

成矿作用的空间分布不均匀性及其控制因素探讨

许德如^{1,2}, 叶挺威^{1,3}, 王智琳⁴, 毛景文⁵,
谢桂青⁵, 黄沁怡^{1,3}, 王历星^{1,3}

(1.中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640; 2.东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.中南大学 地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 5.中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 全球矿产资源时空分布的不均匀性及其形成机制, 已成为地球科学关注的热点和前沿领域。本文在对全球矿产资源的分布规律及其不均匀性分布特点的研究进展进行全面阐述的基础上, 重点分析了控制成矿作用空间分布不均匀性的主要因素, 如地壳组成与演化的差异、地壳/地幔化学组成的不均一性、成矿构造环境的差异、重大地质构造事件的影响、构造转换或转折和叠加、矿床形成与保存能力等。研究认为, 深刻理解全球矿产资源空间分布的不均匀性特征及其形成的根本原因, 应加强以下五个方面的研究: ①大陆成矿作用的空间分布不均匀性的机制; ②从全球构造角度, 揭示成矿作用的时空分布规律; ③强调深部成矿过程, 以阐明成矿作用不均匀性原因; ④加强成矿系统、成矿系列研究; ⑤加强矿产资源时空分布不均匀性的形成机制研究。

关键词: 矿产资源; 成矿作用; 空间配置; 不均匀性; 控制因素

中图分类号: P612 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2019)03-0368-021

0 引言

地球物质运动在时空上的不均衡性, 导致地球系统构造演化的多样性和复杂性, 因而也造成了全球矿床形成条件的差异和它们在时空分布上的不均匀性。世界上某些矿床或矿床类型趋于富集地壳某特定区域、呈丛集性或带状分布, 或仅出现于某特定地质历史时期, 因而有成矿域、成矿省、成矿区(带)和成矿幕等概念的提出(Misra, 1999)。就空间分布而言, 全球金属矿床表现出极不均一性。如裴荣富等(2008)在完成全球 1 : 2500 万大型-超大型矿床成矿图编制时发现: 世界上大型-超大型矿床主要分布

于亚洲(占总数的 37.3%)和北美洲(占总数的 18.2%), 据此新划分出 21 个巨型成矿区带, 并认为异常成矿作用与重大地质事件密切相关。Sillitoe (2012)在总结全球铜矿时也指出: 铜矿在地球上的分布表现出不均一性, 主要产于特定时期的成矿省, 并认为深部岩石圈过程是造成全球铜矿分布不均一性的主要原因。特别是全球斑岩矿床的分布受深部构造控制, 其一般形成于俯冲板片热异常地区(Cooke et al., 2005)。孙卫东等(2010)还认为洋脊俯冲的数量和规模差异是造成东西太平洋地区斑岩铜金矿分布不均一的根本原因。又如, 虽然钨锡矿可形成于不同的构造背景, 但全球钨锡矿的发育受控于岩浆形成时

富 W-Sn 沉积岩分布范围(Romer and Kroner, 2016)。因此,研究全球不同类型矿床/矿种的空间分布规律、深入揭示成矿作用空间不均匀性的根本原因以及探讨成矿作用与重大地质事件的耦合关系已经成为国内外地学界关注的焦点,并对指导成矿预测和找矿勘查具有重大的实践意义。

1 成矿作用空间不均匀性研究进展

1.1 全球不同类型矿床的空间分布特点

全球不同成矿带、不同类型矿床、或不同类型的同一矿种在空间分布上往往表现出明显差异。如全球主要铀矿床中角砾岩型铀矿主要产于南非和加拿大(Phillips and Law, 2000; Fuchs et al., 2017);砂岩型铀矿大多产于美国,近20年来砂岩型铀矿在中国北方地区找矿勘查中也有较大的突破(蔡煜琦等, 2015);不整合面型铀矿床和 IOCG 型(热液铁氧化物-铜-铀-金-稀土)矿床主要出现在加拿大和澳大利亚(Hitzman et al., 1992; Gregory and Wilde, 2005; Hitzman and Valenta, 2005; Ercadider et al., 2013; Slack et al., 2016),其中澳大利亚奥林匹克坝铜-铀-金-银-稀土矿床是世界上最大的铀矿床,并伴有巨量铜-金-银-稀土矿石堆积。脉型铀矿则主要分布于法国、西班牙、葡萄牙、捷克、加拿大、美国、刚果,以及中国华南地区(Hu et al., 2017)。全球金矿大致可划分为砂金型、角砾岩型(即 Witwatersrand 型)、浅成热液型、沉积浸染型(即卡林型)、侵入岩相关类型和石英脉型(造山型)等(Misra, 1999; Thompson et al., 1999; Kerrich et al., 2000)。此外,金还可以伴生矿种的形式出现在与镁铁质和超镁铁质岩有关的铜-镍硫化物矿床、火山块状硫化物(VHMS)矿床、斑岩型铜矿床和 IOCG 型矿床中。金矿床在全球分布虽然广泛,但空间上具有显著丛集性,并以太古宙克拉通绿岩带和环太平洋带为代表(Goldfarb et al., 2005)。其中,南非 Witwatersrand 盆地具有世界上最大的黄金储量,自1886年开采以来共生产了5万吨金,约占全球产量的30%(Phillips and Powell, 2015)。砂金矿以冲积型和残积型为主,其超大型矿床位于加拿大、美国、哥伦比亚、澳大利亚、印度尼西亚、新西兰、俄罗斯西伯利亚以及中亚成矿域蒙古-哈萨克斯坦境内(Misra, 1999)。浅成热液型金矿几乎均产于环太平洋火山岩带中,特别是在美国西部、印度尼西亚、巴布亚新几内亚和日本等地(Misra, 1999)。卡林型金矿集中分布于美国西部

Cordillera 山脉 Nevada 州、中国西南云贵川等地,东南亚和秘鲁也是重要的卡林型金矿产地(Hu et al., 2002; Cline et al., 2005; Muntean et al., 2011)。脉型或中温热液型或造山型金矿广泛发育于加拿大、印度、澳大利亚和津巴布韦等国太古宙(尤在 2.7 Ga)克拉通绿岩带内(Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2001)。但大多数古生代脉型金矿则产于北美、澳大利亚和乌兹别克斯坦等地大陆边缘浊积岩环境,其中乌兹别克斯坦穆龙套金矿床是世界上单体最大的矿床,储量约5290 t,品位3.5~4.0 g/t(Goldfarb et al., 2005);此外,一些脉型金矿也产于美国、加拿大等国中生代-新生代增生造山环境(Misra, 1999)。

根据成矿作用的主要方式,全球矿床成因类型大体可划分正岩浆型矿床、沉积型矿床、变质型矿床和热液型矿床,它们在空间上的分布具有各自显著的特征。

1.1.1 正岩浆型矿床

正岩浆型矿床主要包括与铁镁质-超铁镁质杂岩体、火成碳酸岩、金伯利岩和钾镁煌斑岩以及斜长岩有关的矿床。其中:①与铁镁质-超铁镁质杂岩体有关的铬铁矿矿床、铜-镍-(PGE)硫化物矿床主要产于南非、津巴布韦、澳大利亚、加拿大、美国、俄罗斯西伯利亚、格陵兰、挪威和塞浦路斯等(图1)(Roberts and Gunn, 2014);②与火成碳酸岩有关的铌、稀土矿床主要发现于东非裂谷及其周边地区,其次产于南美洲(巴西)、北美(美国、加拿大)、俄罗斯和欧洲(挪威、瑞典、德国)等地,印度也有少量分布;此外,中国也是世界上碱性岩-碳酸岩型稀土资源最丰富的国家之一,以白云鄂博、南秦岭竹山地区(如庙坪和杀熊洞)、西南地区的冕宁-德昌稀土成矿带(如牦牛坪、大陆槽等)为代表(Castor, 2008; Xu et al., 2008; Hou et al., 2009; Liu et al., 2015; Xie et al., 2015; 翟明国等, 2019);③与金伯利岩和钾镁煌斑岩有关的金刚石矿产以非洲、俄罗斯和西澳大利亚最为发育(Haggerty, 1999),印度、加拿大、美国、巴西、中国和东南亚国家等地也有分布;④产于斜长岩内的钛铁矿床主要分布在加拿大地盾,我国以河北大庙铁-钛-磷矿床为代表(Charlier et al., 2008; 赵太平等, 2010)。

1.1.2 沉积型矿床

与风化-沉积作用有关的矿床包括红土型镍(Ni)矿、铝土矿、锰矿、铁矿、磷矿(P)、离子吸附型稀土(REE)矿、砂矿、与黑色页岩有关的多金属矿和海

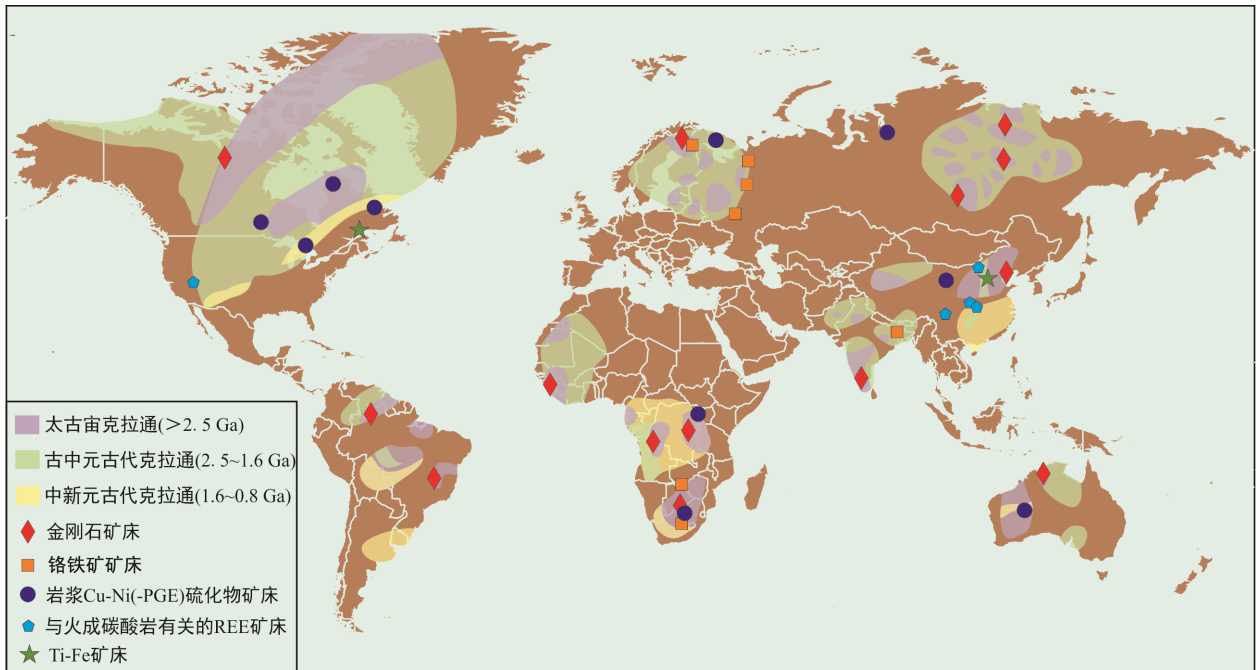


图1 全球克拉通、年龄省和主要正岩浆型矿床分布示意图(据 Haggerty, 1999; Castor, 2008; 赵太平等, 2010; Roberts and Gunn, 2014 修改)

Fig.1 Global distribution of cratons, age provinces and orthomagmatic deposits

底锰结核等(Misra, 1999)。其中, 红土型铝土矿占世界铝土矿资源量 80%以上, 主要分布于几内亚、巴西、澳大利亚、印度、圭亚那和西非。红土型镍矿在西方国家占陆地镍资源量约 65%, 其他分布于南太平洋的新加勒多尼亚、澳大利亚、印度尼西亚、菲律宾、拉丁美洲危地马拉、希腊、巴西和哥伦比亚, 美国、古巴、多米尼亚共和国和印度也有少量分布。海相沉积型磷矿主要产于美国、前苏联和摩洛哥, 其中以美国为最丰富。此外, 中国“三阳式”磷矿也是世界上主要磷矿类型; 离子吸附型稀土矿产以中国华南地区为代表。而全球大多数沉积型锰矿来源于格鲁吉亚和乌克兰的几个巨型矿床, 南非元古宙含铁建造包含世界上原生锰资源量的 3/4。

1.1.3 变质型矿床

本文叙述的变质型矿床仅指起源于变质热液流体、并通过矿物重结晶、成分重组和重新活动所形成的矿床。变质型矿床具有矿种多、分布广和储量等特点。如前寒武纪条带状铁建造(BIF)型铁矿占全球铁矿石产量的 90%以上、世界富铁矿矿石储量的 60%~70%, 主要分布于澳大利亚、巴西、印度、加拿大、美国、俄罗斯和乌克兰及南非等地(图 2), 中国华北和华南地区也有分布(Xu et al., 2014; Zhang et al., 2014)。此外, 重要的变质型矿床还包括石墨、石榴子石、滑石、刚玉、菱镁矿、红柱石-蓝晶石-

