的根本原因, 如同华北克拉通的伸展破坏也同时发生在早白垩世(杨进辉等, 2021; 朱光等, 2021)一样。这种破坏的来源正式大火成岩省在全球尺度作用造成的, 影响深源而宏大。作用的大火成岩省中心可能会随时间变化, 从太平洋的昂通爪哇转移到南印度洋的凯尔盖伦(Kerguelen)(Coffin et al., 2002) (图 9)。

硅质大火成岩省的形成: 金伯利岩/钾镁煌斑岩带等“边缘标志”的弧形内侧, 持续的深源岩浆与浅部地壳长时期作用, 均可能产生硅质大火成岩省, 这就导致了我国东部硅质大火成岩省的形成: 中国东部, 无论华南还是华北, 广泛地分布花岗岩和碱性流纹岩-粗面岩, 这类硅质岩浆作用不同于岛弧带的闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩系列岩石, 而与美国西部的 St. Francois 地体的花岗岩类(Kisvarsanyi, 1980)可比, 这类大面积分布的硅质作用被称为“硅质大火成岩省”(Silicic Large Igneous Province, SLIP), 与金伯利岩-碳酸岩等深源岩浆作用有着高度的关联(Ernst, 2014)。

5.2 中国东部扬子地台与华北地台的相同与不同

岩性组合及形成时代相同, 张压-剥蚀程度的不同。

华北的金伯利岩带和扬子的钾镁煌斑岩带均被看作是加里东期的岩浆作用, 华北金伯利岩之前获得的年龄为加里东期(490 ~ 450 Ma, 池际尚等, 1996; 张宏福和杨岳衡, 2007), 与扬子地区湘黔钾镁煌斑岩带早期获得的加里东期年龄(503 ~ 435 Ma, 池际尚等, 1996; 方维萱等, 2002)相近。然而, 随着近年来工作的不断深入, 华北含金金刚石金伯利岩带的年龄值得进一步商榷, 蒙阴地区含金金刚石金伯利岩带的岩脉传切了“更早”的辉绿岩脉, 而这套辉绿岩脉的年龄准确地限定为白垩纪(117 ~ 121 Ma, 褚志远等, 2019); 类似地, 扬子湘黔钾镁煌斑岩带的年龄也被限定在白垩纪, 宁乡云影窝含金金刚石的



CAMP—中部大西洋岩浆区; HALIP—高北大火成岩省; NAIP—北大西洋火成岩省; OJP—昂通—爪哇高原。地图是罗宾逊投影。

CAMP—Central Atlantic Magmatic Province; HALIP—High Arctic Large Igneous Province; NAIP—North Atlantic Igneous Province; OJP—Ontong Java plateau. Maps are in Robinson projection.

图9 全球 290~0 Ma 大火成岩省(LIPs)和硅质大火成岩省(SLIPs)随时间的示意图分布(Ernst, 2014)

Fig. 9 Global maps showing the schematic distribution of 290–0 Ma LIPs and SLIPs through time(Ernst, 2014)

钾镁煌斑岩管的年龄为白垩纪((101.6±5.1) Ma, 林玮鹏等, 2011), 与湖南常德理公港的含原地金刚石的凝灰质角砾岩地层为白垩纪(杨献忠等, 2019)在时代上吻合。这似乎表明, 无论华北地台还是扬子地台, 与金刚石有关的这类深源岩浆岩, 测定早先形成的矿物(如金云母、钙钛矿、金刚石等), 其年龄值均为加里东期, 而测定具有爆发期或侵入期锆石年龄, 获得的年龄则为燕山晚期(白垩纪), 并且可从同层位的含金刚石地层(如理公港地区含金刚石凝灰质角砾岩)得到验证, 表明早白垩世是金刚石形成关键时期, 与南非地区的含金刚石金伯利岩的时代~120 Ma(Larson and Kincaid, 1996; 王登红, 1998)。这表明, 早期(如加里东期)结晶矿物金刚石、钙钛矿、金云母、镁铝榴石等的金伯利岩-钾镁煌斑岩-含金刚石碱性橄榄玄武岩等岩石组合, 真正上升到华北—扬子地表, 是早白垩世才完成的。即华北—扬子地区的含金刚石金伯利岩-钾镁煌斑岩-橄榄玄武岩是加里东期就在大陆岩石圈龙骨(keel)底部的深处结晶生成, 而在白垩纪时期构造条件具备时, 才快速上升到地表——“早成晚升”。这就可合理地理解中国东部这类深源岩浆岩的看似“杂乱”, 实则必然(白垩纪深源岩浆必定会携带早古生代等时期形成的“捕虏晶”上侵)的同位素测年结果。

然而, 华北地台与扬子地台的差异也是明显的。尽管湖南西部—贵州东北部的钾镁煌斑岩带(间夹金伯利岩, 董斌等, 2006)也遭受剥蚀, 但其存留

地层的时代最老地层为新元古界板溪群(Pt₃B)出现在宁乡一带, 贵州镇远马坪一带的更浅些, 为上元古界灯影组(Z₂dy)—寒武系清虚洞组(C₁q); 而华北地台, 蒙阴地区剥蚀出露地层为新太古界泰山群(Ar₃T), 瓦房店地区为元古代桥头组(Pt₃q)。据此分析, 华北地台和扬子地台的(含金刚石)金伯利岩/钾镁煌斑岩/橄榄玄武岩带, 可能为同一时期同一岩浆事件的产物, 差异的原因在于: 金伯利岩-钾镁煌斑岩带形成之后, 华北的岩浆带因伸展而剥蚀强烈, 可剥露出太古代地层; 而扬子的岩浆带因挤压而剥蚀相对弱些, 只剥露到中元古代板溪群。从蒙阴的太古代泰山群的岩管中还可有工业品位的原生金刚石岩管, 湘黔地区的岩管深部金刚石潜力尚还值得进一步勘探。

华北金伯利岩带(间夹钾镁煌斑岩, 王玉峰等, 2019)和扬子钾镁煌斑岩带(间夹金伯利岩)均属加里东期就已生成, 而在燕山期才具备构造条件而快速上升到地表, 局部可含金刚石等早期宝贵的“捕虏晶”, 同时携带有珍贵的地球深部信息(吕青等, 2021; 王十安等, 2021; 李睿哲等, 2021), 是中国东部大火成岩省的重要组成部分。

5.3 中国大火成岩省与含金刚石金伯利岩/钾镁煌斑岩/碳酸岩

从全球情况看, 含金刚石的金伯利岩带/钾镁煌斑岩带±碳酸岩常常分布在距大火成岩省的中心~1000 km 的边缘环上, 代表了一个大火成岩省的最

强活动的“边缘标志”(Ernst, 2014),中国东部的金伯利岩-钾镁煌斑岩-碱性橄榄玄武岩-碳酸岩带大致可以代表太平洋上的昂通爪哇(Ongtong-Java)大火成岩省(Ingle and Coffin, 2004)在太平洋西北岸中国大陆上强烈活动的边缘标志。中国东部的燕山期(~120 Ma)含金刚石金伯利岩-钾镁煌斑岩带,与非洲南部的~120 Ma 的含金刚石金伯利岩(Larson and Kincaid, 1996)一起,构成太平洋大火成岩省边缘标志的一部分,被后来进一步活动的大火成岩省的岩浆推挤扩展和改造,变成现今相距遥远的残片,但仍是白垩纪时期(~120 Ma)大火成岩省活动记录的重要组成部分,是地幔对流结果(邓晋福等, 2000, 2005, 2007a, b; Mao and Mao, 2020)。

与此相对的情形是,中国的多个大火成岩省,如塔里木、峨眉山、措美、潘佳尔等大火成岩省的“边缘标志”——金伯利岩/钾镁煌斑岩±碳酸岩,被发现者少的可怜,到目前为止,仅有新疆巴楚瓦基里塔格金伯利岩(李友枝等, 2000)和克里阳钾镁煌斑岩(柴凤梅, 2001)有少量报道,并且瓦基里塔格金伯利岩被识别为方解霞黄煌岩(aillikite)(Wang et al., 2021),一种经地幔交代的金伯利岩的变种,因上升相对缓慢而遭受交代,因而新疆瓦基里塔格的“金伯利岩”金刚石含矿性差,这就合理解释了这个金伯利岩群金刚石找矿难以突破的真正原因,那么近似构造背景的“边缘标志带”上还应该能找到西伯利亚大火成岩省类似的含金刚石的岩管,才符合逻辑,这些作为边缘标志的金伯利岩/钾镁煌斑岩才是寻找金刚石渴望取得突破的“远景区”。而中国其他的大火成岩省,如峨眉山、措美大火成岩省等则几乎没有关于金伯利岩或钾镁煌斑岩的报道,然而这些大火成岩省应当有对应的 1000 km 的边缘标志——金伯利岩-钾镁煌斑岩带产出,金刚石及相关矿产也值得关注。

6 结论

通过以上研究可以得出以下认识和结论。

(1)与太平洋内巨型的大火成岩省昂通一爪哇(Ongtong-Java)同时代的中国东部燕山期(150—100 Ma 为主)大火成岩省,由深源的金伯利岩-钾镁煌斑岩-橄榄玄武岩-碳酸岩带和面型分布硅质大火成岩省(SLIPs)组成。

(2)中国东部燕山期大火成岩省控制着燕山期以来的中国的构造格局并塑造了中国东部地形地貌。

(3)中国东部燕山期大火成岩省控制着区内燕山期战略性关键矿产,深源者以金伯利岩-钾镁煌斑岩-橄榄玄武岩有关的金金刚石-铂族元素-金和碳酸岩-碱性杂岩有关的稀土-铍-铌钽等有关;而面型

分布的硅质大火成岩省的花岗岩类则主要与钨锡-铌钽-锂铷铯-萤石等战略性、新兴产业矿产关系密切。

(4)中国东部燕山期大火成岩省的岩浆活动提供的优质成土母岩,强烈影响着生态环境,土壤中丰富的钾-磷和微量元素,适合植被生长,有利于生物多样性的保持和维护,作为农产品种植区则是优质农产品的基础条件之一。

致谢: 特别感谢中国地质调查局发展研究中心冯艳芳博士提供的 1:250 万编图的基础地质资料的支持。感谢贵州 101 地质队杨光忠研究员、吴世光高工、湖南 413 地质队李帅总工在野外勘查工作中给予的帮助,感谢两位审稿专家提出的宝贵意见,以及国家地质实验测试中心各位老师的指导。

Acknowledgements:

This study was supported by Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. JYYWF20180101), China Geological Survey (Nos. DD20190589; DD20160220; DD20190703), and National Natural Science Foundation of China (No. 41072073).

