

胶东和鲁西金矿床空间分布分形差异及对金来源的启示*

朱平平¹, 刘岳², 成秋明³

(1 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074;
3 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519000)

摘要 胶东和鲁西地体发育大量的中生代金矿床, 其金元素的来源一直是学术界争论的焦点, 可能的来源方式为: 交代岩石圈地幔、前寒武纪变质基底和中生代二长花岗岩。为了进一步厘定金矿床的来源, 文章从金的富集阶段模式和金矿床是金元素超常富集地质体的思想出发, 运用金矿床的空间分布数据和空间分析的分形地质统计方法, 进行了研究。研究结果发现, 胶东金矿床($N=823$)具有一阶段的空间分形分布模式, 其分形维数 $\alpha=0.726$, 具有单一来源或单一成因的特征; 结合前人研究和克拉通破坏和西太平洋俯冲的地质背景, 推断胶东金元素极有可能是单一的交代岩石圈地幔来源; 而胶东地体西侧鲁西地体中发育的金矿床($N=139$)则具有二阶段的空间分形分布模式, 其分形维数分别为 $\alpha_1=1.630$ 和 $\alpha_2=0.850$, 具有 2 种金元素来源或 2 种成因类型的特征, 可能分别对应着早前寒武纪变质岩及韧性剪切带有关金矿床和晚中生代岩浆活动有关金矿床空间分布的分形维数, 后者的值与胶东地体的分形维数相近, 结合前人研究, 推测鲁西部分金矿床来源于交代岩石圈地幔的贡献, 另一部分则可能来自于花岗质岩浆。

关键词 地质学; 金来源; 空间分布; 分形模式; 胶东; 鲁西

中图分类号: P618.51; P628*.2

文献标志码: A

The spatial distribution differences between Jiaodong and Luxi terrane gold deposits by fractal method and its implications for the source of gold

ZHU PingPing¹, LIU Yue² and CHENG QiuMing³

(1 Faculty of Land Resources and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2 School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 School of Earth Sciences

and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, Guangdong, China)

Abstract

A large number of Mesozoic gold deposits are developed in Jiaodong and Luxi terranes of Shandong Province, E China, and the sources of the gold elements have been the focus of scholars debate, which may be metasomatic lithospheric mantle, Precambrian metamorphic basement and Mesozoic monzogranite. In order to further determine the origin of gold, this paper studies the spatial distribution data of gold deposits and fractal geological statistics method based on the model of gold enrichment stages and the idea that gold deposits are supernormal enrichment geological bodies. The results show that the Jiaodong gold deposit ($N=823$) has a one-stage spatial fractal distribution pattern, and its fractal dimension $\alpha=0.726$, which is characterized by a single source. Combined

* 本文得到云南省应用基础研究基金(编号:241120200024);昆明理工大学引进人才基金(编号:KKZ3202021050);云南省重大科技项目昆明理工大学“双一流”科技专项(编号:202202AG050006);云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(编号:KKRD202221051);云南省高层次人才及创新团队选拔专项(编号:202305AT350004);云南省基础研究计划面上项目(编号:202301AT070447)联合资助

第一作者简介 朱平平,男,1984年生,博士,讲师,硕士研究生导师,主要从事数学地球科学的教学与研究工作。Email: 17607170784@qq.com

收稿日期 2022-07-21;改回日期 2023-04-10。张绮玲编辑。

with the geological background of the craton destruction and the subduction of the Western Pacific plate, it is inferred that the gold element in Jiaodong gold deposits is probably a single metasomatic lithospheric mantle source. However, the gold deposits ($N=139$) developed in the Luxi terrane have a two-stage spatial fractal distribution pattern, and their fractal dimensions are $\alpha_1=1.630$ and $\alpha_2=0.850$, respectively. The latter value is close to the fractal dimension of the Jiaodong terrane, indicating that the gold element in Luxi gold deposits is partly contributed by metasomatic lithospheric mantle, the other part may come from the reactivation of granitic magma.