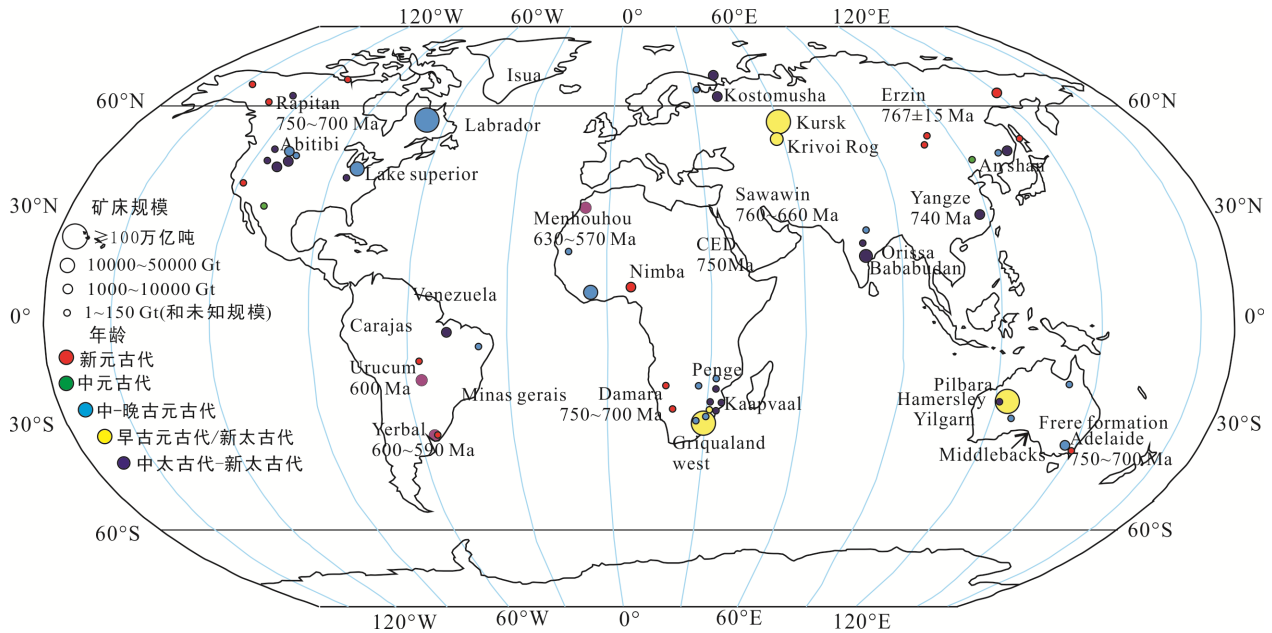
夕线石、宝石(红宝石、蓝宝石、祖母绿)等矿。其中, 石墨矿以赋存于角闪岩相-麻粒岩相变质沉积岩中的斯里兰卡 Bogala 矿床为代表。佳木斯-兴凯成矿带是我国重要的石墨成矿带, 已查明晶质石墨矿 24 处, 资源储量达 1.28 亿吨, 代表性矿床为黑龙江萝北云山石墨矿床(超大型, 晶质石墨资源储量约 4244 万吨)(颜玲亚等, 2018)。变质成因铀矿床则以加拿大 Bancroft 矿区和纳米比亚 Rössing 矿区为代表。我国菱镁矿资源丰富, 储量位居世界首位, 以沉积变质型为主, 集中分布在辽东地区, 代表性矿床为辽宁大石桥菱镁矿床, 占全球储量 40%(赵正等, 2014)。

1.1.4 热液型矿床

热液型矿床包括与现代热液活动和与古老热液活动有关的两类成矿类型。①现代热液成矿作用发生在最近火山活动、具高热流值和构造活跃的地带, 包括汞、金-银贵金属和铁-铜-铅-锌-锰贱金属三个主要成矿系统类型。最大的汞生产基地位于美国, 而浅成热液型贵金属成矿系统以美国和新西兰某些地区活动热液系统为代表。②古老热液所形成的矿床可归纳为层状和层控型贱金属硫化物矿床、与花岗质岩有关的斑岩型和矽卡岩型矿床、赋存于沉积岩中的浸染型和热液脉型矿床五大类。其中, 斑岩型铜矿床约占世界铜资源量的 50%, 主要产于全球

三大成矿域(图 3): 环太平洋成矿域、特提斯成矿域和古亚洲成矿域(Sillitoe, 2010)。世界上与花岗岩有关的锡矿床主要产在四个区域: 东南亚锡矿带(缅甸、泰国、马来西亚、印度尼西亚)、玻利维亚锡矿带、华南锡成矿省(Mao et al., 2013)和加拿大 Cornwall 锡矿省。最重要的火山块状硫化物(VHMS)型矿床则产于加拿大地盾、斯堪的纳维亚半岛、葡

萄牙-西班牙的 Iberian 黄铁矿带和日本的 Green Tuff 带; 赋存于沉积岩中的块状锌-铅硫化物(\pm 重晶石 \pm Ag \pm Au)矿床(SMS 或 SEDEX 型)在世界上分布较为广泛, 分别占全球锌、铅金属资源量 50%以上和 60%以上, 最具代表性的矿床主要分布于澳大利亚、加拿大、德国、爱尔兰、南非、美国、印度和中国云南等地。广泛分布于沉积岩中的层状铜矿(SSC 型)占全球



图中铁建造包括 BIF(条带状铁建造)、GIF(球粒状铁建造)和 Rapitan 型以及几个铁矿石。

图 2 全球前寒武纪铁建造(IFs)分布图(据 Bekker et al., 2010)

Fig.2 Map showing the distribution and ages of major Precambrian iron formations (IFs)

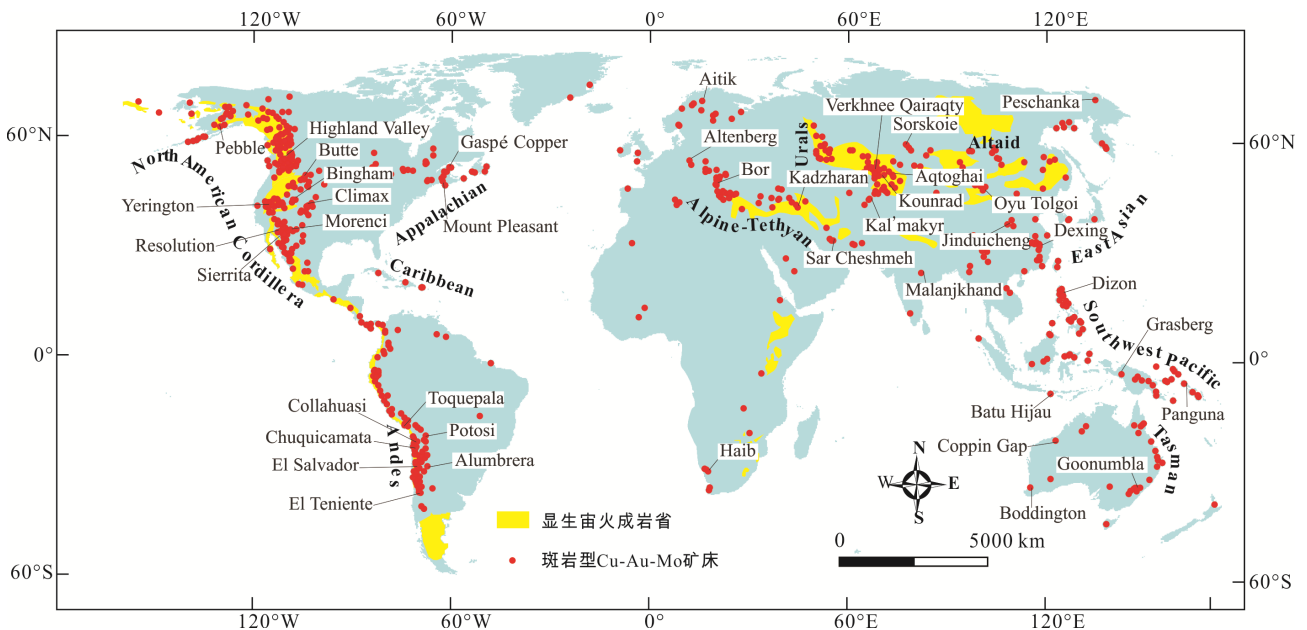


图 3 全球显生宙火成岩省、斑岩铜矿主要成矿区(带)和超大型矿床分布图(据 Seedorff et al., 2005)

Fig.3 Map showing global distribution of porphyry deposits, Phanerozoic igneous provinces, selected porphyry districts, and porphyry belts

金属铜产量和资源储量约 20%~25%，也是世界上金属钴的最大来源，主要分布在赞比亚、刚果、哈萨克斯坦、美国、波兰以及中国云南。密西西比河谷(MVT)型锌铅矿是世界上最重要锌、铅金属矿床类型，但地理分布局限，大都见于美国境内，其他较重要的 MVT 型矿床则分布于加拿大、波兰、澳大利亚和中国云南。造山型金矿床形成于整个地球历史时期，分布极不均匀，与地壳增生事件相对应(图 4)。

1.2 中国大陆矿产资源的空间分布特点

中国大陆因地质构造的复杂性和特殊性，矿产资源分布在空间和时间上均表现出极不均匀性，在空间分布上主要具有以下特点：①前寒武纪矿床主要分布在古陆边缘和陆内裂谷内部，但在不同构造单元矿种差异较大。如华北地块是我国前寒武纪矿产分布最多的地区，以铁、稀土、铌、金、硼、菱镁矿、滑石、铅、锌、镍、石墨等矿最为重要；而华南扬子地块前寒武纪优势矿产则为铜、锰、磷、铅、锌、金、铁等矿。②造山带内显生宙矿产十分丰富，主要分布于中亚成矿带、秦-祁-昆仑成矿带、特提斯-喜马拉雅成矿带和滨太平洋成矿带(翟裕生, 2007)，而中生代约 86%的矿床集中于西太平洋成矿

带，特提斯-喜马拉雅和中亚成矿带中的矿床数量相对较少。③因西部大陆(指 108°E 以西)主要受古亚洲构造域和特提斯-喜马拉雅构造域的控制，而东部主要受太平洋构造域的控制，因此东、西部大陆成矿特征区别显著。如东部虽面积仅占全国的 55%左右，却分布我国已知中、大型矿床数的 3/4；前寒武纪绝大多数超大型、特大型金属和非金属矿床都分布在中国东部大陆。④同一矿种在空间分布上表现极不均衡性，如我国已探明稀土资源量居世界之首，但稀土矿床具有“北轻南重”的分布特点；又如我国境内金矿主要分布于东部西太平洋成矿带的华北北缘、胶东和华南东南沿海，以及华北南缘的秦岭-大别、西南三江特提斯成矿带和华南江南成矿带。其中，中国东部地区已知金矿床(点)占总数量 89%、探明储量约占 95%。⑤不同成因类型的同一矿种在空间分布上也表出不均衡性。如中国境内不同成因类型的铀矿床具有显著的空间分布规律，并表现成矿环境的专属性(蔡煜琦等, 2015)：砂岩型铀矿床主要产于中国北方系列中-新生代陆相盆地中，可能是古亚洲构造域和太平洋构造域形成演化导致陆源碎屑沉积和含铀富氧流体大规模运移的结果；火山

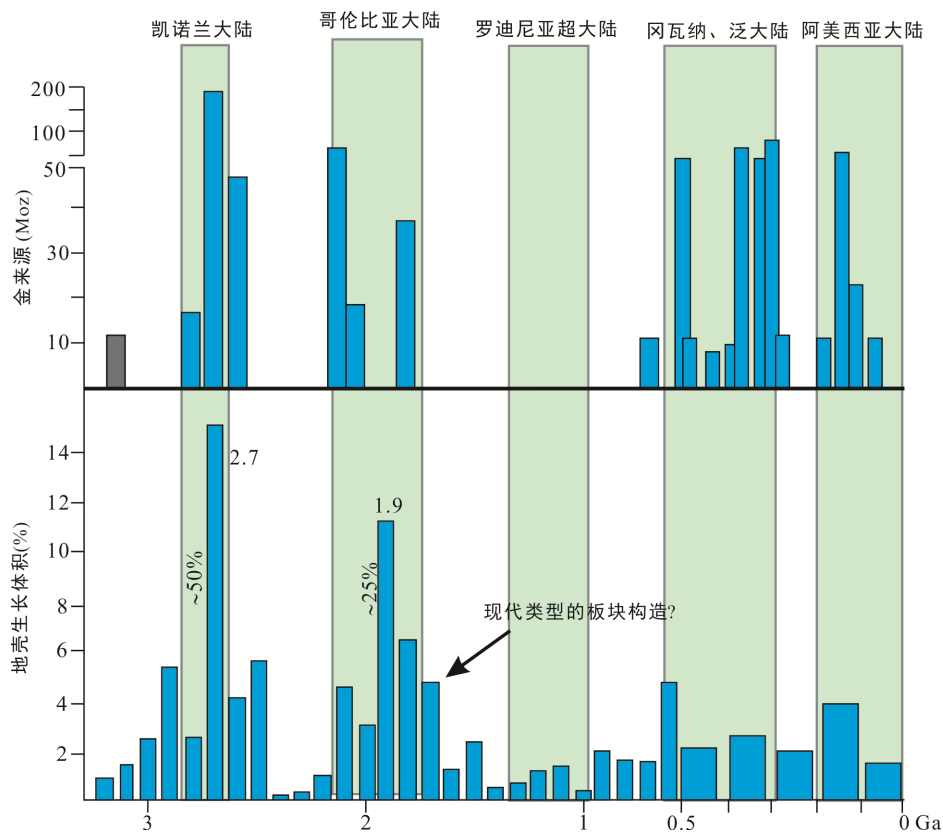


图 4 造山型金矿金资源量与地质构造演化史和地壳增生量的关系(据 Goldfarb et al., 2010)