参考文献:

- 蔡逸涛, 徐敏成, 施建斌, 杨献忠, 张洁, 康丛轩, 曹正琦, 董钟斗, 马玉广. 2019a. 安徽栏杆含金刚石基性岩中辉石及钛铁矿矿物化学特征[J]. 地质通报, 38(1): 1-13.
- 蔡逸涛, 张洁, 康丛轩, 杨献忠, 曹正琦, 董钟斗, 马玉广, 施建斌. 2019b. 安徽栏杆含金刚石基性岩中石榴子石矿物学特征[J]. 地质通报, 38(1): 110-120.
- 蔡逸涛, 张洁, 施建斌, 周琦忠, 马玉广, 刘吉强, 徐敏成, 万方来, 徐华, 肖丙建, 吴祥珂, 袁秋云. 2020. 华北克拉通南缘碱性基性岩金刚石成因探讨——来自红外光谱的证据[J]. 地质学报, 94(9): 2736-2747.
- 柴凤梅. 2001. 塔里木盆地西南缘钾镁煌斑岩岩石学特征及含矿性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 余星, 罗俊成, 何光玉, 林秀斌, 王清华. 2009. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点[J]. 新疆石油地质, 30(2): 179-182.
- 陈金勇, 范洪海, 王生云, 张闯, 赵敬洋, 耿瑞瑞. 2019a. 内蒙古扎鲁特旗巴尔哲超大型矿床控矿因素分析[J]. 地质力学学报, 25(1): 27-35.
- 陈金勇, 范洪海, 王生云, 张佳. 2019b. 内蒙古巴尔哲地区碱性花岗岩地球化学特征、年代学及地质意义[J]. 地质论评, 65(S1): 45-46.
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社.
- 陈毓川. 1986. 宁芜火山岩地区铁矿成矿规律、找矿标志、找矿方向及找矿方法(1976)[C]//中国地质科学院矿床地质研究所文集(18). 北京: 地质出版社: 68.
- 成功, 邱献引. 2013. 中国萤石矿床地质特征与成因综述[J]. 中国非金属矿工业导刊, (5): 47-52.

- 池际尚, 路凤香, 刘永顺, 胡士杰, 赵崇贺, 叶德隆, 郑建平, 赵磊, 张宏福, 江万. 1996. 中国原生金刚石成矿地质条件研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社: 148.
- 褚志远, 王伟德, 吕青, 刘卫东, 康丛轩, 王树星. 2019. 山东蒙阴坡里地区金伯利岩带形成时代——来自辉绿岩锆石 U-Pb 定年数据的证据[J]. 地质通报, 38(1): 44-50.
- 邓晋福, 刘厚祥, 赵海玲, 罗照华, 郭正府, 李玉文. 1996. 燕辽地区燕山期火成岩与造山模型[J]. 现代地质, 10(2): 137-148.
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山—深部过程[J]. 地质论评, 46(1): 41-48.
- 邓晋福, 莫宣学, FLOWER M F J, 苏尚国, 罗照华, 赵海玲, 赵志丹, 喻学惠, 刘翠. 2005. 白垩纪大火成岩省与地幔对流[J]. 地学前缘, 12(2): 217-221.
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 赵兴国, 周肃, 肖庆辉, 吴宗絮, 耿科. 2007a. 华北太行—燕山—辽西地区燕山期(J—K)造山过程与成矿作用[J]. 现代地质, 21(2): 232-240.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007b. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. 高校地质学报, 13(3): 392-402.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 苏尚国, 肖庆辉, 伍光英. 2015. 中国侵入岩大地构造图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社: 99.
- 丁俊英, 倪培, 朱仁智, 居易. 2016. 30 号、42 号、50 号、1 号金伯利岩管典型矿床研究报告[R]. 北京: 中国地质调查局: 166.
- 董斌, 陈明珊, 肖湘辉. 2006. 湖南原生金刚石成矿地质背景及找矿方向[J]. 矿床地质, 25(S1): 337-340.
- 段超, 李延河, 毛景文, 张成, 刘佳林. 2010. 宁芜火山岩盆地凹山玢岩型铁矿床研究进展[J]. 矿床地质, 29(S1): 73-74.
- 范洪海, 凌洪飞, 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 姜耀辉. 2003. 相山铀矿田成矿机理研究[J]. 铀矿地质, 19(4): 208-213.
- 方维萱, 胡瑞忠, 苏文超, 肖加飞, 漆亮, 蒋国豪. 2002. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. 科学通报, 47(4): 307-312.
- 方乙. 2014. 中国东部地区萤石矿隐伏矿体定位预测技术方法组合研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 丰成友, 张德全, 项新葵, 李大新, 瞿泓滢, 刘建楠, 肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. 岩石学报, 28(12): 3858-3868.
- 付海涛. 2020. 辽宁瓦房店金刚石矿田金伯利岩侵位机制分析[J]. 地质学报, 94(9): 2640-2649.
- 郭文魁, 刘兰笙, 俞志杰. 1982. 中国东部成矿域与成矿期的基本特征[J]. 矿床地质, 1(1): 1-14.
- 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 罗震宇, 王康明. 2005. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度[J]. 大地构造与成矿学, 29(3): 316-320.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王雅玫, 王康明, 沙绍礼. 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义[J]. 地质论评, 52(1): 30-37.
- 赫英, 张战军, 毛景文, 张荣华. 2002. 初论庐庐断裂的成藏成矿效应[J]. 大地构造与成矿学, 26(1): 10-15.
- 侯广顺, 李明, 吴成斌, 庞绪成, 徐亚娟, 智云宝. 2015. 鹤壁地区金伯利岩锆石年代学研究及其地质意义[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 34(6): 777-783.
- 侯增谦, 陈文, 卢记仁. 2006. 四川峨嵋大火成岩省 259Ma 大陆溢流玄武岩喷发事件: 来自激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年证据[J]. 地质学报, (8): 1130.
- 胡劲平, 蒋少涌. 2010. 宁芜盆地浅成侵入岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究及其地质意义[J]. 高校地质学报, 16(3): 294-308.
- 黄典豪, 丁孝石, 吴澄宇, 张长江. 1992. 蔡家营铅-锌-银矿[M]. 北京: 地质出版社: 15-17.
- 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 刘兰笙, 孙亚莉, 邹晓秋. 1996. 华北地台钼(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 15(4): 365-373.
- 黄典豪, 吴澄宇, 杜安道, 何红蓼. 1994. 东秦岭地区钼矿床的铼-钨同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 13(3): 221-230.
- 黄友波, 周琦忠, 张琪, 冯学知, 王国强, 张凤鸣, 蔡逸涛. 2019. 江苏徐州塔山橄榄玄武玢岩地球化学特征及其与金刚石成因关系[J]. 地质通报, 38(1): 132-142.
- 黄远成, 石睿, 林泽渊, 李永刚. 2015. 贵州镇远苍蒲塘钾镁煌斑岩管发现及找矿意义[J]. 贵州地质, 32(1): 32-36+46.
- 江万. 1995. 贵州东部镇远地区钾镁煌斑岩的矿物学和岩石学研究[J]. 现代地质, 9(3): 351-358.
- 焦润成, 贺瑾瑞, 王荣荣, 王强强, 回广骥. 2016. 北京北部千家店土城子组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年及启示[J]. 中国地质, 43(5): 1750-1760.
- 李斌, 陈井胜, 刘森, 杨帆, 吴振, 杜继宇. 2019. 辽西髻髻山组的形成时代及地球化学特征[J]. 地质论评, 65(S1): 63-64.
- 黎敦朋, 邱小平, 张文慧, 刘文元, 于波. 2016. 福建紫金山矿田深部似斑状花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 和单矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 40(4): 783-797.
- 李红阳, 卢记仁, 侯增谦, 杨竹森, 高振敏, 高永丰, 王立峰. 2002. 峨眉地幔柱与超大型矿床[J]. 矿床地质, 21(S1): 148-151.
- 李洪奎, 耿科, 李逸凡, 嵯传源. 2011. 沂南县铜井金矿床锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(3): 497-503.
- 李厚民, 毛景文, 沈远超, 刘铁兵, 张连昌. 2003. 胶西北东季金矿床钾长石和石英的 Ar-Ar 年龄及其意义[J]. 矿床地质, 22(1): 72-77.
- 李华芹, 刘家齐, 杜国民, 魏林. 1992. 内生金属矿床成矿作用年代学研究——以西华山钨矿床为例[J]. 科学通报, (12): 1109-1112.
- 李睿哲, 曾普胜, 王十安, 刘斯文, 温利刚, 赵九江. 2021. 钾镁煌斑岩: 优质金刚石主要载体与幔源流体活动标志[J]. 地球学报, 42(6): 761-770.
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. 地学前缘, 17(4): 64-89.
- 李延河, 段超, 赵悦, 裴浩翔, 任顺利. 2016. 氧化还原障在热液铀矿成矿中的作用[J]. 地质学报, 90(2): 201-218.