Keywords: geology, source of gold, spatial fractal distribution pattern, one stage model, Jiaodong terrane, Luxi terrane

胶东地体位于华北克拉通东缘,苏鲁超高压变质带西侧,因发育大量的中生代金矿床而闻名(图1)(Deng et al., 2015; Li et al., 2017; Wang et al., 2021; 宋明春等, 2020)。前人研究显示,矿床金元素的来源是争论的焦点(Li et al., 2017; Deng et al., 2020; Goldfarb et al., 2014; Zhu et al., 2015),可能的来源方式为:中生代二长花岗岩(Yao et al., 2021),交代岩石圈地幔(Wang et al., 2021),与绿岩型金矿床类似的前寒武变质基底(Li et al., 2017; Wang et al., 2018)等。总结前人研究结果,主要是从野外观察、岩石学、矿物学、同位素年代学等知识驱动的角度,来探讨金的来源,而基于空间分析、地质统计、分形奇异性理论与方法、机器学习、迁移学习等数据驱动方法的研究,尚未充分开展。

在当前人工智能和大数据的时代背景下,研究方法有从“知识驱动”转为“数据驱动”的趋势(Reichstein et al., 2019),思维方式也已经逐渐从传统的追求“因果关系”向“相关关系”转变(张旗等, 2018);但由于机器学习和深度学习等数据驱动的方法,属于黑箱式的解决方案(Breiman, 2001),数据代表的地质意义,尚不能充分解释。因此,追求可解释性的知识驱动和数据驱动的交叉创新研究,已成为新的发展趋势(陈建平等, 2017; Zhu et al., 2019; 陈永清等, 2021; 赵鹏大等, 2021; 周永章等, 2017; 成秋明, 2022)。

大数据时代的来临,加速了数字化的发展(陈建平等, 2017; 赵鹏大等, 2021),也使得公益性的数据共享变得开放(刘学龙等, 2017; 张旗等, 2018; 朱平平等, 2019)。例如,刘学龙等(2017)利用国际共享GEOROC和PetDB数据库与数据驱动的方法,在对比全球埃达克岩的数据后发现,非蚀变的与成矿相关花岗岩的数据点偏离全球埃达克岩范围越远,矿化作用越强烈,与铜钼成矿关系越密切。朱平平等(2023)运用中国地质调查局的地质科学数据出版系

统的共享数据和数据驱动方法,在分析胶东毕郭地区勘查地球化学金元素的异常分布后认为,金元素的富集受深部地质过程和板块运动的异常地质事件控制。数据驱动方法从数据出发,可以最大限度避免人为因素的干扰,挖掘的是元素或样品数据之间的相关关系,能得出相对可靠结论(张旗等, 2018)。

基于以上思路,本文试图在金矿床空间分布等共享数据基础上,运用空间分析和分形方法,来分析金的富集模式和阶段,从而为胶东金矿床的金元素来源,提供新的科学证据。

1 区域地质背景

研究区位于华北克拉通东缘,并发育大量中生代金矿床(图1),自西向东可以分为鲁西地体($N=823$)和胶东地体($N=139$),二者以郯庐断裂带为界;研究区出露自太古宙以来的各时代地层单元,但缺失志留系和泥盆系;与金成矿相关的地质单元为太古宙花岗片麻岩和早侏罗世二长花岗岩(朱平平等, 2023; Mao et al., 2019)。片麻岩中广泛发育糜棱岩带,走向为近北东向。

自中生代以来,发生过3次重大地质事件:① 165~80 Ma,中生代西太平洋板块的俯冲与回撤;② 65~24 Ma,新生代早期扬子板块的北向运动;③ 45~0 Ma,新生代中晚期郯庐断裂带的大型平移走滑(梁光河, 2020; 朱平平等, 2023)。

2 研究方法与数据来源

2.1 分形方法

分形由Mandelbrot(1967; 1984)提出并发展,而后广泛应用在非线形领域(Barton et al., 1995; Rangelov et al., 2017)。Cheng(1995)首次将分形引入地质领域,并明确了分形维数的地质意义。本文