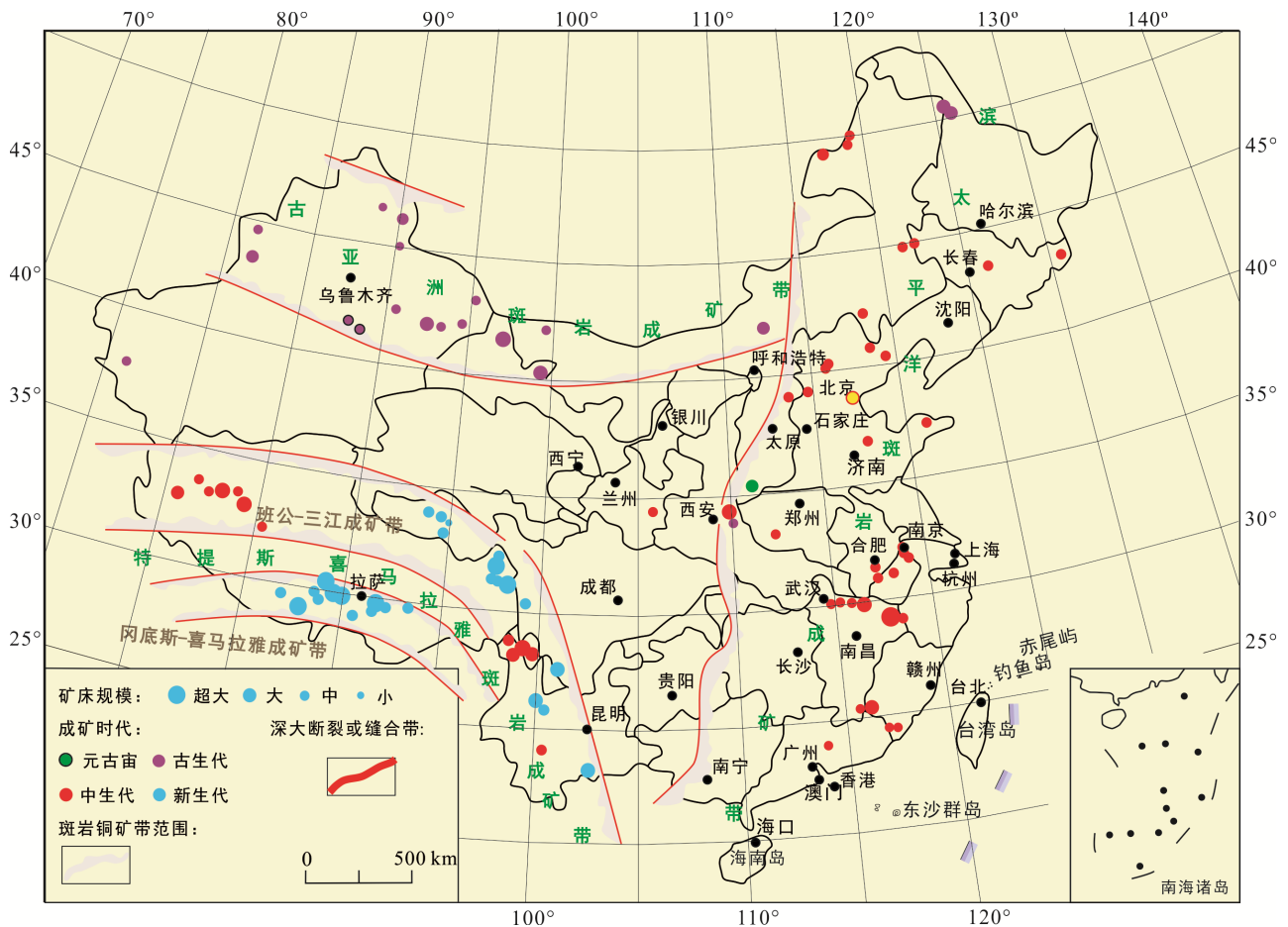
Fig.4 Gold resources of orogenic gold deposits and crustal growth volumes in the Earth's history

岩型和花岗岩型铀矿床主要产于中国华南地区印支期-燕山期构造-岩浆活动带内, 在中国中部长江中下游和秦祁昆构造-岩浆带也有产出, 与太平洋构造域和/或特提斯构造域形成演化过程导致的大规模花岗质岩浆侵入和火山活动及壳幔相互作用等深部过程密切相关; 碳硅泥岩型铀矿床主要产于中国西南地区的扬子陆块边缘, 其次是中国中部的南秦岭地区, 赋存于震旦纪至二叠纪海相碳酸盐岩建造和细粒碎屑岩建造中, 成因上可能与特提斯构造域演化有关。

1.3 中国大陆与全球成矿作用的对比

中国大陆已探明储量的金属矿产有 56 种, 包括黑色金属、有色金属、贵金属、稀有金属、稀土金属、分散金属和放射性金属。然而一批大宗型和战略型矿产资源如石油天然气、金、铜、铝土矿、优质锰、富铁矿、钾盐、金刚石等仍相当紧缺。与全球主要大陆相比, 中国大陆的成矿作用在空间分布

上无论是在矿床类型、还是在矿种上也存在显著的差异。例如, 与西澳和加拿大克拉通不同的是, 中国大陆太古宙地层中尚未发现有重要价值的与科马提岩有关的镍-铜-金矿床, 在花岗绿岩带中也缺少太古宙时期形成的大型-超大型金矿床; 元古宙时期, 中国克拉通面积虽有所扩大, 但其在较长时期内处于不稳定状态, 缺少像南非大陆中发育巨型稳定克拉通盆地, 因而不具备含金砾岩型金矿的形成条件; 也缺乏像西澳 Pilibara 克拉通内稳定的古陆风化环境, 难以形成 Hamersley 型巨型富铁矿床。又如与全球经典斑岩型铜矿产出地——安第斯-科迪勒拉成矿带(Cooke et al., 2005)不同的是, 中国大陆斑岩型铜矿也显示自身的成矿特点(Yang and Cooke, 2019): ①尽管中国境内斑岩型铜矿的产出与全球三大成矿域相对应, 但从矿床数量和规模来看, 以特提斯-喜马拉雅成矿带为主, 而古亚洲和太平洋成矿带的产出相对较少(图 5); ②成矿环境多样, 不仅产于俯冲



图中矿床名称详见李文昌, 2014。

图 5 中国三大斑岩铜矿成矿带及主要矿床分布图(据李文昌等, 2014 修改)

Fig.5 Distribution of the three porphyry copper metallogenic belts and main porphyry copper deposits in China

有关的岛弧,也可出现在陆-陆碰撞、大陆裂谷和碰撞后走滑断裂带等环境(Hou et al., 2011); ③成矿持续时间长,从太古宙至新近纪均有产出,但主要集中于中、新生代; ④常与矽卡岩型、火山热液型、VHMS 型、SEDEX 型和 MVT 型等矿床相伴生,但规模相对较小。

2 成矿作用空间不均匀性的控制因素

实际上,成矿作用在空间上表现出不均匀性的同时,在时间上也表现出不均匀性,显然这两者是一对不可分割的有机整体。因此,可以认为控制成矿作用的空间分布不均匀性的因素也就是控制成矿作用的时间分布不均匀性的因素。

2.1 大陆演化的差异性控制

成矿作用在空间分布上表现出极不均匀性与地球历史时期地壳演化及其大地构造发展阶段差异性关系密切,而这种差异性又具体表现在全球大陆的地壳组成和结构的差异上。与全球其他相对稳定大陆(如加拿大克拉通、西澳克拉通、印度克拉通等)相比,中国大陆本身具有复杂的地壳演化历史和独特的地质构造特征。中国大陆地处欧亚板块、印度板块和太平洋板块的交汇部位,是由数个大小不同的陆块在地质历史时期经多次碰撞拼合而成。中国大陆地壳组成和结构最基本特征是由一系列不同时期的弧-盆系统经多期多阶段碰撞、拼贴而形成的,一系列造山带组成的构造域将华北、扬子 and 塔里木三大陆块统一为一个整体;中生代以来,中国大陆、特别是其东部地区又经历了陆内造山与岩石圈伸展和减薄的多期次交替,不仅强烈改造或破坏了古老大陆岩石圈或克拉通,同时导致大规模的岩浆作用(大火成岩省出现)、显著的陆内变形(NE-NNE 向深大断裂、断块隆升和剥蚀、挤压逆冲推覆与褶皱、盆-岭构造省和变质核杂岩等)和大规模的钨、锡、铋、钼、铜、铅、锌、金、铈等有色稀有和贵金属与放射性金属(U)的爆发式成矿(Mao et al., 2011, 2013)。中国大陆这一复杂而特殊的地壳演化和地质构造特征,决定了其成矿作用具有十分鲜明的特色,由此也控制了它在成矿作用的空间分布上与全球大陆差异显著。

2.2 地壳/地幔化学组成不均一性的控制

成矿域和成矿省概念的提出,实质上暗示了区域规模地球化学异常的出现或矿床所在区域的地壳或地幔存在大规模地球化学不均一性。这种不均一性早被证实,并认为是控制成矿作用空间分布不均

一的重要因素之一。成矿物质分布的不均一性已被广泛应用于解释不同地质构造单元元素富集成矿的差异,并提出了“地球化学省”或“地球化学块体”的概念,认为地壳或地幔、地球化学块体内部结构决定了元素的浓集程度和富集成矿的轨迹,进而造成一些成矿元素呈带状分布的特征(Xie and Cheng, 2001)。人们已意识到,岩石圈厚度变化因地幔物质分异的差异,岩浆岩性质和元素成矿也会出现明显的分带。以太平洋地区为例,中央带主要分布岩浆岩为基性、超基性岩,Cr、Fe、Mn、Ni、Co 等亲铁及铂族元素富集;内带中酸性岩发育,主要有 Cu、Pb、Zn、Ag、Bi、Sb、Au 等亲铜元素富集;而外带则广泛分布酸性岩,中生代成矿元素多为 W、Sn、Li、Be、REE、Nb、Ta 等亲石元素,中国华南地区广泛分布的不同时代花岗质岩和与之相关的矿产即位于该带内。成矿元素在区域分布上的不均一性十分显著,从世界范围来看,钨成矿区主要发生在太平洋带的外带或靠近大陆的内部带(如我国南岭地区),其次为地中海带以及中亚至我国西北地区。环太平洋带在侏罗纪至白垩纪末期形成,且带中花岗质岩浆有关的钨、锡等矿化也说明是大陆分异演化到一定程度时才能产生钨锡矿化。

化学元素分布的不均匀性不仅影响到成矿元素的空间分布,而且也制约了成矿元素的时间分布,从而在成矿作用上表现出一定的时空分布规律性。一些元素在地球历史的早期阶段相对富集,但随着地球向晚期发展,其富集程度越来越弱。如金矿主要产于前寒武纪,显生宙以来产金则相对较少;全球铁矿分布也具有类似的特点,最富集于前寒武纪、特别是元古宙。而钨、锡、铅锌和稀有金属等矿产分布则表现出不同的趋势,全球范围内前寒武纪钨成矿最少,中生代燕山期则是钨矿化的高峰期,全球约 3/4 的钨产量集中于燕山期;锡的矿化虽然在 10 亿年前就已开始,但具有经济意义的锡矿化则集中在较晚的地质时期。

世界各大陆(北美、非洲南部、印度、乌克兰及波罗的海等地区)在地球演化历史时期成矿元素的变化规律是:前寒武纪主要成矿元素有 Pt、Fe、Ni、Co、Au、U 等;古生代主要成矿元素为 U、Pb、Co、Ni 和铂族元素,其次为 W、Sn、Mo、Hg 等;中生代主要成矿元素是 W、S、Au、Sb;而新生代则以 Hg、Mo、Cu、Pb、Sb 等为主。中国大陆不同成矿域在成矿元素组合和成矿强度上也具有较大的差异:在成矿元素组合上,华北地块在太古宙形成铁成矿