- 李友枝, 赵磊, 何明跃, 帕拉提·阿布都卡迪尔, 李建哲. 2000. 西昆仑克里阳地区钾镁煌斑岩岩石学特征及其意义[J]. 现代地质, 14(4): 385-391.
- 李佑国, 莫宣学, 赵崇贺. 1991. 山西大同采凉山钾镁煌斑岩的地质与岩石学特征[J]. 地质科技情报, 10(S1): 29-36.
- 李子云, 马文运. 1993. 宁乡县云影窝含金刚石钾镁煌斑岩地质特征[J]. 湖南地质, 12(4): 221-225.
- 梁雨薇, 赖勇, 胡弘, 张丰. 2017. 山东省微山稀土矿正长岩类锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 53(4): 652-666.
- 林玮鹏, 丘志力, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬, 龚盛玮. 2009. 湖南宁乡 V 号岩管煌斑岩的岩石地球化学特征[J]. 资源调查与环境, 30(3): 180-187.
- 林玮鹏, 丘志力, 董斌, 梁伟章, 陈华, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬. 2011. 湖南宁乡钾镁煌斑岩及相关岩石重砂锆石地球化学特征、U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 50(3): 105-111.
- 刘观亮, 汪雄武, 吕学森. 1993. 大洪山钾镁煌斑岩[M]. 北京: 地质出版社: 186.
- 刘鹏, 程彦博, 王小雨, 张翔, 高风颖, 廖正国. 2015. 粤东桃子窝锡矿区火山-次火山岩和花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(5): 620-636.
- 刘平, 李沛刚, 马荣, 韩忠华, 杨光龙, 叶德书. 2006. 一个与火山碎屑岩和热液喷发有关的金矿床——贵州泥堡金矿[J]. 矿床地质, 25(1): 101-110.
- 刘善宝, 刘战庆, 王成辉, 王登红, 赵正, 胡正华. 2017. 赣东北朱溪超大型钨矿床中白钨矿的稀土、微量元素地球化学特征及其 Sm-Nd 定年[J]. 地学前缘, 24(5): 17-30.
- 路凤香. 2008. 金伯利岩与金刚石[J]. 自然杂志, 30(2): 63-66+60.
- 骆辉, 赵运起. 1997. 辽宁阜新排山楼金矿地质和成矿作用[J]. 前寒武纪研究进展, 20(4): 13-24.
- 罗会文, 杨光树. 1989. 贵州省镇远地区钾镁煌斑岩岩石特征[J]. 岩石矿物学杂志, 8(2): 97-109.
- 吕青, 焦永鑫, 葛跃进, 肖丙建, 褚志远, 刘淑桢. 2021. 基于红外光谱-拉曼光谱研究山东郯城砂矿的金刚石及包裹体类型[J]. 地球学报, 42(6): 895-906.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景[J]. 岩石学报, 21(1): 171-190.
- 梅厚钧, 唐春景, 李荪蓉, 李永明, 张兴春, 卢登蓉, 张连昌. 1998. 中国的钾镁煌斑岩和金伯利岩与金刚石矿床生成[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 28(S2): 71-77.
- 梅玉萍, 李华芹, 王登红, 路远发, 杨红梅, 许建祥, 张家菁. 2007. 江西岩背斑岩锡矿的成岩成矿时代及其地质意义[J]. 地球学报, 28(5): 456-461.
- 蒙义峰, 杨竹森, 曾普胜, 徐文艺, 王训成. 2004. 铜陵矿集区成矿流体系统时限的初步厘定[J]. 矿床地质, 23(3): 271-280.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 严兆彬, 张成勇, 姜美珠, 杨建新, 旷文战, 康世虎, 申科峰. 2015. 内蒙古二连裂谷盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向[J]. 矿床地质, 34(4): 711-729.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J]. 地质通报, 36(10): 1850-1866.
- 庞奖励, 袁愉卓. 1997. 二道沟矿床绢云母的 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 矿物学报, (4): 442-447.
- 邱小平, 刘世川, 魏密. 黔西南水银洞爆破角砾岩筒与金元素超常富集[J]. 地球学报, 42(6): 849-858.
- 丘志力, 梁冬云, 王艳芬, 孙媛, 李榴芬. 2014. 巴尔哲碱性花岗岩锆石稀土微量元素、U-Pb 年龄及其成岩成矿指示[J]. 岩石学报, 30(6): 1757-1768.
- 饶红娟, 蔡逸涛, 杨献忠, 康丛轩, 石睿, 林泽渊. 2019. 贵州镇远马坪地区钾镁煌斑岩侵位模式及找矿前景[J]. 地质通报, 38(1): 76-92.
- 饶家荣. 1999. 湖南原生金刚石矿深部构造地质背景及成矿预测[J]. 湖南地质, 18(1): 21-28.
- 宋明春, 余西顺, 宋英听, 肖丙建, 周登诗, 高存山, 冯爱平. 2020. 山东省鲁西金刚石的类型、源区及区域壳幔演化背景[J]. 地质学报, 94(9): 2606-2625.
- 宋瑞祥. 2013. 中国金刚石矿床专论: 中国金刚石矿找矿与开发[M]. 北京: 地质出版社.
- 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 卢纪仁, 汪云亮, 张成江, 李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征及时限[J]. 地质学报, 4(4): 498-506.
- 孙艳, 王登红, 王成辉, 李建康, 赵芝, 王岩, 郭唯明. 2019. 我国铀矿成矿规律、新进展和找矿方向[J]. 地质学报, 93(6): 1231-1244.
- 童潜明. 1996. 沅水流域找原生金刚石工业矿床的意见[J]. 湖南地质, 15(1): 5-11.
- 涂光炽. 2002. 我国西南地区两个别具一格的成矿带(域)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 21(1): 1-2.
- 涂光炽. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社: 424.
- 王登红, 陈毓川, 陈文, 桑海清, 李华芹, 路远发, 陈开礼, 林枝茂. 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 地质学报, 78(1): 132-138+146.
- 王登红. 1998. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京: 地震出版社: 160.
- 王登红. 2001. 地幔柱的概念、分类、演化与大规模成矿——对中国西南部的探讨[J]. 地学前缘, 8(3): 67-72.
- 王国政. 2002. 宝盖沟锡矿——黑英岩钠长岩型高温热液矿床[J]. 地质与勘探, (2): 42-45.
- 王洪浩, 李江海, 张华添, 许丽, 李维波. 2016. 华北陆块中奥陶世绝对位置探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 46(1): 57-66.
- 王立本, 李克俭, 陈东. 1997. 安基山和铜山铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钼同位素年龄及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 16(2): 154-159.
- 王留海, 廖其放. 1989. 大洪山地区钾镁煌斑岩岩石特征[J]. 湖北地质, 3(2): 68-78.
- 王留海. 1991. 大洪山区钾镁煌斑岩的矿物特征及含矿性探讨[J]. 矿物岩石, 11(4): 51-56.
- 王取义. 1995. 江西安远莲花塘白榴黄长煌斑岩特征[J]. 江西地质, 9(4): 286-291.
- 王十安, 曾普胜, 刘斯文, 温利刚, 李睿哲, 赵九江. 2021. 金伯

- 利岩: 地球深部探测的重要探针[J]. 地球学报, 42(6): 749-759.
- 王时麒, 汤葵联. 1994. 内蒙赤峰安家营子金矿床成矿流体的物理化学条件研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 30(4): 446-452.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥, 叶安旺. 2002. 河南小秦岭金矿区 Q875 脉中深部矿化蚀变岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其意义[J]. 科学通报, 47(18): 1427-1431.
- 王义天, 毛景文, 卢欣祥. 2001. 嵩县祁雨沟金矿成矿时代的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学证据[J]. 地质论评, 47(5): 551-555.
- 王一先, 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铈铈矿床地球化学和成因[J]. 地球化学, 26(1): 24-35.
- 王玉峰, 周军, 王建平, 朱成河, 杨献忠. 2019. 山东省平邑县大井头钾镁煌斑岩地质特征及金刚石含矿性[J]. 地质通报, 38(1): 93-102.
- 魏俊浩, 刘丛强, 赵永鑫, 李志德. 2001. 辽宁五龙金矿主成矿阶段成矿持续时限[J]. 地质论评, 47(4): 433-437.
- 吴良士, 邹晓秋. 1997. 江西城门山铜矿铈-铈同位素年龄研究[J]. 矿床地质, 16(4): 376-381.
- 谢智, 孙卫东, 柴之芳, 陈江峰, 杜安道, 李春生, 毛雪瑛. 2002. 辉钼矿的 Os-Os 法与 Re-Os 法定年及结果比较[J]. 核技术, 25(12): 1013-1018.
- 邢光福, 冯益民. 2015. 中国火山岩大地构造图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社: 95.
- 邢光福, 卢清地, 陈荣, 张正义, 聂童春, 李龙明, 黄家龙, 林敏. 2008. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比[J]. 地质学报, 82(4): 451-463.
- 徐晓春, 楼金伟, 陆三明, 谢巧勤, 褚平利, 尹滔. 2009. 安徽金寨银山铜-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄测定[J]. 矿床地质, 28(5): 621-632.
- 徐义刚, 梅厚钧, 许继峰, 黄小龙, 王岳军, 钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因[J]. 科学通报, 48(4): 383-387.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 30(1): 1-9.
- 鄢明才, 迟清华, 顾铁新, 王春书. 1997. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 21(6): 451-459.
- 杨光忠, 李永刚, 张与伦, 罗邦良, 黄应均. 2019. 黔东钾镁煌斑岩分布控制因素及其侵位模式[J]. 地质通报, 38(1): 27-35.
- 杨光忠. 2013. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩产出控制因素浅析[J]. 地质与勘探, 49(4): 696-702.
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 曾庆栋, 赵亚楠, 王浩, 朱昱升. 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1401-1419.
- 杨树锋, 陈汉林, 董传万, 贾承造, 汪振国. 1996. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义[J]. 地球化学, 25(2): 121-128.
- 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万, 贾承造, 魏国齐. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义[J]. 高校地质学报, 11(4): 504-511.
- 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 励音骐, 余星, 李东旭, 孟立丰. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省[J]. 中国科学: 地球科学, 44(2): 187-199.
- 杨献忠, 蔡逸涛, 康丛轩, 黄光昭, 李帅, 向华. 2019. 湖南桃源理公港地区含金刚石沉凝灰岩的发现及其找矿意义[J]. 中国地质调查, 6(6): 56-62.
- 杨毓红, 黄艺, 刘荣, 张锡贵, 杨朝贵, 颜军, 叶春, 龚兴祥. 2021. 黔东南钾镁煌斑岩地球化学特征及指示意义[J]. 矿物学报, 41(3): 258-270.
- 叶德隆, 王群, 杨金香, 任迎新. 1991. 湖北大洪山南段的金伯利岩和钾镁煌斑岩[J]. 地质科技情报, 10(S1): 37-44+36.
- 应汉龙. 1994. 胶东金青顶、邓格庄金矿床含金石英的 ^{40}Ar / ^{39}Ar 快中子活化年龄[J]. 黄金科学技术, 2(4): 24-28.
- 于学峰, 唐好生, 韩作振, 李长有. 2010. 山东鄱山-龙宝山地区与碱性岩有关的稀土矿床地质特征及成因[J]. 地质学报, 84(3): 407-417.
- 余金杰, 毛景文. 2002a. 宁芜玢岩铁矿钠长石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年及意义[J]. 自然科学进展, 12(10): 53-57.
- 余金杰, 毛景文. 2002b. 宁芜玢岩铁矿磷灰石的稀土元素特征[J]. 矿床地质, 21(1): 65-73.
- 余金杰, 毛景文, 张长青. 2007. 地幔流体参与宁芜玢岩铁矿成矿——碳、锶同位素证据[J]. 自然科学进展, 17(9): 1216-1221.
- 曾普胜, 赵九江, 温利刚, 汪双清, 张小涛, 王十安. 2020. 郯庐断裂带山东段金伯利岩和碱性岩浆岩的深源特征矿物信息及其资源能源意义[J]. 地质学报, 94(9): 2626-2639.
- 张安棣. 1991. 金刚石找矿指示矿物研究及数据库[M]. 北京: 北京科技出版社: 1-162.
- 张德全, 徐洪林, 孙桂英. 1995. 山东邓格庄金矿与昆嵛山花岗岩的定位时代及其地质意义[J]. 地质论评, 41(5): 415-425.
- 张宏福, 杨岳衡. 2007. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(2): 285-294.
- 张连昌, 卢登蓉, 王淑荣, 梅厚钧. 1998. 山西大同钾镁煌斑岩地质地球化学特征[J]. 矿物岩石, 18(4): 31-37.
- 张连昌, 沈远超, 刘铁兵, 曾庆栋, 李光明, 李厚民. 2002. 山东胶莱盆地北缘金矿 Ar-Ar 法和 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 32(9): 727-734.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 李承东, 贾秀勤. 2007. 晚中生代中国东部高原北界探讨[J]. 岩石学报, 23(4): 689-700.
- 张旗, 王元龙, 金惟俊, 李承东. 2008. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. 地质通报, 27(9): 1404-1430.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 王元龙. 2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 16(2): 21-51.
- 张拴宏, 赵越. 2018. 华北克拉通北部 13.3~13.0 亿年基性大火成岩省与稀土-钕成矿事件[J]. 地学前缘, 25(5): 34-50.
- 张拴宏, 裴军令, 胡国辉, 张琪琪, 税国豪, 赵越. 2019. 大火成岩省与大规模黑色页岩沉积的成因联系及其意义[J]. 地质力学学报, 25(5): 920-931.
- 张万良. 2007. 华南红盆与铀矿保存[J]. 矿产与地质, 21(2): 118-121.
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全, 傅先政, 鲍修坡, 李鹤年, 艾永富. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿