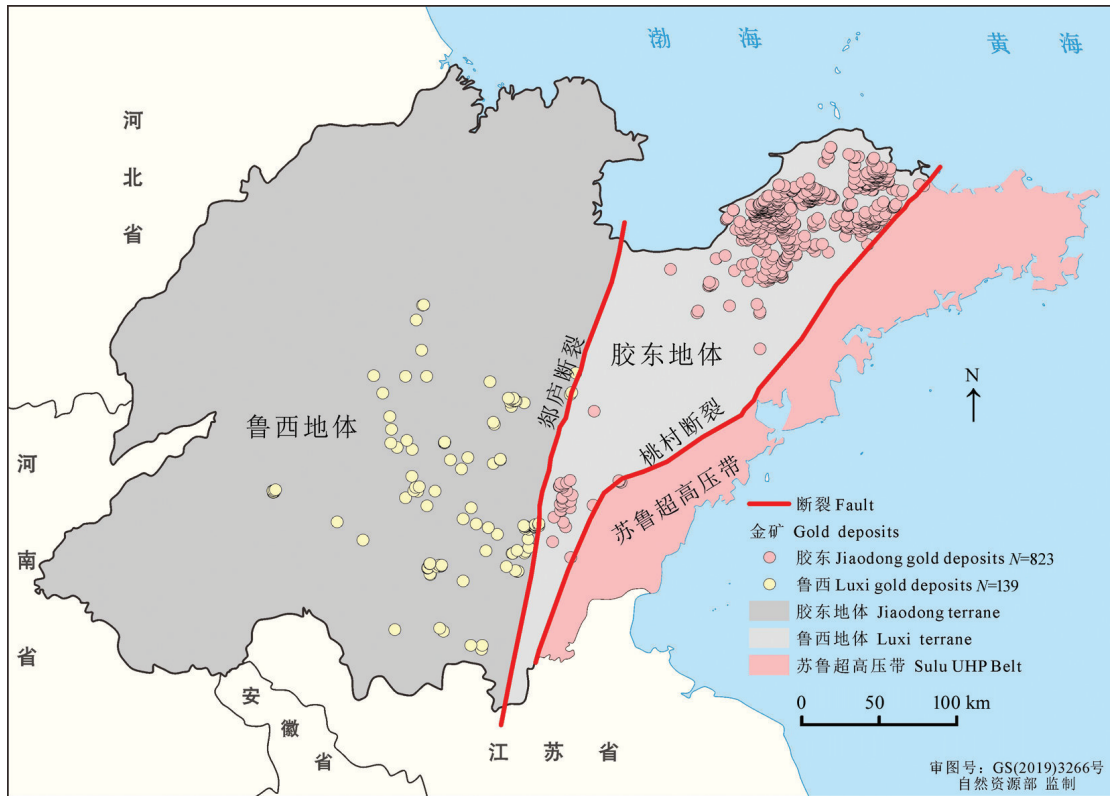


图 1 胶东和鲁西金矿床空间分布图

金矿床空间分布数据来源:中国地质调查局全国矿产地数据库 2021 年版 (<http://ngac.org.cn/Kuangchandi/index.html>)

Fig. 1 Spatial distribution of gold deposits of the Jiaodong and Luxi terranes, East China

Au deposit location related information source: <http://ngac.org.cn/Kuangchandi/index.html>

中,针对二维金矿床空间分布的分形维数,采用基于正方形方法进行计算 (Cheng et al., 1996),可以用下式表达:

$$N=c_1\varepsilon^{-(2-\alpha)} \quad (1)$$

$$\log N=c_2+\alpha \log \varepsilon \quad (2)$$

式(1)、(2)中, ε 为不同尺度正方形的边长; N 为分割全部金矿床所需要的最少正方形个数; c_1 和 c_2 为常数; α 为分形维数,其地质意义为: α 越接近2,表明地质过程越简单; α 越远离2,表明地质过程越复杂。

方法的具体计算,采用DotProc软件实现(<http://www.kuskov.com>),采用的数据是矿床的经纬度坐标或转换的UTM坐标,其实现的过程如下:

- (1) 以能全部包含单个地质体中金矿床空间位置的最小正方形边长开始统计,本文中从 10^6 m开始,也就是:正方形边长 $\log \varepsilon = \log 10^6 = 6$ 时,正方形的个数 $N=1$;
- (2) 逐渐减小正方形边长,同时统计 ε 和 N ;
- (3) 记下所有不同尺度的 ε 和 N ,并转化为对数

尺度下的函数关系;

(4) 根据对数函数关系的指数 $=(2-\alpha)$,即拟合直线的斜率,即为分形维数 α ;

(5) 结合区域地质背景和成矿过程,进行 α 的地质解释。

2.2 数据来源

本文的研究数据来源于:全国矿产地数据库 2021 年版。在中国地质调查局地质科学数据出版系统 (<http://dcc.ngac.org.cn/>) 中进行注册和申请后,能及时查询,并通过 Python 语言和爬虫算法 (Boldi et al., 2004),能方便获取。该数据集包括经度、纬度、矿产地名称、矿种和规模等 5 种属性数据(表 1)。