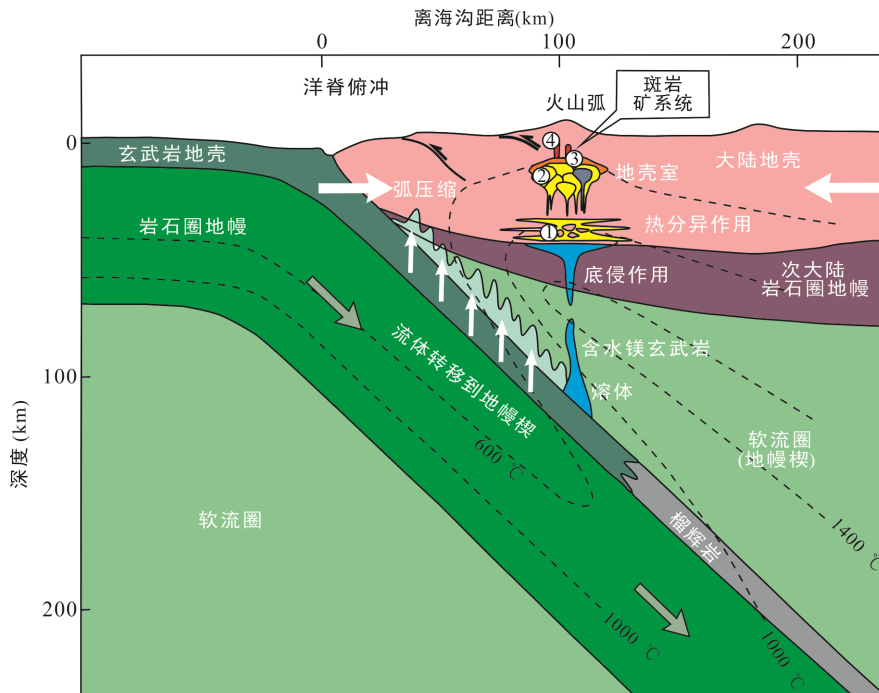
系统、元古宙产生铜-铅-锌、稀土-铁-铅-锌和镁-硼-石墨(古元古代的石墨)成矿系统、古生代形成铜-钼成矿系统、中生代产生金、银-铅-锌和钼成矿系统(Zhai and Santosh, 2013); 而华南地块在元古宙晚期形成铜-铅-锌、铅-锌和铁-钴-铜成矿系统、晚古生代形成有色和贵金属成矿系统、晚古生代至早中生代产生金、铜-铅-锌和铂-钨-镍-铜-钴成矿系统、晚中生代产生金-铋-钨、钨-锡-铋-钨-铍、稀土和钨-铜成矿系统、喜马拉雅期则出现铜、金成矿系统(Hu et al., 2017)。在成矿强度上, 古亚洲成矿域以华北地块及其北缘最高, 环太平洋成矿域以华南地块最高, 特提斯成矿域以西藏地块最高, 而秦-祁-昆成矿域以秦岭-大别造山带最高。

总体上, 地壳中成矿元素在空间和时间上分布是极不均匀的, 具有一定的区域性特征和变化规律。这种空间及时间上的不均匀性主要是岩石圈组成和结构、构造运动和岩浆活动及其演化等在时空上差异所引起的, 而这种差异又是由地幔物质分异以及地壳在后期发展演化的不均匀性所决定的。

2.3 成矿构造环境的差异性控制

矿床代表着地壳中因岩石圈各种地质作用扰动而发生的系列内生或外生成矿过程而出现的异常金属富集(Santosh and Pirajno, 2014)。人们已认识到构

造环境或构造作用是控制矿床在空间和时间上分布不均匀性的一级因素, 进而控制了与矿床形成有关的其他地质过程, 如岩浆成分与演化、沉积盆地形成与充填、与成矿流体运移和矿物质沉淀场所有关的断裂和剪切带等构造的发展等。由于地壳演化及其大地构造发展阶段实质上表现为超大陆多旋回的聚合、裂解与地壳增生, 由此还导致了不同类型的构造环境和构造类型。且所伴随的成矿事件又是多种有利因素的耦合结果, 因而不同成矿构造环境下的成矿作用在空间和时间分布上就往往表现出不均匀性或特殊性(Goldfarb et al., 2010)。例如, 造山型金矿主要产于 ca. 2.7 Ga 以来的科迪勒拉型造山带内, 金-砷-钨和汞-铋矿床则赋存于地体缝合带较浅部地壳。又如世界上大多数斑岩型铜-(钼-金)矿床和浅成热液型金-银矿床主要产于岩浆弧环境(图 6), 典型的例子有产于安第斯山脉中部大陆弧(Cooke et al., 2005)和东太平洋岛弧环境内的斑岩型铜矿床(Sillitoe, 2010)。大量研究证据表明, 岩浆源区高氧逸度是 Cu、Au 等成矿金属元素进入熔体进而形成大型斑岩型矿床的关键条件(Richards, 2011)。再如世界上大多数沉积岩型铅锌矿(MVT 型、SEDEX 型等)主要与地壳发展历史时期的裂谷或被动大陆边缘环境有关(Leach et al., 2010)。



图中标识的数字①~④代表导致大型斑岩矿床形成的四个关键触发过程。

图 6 俯冲环境下斑岩型矿床形成模式图(据 Wilkinson, 2013)

Fig.6 Suprasubduction zone setting for the formation of porphyry ore deposits

2.4 重大地质构造事件的控制

超大陆多旋回聚合和裂解对成矿作用及矿床的时空分布的控制已引起众多学者的关注(Nance et al., 2014), 如我国华北地区主要矿床类型的时空分布与该区多期聚合和裂解事件表现出耦合性, 具体表现为新太古代地壳巨量生长和稳定化过程与条带状 BIF 铁矿成矿系统、古元古代裂解-俯冲-增生-碰撞和大氧化事件与铜-铅-锌、镁-硼成矿系统、晚古元古代-新元古代多期裂解与稀土-铁-铅-锌成矿系统、古生代造山与铜-钼成矿系统、中生代岩石圈减薄和克拉通破坏伸展构造与金、银-铅-锌、钼成矿系统(Zhai and Santosh, 2013)。我国华南矿产资源丰富、矿床类型多样, 其成矿作用与 2.1~1.4 Ga 的 Columbia 超大陆演化、1.3~0.9 Ga 格林威尔或晋宁期造山和 Rodinia 超大陆聚合及随后的裂解、ca. 650~500 Ma 的 Gondwana 超大陆聚合、泥盆纪以来的特提斯洋演化和 ca. 250~200 Ma 的 Pangea 大陆形成、以及 ca. 180 Ma 以来的太平洋板块俯冲和由此引起的岩石圈伸展减薄等地球动力学事件有密切

关系(Zaw et al., 2007; Hu et al., 2017)。在东南亚地区, 以与斑岩有关的矽卡岩型、浅成热液型和沉积型/造山型金矿为特色的多类型矿产形成已被认为与冈瓦纳大陆裂解、弧岩浆作用、弧后盆地发展以及弧-陆和陆-陆碰撞等长期复杂的构造演化有关(Zaw et al., 2014)。Deb (2014)对印度地块铁-锰-磷、金、铜-钼-锡、铅-锌-铜、铅-锌、铜-钼-稀土、钨-锡等不同类型矿床的时-空分布规律研究发现, 该地块前寒武纪成矿作用具有 4 个特定的时期, 其中, 新太古代(ca. 2.8~2.5 Ga)、古-中元古代(ca. 2.3~1.5 Ga)和新元古代(1.0~0.7 Ga)成矿幕分别与 Kenorland 超大陆、Columbia 超大陆和 Rodinia 超大陆的聚合与裂解有关, 且新太古代和古元古代两个最强烈的成矿事件又与全球地壳增长的主峰相对应(图 7)。Teixeira et al. (2007)研究也发现, 南美克拉通经历了古元古代(2.3~1.8 Ga)、中元古代-新元古代(1.3~0.6 Ga)和新元古代-显生宙(650~500 Ma)的多次聚合与裂解, 并分别伴随金-钼-铈-钨-锡矿化、以金-钼-镍-铜-锌-铅等为主的矿化和以铅-锌-铜等为主的矿化。

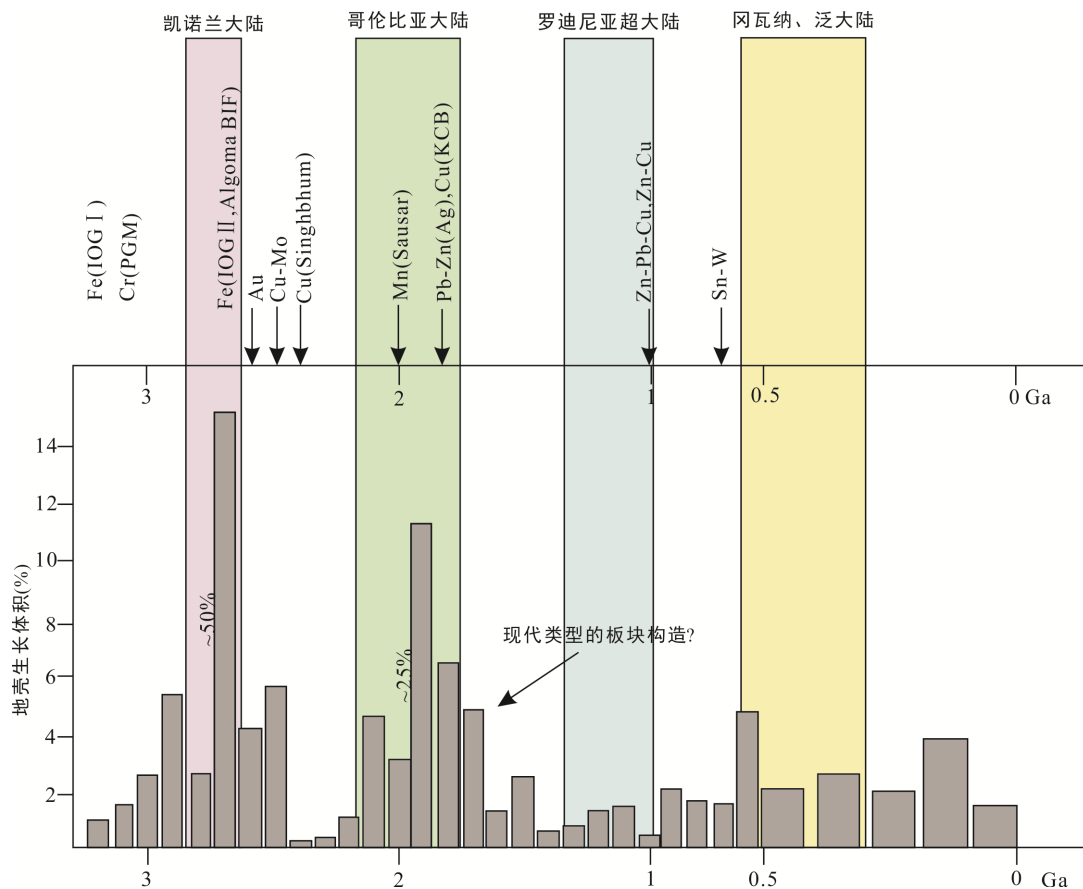


图 7 印度主要矿床类型与年轻地壳增长和超大陆聚合综合图(据 Deb, 2014)

Fig.7 A composite diagram of crustal growth and supercontinent assembly in relation to the major ore deposits in India

因此,某些重要类型矿床尽管产于某一特定的构造环境,但也可形成不同地壳发展时期相似的构造背景下,因而常表现出“幕式”或“重复”的特点。如造山型金矿的发生可达30亿年以上,在中太古代到晚前寒武纪、直至显生宙整个地史时期表现出“幕式”产出特征(Goldfarb and Groves, 2015);又如广受关注的热液 IOCG 型矿床,尽管可形成于地壳发展的不同时期,但主要与伸展构造事件(如陆内非造山岩浆环境、俯冲相关的大陆边缘弧伸展环境、陆内造山垮塌环境)及所伴随的脆-韧性剪切变形关系密切(Williams et al., 2005)。这些“幕式”成矿作用与全球超大陆的聚合与地壳增生事件相对应(图4)。

世界上一些重要矿床类型通常分布于地壳演化的特定时期,它们的形成受特定地球动力学环境和重大地质事件的制约。地幔柱作为特殊地球动力学环境下的产物,其与大规模成矿关系越来越引起广泛关注(Pirajno et al., 2009)。地幔柱活动不仅导致板内不同时期大规模岩浆作用、出现大火成岩省,且相应地发育了世界级的正岩浆型铬、铜-镍-PGE 硫化物矿床及与其伴生的大陆斑岩型铜-钼成矿系统和镍-钴-砷、金、铋-汞热液脉型矿床(Mao et al., 2008),这些矿床在成矿系统成因上与地幔柱活动在时空分布表现强烈的一致性。典型的实例如澳大利亚始太古代至现代不同时期的大火成岩省及相关的成矿系统(Pirajno et al., 2009)。亚洲大陆二叠纪-三叠纪大规模的火成岩事件及大型铜、镍、PGE、金和稀有、稀土矿床与超地幔柱活动也有密切的关系。引起板内大规模岩浆作用和沿走滑断裂带分布的岩浆-热液型银-铋、银-铅-铋、银-铅、银-汞-铋、锡-银矿床和脉型、浅成热液型、再活化脉型金矿床、镁铁-超镁铁质岩相关的铜-镍-PGE 矿化,可能是碰撞后地幔柱活动或软流圈上涌结果。类似于 BIFs 的成因,某些深海 VHMS 型矿床(Berge, 2013)、斑岩型铜-钼矿床以及汞、金-汞、稀有金属和金成矿系统(Webber et al., 2013)也被认为与地幔柱活动具有直接的和/或间接的关系。Griffin et al. (2013)进而认为 SCLM(subcontinental lithospheric mantle)因为其本身含有丰富的成矿元素,因此对岩浆型矿床形成可能起重要的作用。