模式[M]. 北京: 地震出版社: 1-234.

赵越, 宋彪, 张拴宏, 刘健. 2006. 北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义[J]. 地学前缘, 13(2): 184-190.

朱翠伊, 廖永骨, 卿敏, 韩旭. 2002. 山西堡子湾金矿成矿时代探讨[J]. 黄金地质, 8(1): 17-20.

朱光, 陆元超, 苏楠, 吴晓冬, 尹浩, 张帅, 谢成龙, 牛漫兰. 2021. 华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学[J]. 中国科学: 地球科学, 51(9): 1420-1443.

References:

- ALI J R, FITTON J G, HERZBERG C. 2010. Emeishan large igneous province (SW China) and the mantle-plume up-doming hypothesis[J]. *Journal of the Geological Society*, 167: 953-959.
- ARNDT N. 2003. Komatiites, kimberlites, and boninites[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 108(B6): 5-1-5-11.
- BRYAN S E, EWART A, STEPHENS C J, PARIANOS J, DOWNES P J. 2000. The Whitsunday Volcanic Province, Central Queensland, Australia: lithological and stratigraphic investigations of a silicic-dominated large igneous province[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99(1-4): 55-78.
- CAI Yi-tao, XU Min-cheng, SHI Jian-bin, YANG Xian-zhong, ZHANG Jie, KANG Cong-xuan, CAO Zheng-qi, DONG Zhong-dou, MA Yu-guang. 2019a. Mineral chemistry characteristics of clinopyroxene and ilmenite in basite of Lan'gan area, Anhui Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- CAI Yi-tao, ZHANG Jie, KANG Cong-xuan, YANG Xian-zhong, CAO Zheng-qi, DONG Zhong-dou, MA Yu-guang, SHI Jian-bin. 2019b. Mineral chemistry characteristics of garnets in diamondiferous basite of Lan'gan area, Anhui Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 110-120(in Chinese with English abstract).
- CAI Yi-tao, ZHANG Jie, SHI Jian-bin, ZHOU Qi-zhong, MA Yu-guang, LIU Ji-qiang, XU Min-cheng, WAN Fang-lai, XU Hua, XIAO Bing-jian, WU Xiang-ke, YUAN Qiu-yun. 2020. A discussion on the origin of basite type diamonds in the southern part of North China Craton: evidences from FTIR[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 2736-2747(in Chinese with English abstract).
- CAMPBELL I H. 2001. Identification of ancient mantle plumes[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 352: 5-21.
- CHAI Feng-mei. 2001. Study on petology characteristics and ore bearing of lamproite in the southwest margin of Tarim Platform[D]. Urumqi: Xinjiang University(in Chinese with English abstract).
- CHEN Han-lin, YANG Shu-feng, LI Zi-long, YU Xing, LUO Jun-cheng, HE Guang-yu, LIN Xiu-bin, WANG Qing-hua. 2009. Spatial and temporal characteristics of Permian large igneous province in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(2): 179-182(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jin-Yong, FAN Hong-Hai, WANG Sheng-Yun, ZHANG Chuang, ZHAO Jing-yang, GENG Rui-rui. 2019a. Ore-controlling factors of the Baerzhe super-large deposit in Jarud Banner, Inner Mongolia[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(1): 27-35(in Chinese with English abstract).
- CHEN Jin-Yong, FAN Hong-Hai, WANG Sheng-Yun, ZHANG Jia. 2019b. Geochemical characteristics and chronology of alkali-granites in Baerzhe area, Inner Mongolia, and geological significance[J]. *Geological Review*, 65(S1): 45-46(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yan-jing, FU Shi-gu. 1992. Gold Mineralization in West Henan[M]. Beijing: Seismological Press(in Chinese).
- CHEN Yu-chuan. 1986. Metallogenic regularity, prospecting criteria, prospecting direction and prospecting method of iron ore in Ningwu-volcanic area (1976)[C]//Collection of Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences(18). Beijing: Geological Publishing House: 68(in Chinese).
- CHENG Gong, QIU Xian-Yin. 2013. Review of geological characteristics and genesis of fluorite deposits in China[J]. *China Non-Metallic Minerals Industry*, (5): 47-52(in Chinese with English abstract).
- CHI Ji-shang, LU Feng-xiang, LIU Yong-shun, HU Shi-jie, ZHAO Chong-he, YE De-long, ZHENG Jian-ping, ZHAO Lei, ZHANG Hong-fu, JIANG Wan. 1996. Study on metallogenic geological conditions of primary diamond in China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- CHI Qing-Hua, YAN Ming-Cai. 2007. Applied Geochemical element abundance Data Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House: 148(in Chinese).
- CHU Zhi-yuan, WANG Wei-de, LÜ Qing, LIU Wei-dong, KANG Cong-xuan, WANG Shu-xing. 2019. The formation age of the kimberlite zone in Poli area of Mengyin, Shandong Province: Zircon U-Pb dating data of diabase[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 44-50(in Chinese with English abstract).
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 1991. Large Igneous Provinces: JOI/USSAC Workshop Report[R]. Austin TX: University of Texas at Austin Institute for Geophysics.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 1992. Volcanism and continental break-up: A global compilation of large igneous provinces[J]. *Geological Society London Special Publications*, 68(1): 17-30.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 1993a. Scratching the surface: Estimating dimensions of large igneous provinces[J]. *Geology*, 21(6): 515-518.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences[J]. *Review of Geophysics*, 32(1): 1-36.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 2001. Large igneous provinces: progenitors of some ophiolites?[C]//ERNST R E, BUCHAN K L. Mantle Plumes: Their Identification through Time. Boulder, CO: Geological Society of America Special Paper 352:

- 59-70.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 2005. Large igneous provinces[C]//SELLEY R C, COCKS R, PLIMER I R. Encyclopedia of Geology. Elsevier: Oxford: 315-323.
- COFFIN M F, PRINGLE M S, DUNCAN R A, GLADCZENKO T P, STOREY M, MÜLLER R D, GAHAGAN L A. 2002. Kerguelen hotspot magma output since 130 Ma[J]. Journal of Petrology, 43(7): 1121-1137.
- COFFIN M F, ELDHOLM O. 1993b. Large igneous provinces. Scientific American, 269: 42-49.
- DAVIS G A, DARBY B J. 2010. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. Geoscience Frontiers, 1: 1-20.
- DAVIS G A, XIA Hao-ran. 2013. The Yanshan allochthon of North China: ≥ 40 million years of Late Jurassic-Early Cretaceous mid-crustal detachment[C]//Abstracts of the First Joint Scientific Meeting of Geological Society of China (GSC) and Geological Society of America (GSA).
- DAVIS G A. 2011a. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance[J]. Science China (Earth Sciences), 54(10): 1469-1483.
- DAVIS G A. 2011b. Early Cretaceous extensional structures in the Liaodong Peninsula: Structural associations, geochronological constraints and regional tectonic implications[J]. Science China (Earth Sciences), 54(6): 823-842.
- DAWSON J B, STEPHENS W E. 1975. Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths[J]. The Journal of Geology, 83(5): 589-607.
- DAWSON J B. 1980. Kimberlites and their Xenolith[M]. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag: 1-252.
- DENG Jin-fu, FENG Yan-fang, DI Yong-jun, SU Shang-guo, XIAO Qing-hui, WU Guang-ying. 2015. Description of tectonic map of intrusive rocks in China (1:2500000)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- DENG Jin-fu, LIU Hou-xiang, ZHAO Hai-ling, LUO Zhao-hua, GUO Zheng-fu, LI Yu-wen. 1996. Yanshanian igneous rocks and orogeny model in Yanshan-Liaoning area[J]. Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 10(2): 137-148(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, MO Xuan-xue, FLOWER M F J, SU Shang-Guo, LUO Zhao-Hua, ZHAO Hai-Ling, ZHAO Zhi-Dan, YU Xue-Hui, LIU Cui. 2005. Cretaceous large igneous provinces and mantle convection[J]. Earth Science Frontiers, 12(2): 217-221(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, SU Shang-guo, LIU Cui, ZHAO Guo-chun, ZHAO Xing-guo, Zhou Su, XIAO Qing-hui, WU Zong-xu, Geng Ke. 2007a. Yanshanian(Jura-Cretaceous) Orogenic processes and metallogenesis of the Taihangshan-Yanshan-West Liaoning orogenic belt, North China[J]. Geoscience, 21(2): 232-240(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, XIAO Qing-hui, SU Shang-guo, LIU Cui, ZHAO Guo-chun, WU Zong-xu, LIU Yong. 2007b. Igneous petrotextonic assemblages and tectonic settings: A discussion[J]. Geological Journal of China Universities, 13(3): 392-402(in Chinese with English abstract).
- DENG Jin-fu, ZHAO Guo-chun, ZHAO Hai-ling, LUO Zhao-hua, DAI Sheng-qian, LI Kai-ming. 2000. Yanshanian igneous petrotextonic assemblage and orogenic-deep processes in East China[J]. Geological Review, 46(1): 41-48(in Chinese with English abstract).
- DING Jun-ying, NI Pei, ZHU Ren-zhi, JU Yi. 2016. Research report on the No.30, no.42, No.50 and No.1 Typical Kimberlitic pipe deposits[R]. Beijing: China Geological Survey: 1-166(in Chinese).
- DONG Bin, CHEN Ming-shan, XIAO Xiang-hui. 2006. Metallogeni geological setting and prospecting targets of primary diamond deposits in Hunan province[J]. Mineral Deposits, 25(S1): 337-340(in Chinese with English abstract).
- DUAN Chao, LI Yan-He, MAO Jing-Wen, ZHANG Cheng, LIU Jia-Lin. 2010. Research progress of Aoshan porphyrite type iron deposit in Ningwu volcanic basin[J]. Mineral deposits, 29(S1): 73-74(in Chinese).
- ERNST R E, JOWITT S. 2013. Large Igneous Provinces (LIPs) and metallogeny[C]//Tectonics, Metallogeny, and discovery: the North American cordillera and similar accretionary settings. Society of Economic Geologists Special Publication: 17-51.
- ERNST R E. 2014. Large Igneous Provinces[M]. London: Cambridge University Press: 667.
- FAN Hong-hai, LING Hong-fei, WANG De-Zi, LIU Chang-shi, SHEN Wei-zhou, JIANG Yao-hui. 2003. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field[J]. Uranium Geology, 19(4): 208-213(in Chinese with English abstract).
- FANG Wei-xuan, HU Rui-zhong, SU Wen-chao, XIAO Jia-fei, QI Liang, JANG Guo-hao. 2002. The emplacement age of lamproites in Zhenyuan area, Guizhou[J]. Chinese Science Bulletin, 47(4): 307-312(in Chinese).
- FANG Yi. 2014. The study of comprehensive exploration methods for the prediction of concealed fluorite deposit in East China[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- FARNETANI C G, RICHARDS M A. 1994. Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 99(B7): 13813-13833.
- FENG Cheng-you, ZHANG De-quan, XIANG Xin-kui, LI Da-xin, QU Hong-ying, LIU Jian-nan, XIAO Ye. 2012. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Dahutang tungsten deposit in northwestern Jiangxi Province and its geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(12): 3858-3868(in Chinese with English abstract).
- FU Hai-tao. 2020. Analysis of kimberlite emplacement mechanism in the Wafangdian diamond ore field[J]. Acta Geologica Sinica, 94(9): 2640-2649(in Chinese with English abstract).
- GUO F, FAN W M, LI C W, ZHAO L, LI H X, YANG J H. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. Lithos, 150: 62-84.
- GUO Wen-kui, LIU Lan-sheng, YU Zhi-jie. 1982. The foundamen-

- tal features of metallogenic megaprovince and epochs of Eastern China[J]. *Mineral Deposits*, 1(1): 1-14(in Chinese with English abstract).
- HAGGERTY S E. 1986. Diamond genesis in a multiply-constrained model[J]. *Nature*, 320: 34-38.
- HAGGERTY S E. 1999. Diamond formation and kimberlite-clan magmatism in cratonic settings[C]//FEI Y W, BERTKA C M, MYSEN B O. *Mantle petrology: field observation and high pressure experimentation-a tribute to Francis R Boyd*. University Park, PA: The Geochemical Society, Special Publication: 105-123.
- HE B, XU Y G, CHUNG S L, XIAO L, WANG Y M. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3-4): 391-405.
- HE B, XU Y -G, GUAN J -P, ZHONG Y -T. 2011. Reply to comment on 'Paleo-karst on the top of the Maokou Formation: further evidence for domal crustal uplift prior to the Emeishan flood volcanism' by Bin He, Yi-Gang Xu, Jun-Peng Guan & Yu-Ting Zhong, *Lithos* 119 1-9, 2010[J]. *Lithos*, 125(3-4): 1009-1011.
- HE B, XU Y G, WANG Y M, LUO Z Y. 2006. Sedimentation and lithofacies paleogeography in Southwestern China before and after the Emeishan flood volcanism: New insights into surface response to mantle plume activity[J]. *Journal of Geology*, 114: 117-132.
- HE Bin, XU Yi-gang, WANG Ya-mei, LUO Zhen-yu, WANG Kang-ming. 2005. The magnitude of Crustal uplift prior to the eruption of the Emeishan basalt: Inferred from sedimentary records[J]. *Geotectonica et Metallogenesi*, 29(3): 316-320(in Chinese with English abstract).
- HE Bin, XU Yi-gang, XIAO Long, WANG Ya-mei, WANG Kang-ming, SHA Shao-li. 2006. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications[J]. *Geological Review*, 52(1): 30-37(in Chinese with English abstract).
- HE Ying, ZHANG Zhan-jun, MAO Jing-wen, ZHANG Rong-hua. 2002. Effect of the Tan-Lu fault on the formation of mineral deposits and oil-gas fields[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 26(1): 10-15(in Chinese with English abstract).
- HEAMAN L M, KJARSGAARD B A, CREASER R A. 2003. The timing of kimberlite magmatism in North America: implications for global kimberlite genesis and diamond exploration[J]. *Lithos*, 71(2-4): 153-184.
- HOU Guang-shun, LI Ming, WU Cheng-bin, PANG Xu-cheng, XU Ya-juan, ZHI Yun-bao. 2015. Geochronology research on zircon from kimberlite in Hebi region and its geological significance[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 34(6): 777-783(in Chinese with English abstract).
- HOU Zeng-ian, CHEN Wen, LU Ji-ren. 2006. The 259Ma continental overflow basalt eruption in Emei Igneous Province, Sichuan Province: evidence from laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, (8): 1130(in Chinese).
- HU Jin-Ping, JIANG Shao-Yong. 2010. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of porphyrites from the Ningwu Basin and their geological implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(3): 294-308(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, DING Xiao-shi, HAO Cheng-yu, ZHANG Chang-jiang. 1992. *Caijiaying Pb-Zn-Ag Ore Deposit*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 15-17(in Chinese).
- HUANG Dian-hao, DU An-dao, WU Cheng-yu, LIU Lan-sheng, SUN Ya-li, ZOU Xiao-qiu. 1996. Metalochronology of molybdenum (copper) deposits in North China platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 15(4): 365-373(in Chinese with English abstract).
- HUANG Dian-hao, WU Cheng-yu, DU An-dao, HE Hong-liao. 1994. Re-Os isotope ages of molybdenum deposits in East Qinling and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 13(3): 221-230(in Chinese with English abstract).
- HUANG You-bo, ZHOU Qi-zhong, ZHANG Qi, FENG Xue-zhi, WANG Guo-qiang, ZHANG Feng-ming, CAI Yi-tao. 2019. Geochemical feature of olivine basaltic porphyrite in Tashan area of Xuzhou, Jiangsu Province, and its relation to diamond origin[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(1): 132-142(in Chinese with English abstract).
- HUANG Yuan-cheng, SHI Rui, LIN Ze-yuan, LI Yong-gang. 2015. Discovery of lamproite tube and its prospecting significance in Cangputang of Zhenyuan, Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 32(1): 32-36+46(in Chinese with English abstract).
- INGLE S, COFFIN M F. 2004. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 218(1-2): 123-134.
- ISHIGARA D, MIZUTA T, ISHIKAWA Y, WANG J B, WANG Y W, WANG L J. 2001. Geochemical characteristics of igneous rocks and tin-copper mineralization[J]. *Project Final Report of Chinese Research Center for Mineral Resources Exploration*: 4-115-4-138.
- JIANG Wan. 1995. Mineralogical and Petrological study on lamproite in Zhenyuan area, Guizhou[J]. *Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 9(3): 351-358(in Chinese with English abstract).
- JIAO Run-cheng, HE Jin-rui, WANG Rong-rong, WANG Qiang-qiang, HUI Guang-ji. 2016. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from Tuchengzi Formation in Qianjiadian of North Beijing and its significance[J]. *Geology in China*, 43(5): 1750-1760(in Chinese with English abstract).
- KERRICH R, GOLDFARB R J, RICHARDS J P. 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework[M]. *Society of Economic Geologists*: 1097-1136.
- KISVARSAANYI E B. 1980. Granitic ring complexes and Precambrian hot-spot activity in the St. Francois terrane, Midcontinent region, United States[J]. *Geology*, 8(1): 41-43.
- KRAVCHINSKY V A, COGN J P, HARBERT W P, KUZMIN M I. 2002. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new paleomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia[J]. *Geophysical Journal International*, 148(1): 34-57.
- LARSON R L, KINCAID C. 1996. Onset of mid-Cretaceous volcanism by elevation of the 670 km thermal boundary layer[J]. *Geology*, 24(6): 551.
- LE MAITRE R W. 2002. *Igneous rocks: a classification and glossary*