3 结果与讨论

空间分析和分形的分析结果显示,胶东地体金矿床的空间分布,显示了完全的一阶段分形特征;而鲁西地体,则显示二阶段的分形特征(图 2)。分形阶

表1 胶东和鲁西地体部分大型金矿床的数据

Table 1 Data of large gold deposits in Jiaodong and Luxi terranes

序号	经度/°	纬度/°	矿产地名称	矿种	规模	UTM_X	UTM_Y	所属构造单元
1	120.5150	37.4620	玲珑金矿区	金矿	大型	545562	4147910	胶东地体
2	120.3828	37.1875	曹家洼金矿	金矿	大型	533988	4117390	胶东地体
3	120.3470	37.2250	大尹格庄	金矿	大型	530796	4121540	胶东地体
4	120.5510	37.4520	李家庄矿区	金矿	大型	548754	4146820	胶东地体
5	120.1630	37.4290	河东金矿区	金矿	大型	514427	4144130	胶东地体
6	120.1480	37.4230	河西金矿区	金矿、银矿	大型	513100	4143470	胶东地体
7	120.3131	37.3000	谢家沟矿区	金矿	大型	527756	4129850	胶东地体
8	120.9890	37.6720	庄官金矿	金矿、银矿	大型	587253	4171550	胶东地体
9	117.7860	35.3750	归来庄金矿床	金矿	大型	298798	3918450	鲁西地体
10	118.4750	35.5883	金龙矿区	金矿	大型	361784	3940940	鲁西地体
11	118.4028	35.5944	金场矿区	金矿	大型	355249	3941720	鲁西地体
12	118.4744	35.6050	铜井矿区	金矿	大型	361762	3942790	鲁西地体
13	117.6742	36.6258	鑫汇金矿	金矿	大型	291947	4057510	鲁西地体

注: UTM_X,UTM_Y分别为金矿床的纵横投影坐标,坐标系统为CGCS2000,中央经线为:120°。

段产生的根本原因为金矿床是金元素异常富集的空间表现,属于典型的丛聚性分布(赵鹏大等,1996),而这种丛聚性分布,能很好地运用幂律分布,也就是分形分布表达(Cheng et al., 1994);而在实际应用过程中,矿床和地球化学元素往往呈现混合分布的特征,需要进行分布模式的识别,并进行背景与异常的分形。Cheng等(1996)详细描述了与斑岩型铜金矿床相关的元素在蚀变与非蚀变地区的空间分布模式,并认为双对数图解,能很好地分

离背景的随机分布和异常的丛聚性分布,从而提出了应用极为广泛的基于分形的元素含量-面积模型(C-A)。本次研究中的金矿床空间分布的分形特征,是不同地质事件综合的结果,能运用双对数图进行表达和不同地质事件的分离;这意味着胶东地体的金矿床,由单一地质事件或单一金源区控制而富集成矿;而鲁西地体则是由2次地质事件或2个源区共同控制;其函数关系分别为:①胶东地体, $y=10^7 \cdot x^{-1.274}$,相关系数 $R^2=0.9959$,分形维数 $\alpha=0.726$,地质过程相对复杂;②鲁西地体,第一阶段: $y=1652.2 \cdot x^{-0.370}$,相关系数 $R^2=0.9007$,分形维数 $\alpha=1.630$,接近2,意味着地质过程相对简单;第二阶段: $y=4 \cdot 10^7 \cdot x^{-1.150}$,相关系数 $R^2=0.9796$,分形维数 $\alpha=0.850$,与胶东地体相似且远离2,显示出与胶东地体金来源相似和同样的地质复杂过程的特征。

金元素来源的多样性,决定了其多样化的争论。部分胶东金矿床,产于太古代花岗片麻岩中(例如,胶北地体中的栖霞笏山金矿),与绿岩型金矿床类似,有学者认为金元素可能来源于前寒武纪变质基底(Li et al., 2017; Wang et al., 2018);也有部分胶东金矿床与中生代二长花岗岩相互伴生(例如,栾家河金矿床),有学者认为金元素可能来源于岩浆岩(Yao et al., 2021);Groves等(2020)认为胶东金矿床与造山型金矿床高度相似,并认为金元素来源于地幔;Zhu等(2015)认为胶东金矿床与克拉通破坏同步,是一种全新的金矿床类型,且金元素来源于交代岩石圈地幔;Deng等(2020)认为胶东金矿床是一种