2.5 构造转换、转折和叠加的控制

构造转换或转折以及不同级别、不同类型、不同层次的构造叠加,也是控制成矿作用时空分布不均一性的重要因素,这些构造过程往往诱发多期成

矿的叠加,因此某些矿床通常表现出多期成矿叠加和富化的特征,在空间分布上也往往表现出区域性或仅仅出现某一特定环境,以致难于用某一种或单阶段成矿模式解释它们的成因,如我国内蒙古白云鄂博特大型稀土-铌-铁矿床(陈国达, 1982)、海南省石碌大型富赤铁矿铁多金属矿床(Xu et al., 2013, 2014, 2015)。为阐明这些复杂成因矿床的形成机理,陈国达(1982)曾提出多因复成矿床的概念,认为它是“那些由于不止一次的成矿作用的综合结果,以致明显地同时具有多方面的成因特征的一类矿床”,通常表现出“叠加富化、改造富化和再造富集”等三种成因模式。我国大陆成矿作用一个鲜明特色就是:由于不同构造域(如古亚洲、特提斯、环太平洋)在不同时期的转换和叠加(赵越等, 1994),丰富的矿产资源集中分布于世界上三大巨型成矿带,即古亚洲成矿带、特提斯成矿带和环西太平洋成矿带(图5),并在成矿作用特征、矿床成因类型、矿种和时空分布上表现出明显差异。基于我国特殊的地质构造发展和演化特征,有学者还提出“叠加成矿”论(涂光炽, 1979; 曾庆丰等, 1984),用来解释中国大陆、特别是中国东部大陆中生代以来的大规模成矿富集事件与赋存规律,并认为构造叠加与成矿叠加是相互依存的。

近二十年来,随着对成矿作用动力学研究的不断深入,人们还逐步意识到构造应力场转换与界面成矿是成矿作用动力学的关键和核心,并决定着矿床的形成、定位与时空分布(邓军等, 1998)。事实上,构造应力场转换与构造域的发生、发展和不同构造域体制的转折或转换、叠加有着密切的成因联系(翟明国等, 2003; Sun et al., 2007, 2013; 邓军等, 2010; 宋传中等, 2010),并往往表现为不同构造层次叠加作用和韧-脆性变形的转换,以及同一构造层次不同时期、不同构造部位应力的转换,这些过程最终导致有利的构造物理化学成矿界面(吕古贤等, 2001),进而制约了成矿作用性质和矿床/矿种类型及其空间分布和不均匀性。例如,在矿田尺度上,我国海南省石碌富铁矿的形成与 NE-NNE 向褶皱叠加于早期 NW 向褶皱之上、并引起富铁矿矿体主要赋存于复向斜核部有关(图8),这种多期褶皱叠加(即构造应力转换)常导致构造穹隆、构造盆地和鞍状构造等,并引发不同尺度的物质(包括地层、岩体、矿体、岩石、矿石等)的重叠、减薄和加厚变富(Ghosh and Mukhopadhyay, 2007)。又如,从构造体制转换的

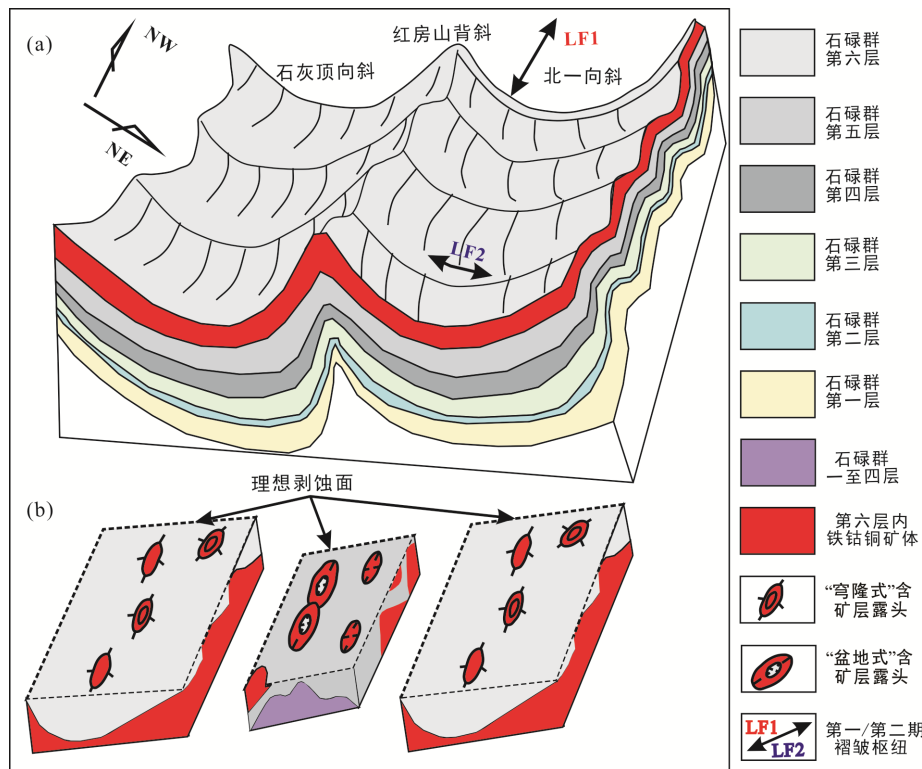


图 8 海南省石碌铁多金属矿田叠加褶皱立体形态(a)和理想剥蚀水平(b)示意图

Fig.8 Sketch map showing the three-dimensional room (a) and ideal denudation level (b) of the Shilu Fe-Co-Cu ore district due to fold superimposition in Hainan province, South China

角度来看,中生代时期,由于中国大陆、特别是中国中东部大陆经历了重大构造转折,即从晚古生代-早中生代初的板块边缘造山向中-新生代的板内或陆内造山的转变(Zhou et al., 2006; Li and Li, 2007; Mao et al., 2014),因而在中国东南部创造了世界级的钨、锡、铋、钼、锑矿床(图 9, Mao et al., 2011, 2013)。

2.6 矿床形成与保存能力的共同控制

单个矿床类型的时空分布模式反映了其形成和保存能力这一复杂的相互作用过程(Kesler and Wilkinson, 2008),这个过程反过来还折射出地球演化历史构造作用过程和环境条件的改变。由于某些特定矿床类型在时间分布上的周期性变化可能与地质历史时期超大陆聚合与裂解有着密切联系,而其他类型矿床可能与局部陆内伸展有关。如世界上的汞和金汞矿床虽然主要分布于环太平洋成矿带、特提斯成矿带和中亚成矿带上,但古老克拉通的陆内裂谷和拗拉槽、不同时期造山带内的板内裂谷、活动大陆边缘也有利于这些成矿系统的产生,因而超大陆旋回、以地幔柱为主的构造演化和类似现代板块的构造是造成矿床分布不均一性的一级控制因素(Kerrich et al., 2005)。从前寒武纪到显生宙,大陆壳

增长速度降低、陆下岩石圈地幔厚度和密度改变,导致了整个地史时期矿床的形成和保存过程进一步解耦,从而影响着包括造山型、斑岩型和浅成热液型、VHMS 型、砂金型、IOCG 型、PGE 类、钻石类和可能的 SEDEX 型等矿床在形成和保存时间上的分布模式(图 10)。

以上控制因素分析表明,成矿作用与大地构造演化及其地球动力学背景和重大地质事件存在着密切的成因联系,进而导致不同成因类型的矿床或矿种在时空分布上的不均匀性。这种不均匀性主要体现在:①世界上一些重要矿床类型通常分布于地壳演化某特定的时期;②某些矿床成矿系统可能只出现于某特定构造环境或地球动力学背景下;③不同构造域在同一时期或同一构造域在不同发展阶段其成矿作用可能表现特殊性;④由于构造常出现叠加作用,成矿作用也表现叠加特点,往往形成一类大而富的矿床。超大陆的聚合和裂解所表现出的旋回性或周期性,同时也导致了成矿作用的旋回性或周期性特征;另一方面,不同构造域的地壳因物质组成、结构和演化发展阶段上的差异,即地球化学成分的不均一性,还会造成成矿作用上的多样性和特

殊性。板块构造侧重解决板块边缘的成矿问题, 地幔柱构造则对解决板内或陆内成矿作用机制有独特的优势; 而超大陆旋回在地壳演化过程的某些活跃期或活动高峰(如俯冲碰撞、裂谷或裂解)必然伴有强

烈的地壳变形、岩浆活动和变质作用及盆地沉积, 因此, 成矿作用在时空上所表现的不均匀性, 实质上是超大陆旋回地壳演化至某些特定时期因大地构造体制差异或地球动力学环境不同的具体表现。

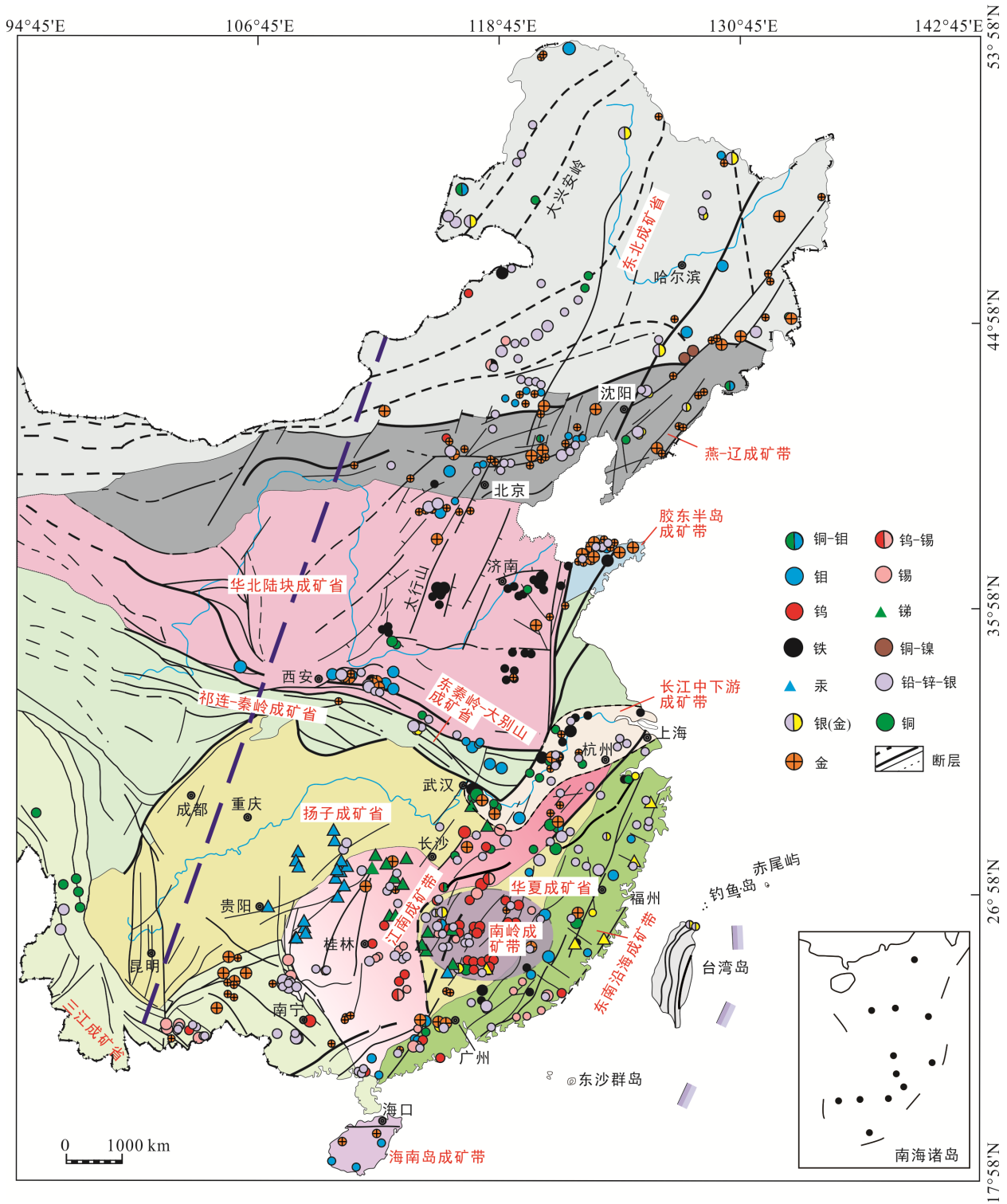
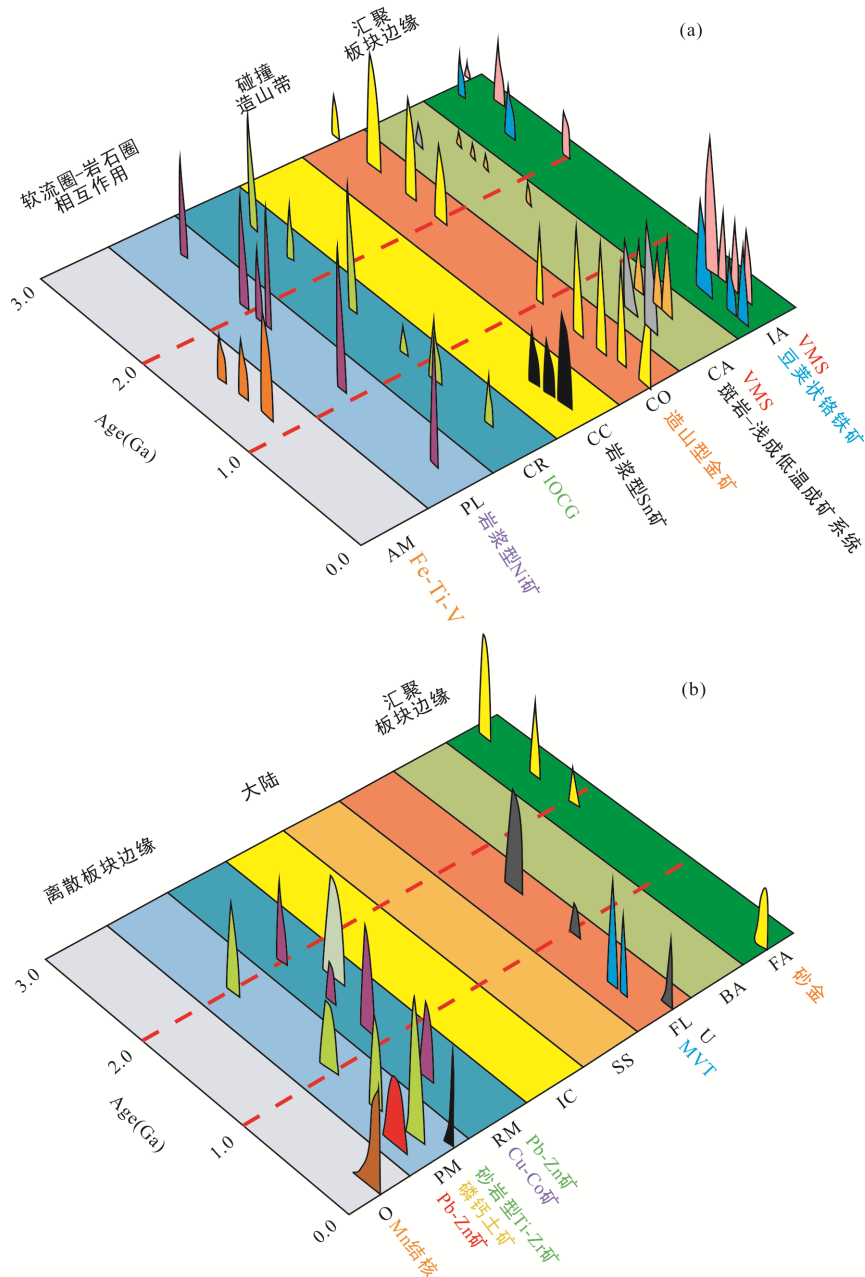