- sary of terms(2nd edition)[M]. Recommendation of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. New York, Cambridge, Cambridge University Press: 16-17.
- LI Bin, CHEN Jing-sheng, LIU Miao, YANG Fan, WU Zhen, DU Ji-yu. 2019. Formation age and geochemical characteristics of the Tiaojishan Formation in the Western Liaoning Province[J]. *Geological Review*, 65(S1): 63-64(in Chinese with English abstract).
- LI Dun-Peng, QIU Xiao-Ping, ZHANG Wen-hui, LIU Wen-yuan, YU Bo. 2016. Zircon SHRIMP U-Pb and single mineral $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of granodiorite from the deep part of the Zijinshan orefield in Fujian Province and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 783-797(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-kui, GENG Ke, LI Yi-fan, ZHUO Chuan-yuan. 2011. Zircon SHRIMP U-Pb age of Tongjing gold deposit in Yanan County, Shandong and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(3): 497-503(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-yang, LU Ji-ren, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, GAO Zhen-min, GAO Yong-feng, WANG Li-feng. 2002. Emei mantle plume and superlarge ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 21(S1): 148-151(in Chinese with English abstract).
- LI Hou-min, MAO Jing-wen, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZHANG Lian-chang. 2003. Ar-Ar ages of K-feldspar and quartz from Dongji gold deposit, Northwest Jiaodong, and their significance[J]. *Mineral Deposits*, 22(1): 72-77(in Chinese with English abstract).
- LI Hua-qin, LIU Jia-qi, DU Guo-min, WEI Lin. 1992. Study on metallogenic chronology of endogenetic ore deposits in Xihuashan Tungsten Deposit[J]. *Chinese Science Bulletin*, (12): 1109-1112(in Chinese).
- LI Rui-zhe, ZENG Pu-sheng, WANG Shi-an, LIU Si-wen, WEN Li-gang, ZHAO Jiu-jiang. 2021. Lamproite: The Main Carrier of High Quality Diamond and the Activity Mark of Mantle Source Fluid[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(6): 761-770(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, SUO Yan-hui, DAI Li-ming, LIU Li-ping, JIN Chong, LIU Xin, HAO Tian-yao, ZHOU Li-hong, LIU Bao-hua, ZHOU Jun-tai, JIAO Qian. 2010. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64-89(in Chinese with English abstract).
- LI Yan-he, DUAN Chao, ZHAO Yue, PEI Hao-xiang, REN Shun-li. 2016. The role of oxidizing reducing barrier in mineralization of hydrothermal uranium ore[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 201-218(in Chinese with English abstract).
- LI You-guo, MO Xuan-xue, ZHAO Chong-he. 1991. Geology and petrology characteristics of lamproite in Cailiangshan area, Datong Shanxi Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 10(S1): 29-36(in Chinese with English abstract).
- LI You-zhi, ZHAO Lei, HE Ming-yue, PALLATI Abdulkadir, LI Jian-zhe. 2000. Petrology features and significance of lamproite in Keliyang, West Kunlun area[J]. *Geoscience*, 14(4): 385-391(in Chinese with English abstract).
- LI Z X. 2014. Tectonics of the South China Block: Interpreting the rock record[M]. Beijing: Science Press: 144.
- LI Zi-yun, MA Wen-yun. 1993. Geological feature of Yunyingwo lamproite in Ningxiang[J]. *Hunan Geology*, 12(4): 221-225(in Chinese with English abstract).
- LIANG Yu-wei, LAI Yong, HU Hong, ZHANG Feng. 2017. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics study of syenite from Weishan REE deposit, Western Shandong[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 53(4): 652-666(in Chinese with English abstract).
- LIN Wei-peng, QIU Zhi-li, DONG Bin, LIANG Wei-zhang, CHEN Hua, LI Zi-yun, CHEN Bing-hui, LI Liu-fen. 2011. Geochemistry and U-Pb dating of heavy mineral zircons and their significance in lamproites and associated rocks from Ningxiang, Hunan Province[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 50(3): 105-111(in Chinese with English abstract).
- LIN Wei-peng, QIU Zhi-li, LI Zi-yun, CHEN Bing-hui, LI Liu-fen, GONG Sheng-wei. 2009. Lithogeochemical characteristics of No.5 pipe-like lamprophyre in Ningxiang, Hunan province[J]. *Resources Survey & Environment*, 30(3): 180-187(in Chinese with English abstract).
- LIU Guan-liang, WANG Xiong-wu, LV Xue-miao. 1993. Lamproite in Dahongshan area[M]. Beijing: Geological Publishing House: 186(in Chinese).
- LIU Peng, CHENG Yan-bo, WANG Xiao-yu, ZHANG Xiang, GAO Feng-ying, LIAO Zheng-guo. 2015. Zircon U-Pb geochronology and characteristics of Hf isotope from the Taoziwo Sn deposit in eastern Guangdong Province and their significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(5): 620-636(in Chinese with English abstract).
- LIU Ping, LI Pei-gang, MA Rong, HAN Zhong-hua, YANG Guang-long, YE De-shu. 2006. A gold deposit associated with pyroclastic rock and hydrothermal exhalation: Nibao gold deposit in Guizhou Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 101-110(in Chinese with English abstract).
- LIU Shan-bao, LIU Zhan-qing, WANG Cheng-hui, WANG Deng-hong, ZHAO Zheng, HU Zheng-hua. 2017. Geochemical characteristics of REEs and trace elements and Sm-Nd dating of scheelite from the Zhuxi giant tungsten deposit in northeast Jiangxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 17-30(in Chinese with English abstract).
- LU Feng-xiang. 2008. Kimberlite and diamond[J]. *Chinese Journal of Nature*, 30(2): 63-66+60(in Chinese with English abstract).
- LÜ Qing, JIAO Yong-xin, GE Yue-jin, XIAO Bing-jian, CHU Zhi-yuan, LIU Shu-zhen. 2021. A Study of Types of Diamonds and Inclusions in Tancheng Placer of Shandong Province Based on Infrared and Raman Spectroscopy[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(6): 895-906(in Chinese with English abstract).
- LUO Hui, ZHAO Yun-qi. 1997. Geology and mineralization of Paishanlou gold deposit in Fuxin, Liaoning Province[J]. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 13-24(in Chinese with English abstract).
- LUO Hui-wen, YANG Guang-shu. 1989. The characteristics of lamproite in Zhenyuan area, Guizhou[J]. *Acta Petrologica et*

- Miernalogica, 8(2): 97-109(in Chinese with English abstract).
- MAHONEY J J, STOREY M, DUNCAN R A, SPENCER K J, PRINGLE M. 1993. Geochemistry and geochronology of the Ontong Java Plateau[J]. AGU Geophysical Monograph, 77: 233-261.
- MAO H K, MAO W L. 2020. Key problems of the four-dimensional Earth system[J]. Matter and Radiation at Extremes, (3): 31-39.
- MAO J W, PIRAJNO F, XIANG J F, GAO J J, YE H S, LI Y F, GUO B J. 2011. Mesozoic molybdenum deposits in the east Qinling-Dabie orogenic belt: Characteristics and tectonic settings[J]. Ore Geology Reviews, 43(1): 264-293.
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, ZHANG Zuo-heng, LI Xiao-feng, WANG Yi-tian, ZHANG Chang-qing, LI Yong-feng. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- MEI Hou-jun, TANG Chun-jing, LI Sun-rong, LI Yong-ming, ZHANG Xing-chun, LU Deng-rong, ZHANG Lian-chang. 1998. Formation of lamproite, kimberlite and diamond deposits in China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 28(S2): 71-77(in Chinese).
- MEI Yu-ping, LI Hua-qin, WANG Deng-hong, LU Yuan-fa, YANG Hong-mei, XU Jian-xiang, ZHANG Jia-jing. 2007. Rock-forming and ore-forming ages of the Yanbei porphyry tin deposit in Jiangxi Province and their geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 28(5): 456-461(in Chinese with English abstract).
- MENG Yi-feng, YANG Zhu-sen, ZENG Pu-sheng, XU Wen-yi, WANG Xun-cheng. 2004. Tentative temporal constraints of ore-forming fluid systems in Tongling Metallogenic Province[J]. Mineral Deposits, 23(3): 271-280(in Chinese with English abstract).
- MITCHELL R H, BERGMAN S C. 1991. Petrology of lamproites[M]. New York: Plenum Press.
- MITCHELL R H. 1995. Kimberlites, Orangeites and Related Rocks[M]. New York: Plenum Press.
- NIE F J, YAN Z B, FENG Z B, LI M G, XIA F, ZHANG C Y, WANG Y G, YANG J X, KANG S H, SHEN K F. 2020. Genetic models and exploration implication of the paleochannel sandstone-type uranium deposits in the Erlian Basin, North China—A review and comparative study[J]. Ore Geology Reviews, 127: 103821.
- NIE Feng-jun, LI Man-gen, DENG Ju-zhi, YAN Zhao-bin, ZHANG Cheng-yong, JIANG Mei-zhu, YANG Jian-xin, KUANG Wen-zhan, KANG Shi-hu, SHEN Ke-feng. 2015. Multiple type uranium deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 34 (4): 711-729(in Chinese with English abstract).
- NIE Feng-jun, YAN Zhao-bin, XIA Fei, LI Man-gen, LU Ya-yun, CAI Jian-fang, GUO Fu-neng, NING Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China[J]. Geological Bulletin of China, 36(10): 1850-1866(in Chinese with English abstract).
- NIU Bao-gui, HE Zheng-jun, SONG Biao, REN Ji-shun, XIAO Li-wei. 2004. SHRIMP geochronology of volcanics of the Zhangjiakou and Yixian Formations, Northern Hebei Province, with a discussion on the age of the Xing'anling Group of the Great Hinggan Mountains and volcanic strata of the south-eastern coastal area of China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 78(6): 1214-1228.
- PANG Jiang-li, QIU Yu-zhuo. 1997. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ age of sericite in Erdaogou deposit and its geological significance[J]. Acta Mineralogica Sinica, (4): 442-447(in Chinese with English abstract).
- PANKHURST R J, RAPELA C R. 1995. Production of Jurassic rhyolite by anatexis of the lower crust of Patagonia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 134(1-2): 23-36.
- PEATE I U, BRYAN S E. 2009. Pre-eruptive uplift in the Emeishan?[J]. Nature Geosciences, 2: 531-532.
- PENG P. 2010. Reconstruction and interpretation of giant mafic dyke swarms: A case study of 1.78 Ga magmatism in the North China craton[J]. Geological Society Special Publication, 338: 163-178.
- PENG P. 2015. Precambrian mafic dyke swarms in the North China Craton and their geological implications[J]. Science China: Earth Sciences, 58(5): 649-675.
- QIU Kun-feng, YU Hao-cheng, WU Ming-qian, GENG Jian-zhen, GE Xiang-kun, GOU Zong-yang, TAYLOR R D. 2019. Discrete Zr and REE mineralization of the Baerzhe rare-metal deposit, China[J]. American Mineralogist, 104(10): 1487-1502.
- QIU Xiao-ping, LIU Shi-chuan, WEI Mi. 2021. Fluid Explosion Breccia Pipe and Gold Supernormal Enrichment in Shuiyindong Gold Ore Deposit, Southwest Guizhou Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(6): 849-858(in Chinese with English abstract).
- QIU Zhi-li, LIANG Dong-yun, WANG Yan-fen, SUN Yuan, LI Liu-fen. 2014. Zircon REE, trace element characteristics and U-Pb chronology in the Baerzhe alkaline granite: Implications to the petrological genesis and mineralization[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1757-1768(in Chinese with English abstract).
- RAO Hong-juan, CAI Yi-tao, YANG Xian-zhong, KANG Cong-xuan, SHI Rui, LIN Ze-yuan. 2019. An analysis of the emplacement mode and ore-search prospect of lamproite in the Maping area, Zhenyuan County, Guizhou Province[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 76-92(in Chinese with English abstract).
- RAO Jia-rong. 1999. Deep structural geology setting and metallogenic forecasting of primary diamond in Hunan[J]. Hunan Geology, 18(1): 21-28(in Chinese with English abstract).
- ROBIN G. 2010. Igneous rocks and processes[M]. Chichester: Wiley- Blackwell Publishing.
- SHELLNUTT J G, BHAT G M, WANG K L, BROOKFIELD M E, JAHN B M, DOSTAL J. 2014. Petrogenesis of the flood basalts from the Early Permian Panjal Traps, Kashmir, India: Geochemical evidence for shallow melting of the mantle[J]. Lithos, 204: 159-171.
- SHELLNUTT J G, DENYSZYN S W, MUNDIL R. 2012. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China)[J].