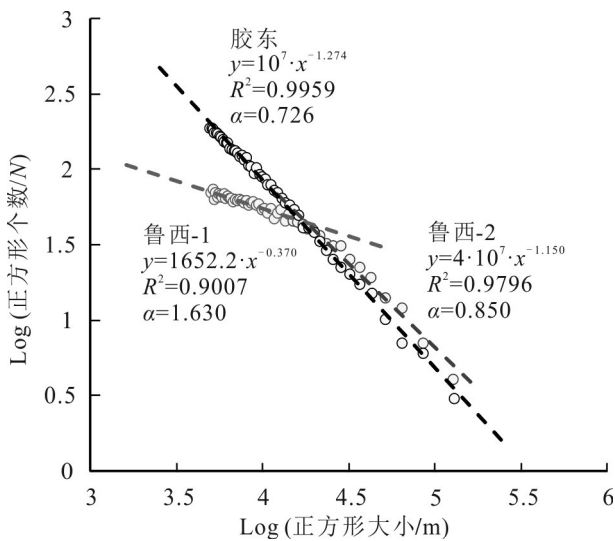


图2 胶东和鲁西地体金矿床空间分布的分形维数
Fig. 2 Fractal dimension of spatial distribution of gold deposits in Jiaodong and Luxi terranes

独特的金矿床,与胶东地体的地质组成和动力学背景密切相关,且金元素来源于与西太平洋俯冲和回撤相关的地幔源区;Wang 等 (2021) 采取了胶东地区太古代和古元古代的各类变质基底样品,得到 $w(\text{Au})$ 普遍低于 $(0.47 \pm 0.29) \times 10^{-9}$ 的结果,并与变质作用导致金亏损的模型相符,认为前寒武纪基底,难以以为胶东金矿床提供大量金,金可能来源于交代的岩石圈地幔。笔者认为,变质基底的金源区,会产生二阶段的富集模式,与一阶段的富集模式相悖,因此也排除了金来源变质基底的可能性;金来源的另外一种可能性就是岩体;而二长花岗岩并不是广泛出露,虽然也有研究证实了金与岩浆岩的关系更为密切,如 Yao 等 (2021);但在金矿床赋存于花岗片麻岩时,无法用一阶段分形特征和单一岩浆来源来解释 (宋明春等, 2020), 因此,产生一阶段分形特征的胶东金元素的来源,与西太平洋板块俯冲背景下,产生大规模金元素运移和富集成矿的特征相符,这也与 Wang 等 (2021) 提出的金富集模式 (图 3) 相同;而胶东和鲁西地体中金矿床成矿的差异性,是由于扬子克拉通在中生代北向运动,致使金元素活化上升后更多倾向于东北向富集,造成了郯庐断裂带东西两侧差异性的空间富集规律 (梁光河, 2020; 朱平等, 2022)。结合鲁西地体发育大量中生代花岗岩的地质单元 (沈昆等, 2001) 和金矿床中

氮与岩浆相近的特点 (毛景文等, 2005), 推测鲁西第一阶段分形模型的金元素,可能是中生代花岗质岩浆的贡献;同时,鲁西地体中主要 2 种类型的金矿床:一是与晚中生代岩浆活动有关的金矿床,如归来庄金矿床、沂南金矿床;二是与早前寒武纪变质岩及韧性剪切带有关的金矿床,如化马湾金矿床 (陈永清等, 2021)。推测鲁西地体金矿床空间分布的分形二阶段模式,可能分别对应着上述 2 种不同的金矿床类型。

从地球各圈层含量的角度分析,金元素具有明显的亲铁、亲镁性,在地球各圈层中,越靠近地核,金元素的丰度越高;在地壳中 $w(\text{Au})$ 的平均值仅为 3.5×10^{-9} ,地幔中为 5×10^{-9} ,地核中则高达 2600×10^{-9} (王清廉, 1989)。在构造背景上,弧陆俯冲过程是最为有利的金元素活化和富集的过程 (Solomon, 1990), 相对于硅酸盐熔体,金具有较大的配分系数 (Peach et al., 1990; 1994), 含金硫化物在岩石圈热回弹动力学背景下二次熔融,克拉通破坏背景下产生的交代岩石圈地幔,极有可能是胶东和鲁西地体中金元素的共同来源区 (朱平等, 2019)。