图 9 中国东部包含主要晚中生代燕山期矿床的重要成矿带(省)分布图(据 Xu et al., 2017 修改)

Fig.9 Map showing the distribution of major metallogenic belts or provinces hosting predominantly Yanshanian (Late Mesozoic) ore deposits in East China



图(a)中 AM. 非造山岩浆岩; CA. 大陆弧; CC. 陆陆碰撞造山带; CO. 科迪勒拉型造山带; CR. 大陆裂谷; IA. 洋内弧; PL. 地幔柱-岩石圈. 斑岩型-浅成热液型和 VMS 型矿床均产于洋内弧和大陆弧环境, 但方便描述, 前者投在 CA 轨迹线. 相似地, 岩浆型 Sn 矿应在 CO 和 CC 环境均有产出, 但只投影在 CC 轨迹线内. 图(b)沉积盆地中; BA. 弧后盆地; FA. 弧前盆地; FL. 前陆盆地; IC. 陆内盆地; O. 大洋盆地; PM. 被动边缘盆地; RM. 大陆裂谷盆地; SS. 走滑盆地. 砂金矿在 FA 和 BA 两种环境均有产出, 但方便描述, 只投影在 FA.

图 10 不同地球动力学环境下特定类型矿床的循环变化(据 Kerrich et al., 2005)

Fig.10 Secular variations of specified classes of mineral deposits in accordance with the dynamic settings

3 成矿作用时空分布不均匀性研究展望

全球矿产资源发育特征和时空配置及形成机制是当今地球科学研究的重大课题之一。20 世纪 60 年代末以来, 随着全球板块构造和地幔柱构造等地

球动力学理论的兴起与广泛应用, 对重新认识全球矿产资源的形成与时空分布规律已产生了深远影响, 并推动现代成矿学的创新和找矿勘查模式的深刻变革。但目前针对全球、特别是针对中国大陆矿产资源的形成与时空分布特征仍有待进一步深入研究。

3.1 大陆成矿作用时空分布不均匀性的机制研究

大陆成矿作用是指古大洋形成以前和古大洋闭

合以后,在大陆板块内部演化阶段、主要由大陆板块内部动力学过程(地幔柱活动、岩石圈伸展、岩石圈拆沉、幔源岩浆底侵等)而诱发的成矿作用(李锦轶和肖常序,1998;胡瑞忠等,2010);而俯冲碰撞成矿是基于威尔逊板块构造旋回体制,因板块扩张-离散和板块俯冲-碰撞-汇聚而在板块边缘(包括造山带)发生的成矿作用,即板缘成矿。因此,两者具有完全不同的成矿构造环境、动力学背景以及成矿物理化学条件等。然而,与板缘成矿作用相比,有关板内或陆内矿产资源的时空分布规律与成因机制的认识还较为薄弱。

基于威尔逊板块构造旋回理论在解释大陆板块内部的构造变形、岩浆活动和成矿作用等所遇到的挑战,20世纪80年代末以来国际上掀起了以“发展板块构造理论、深入理解大陆成矿作用机制、提高发现大陆内部矿床能力”为主要目的的“大陆动力学”研究(肖庆辉,1996,1997;李锦轶和肖常序,1998;许志琴等,2008;滕吉文等,2009,2014;胡瑞忠等,2010;张国伟等,2011;翟明国,2015)。经过近三十年来的研究与发展,大陆成矿作用已成为当前国际矿床学研究的前沿领域和新热点(毛景文等,2005;胡瑞忠等,2008,2010)。由于地球深部物质与能量的交换、物质运移的深层过程和动力学机制是大陆动力学研究的核心科学问题(滕吉文等,2014),而大陆的物质演化(包括成矿元素)是解开大陆动力学之谜的基础(翟明国等,2015),因此,深入研究大陆成矿作用,不仅能揭示制约金属元素巨量堆积的机理及与壳-幔相互作用等深部过程的关系,反过来也为阐明大陆组成与深部结构、增生和保存及与之相关的大陆裂解、离散和聚合的动力学过程和机制等重大科学问题提供重要依据(许志琴等,2008;滕吉文等,2009;Pirajno et al., 2009b;张国伟等,2011;Dobretsov and Buslov, 2011;Zhai and Santosh, 2013;Goldfarb et al., 2014;Nance et al., 2014)。研究大陆动力学与成矿关系的大陆成矿学也必将成为当代地球科学系统新的学科增长点(翟明国等,2016),对阐明全球大陆矿产资源的形成机理及其时空配置特征等提供重要基础。

3.2 从全球构造视角,加强成矿作用时空分布规律研究

目前,区域性或局部性成矿作用的时空分布规律研究相对较多,而从全球视角开展对比性研究的较少。虽然全球地质构造及其演化表现多样性、复杂性和特殊性,但全球板块的起源与演化方式、增

生和消亡过程、以及驱动机制具有一定的相似性,这也是从全球(板块)构造的视角研究成矿作用的时空分布规律及其不均匀性分布的原因。大陆成矿作用在中国、尤其是在中国东部地区极其广泛和重要(Xu et al., 2017),因此,中国大陆应成为研究大陆成矿作用特征、破解“大陆成矿之谜”的“世界窗口”。但相对全球其他大陆,由于中国大陆地质构造的复杂性和特殊性(Wang and Mo, 1995;任纪舜等,1999;Wan, 2010),其成矿作用还表现出显著的特色,如近80%中-大型金属矿床产于燕山期(陈毓川等,2007)。不过,中国大陆与全球大陆在形成演化还具有相似性,大致均经历了Kenorland、Columbia、Rodinia、Gondwana或Fan-Africa、Pangea和Amasia等超大陆旋回。因此,在深入研究中国大陆构造演化特点的基础上,应将中国大陆构造演化置于全球(板块)构造体系内,加强成矿作用非均匀性的深部过程和全球性对比研究,以揭示与全球其他大陆的显著差异(翟明国等,2016),并阐明中国大陆成矿作用的时空分布规律及其不均匀性原因,对认知中国大陆的增生和陆内演化过程及动力学机制等具有重大理论意义。

3.3 加强深部成矿过程研究,揭示成矿作用不均匀性原因

当今,地壳深部已成为满足经济发展对矿产与油气资源需求的主战场。但如何应用浅部信息对深部地质体及其成矿过程进行有效推断,则是探测深部资源的关键,也是深入揭示深部资源形成与演化的基础。深部和浅部是两个相对的概念,它们是连续、不可分割的整体。地壳由浅到深,其地质和物理化学条件具有一定变化规律,如随变质程度、温度、压力的增高,变形特征由脆性转变为脆-韧性、韧性,流体压力体系由静水压力变为静岩压力等等。另一方面,沟通浅部和深部地质的介质可以是岩浆(壳源、幔源或壳-幔混源)或其他地质流体(变质水、大气降水、或混合热液等等),通道一般是构造薄弱带(如陆块内的先存断裂或陆块间的边界深大断裂等),动力是密度差引起的浮力以及各种地质因素(如构造变形、沉积压实、岩浆去气)造成的流体超压,这些条件变化往往控制着深部至浅部的成矿作用特点。因此,通过浅部信息追索深部的成矿过程与机理,就必须对沟通浅部和深部的动力学过程进行研究。另外,对于深部资源探测来说,了解成矿物质是来源于深部、远处还是就近,尤其重要。最后,矿产及油气资源的形成还需要合适的矿质沉淀及圈

闭条件。因此,加强深部成矿过程与机理研究,并建立深部资源探测的理论体系,要解决的是成矿物质源区、成矿流体动力及通道、成矿物质聚集的物理化学条件等三个方面的问题,这些均有助于深刻理解深部成矿作用过程和矿产资源的形成与时空分布规律。而且,从全球大陆的形成与演化来看,同一地质历史时期地球深部的不同部位因层圈相互作用的强度不同、或者由于地质演化历史的不同阶段地球内部层圈相互作用表现出强烈差别,地球浅部至深部的成矿作用在空间上往往也表现出不均匀性或丛聚性,或者不同时代的成矿作用强度的差异,矿产资源时空分布表现出不均匀性。因此,加强深部成矿过程与层圈相互作用关系的研究,深入揭示地球深部物质与能量的交换及其动力学机制,对阐明全球矿产资源的形成机理、分布规律与时空演化特征将提供重要依据。

3.4 加强成矿系统、成矿系列研究

成矿系统(Groves et al., 2005; Pirajno and Chen, 2005; Zhai, 2005; Groves and Bierlein, 2007)组成特征和发育规律是当前矿床学研究的热点和未来趋势。成矿系统作为地球上一种特殊的物质运动系统,涉及有用物质由分散到浓集成矿的过程和机制,是指“在一定的时空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,它是具有成矿功能的一个自然系统”(翟裕生等, 1999; 翟裕生, 2001, 2007)。这一概念包括了控矿构造体制、成矿作用过程、形成的矿床系列和异常系列,以及成矿后变化保存五个要点,体现了矿床形成有关物质、运动、时间、空间、形成、演变的整体观与历史观(翟裕生, 2004, 2007; 翟裕生等, 2008)。由于成矿系统是将成矿的构造体系、流体系统和化学反应及矿床定位有机结合起来,因此开展成矿系统分析,不仅有助于深化区域和矿区成矿规律、正确认识矿床的形成和时空分布规律,而且对发现大矿、富矿和(深部)新类型矿床/矿种、并有效地指导矿产勘查等均具重要理论和实际意义(翟裕生等, 2000)。

成矿系统可划分为包括矿田(矿床)成矿系统在内的不同层次,且不同成矿系统形成于不同的构造环境和地壳深度,具一定的时-空边界,常包括多个矿种或多种矿床类型,是多种有利成矿与控制因素耦合的结果,因此,深入揭示不同成矿系统的组成特征、发育完整程度、发育规律和形成机制是成矿系统研究的主要任务,对阐明地壳不同层次的成矿