- Gondwana Research, 22(1): 118-126.
- SHIER Y S B, CARTIGNY P, FROST D J, KESHAV S, NESTOLA F, NIMIS P, PEARSON D G, SOBOLEV N V, WALTER M J. 2013. Diamonds and the geology of mantle carbon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1): 355-421.
- SONG Ming-chun, YU Xi-shun, SONG Ying-xin, XIAO Bing-jian, ZHOU Deng-shi, GAO Cun-shan, FENG Ai-ping. 2020. Type, sources, and regional crust-mantle evolution background of diamonds in the western Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 2606-2625(in Chinese with English abstract)
- SONG Rui-xiang. 2013. Diamond deposits in China: Prospecting and development of diamond deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- SONG Xie-yan, HOU Zeng-qian, CAO Zhi-min, LU Ji-ren, WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, LI You-guo. 2001. Geochemical characteristics and period of the Emei igneous province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 4(4): 498-506(in Chinese with English abstract).
- SU Hui-min, JIANG Shao-yong, ZHU Xin-you, DUAN Zhen-peng, HUANG Xing-kai, ZOU Tao. 2021. Magmatic-hydrothermal processes and controls on rare-metal enrichment of the Baerzhe peralkaline granitic pluton, inner Mongolia, north-eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 131: 103984.
- SU Wen-chao, HU Rui-zhong, XIA Bin, XIA Yong, LIU Yu-ping. 2009. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Chemical Geology*, 258(3-4): 269-274.
- SUN Yan, WANG Deng-hong, WANG Cheng-hui, LI Jian-kang, ZHAO Zhi, WANG Yan, GUO Wei-ming. 2019. Metallogenic regularity, new prospecting and guide direction of rubidium deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1231-1244(in Chinese with English abstract).
- TONG Qian-ming. 1996. Suggestions of searching primary diamond deposit with industrial value along Yuanjiang River[J]. *Hunan Geology*, 15(1): 5-11(in Chinese with English abstract).
- TU Guang-Chi. 2002. Two unique mineralization areas in Southwest China[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 21(1): 1-2(in Chinese with English abstract).
- TU Guang-chi. 2004. Geochemistry of dispersed elements and metallogenic mechanism [M]. Beijing: Geological Publishing House: 424(in Chinese).
- WAGNER P A. 1914. The diamond fields of southern Africa[M]. Johannesburg: The Transvaal Leader.
- WANG C H, ZHANG Z C, XIE Q H, CHENG Z G, KONG W L, LIU B X, SANTOSH M, JIN S K. 2021. Olivine from aillikites in the Tarim large igneous province as a window into mantle metasomatism and multi-stage magma evolution[J]. *American Mineralogist*, 106(7): 1064-1076.
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, CHEN Wen, SANG Hai-qing, LI Hua-qin, LU Yuan-fa, CHEN Kai-li, LIN Zhi-mao. 2004. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132-138+146(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-Hong. 1998. Mantle plume and metallogeny[M]. Beijing: Seismological Press: 160(in Chinese).
- WANG Deng-hong. 2001. Basic concept, classification, evolution of mantle plume and large scale mineralization——probe into Southwestern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 67-72(in Chinese with English abstract).
- WANG Guo-zheng. 2002. Baogaigou tin deposit——a higher temperature hydrothermal deposit of albitite and biotite quartzite types[J]. *Geology and Exploration*, (2): 42-45(in Chinese with English abstract).
- WANG Hong-hao, LI Jiang-hai, ZHANG Hua-tian, XU Li, LI Wei-bo. 2016. The absolute paleoposition of the North China Block during the Middle Ordovician[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 46(1): 57-66(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-ben, JI Ke-jian, CHEN Dong. 1997. Re-Os isotope ages of molybdenite from the Anjishan copper deposit and the Tongshan copper molybdenum deposit and their implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 154-159(in Chinese with English abstract).
- WANG Liu-hai, LIAO Qi-fang. 1989. Petrology characteristics of lamproite rocks within Dahongshan MT area[J]. *Hubei Geology*, 3(2): 68-78(in Chinese with English abstract).
- WANG Liu-hai. 1991. Characteristics of minerals and ore-bearing ability in lamproites of mountain Dahongshan district[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 11(4): 51-56(in Chinese with English abstract).
- WANG Qu-yi. 1995. The features of Lianhuatang leucitite in Anyuan County, Jiangxi[J]. *Jiangxi Geology*, 9(4): 286-291(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-an, ZENG Pu-sheng, LIU Si-wen, WEN Li-gang, LI Rui-zhe, ZHAO Jiu-jiang. 2021. Kimberlite: An Important Probe for Deep Earth Exploration[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 42(6): 749-759(in Chinese with English abstract).
- WANG Shi-qi, TANG Kui-lian. 1994. The physicochemical conditions of ore-forming fluids of Anjiayingzi gold deposit, Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 30(4): 446-452(in Chinese with English abstract).
- WANG Yi-tian, MAO Jing-wen, LU Xin-xiang, YE An-wang. 2002. ^{40}Ar - ^{39}Ar age and its significance of middle-deep mineralized altered rocks in Q875 vein, Xiaolinling gold deposit, Henan Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(18): 1427-1431(in Chinese).
- WANG Yi-tian, MAO Jing-wen, LU Xin-xiang. 2001. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating and geochronological constraints on the ore-forming epoch of the Qiyugou gold deposit in Songxian County, Henan Province[J]. *Geological Review*, 47(5): 551-555(in Chinese with English abstract).
- WANG Yi-Xian, ZHAO Zhen-hua. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE Nb-Be-Zr superlarge deposit[J]. *Geochimica*, 26(1): 24-35(in Chinese with English abstract).
- WANG Yu-feng, ZHOU Jun, WANG Jian-ping, ZHU Cheng-he, YANG Xian-zhong. 2019. A discussion on geological characteristics and diamond ore-bearing potentiality of the Dajingtou lamprophite, Pingyi County, Shandong Province[J].