4 结 论

(1) 胶东金矿床空间分布,显示了单一的分形

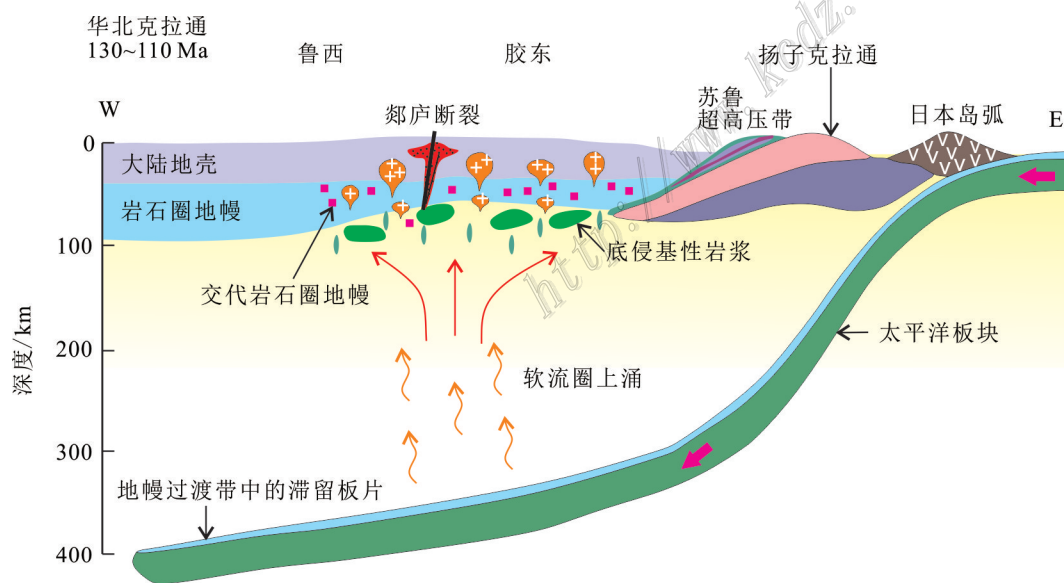


图 3 胶东和鲁西地体金矿床的地球动力学背景和成矿过程 (据 Wang et al., 2021 修改)

Fig. 3 Geodynamic background and metallogenic process of gold deposits in the Jiaodong and Luxi terranes, East China (modified after Wang et al., 2021)

分布,指示了金来源的单一性,为排除多种来源的争论,提供了科学证据;

(2)鲁西金矿床空间分布,显示了两阶段的分形分布,指示了鲁西金矿床的两种源区或两种成因类型特征;