作用特征及其时空分布不均匀性提供重要证据。目前,成矿系统分析已趋于将造山带、盆地或盆-山系统的形成演化作为一个整体,并侧重于区域成矿地质背景包括深部作用背景、成矿作用演化、成矿系统动力学、地质流体与成矿作用、大型-超大型矿床形成的地质背景和控制因素以及全球性成矿规律等研究(翟裕生, 2004)。由于成矿系统形成、演化与区域构造演化和地球动力学行为密切相关,而构造系统演化又控制了区域成矿谱系的发育和成矿系统的演化,因而成矿系统动力学是确定成矿系统演化和最终结果的关键(邓军等, 1999; 翟裕生等, 1999)。加强不同构造体制、不同地球动力学背景下构造-流体-成矿系统及其动力学的研究,不仅有助于正确理解成矿系统的组成特征和发育机制,深入揭示重要与特色矿床的形成机理与时空演化,而且对阐明其中的大矿、富矿、新类型矿床/矿种的时-空配置及成矿动力过程,进而深化矿床成因的认识均具重大理论和实际价值(翟裕生, 1996, 2001; 於崇文等, 1998; 邓军等, 1999; 侯增谦, 2010)。

3.5 加强矿产资源时空分布不均匀性的形成机制研究

深入揭示全球矿产资源时空分布不均匀性的机制将涉及与成矿相关的各种地质过程和不同圈层间(岩石圈、水圈、生物圈、大气圈、壳-幔交换等)的相互作用等。由于成矿作用时空分布不均匀性主要与控制成矿的构造环境有关,而全球大陆不同块体在同一地质时期、或不同地质发展阶段成矿构造环境的差异又直接影响与矿床成因相关的各种地质过程,因而控制了不同矿种、不同成因类型矿床的时空分布不均匀性。毛景文等(2008)总结出华南地区中生代主要金属矿床成矿作用发生于三个阶段:晚三叠世(230~210 Ma)、中晚侏罗世(170~150 Ma)和早中白垩世(134~80 Ma)。其中,晚三叠世成矿元素组合为 W-Sn-Nb-Ta,成因上与过铝质二云母花岗岩有关,是华北、华南和印支三大板块后碰撞过程的成岩成矿响应;中晚侏罗世的成矿包括 170~160 Ma 斑岩-矽卡岩型铜矿和 160~150 Ma 与花岗岩有关的钨锡多金属矿床,均是 Izanagi 板块向欧亚大陆俯冲结果,但前者可能与 170~160 Ma 期间俯冲板片局部撕裂形成 I 型或埃达克质岩有关,而后者与 160~150 Ma 期间俯冲板片在局部(如南岭地区)开天窗、软流圈物质上涌、并形成壳幔混合型高分异花岗质岩有关;早中白垩世则形成浅成低温热液型铜金银矿床和花岗岩有关的钨锡铜多金属矿床,可能与俯冲板片方向改变、大陆岩石圈伸展(以大规模断陷盆地和变质

核杂岩出现为特征)导致的大规模火山活动和花岗岩岩浆侵位有关。另一方面, 每一特定构造环境的发生或构造环境的改变, 将产生一系列相应的控矿、导矿或赋矿构造, 从而决定了成矿作用的时空分布。例如, 中国东部燕山早期(ca. 200~135 Ma)大规模成矿作用主要受近 EW 向伸展型断裂构造控制, 而燕山晚期(ca. 135~65 Ma)的成矿作用主要产于

NNE 向伸展型断裂系统内, 分别与当时最大主压应力方向平行, 而两组构造的交汇部位则是最有利的富矿体成矿部位(图 11)。可见, 构造环境及由此导致的构造体系是影响成矿作用时空分布的一个关键因素, 它们不仅可作为流体和成矿物质运移的通道, 同时还改变成矿的物理化学条件, 并最终提供成矿物质沉淀、聚集和就位的空间。

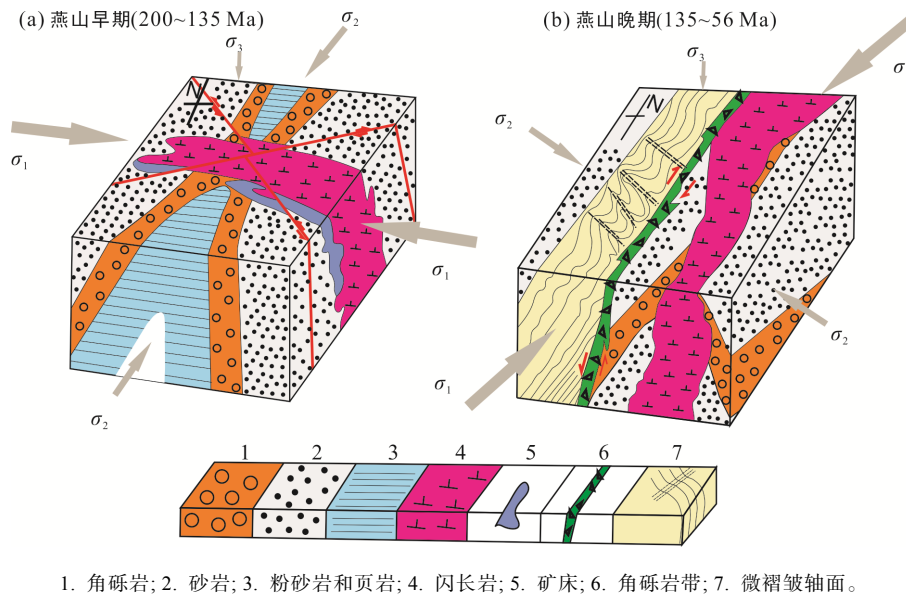


图 11 燕山早期(a)和燕山晚期(b)构造应力场、岩石变形及其对成矿作用的影响(据 Wan, 2010)
Fig.11 Tectonic stress fields, rock deformation and their influences on Yanshanian mineralization

然而, 目前对控制全球矿产资源时空分布不均匀性的根本原因及其机理仍有待进一步深入研究。由于矿床形成的地质与物理化学条件复杂, 一方面应从全球(板块)构造和地球动力学的角度, 运用地球各圈层物质与能量交换的基本原理, 来探讨成矿物质的源区及其迁移、沉淀与富集机制; 另一方面应从成矿构造环境的时空演化特征出发, 分析不同构造背景下所形成的矿种和矿床类型, 并重视我国周边和近邻国家的成矿作用的对比研究, 以阐明成矿作用的时空分布规律及其不均匀性的根本原因。

致谢: 中国地质大学(武汉)蒋少涌教授和中国地质科学院地质研究所杨志明研究员对本文质量的提高提出了许多有建设性的建议, 在此表示感谢!

参考文献(References):

蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 郭庆银, 宋继叶, 范洪海, 刘武生, 漆富成, 张明林. 2015. 中国铀矿资源特征及成矿规律概要. 地质学报, 89(6): 1051-1069.

曾庆丰, 李东旭, 吴淦国. 1984. 构造叠加与成矿叠加. 中国科学(B辑), (5): 449-457.
陈国达. 1982. 多因复成矿床并从地壳演化看其形成机理. 大地构造与成矿学, 6(1): 33-55.
陈毓川, 常印佛, 裴荣富, 任纪舜, 汤中立, 翟裕生. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价. 北京: 地质出版社.
邓军, 侯增谦, 莫宣学, 杨立强, 王庆飞, 王长明. 2010. 三江特提斯复合造山与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 27-42.
邓军, 吕古贤, 杨立强, 郭涛, 方云, 舒斌. 1998. 构造应力场转换与界面成矿. 地球学报, 19(3): 244-250.
邓军, 翟裕生, 杨立强, 杨军臣, 方云, 万丽, 王建平, 丁式江. 1999. 剪切带构造-流体-成矿系统动力学模拟. 地质前缘, 6(1): 115-127.
侯增谦. 2010. 大陆碰撞成矿论. 地质学报, 84(1): 30-58.
胡瑞忠, 毛景文, 毕献武, 彭建堂, 宋谢炎, 钟宏, 陶琰, 谢桂青. 2008. 浅谈大陆动力学与成矿关系研究的若干发展趋势. 地球化学, 37(4): 344-352.
胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 华仁民, 毕献武, 钟宏, 宋谢炎, 陶琰. 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学

- 问题. 地学前缘, 17(2): 12–26.
- 李锦轶, 肖序常. 1998. 板块构造学说与大陆动力学——纪念李春煜教授逝世10周年(代前言). 地质论评, 44(4): 337–338.
- 李文昌, 任治机, 王建华. 2014. 中国斑岩铜矿时空分布规律. 矿床地质, 33(S1): 19–20.
- 吕古贤, 林文蔚, 郭涛, 殷秀兰, 舒斌, 郭初筭. 2001. 金矿成矿过程中构造应力场转变与热液浓缩-稀释作用. 地学前缘, 8(4): 253–264.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510–526.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用. 矿床地质, 24(3): 193–205.
- 裴荣富, 梅燕雄, 李进文, 孟贵祥, 王少怀, 王永磊, 李莉, 黄修保, 王浩琳. 2008. 1: 2500万世界大型超大型矿床成矿图说明书. 北京: 地质出版社: 1–58.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 姜春发, 牛宝贵, 李锦轶. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社: 1–50.
- 宋传中, Lin S F, 周涛发, 闫峻, 任升莲, 李加好, 涂文传, 张妍. 2010. 长江中下游及其邻区中生代构造体制转换. 岩石学报, 26(9): 2835–2849.
- 孙卫东, 凌明星, 杨晓勇, 范蔚茗, 丁兴, 梁华英. 2010. 洋脊俯冲与斑岩铜金矿成矿. 中国科学: 地球科学, 40(2): 127–137.
- 滕吉文, 白武明, 张中杰, 杨顶辉, 杨辉, 刘财, 韩立国, 张雪梅. 2009. 中国大陆动力学研究导向和思考. 地球物理学进展, 24(6): 1913–1936.
- 滕吉文, 宋鹏汉, 毛慧慧. 2014. 当代大陆内部物理学与动力学研究的导向和科学问题. 中国地质, 41(3): 675–697.
- 涂光炽. 1979. 矿床的多成因问题. 地质与勘探, (6): 1–5.
- 肖庆辉. 1996. 大陆动力学的科学目标和前沿. 地质科技管理, (3): 34–36.
- 肖庆辉. 1997. 大陆动力学研究中值得注意的几个重大科学前沿. 陕西地矿信息, 22(2): 1–12.
- 许志琴, 李廷栋, 稽少丞, 王宗起, 张泽明. 2008. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报, 24(7): 1433–1444.
- 颜玲亚, 高树学, 陈正国, 焦丽香, 孙莉, 刘艳飞, 周雯. 2018. 中国石墨成矿特征及成矿区带划分. 中国地质, 45(3): 421–444.
- 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 张德会, 何文武, 唐仲华. 1998. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社: 1–218.
- 翟明国. 2015. 大陆动力学的物质演化研究方向与思路. 地球科学与环境学报, 37(4): 1–14.
- 翟明国等. 2016. 地球科学学科前沿丛书: 矿产资源形成之谜与需求挑战. 北京: 科学出版社: 1–159.
- 翟明国, 吴福元, 胡瑞忠, 蒋少涌, 李文昌, 王汝成, 王登红, 齐涛, 秦克章, 温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源: 现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106–111.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学(D辑), 33(10): 913–920.
- 翟裕生. 1996. 关于构造-流体-成矿作用研究的几个问题. 地学前缘, 3(3–4): 230–236.
- 翟裕生. 2001. 矿床学的百年回顾与发展趋势. 地球科学进展, 16(5): 719–725.
- 翟裕生. 2004. 地球系统科学与成矿学研究. 地学前缘, 11(1): 1–10.
- 翟裕生. 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统. 地学前缘, 14(1): 172–181.
- 翟裕生, 邓军, 李晓波. 1999. 区域成矿学. 北京: 地质出版社: 1–287.
- 翟裕生, 彭润民, 邓军, 王建平. 2000. 成矿系统分析与新类型矿床预测. 地学前缘, 7(1): 123–132.
- 翟裕生, 王建平, 邓军, 彭润民, 刘家军. 2008. 成矿系统时空演化及其找矿意义. 现代地质, 22(2): 143–150.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 姚安平. 2011. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学. 地学前缘, 18(3): 1–12.
- 赵太平, 陈伟, 卢冰. 2010. 斜长岩体中Fe-Ti-P矿床的特征与成因. 地学前缘, 17(2): 106–117.
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 29(2): 105–119.
- 赵正, 白鸽, 王登红, 陈毓川, 徐志刚. 2014. 中国成菱镁矿区带与关键科学问题. 地质学报, 88(12): 2326–2338.
- Bekker A, Slack J F, Planavsky N, Krapež B, Hofmann A, Konhauser K O and Rouxel O J. 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105(3): 467–508.
- Berge J. 2013. Likely “mantle plume” activity in the Skellefte district, Northern Sweden. A reexamination of mafic/ultramafic magmatic activity: Its possible association with VMS and gold mineralization. *Ore Geology Reviews*, 55: 64–79.
- Castor S B. 2008. The mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California. *The*