- Geological Bulletin of China, 38(1): 93-102(in Chinese with English abstract).
- WEI Jun-hao, LIU Cong-qiang, ZHAO Yong-xin, LI Zhi-de. 2001. Time span of the major ore-forming stages of the Wulong gold deposit, Liaoning[J]. Geological Review, 47(4): 433-437(in Chinese with English abstract).
- WU F Y, LIN J Q, WILDE S A, ZHANG X O, YANG J H. 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. Earth Planetary Science Letters, 233(1-2): 103-119.
- WU Liang-shi, ZOU Xiao-qiu. 1997. Re-Os isotopic age study of the Chengmenshan copper deposit, Jiangxi Province[J]. Mineral Deposits, 16(4): 376-381(in Chinese with English abstract).
- XIE Zhi, SUN Wei-dong, CHAI Zhi-fang, CHEN Jiang-feng, DU An-dao, LI Chun-sheng, MAO Xue-ying. 2002. Comparison of Os-Os and Re-Os dating results of molybdenites[J]. Nuclear Techniques, 25(12): 1013-1018(in Chinese with English abstract).
- XING Guang-fu, FENG Yi-min. 2015. Description of tectonic map of volcanic rocks in China(1:2500000)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 95(in Chinese).
- XING Guang-fu, LU Qing-di, CHEN Rong, ZHANG Zheng-yi, NIE Tong-chun, LI Long-ming, HUANG Jia-long, LIN Min. 2008. Study on the ending time of Late Mesozoic tectonic regime transition in South China—comparing to the Yanshan area in North China[J]. Acta Geologica Sinica, 82(4): 451-463(in Chinese with English abstract).
- XU Xiao-chun, LOU Jin-wei, LU San-ming, XIE Qiao-qin, CHU Ping-li, YIN Tao. 2009. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 28(5): 621-632(in Chinese with English abstract).
- XU Y G, HE B, CHUNG S L, MENZIES M A, FREY F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. Geology, 32(10): 917-920.
- XU Y G, HE B. 2007. Thick, high-velocity crust in the Emeishan large igneous province, southwestern China: Evidence for crustal growth by magmatic under-plating or intraplate[C]//Plates, plumes and planetary processes. Special Paper of the Geological Society of America, 430: 841-858.
- XU Yi-gang, MEI Hou-jun, XU Ji-feng, HUANG Xiao-long, WANG Yue-jun, ZHONG Sun-lin. 2003. Differentiation trend and genesis of two types of magmas in Emeishan Large Igneous Province[J]. Chinese Science Bulletin, 48(4): 383-387(in Chinese).
- XU Yi-gang, ZHONG Sun-lin. 2001. The Emeishan Large Igneous Province: Evidence of mantle plume activities and melting conditions[J]. Geochemica, 30(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- YAN Ming-Cai, CHI Qing-Hua, GU Tie-xin, WANG Chun-shu. 1997. Chemical compositions of continental crust and rocks in Eastern China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 21(6): 451-459(in Chinese with English abstract).
- YANG Guang-zhong, LI Yong-gang, ZHANG Yu-lun, LUO Bang-liang, HUANG Ying-jun. 2019. Distribution-controlling factors and emplacement mode of lamproite in southeastern Guizhou Province[J]. Geological Bulletin of China, 38(1): 27-35(in Chinese with English abstract).
- YANG Guang-zhong. 2013. Controlling factors of lamprophyre's occurrence in the Zhenyuan area of Guizhou Province[J]. Geology and Exploration, 49(4): 696-702(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-hui, XU Lei, SUN Jin-feng, ZENG Qing-dong, ZHAO Ya-nan, WANG Hao, ZHU Yu-sheng. 2021. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton[J]. Scientia Sinica(Terrae), 51(9): 1401-1419(in Chinese with English abstract).
- YANG Jin-hui, ZHOU Xin-hua. 2001. Rb-Sr, Sm-Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits[J]. Geology, 29(8): 711-714.
- YANG Shu-feng, CHEN Han-lin, DONG Chuan-wan, JIA Cheng-zao, WANG Zhen-guo. 1996. The discovery of Permian syenite inside Tarim Basin and its geodynamic significance[J]. Geochimica, 25(2): 121-128(in Chinese with English abstract).
- YANG Shu-feng, CHEN Han-lin, JI Deng-wu, LI Zi-long, DONG Chuan-wan, JIA Cheng-zao, WEI Guo-qi. 2005. Geological process of Early to Middle Permian magmatism in Tarim Basin and its geodynamic significance[J]. Geological Journal of China Universities, 11(4): 504-511(in Chinese with English abstract).
- YANG Shu-feng, CHEN Han-lin, LI Zi-long, LI Yin-qi, YU Xing, LI Dong-xu, MENG Li-feng. 2014. Early Permian Tarim Large Igneous Province in northwest China[J]. Science China: Earth Sciences, 44(2): 187-199(in Chinese).
- YANG Xian-Zhong, CAI Yi-Tao, KANG Cong-xuan, HUANG Guang-zhao, LI Shuai, XIANG Hua. 2019. Discovery of diamond-bearing sedimentary tuff and its prospecting significance in Ligonggang area of Taoyuan County, Hunan Province[J]. Geological Survey of China, 6(6): 56-62(in Chinese with English abstract).
- YANG Yu-hong, HUANG Yi, LIU Shen, ZHANG Xi-gui, YANG Chao-gui, YAN Jun, YE Chun, GONG Xing-xiang. 2021. Geochemical characteristics of lamproites in Southeastern Guizhou and their indicative significances[J]. Acta Mineralogica Sinica, 41(3): 258-270(in Chinese with English abstract).
- YE De-long, WANG Qun, YANG Jin-xiang, REN Ying-xin. 1991. Kimberlite and lamproite in the southern section of Mountain Dahong in Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 10(S1): 37-44, 36(in Chinese with English abstract).
- YING Han-long. 1994. ^{40}Ar / ^{39}Ar fast neutron activation age of auriferous quartz in Jinqingding and Denggezhuang gold deposits, Jiaodong[J]. Gold Science and Technology, 2(4): 24-28(in Chinese).
- YU Jin-Jie, MAO Jing-wen, ZHANG Chang-qing. 2007. Metallogenic Regularity and Prospecting direction of Ningwu-porphyrite Iron Deposit: Evidence from Mantle Fluids[J]. Progress in Natural Science, 17(9): 1216-1221(in Chinese).
- YU Jin-jie, MAO Jing-wen. 2002a. Dating of ^{40}Ar - ^{39}Ar of albitite

- from Ningwu-porphyrite iron ore and its significance[J]. *Progress in Natural Science*, 12(10): 53-57(in Chinese).
- YU Jin-jie, MAO Jing-wen. 2002b. Rare earth elements in apatite from porphyrite iron deposits of Ningwu area[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 65-73(in Chinese with English abstract).
- YU Xue-feng, TANG Hao-sheng, HAN Zuo-zhen, LI Chang-you. 2010. Geological characteristics and origin of rare earth elements deposits related with alkaline rock in the Chishan-Longbaoshan area, Shandong Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(3): 407-417(in Chinese with English abstract).
- ZENG Pu-sheng, ZHAO Jiu-jiang, WEN Li-gang, WANG Shuang-qing, ZHANG Xiao-tao, WANG Shi-an. 2020. Deep source characteristics of the kimberlite and alkaline intrusives in the Shandong segment of the Tan-Lu fault belt and their resource and energy significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(9): 2626-2639(in Chinese with English abstract).
- ZHANG An-di. 1991. Research and database of diamond prospecting indicator minerals[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press: 1-162(in Chinese).
- ZHANG De-quan, XU Hong-lin, SUN Gui-ying. 1995. Emplacement ages of the Denggezhuang gold deposit and the Kunyushan granite and their geological implications[J]. *Geological Review*, 41(5): 415-425(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-fu, YANG Yue-heng. 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 285-294(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, LU Deng-rong, WANG Shu-rong, MEI Hou-jun. 1998. Geology and geochemistry of lamproite in Datong area, Shanxi Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 18(4): 31-37 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lian-chang, SHEN Yuan-chao, LIU Tie-bing, ZENG Qing-dong, LI Guang-ming, LI Hou-min. 2002. Ar-Ar method and Rb-Sr isochron age of gold deposits in the northern margin of Jiaolai Basin, Shandong Province[J]. *Science in China (Series D)*, 32(9): 727-734(in Chinese).
- ZHANG Qi, JIN Wei-Jun, LI Cheng-Dong, WANG Yuan-Long. 2009. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 21-51(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi, JIN Wei-Jun, WANG Yuan-Long, LI Cheng-Dong, JIA Xiu-Qin. 2007. Discussion of north boundary of the East China Plateau during late Mesozoic Era[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 689-700(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi, WANG Yuan-long, JIN Wei-jun, LI Cheng-dong. 2008. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: evidence, problems and implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1404-1430(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shuan-hong, PEI Jun-ling, HU Guo-hui, ZHANG Qi-qi, SHUI Guo-hao, ZHAO Yue. 2019. Genetic link between large igneous provinces and large volumes of black shale deposition and its implications[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 920-931(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shuan-hong, ZHAO Yue. 2018. The 1.33-1.30 Ga mafic large igneous province and REE-Nb metallogenic event in the northern North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(5): 34-50(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wan-liang. 2007. Red basin in south China and uranium ore conservation[J]. *Mineral Resources and Geology*, 21(2): 118-121(in Chinese with English abstract).
- ZHANG S H, ERNST R E, PEI J L, ZHAO Y, ZHOU M F, HU G H. 2018. A temporal and causal link between ca. 1380 Ma large igneous provinces and black shales: Implications for the Mesoproterozoic time scale and paleoenvironment[J]. *Geology*, 46(11): 963-966.
- ZHANG S H, ZHAO Y, LI X H, ERNST R E, YANG Z Y. 2017. The 1.33-1.30 Ga Yanliao large igneous province in the North China Craton: Implications for reconstruction of the Nuna (Columbia) supercontinent, and specifically with the North Australian Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 465: 112-125.
- ZHAO Yi-ming, WANG Da-wei, ZHANG De-quan, FU Xian-zheng, BAO Xiu-po, LI He-nian, AI Yong-fu. 1994. Metallogenic geological conditions and prospecting model of copper polymetallic deposits in southeast Inner Mongolia[M]. Beijing: Seismological Press: 1-234(in Chinese).
- ZHAO Yue, SONG Biao, ZHANG Shuan-hong, LIU Jian. 2006. Geochronology of the inherited zircons from Jurassic Nandaling Basalt of the Western Hills of Beijing, North China: its implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 184-190(in Chinese with English abstract).
- ZHOU M F, ROBINSON P T, LESHER C M, KEAYS R R, ZHANG C J, MALPAS J. 2005. Geochemistry, petrogenesis and metallogenesis of the Panzhihua gabbroic layered intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposits, Sichuan Provinces, SW China[J]. *Journal of Petrology*, 46: 2253-2280.
- ZHU Cui-yi, LIAO Yong-gu, QING Min, HAN Xu. 2002. Discussion on metallogenic epoch of Puziwan gold deposit, shanxi[J]. 8(1): 17-20(in Chinese with English abstract).
- ZHU D C, CHUNG S L, MO X-X, ZHAO Z D, NIU Y L, SONG B, YANG Y H. 2009. The 132 Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present-day southeastern Tibet and southwestern Australia[J]. *Geology*, 37(7): 583-586.
- ZHU Guang, LU Yuan-chao, SU Nan, WU Xiao-dong, YIN Hao, ZHANG Shuai, XIE Cheng-long, NIU Man-lan. 2021. Crustal deformation and dynamics of Early Cretaceous in the North China Craton[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 51(9): 1420-1443(in Chinese with English abstract).