(3)鲁西地体金矿床空间分布的两阶段分形特征,可能分别对应晚中生代岩浆活动有关金矿床和早前寒武纪变质岩及韧性剪切带有关金矿床空间分布的分形维数。

致谢 感谢陈永清教授极富建设性又详细的审稿意见,极大地提高了论文的质量;感谢匿名审稿人对本文的审稿意见。

References

- Barton C C and Tebbens S F. 1995. Fractals in the Earth sciences[M]. New York: Spring. 1-265.
- Boldi P, Codenotti B, Santini M and Vigna S. 2004. UbiCrawler: A scalable fully distributed Web Crawler[J]. Software: Practice and Experience, 34(8): 711-726.
- Breiman L. 2001. Random forests[J]. Machine Learning Archive, 45(1): 5-32.
- Chen J P, Li J, Xie S, Liu J and Hu B. 2017. China geological big data research status[J]. Journal of Geology, 41(3): 353-366(in Chinese with English abstract).
- Chen Y Q and Mo X X. 2021. Metallogenic background, process and exploration as one: A trinity concept for prospecting for super-large ore deposits[J]. Earth Science Frontiers, 28(3): 26-48(in Chinese with English abstract).
- Cheng Q M and Agterberg F P. 1996. Multifractal modeling and spatial statistics[J]. Mathematical Geology, 28(1): 1-16.
- Cheng Q M, Agterberg F P and Ballantyne S B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. Journal of Geochemical Exploration, 51(2): 109-130.
- Cheng Q M. 1995. The perimeter-area fractal model and its application to geology[J]. Mathematical Geology, 27(1): 69-82.
- Cheng Q M, Agterberg F P and Bonham-Carter G F. 1996. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation[J]. Journal of Geochemical Exploration, 56(3): 183-195.
- Cheng Q M. 2022. Quantitative simulation and prediction of extreme geological events[J]. Science China Earth Sciences. 1-17(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang C, Bagas L, Carranza E J M and Lu Y. 2015. Cretaceous-Cenozoic tectonic history of the Jiaojia fault and gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from zircon U-Pb, illite K-Ar, and apatite fission track thermochronometry[J]. Mineralium Deposita, 50(8): 987-1006.
- Deng J, Wang Q, Santosh M, Liu X, Liang Y, Yang L, Zhao R and Yang L. 2020. Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: A new model for the Jiaodong gold province, eastern China[J]. Mineralium Deposita, 55(2): 257-274.
- Goldfarb R J and Santosh M. 2014. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique[J]? Geoscience Frontiers, 5(2): 139-153.
- Groves D I, Santosh M and Zhang L. 2020. A scale-integrated exploration model for orogenic gold deposits based on a mineral system approach[J]. Geoscience Frontiers, 11(3): 719-738.
- Li S and Santosh M. 2017. Geodynamics of heterogeneous gold mineralization in the North China Craton and its relationship to lithospheric destruction[J]. Gondwana Research, 50(SI): 267-292.
- Liang G H. 2020. Detailed study of the formation of Japanese islands based on tectonic evolution of basins in the East China Sea and Northern South China Sea[J]. Earth Science Frontiers, 27(1): 244-259 (in Chinese with English abstract).
- Liu X L, Li W C, Zhang N, Zhu J, Luo Y, Yang F C, Zhang C Z and Wang S S. 2017. Comparison of granites and adakites related to mineralization in the Pulang porphyry copper deposit, Northwest Yunnan: Preliminary results of big data study[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(2): 289-302(in Chinese with English abstract).
- Mandelbrot B B. 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 156(3775): 636-638.
- Mandelbrot B B, Passoja D E and Paullay A J. 1984. Fractal character of fracture surfaces of metal[J]. Nature, 308(5961): 721-722.
- Mao J W, Xie G Q, Zhang Z H, Li X F, Wang Y T, Zhang C Q and Li Y F. 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169-188(in Chinese with English abstract).
- Mao X, Ren J, Liu Z, Chen J, Tang L, Deng H, Bayless R C, Yang B, Wang M and Liu C. 2019. Three-dimensional prospectivity modeling of the Jiaojia-type gold deposit, Jiaodong Peninsula, eastern China: A case study of the Dayingezhuang deposit[J]. Journal of Geochemical Exploration, 203: 27-44.
- Peach C L, Mathez E A, Keays R R and Reeves S J. 1994. Experimentally determined sulfide melt-silicate melt partition coefficients for Iridium and Palladium[J]. Chemical Geology, 117(1-4): 361-377.
- Peach C L, Mathez E A and Keays R R. 1990. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(12): 3379-3389.
- Rangelov B and Ivanov Y. 2017. Fractal properties of the elements of plate tectonics[J]. Journal of Mining and Geological Sciences, 60: 83-89.
- Reichstein M, Camps-Valls G, Stevens B, Jung M, Denzler J and Carvalhais N. 2019. Deep learning and process understanding for data-driven earth system science[J]. Nature, 566(7743): 195-204.
- Shen K, Ni P and Lin J Q. 2001. Characteristics and evolution of ore fluids in Guilaizhuang gold deposit, Southwest Shaodong[J]. Chi-