- Canadian Mineralogist*, 46(4): 779–806.
- Charlier B, Sakoma E, Sauv e M, Stanaway K, Auwera J V and Duchesne J C. 2008. The Grader layered intrusion (Havre-Saint-Pierre Anorthosite, Quebec) and genesis of nelsonite and other Fe-Ti-P ores. *Lithos*, 101(3): 359–378.
- Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, Tosdal R and Hickey K A. 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 451–484.
- Cooke D R, Hollings P and Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls. *Economic Geology*, 100(5): 801–818.
- Deb M. 2014. Precambrian geodynamics and metallogeny of the Indian shield. *Ore Geology Reviews*, 57: 1–28.
- Dobretsov N L and Buslov M M. 2011. Problems of geodynamics, tectonics, and metallogeny of orogens. *Russian Geology and Geophysics*, 52(12): 1505–1515.
- Ercadider J M, Nnesley I R A, McKechnie C L, Bogdan T S and Reighton S C. 2013. Magmatic and Metamorphic Uraninite Mineralization in the Western Margin of the Trans-Hudson Orogen (Saskatchewan, Canada): A Uranium Source for Unconformity-Related Uranium Deposits? *Economic Geology*, 108: 1037–1065.
- Fuchs S H J, Schumann D, Williams-Jones A E, Murray A J, Couillard M, Lagarec K, Phaneuf M W and Vali H. 2017. Gold and uranium concentration by interaction of immiscible fluids (hydrothermal and hydrocarbon) in the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 293: 39–55.
- Ghosh G and Mukhopadhyay J. 2007. Reappraisal of the structure of the Western Iron Ore Group, Singhbhum craton, eastern India: Implications for the exploration of BIF-hosted iron ore deposits. *Gondwana Research*, 12(4): 525–532.
- Goldfarb R J, Baker T, Dub e B, Groves D I, Hart C J R and Gosselin P. 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*: 407–450.
- Goldfarb R J, Bradley D and Leach D L. 2010. Secular Variation in Economic Geology. *Economic Geology*, 105(3): 459–46.
- Goldfarb R J and Groves D I. 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 233: 2–26.
- Goldfarb R J, Groves D I and Gardoll S. 2001. Orogenic gold and geologic time: A global synthesis. *Ore Geology Reviews*, 18(1–2): 1–75.
- Goldfarb R J, Ryan T D, Collins G S, Goryachev N A and Orlandini O. 2014. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Research*, 25(1): 48–102.
- Gregory M J and Wilde A R. 2005. Uranium deposits of the Mount Isa Region and their relationship to deformation, metamorphism, and copper deposition. *Economic Geology*, 100(3): 537–546.
- Griffin W L, Begg G C and O'Reilly S Y. 2013. Continental-root control on the genesis of magmatic ore deposits. *Nature Geoscience*, 6(11): 905–910.
- Groves D I and Bierlein F P. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 19–30.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, Hagemann S and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposits types. *Ore Geology Reviews*, 13(1): 7–27.
- Groves D J, Vielreicher R M, Goldfarb R J, Hronsky J M A and Condie K C. 2005. Tectonic and lithospheric controls on the heterogeneous temporal distribution of mineral deposits // Mao J W and Bierlein F P. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting Beijing, China*: 11–14.
- Haggerty S E. 1999. A diamond trilogy: Superplumes, supercontinents, and supernovae. *Science*, 285(5429): 851–860.
- Hitzman M W, Oreskes N and Einaudi M T. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*, 58(1): 241–287.
- Hitzman M W and Valenta R K. 2005. Uranium in iron oxide-copper-gold (IOCG) systems. *Economic Geology*, 100(8): 1657–1661.
- Hou Z Q, Tian S H, Xie, Y L, Yuan Z X, Yin S P, Yi L S, Fei H C, Zou T R, Bai G and Li X Y. 2009. The Himalayan Mianning-Dechang REE belt associated with carbonatite-alkalic complex in the eastern Indo-Asian collision zone, SW China. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 65–89.
- Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F and Yang Z M. 2011. Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of

- thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39: 21–45.
- Hu R Z, Chen W T, Xu D R and Zhou M F. 2017. Reviews and new metallogenic models of mineral deposits in South China: An introduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 137: 1–8.
- Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu Z G and Hofstra A H. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Mineralium Deposita*, 37(3): 378–392.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, Garwin S and Jia Y F. 2000. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*, 43: 1–68.
- Kerrick R, Goldfarb R J and Richards J. 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. Economic Geology 100th Anniversary Volume: 1097–1136.
- Kesler S E and Wilkinson B H. 2008. Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. *Geology*, 36(3): 255–258.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, Pisarevsky S A and Taylor R. 2010. Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history. *Economic Geology*, 105(3): 593–625.
- Li Z X and Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182.
- Liu Y, Hou Z Q, Tian S H, Zhang Q C, Zhu Z M and Liu J H. 2015. Zircon U-Pb ages of the Mianning-Dechang syenites, Sichuan Province, southwestern China: Constraints on the giant REE mineralization belt and its regional geological setting. *Ore Geology Reviews*, 64: 554–568.
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H and Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48: 267–294.
- Mao J W, Pirajno F and Cook N. 2011. Mesozoic metallogeny in East China and corresponding geodynamic settings — An introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 1–7.
- Mao J W, Pirajno F, Lehmann B, Luo M C and Berzina A. 2014. Distribution of porphyry deposits in the Eurasian continent and their corresponding tectonic settings. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(B), 576–584.
- Mao J W, Pirajno F, Zhang Z H, Chai F M, Wu H, Chen S P, Cheng L S, Yang J M and Zhang C Q. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 184–203.
- Misra K C. 1999. Understanding mineral deposits. Kluwer Academic Publishers: 1–845.
- Muntean J L, Cline J S, Simon A C and Longo A. 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. *Nature Geoscience*, 4(2): 122–127.
- Nance R D, Murphy J B and Santosh M. 2014. The supercontinent cycle: A retrospective essay. *Gondwana Research*, 25: 4–29.
- Phillips G N and Law J D M. 2000. Witwatersrand gold fields: Geology, genesis, and exploration. *Reviews in Economic Geology*, 13: 439–500.
- Phillips G N and Powell R. 2015. Hydrothermal alteration in the Witwatersrand goldfields. *Ore Geology Reviews*, 65: 245–273.
- Pirajno F and Chen Y J. 2005. Hydrothermal ore systems associated with the extensional collapse of collision orogens // Mao J W and Bierlein F P. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting Beijing, China: 1045–1048.
- Pirajno F, Ernst R E, Borisenko A S, Fedoseev G and Naumov E A. 2009. Intraplate magmatism in central Asia and China and associated metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 114–136.
- Pirajno F, Ernst R E, Borisenko A S, Fedoseev G S and Naumov E A. 2009b. Intraplate magmatism in central Asia and China and associated metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 114–136.
- Richards J P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits: Just add water. *Economic Geology*, 106(7): 1075–1081.
- Roberts S and Gunn G. 2014. Cobalt // Gunn G. Critical Metals Handbook. Wiley, Chichester, UK: 361–385.
- Romer R L and Kroner U. 2016. Phanerozoic tin and tungsten mineralization-tectonic controls on the distribution of enriched protoliths and heat sources for crustal melting. *Gondwana Research*, 31: 60–95.
- Santosh M and Pirajno F. 2014. Ore deposits in relation to solid earth dynamics and surface environment: Preface.

- Ore Geology Reviews*, 56: 373–375.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M, Einaudi, M T, Zurcher L Stavast W J A, Johnson D A and Barton M. 2005. Porphyry deposits: Characteristics and origin of hypogene features. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume: 251–298.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105: 3–41.
- Sillitoe R H. 2012. Copper Provinces. Society of Economic Geologists Special Publication, 16: 1–18.
- Slack J F, Corriveau L and Hitzman M W. 2016. A special issue devoted to Proterozoic iron oxide-apatite (\pm REE) and iron oxide copper-gold and affiliated deposits of Southeast Missouri, USA, and the great Bear magmatic zone, Northwest Territories, Canada—Preface. *Economic Geology*, 111(8): 1803–1814.
- Sun W D, Ding X, Hu Y H and Li X H. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533–542.
- Sun W S, Li S B, Yang X Y, Ling M X, Ding X J, Duan L A, Zhan M Z, Zhang H and Fan W M. 2013. Large-scale gold mineralization in eastern China induced by an Early Cretaceous clockwise change in Pacific plate motions. *International Geology Review*, 55(3): 311–321.
- Teixeira J B G, Misi A and Da Silva M da G. 2007. Supercontinent evolution and the Proterozoic metallogeny of South America. *Gondwana Research*, 11(3): 346–361.
- Thompson J F G, Sillitoe R H, Baker T, Lang J R and Mortensen J K. 1999. Intrusion related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineralium Deposita*, 34(4): 323–344.
- Wan T F. 2010. Mineralization and tectonics in China // Wang T F. *The Tectonics of China*. Beijing: Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 339–362.
- Wang H Z and Mo X X. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*, 8: 6–16.
- Webber A P, Roberts S, Taylor R N and Pitcairn I K. 2013. Golden plumes: Substantial gold enrichment of oceanic crust during ridge-plume interaction. *Geology*, 41(1): 87–90.
- Wilkinson J J. 2013. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs. *Nature*, 6: 917–925.
- Williams P J, Barton M D and Johnson D A, Fontbte L, Haller A de, Mar G, Oliver N H S and Marschik R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Economic Geology* 100th Anniversary Volume: 371–405.
- Xie X J and Cheng H X. 2001. Global geochemical mapping and its implementation in Asia-Pacific region. *Applied Geochemistry*, 16: 1309–1321.
- Xie Y L, Li Y X, Hou Z Q, Cooke D R, Danyushevsky L, Dominy S C and Yin S. 2015. A model for carbonatite hosted REE mineralization—the Mianning-Dechang REE belt, Western Sichuan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 70: 595–612.
- Xu C, Campbell I H, Kynicky J, Allen C M, Chen Y J, Huang Z L and Qi L. 2008. Comparison of the Daluxiang and Maoniuping carbonatitic REE deposits with Bayan Obo REE deposit, China. *Lithos*, 106(1): 12–24.
- Xu D R, Chi G X, Zhang Y H, Zhang Z C and Sun W D. 2017. Yanshanian (Late Mesozoic) ore deposits in China—An introduction to the special issue. *Ore Geology Reviews*, 88: 481–490.
- Xu D R, Kusiak M A, Wang Z L, Chen H Y, Bakun-Czubarow N, Wu C J, Konečný P and Hollings P. 2015. Microstructural observation and chemical dating on monazite from the Shilu Group, Hainan Province of South China: Implications for origin and evolution of the Shilu Fe-Co-Cu ore district. *Lithos*, 216–217: 158–177.
- Xu D R, Wang Z L, Cai J X, Wu C J, Bakun-Czubarow N, Wang L, Chen H Y, Baker M J and Kusiak M A. 2013. Geological characteristics and metallogenesis of the Shilu Fe-ore deposit in Hainan Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 53: 318–342.
- Xu D R, Wang Z L, Chen H Y, Hollings P, Jansend N H, Zhang Z C and Wu C J. 2014. Petrography and geochemistry of the Shilu Fe-Co-Cu ore district, South China: Implications for the origin of a Neoproterozoic BIF system. *Ore Geology Reviews*, 57: 322–350.
- Yang Z M and Cooke D R. 2019. Porphyry copper deposits in China. Society of Economic Geologists Special Publications, in press.
- Zaw K, Meffre S, Lai C K, Burrett C, Santosh M, Graham I, Manaka T, Salam A, Kamvong T and Cromie P. 2014. Tectonics and metallogeny of mainland Southeast Asia—A review and contribution. *Gondwana Research*, 26(1): 5–30.
- Zaw K, Peters S G, Cromie P, Burrett C and Hou Z Q. 2007.

- Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 3-47.
- Zhai M G and Santosh M. 2013. Metallogeny of the North China Craton: Link with secular changes in the evolving Earth. *Gondwana Research*, 24: 275-297.
- Zhai Y S. 2005. Metallogenic system and its application to mineral exploration // Mao J W and Bierlein F P. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting Beijing, China: 1-5.
- Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Li H M, Li J W, Zhang Z H, Song X Y and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247-263.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episode*, 29(1): 26-33.

Spatially Heterogeneous Distribution of Metallogenesis and its Controlling Factors

XU Deru^{1,2}, YE Tingwei^{1,3}, WANG Zhilin⁴, MAO Jingwen⁵, XIE Guiqing⁵, HUANG Qinyi^{1,3} and WANG Lixing^{1,3}

(1. CAS Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 5. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Temporal and spatial heterogeneous characteristics of the global mineral resources and its formation mechanism have now become hotspots and leading field of the earth science system. Based on researches on the spatial distribution and its heterogeneity of the global mineral resources, the authors analyzed the major factors controlling the spatially heterogeneous distribution of metallogenesis, which include: ① the differentiation of the crustal components and evolution, ② the chemical heterogeneity of the crust and mantle, ③ the diverse ore-forming tectonic settings, ④ the constraints of important geological and tectonic events, ⑤ the tectonic and/or structural transformation or change and superimposition, and ⑥ the abilities of formation and preservation of ore deposits/bodies. In order to understand the heterogeneous distribution of the global mineral resources, the authors point out that the future work should focus on the following five aspects: ① the mechanism of the spatially heterogeneous distribution of continental metallogenesis, ② spatial distribution of metallogenesis in the context of the global tectonics, ③ the factors control the spatial heterogeneous distribution of metallogenesis, especially the deep-seated metallogenic process(es), ④ mineral systems and ore deposit series, and ⑤ the mechanism of the spatially heterogeneous distribution of the global mineral resources.

Keywords: mineral resources; metallogenesis; spatial allocation; heterogeneity; controlling factors