- nese Journal of Geology, 36(1): 1-13(in Chinese with English abstract)
- Solomon M. 1990. Subduction, arc reversal, and the origin of porphyry copper-gold deposit in island arcs[J]. Geology, 18: 630-633.
- Song M C, Lin S Y, Yang L Q, Song Y X, Ding Z J, Li J, Li S Y and Zhou M L. 2020. Metallogenic model of Jiaodong Peninsula gold deposits[J]. Mineral Deposits, 39(2): 215-236(in Chinese with English abstract)
- Wang J, Liu Z and Liu J. 2018. Exhumation of the Mesozoic Guojialing granodiorite: Implication for the preservation of gold deposits in the Jiaobei Terrane, China[J]. Resource Geology, 68(1): 51-64.
- Wang Q L. 1989. Precambrian ancient crust is the basis of gold formation[J]. Geology and Exploration, 8(8): 38(in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Xu Z, Cheng H, Zou Y, Guo J, Liu Y, Yang J, Zong K, Xiong L and Hu Z. 2021. Precambrian metamorphic crustal basement cannot provide much gold to form giant fold deposits in the Jiaodong Peninsula, China[J]. Precambrian Research, 354 (106045): 106045.
- Yao X, Cheng Z, Du Z, Pang Z, Yang Y and Liu K. 2021. Petrology, geochemistry, and Sr-Nd-S isotopic compositions of the ore-hosting biotite monzodiorite in the Luanjiahe gold deposit, Jiaodong Peninsula, China[J]. Journal of Earth Science, 32(1): 51-67.
- Zhang Q, Jiao S T and Lu X X. 2018. Discussion on causality and correlation in geological research[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(2): 275-280(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D, Chi D S and Chen Y Q. 1996. A thorough investigation of geo-anomaly: A basic of metallogenic prognosis[J]. Geological Journal of China Universities, 2(4): 2-14(in Chinese with English abstract).
- Zhao P D and Chen Y Q. 2021. Digital geology and quantitative mineral exploration[J]. Earth Science Frontiers, 28(3): 1-5(in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Z, Li P X, Wang S G, Xiao F, Li J Z and Gao L. 2017. Research progress on big data and intelligent modelling of mineral deposits[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(2): 327-331(in Chinese with English abstract).
- Zhu P P, Cheng Q M and Chen G X. 2019. New fractal evidence of Pacific Plate subduction in the Late Mesozoic, Great Xing'an Range, Northeast China[J]. Journal of Earth Science, 30(5): 1031-1040.
- Zhu P P, Cheng Q M and Wu G P. 2019. Constraint of crustal thickness on gold deposit spatial distribution of China[J]. Mineral Deposits, 38(3): 479-490(in Chinese with English abstract).
- Zhu P P, Cheng Q M and Wu G P. 2023. Quantitatively determine the distribution direction and geological significance of geochemical anomalies in Biguo area of Jiaodong terrane[J]. Earth Science Frontiers, 30(2): 440-450 (in Chinese with English abstract).
- Zhu R, Fan H, Li J, Meng Q, Li S and Zeng Q. 2015. Decratonic gold deposits[J]. Science China: Earth Sciences, 58(9): 1523-1537.

附中文参考文献

- 陈建平, 李靖, 谢帅, 刘静, 胡彬. 2017. 中国地质大数据研究现状[J]. 地质学刊, 41(3): 353-366.
- 陈永清, 莫宣学. 2021. 超大型矿床成矿背景-过程-勘查三位一体的找矿理念[J]. 地学前缘, 28(3): 26-48.
- 成秋明. 2022. 极端地质事件定量模拟与预测[J]. 中国科学:地球科学. 1-17.
- 梁光河. 2020. 从东海和南海北部盆地群演化探讨日本大陆板块的形成过程[J]. 地学前缘, 27(1): 244-259.
- 刘学龙, 李文昌, 张娜, 朱俊, 罗应, 杨富成, 张昌振, 王帅帅. 2017. 滇西北普朗斑岩铜矿与成矿有关的花岗岩与全球埃达克岩的对比:大数据研究的初步结果[J]. 岩石学报, 34(2): 289-302.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天. 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.
- 沈昆, 倪培, 林景任. 2001. 鲁西南归来庄金矿成矿流体特征和演化[J]. 地质科学, 36(1): 1-13.
- 宋明春, 林少一, 杨立强, 宋英昕, 丁正江, 李杰, 李世勇, 周明岭. 2020. 胶东金矿成矿模式[J]. 矿床地质, 39(2): 215-236.
- 王清廉. 1989. 前寒武纪古老地壳是成金的基础[J]. 地质与勘探, 8(8): 38.
- 张旗, 焦守涛, 卢欣祥. 2018. 论地质研究中的因果关系和相关关系——大数据研究的启示[J]. 岩石学报, 34(2): 275-280.
- 赵鹏大, 池顺都, 陈永清. 1996. 查明地质异常:成矿预测的基础[J]. 高校地质学报, 2(4): 2-14.
- 赵鹏大, 陈永清. 2021. 数字地质与数字矿产勘查[J]. 地学前缘, 28(3): 1-5.
- 周永章, 黎培兴, 王树功, 肖凡, 李景哲, 高乐. 2017. 矿床大数据及智能矿床模型研究背景与进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(2): 327-331.
- 朱平平, 成秋明, 武国朋. 2019. 地壳厚度对中国金矿床空间分布规律的制约[J]. 矿床地质, 38(3): 479-490.
- 朱平平, 刘岳, 成秋明. 2023. 定量确定胶东毕郭地区勘查地球化学异常的分布方向及地质意义[J]. 地学前缘, 30(2): 440-450.