

中国煤中有害微量元素含量的空间分布

曹庆一 任文颖 梁朝铭 张宇飞 杨柳

引用本文:

曹庆一, 任文颖, 梁朝铭, 等. 中国煤中有害微量元素含量的空间分布[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(5): 13–22.

CAO Qingyi, REN Wenying, LIANG Chaoming, et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coals[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(5): 13–22.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.09.0520>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于地形分区IDW的复垦排土场土壤养分空间分布

Spatial distribution of soil nutrients in reclamation dump sites based on subdivision IDW

煤田地质与勘探. 2020, 48(4): 199–205 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.04.027>

陕北横山矿区延安组 3^{-1} 煤层Sr和Ba的分布及赋存模式

Distribution and mode of occurrence of Jurassic 3^{-1} coal from Hengshan

煤田地质与勘探. 2017, 45(2): 8–13 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.02.002>

淮南塌陷塘重金属空间分布特征研究

Spatial distribution characteristics of heavy metals in Huainan subsidence pond

煤田地质与勘探. 2018, 46(1): 125–134 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2018.01.022>

临兴地区煤系泥岩微量元素特征及其地质意义

Characteristic and geological significance of trace elements in mudstone of Upper Carboniferous–Lower Permian in Linxing area

煤田地质与勘探. 2017, 45(3): 18–24,31 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.004>

淮南煤田地下水水化学空间分布及其形成作用

Spatial distribution and formation of groundwater hydrochemistry in Huainan coalfield

煤田地质与勘探. 2019, 47(5): 40–47 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.006>

陕南石煤及煤灰中钼元素在固液间迁移规律

Solid–liquid migration of molybdenum in stone coal and coal ash in southern Shaanxi

煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 64–70 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.011>



移动阅读

曹庆一,任文颖,梁朝铭,等.中国煤中有害微量元素含量的空间分布[J].煤田地质与勘探,2022,50(5):13-22. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.09.0520

CAO Qingyi, REN Wenying, LIANG Chaoming, et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coals[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(5): 13-22. doi: 10.12363/issn.1001-1986.21.09.0520

中国煤中有害微量元素含量的空间分布

曹庆一,任文颖,梁朝铭,张宇飞,杨 柳

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘要:煤中有害微量元素对生态环境和人体健康的潜在影响是地球化学和能源环境领域研究的热点之一,地球化学制图对深刻理解地球化学过程及其变化规律具有重要作用。目前,尚缺乏中国煤中有害微量元素含量的空间分布图。通过对中国煤炭样品中 1 167 个 Be、1 315 个 Co、1 406 个 Cu、1 191 个 Mo、1 247 个 Th 和 1 390 个 Zn 含量数据进行统计分析,测算中国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 的平均含量,并利用 ArcGIS 技术绘制中国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn 的含量地球化学空间分布地图。结果表明:中国煤中有害微量元素含量跨度大,数据分布呈正偏性,不符合正态分布特征;中国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 的平均含量分别为 2.10、5.53、21.36、2.19、7.35 和 30.02 mg/kg;各元素含量的空间分布极不均匀;煤中有害微量元素含量空间分布格局是多种因素综合作用的结果,如物源区母岩、热液作用、水运移作用等,其中热液作用是煤中有害微量元素异常富集的典型特征。研究成果可为煤中微量元素研究和环境管理提供直观有效的参考。

关键词:有害微量元素;空间分布;铍;钴;铜;钼;钍;锌;煤;ArcGIS 技术

中图分类号: TD861; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)05-0013-10

Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coals

CAO Qingyi, REN Wenying, LIANG Chaoming, ZHANG Yufei, YANG Liu

(School of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The potential impact of harmful trace elements in coal on the ecological environment and human health is one of the hot topics in the fields of geochemistry and energy environment. Geochemical mapping plays an important role in the deep understanding of geochemical processes and their changing laws. However, previous studies have not provided the national geochemical maps of harmful trace elements in Chinese coals. In this study, the content data of 1 167 Be, 1 315 Co, 1 406 Cu, 1 191 Mo, 1 247 Th, and 1 390 Zn in Chinese coal samples are analyzed, and their average contents are measured. The supporting data are obtained from the trace elements in coal of China (TECC) database. The geochemical maps of Be, Co, Cu, Mo, Th, and Zn in Chinese coals have been published by using ArcGIS mapping. The main conclusions are as follows. The content of harmful trace elements in Chinese coals has a large span and the data distribution is positively biased, which does not conform to the normal distribution. The average content of Be, Co, Cu, Mo, Th and Zn in Chinese coals is 2.10, 5.53, 21.36, 2.19, 7.35 and 30.02 mg/kg, respectively. The spatial distribution of the content of harmful trace elements in Chinese coals is extremely uneven. The spatial distribution pattern of the content of harmful trace elements in coal is dependent on many factors, such as source-rock, hydrothermal action, water migration, etc. Among them, hydrothermal action is a typical feature of abnormal concentration of harmful trace elements in coal. This study can provide intuitive and effective references for geochemical research and environmental management of coal mines.

Keywords: harmful trace element; spatial distribution; Be; Co; Cu; Mo; Th; Zn; coal; ArcGIS technology

收稿日期: 2021-09-17; 修回日期: 2021-11-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)子课题(2014CB238906-01); 中央高校基本科研业务费项目(2021YJSDC10)

第一作者: 曹庆一, 1994 年生, 男, 河南驻马店人, 博士研究生, 从事环境地质学领域的研究. E-mail: qyc5411@126.com

通信作者: 杨柳, 1978 年生, 女, 辽宁铁岭人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为 3S 技术应用、水资源保护等. E-mail: yang_l@126.com

绘制环境中化学元素的区域分布地图对于确定和理解大规模地球化学过程以及记录空间和时间地球化学变化至关重要。同时,地球化学制图在土地利用规划和政策制定方面有许多实际应用,且在了解化学元素在地方病发生和分布中具有重要作用^[1-4]。1984年,国际原子能机构(IAEA)首次提出了“全球一张地球化学图”的概念;1988—1997年,国际地球化学填图计划和全球地球化学基准计划相继开展^[5]。此外,各种具有特定目标的地球化学调查活动被广泛开展,如EuroGeoSurveys农业和牧场土壤地球化学制图项目(GEMAS),该项目旨在获取欧洲农牧区土壤的金属含量数据^[6-7];在中国东部第四纪平原开展了为环境调节和农业实践提供数据的多用途生态地球化学制图项目^[8];巴伦支海生态地球化学项目^[9];北美土壤景观项目等^[10]。这些调查通过地球化学制图以获取环境中有害微量元素的含量、分布和影响因素等信息。

煤炭是保证全球经济增长的主要能源之一,未来很长一段时间将继续保持其在全球能源生产中的主导地位。中国是全球最大的煤炭生产国,2020年原煤产量为39亿t,约占全球煤炭产量的51%。由于煤炭工业规模庞大,其开发利用过程造成的环境污染问题备受关注^[11-12],重点问题之一是煤中有害微量元素对环境构成的潜在风险^[13-15]。煤中有害微量元素向地下水、空气和土壤的迁移已被广泛报道^[16-18]。中国已经对有害微量元素开展了大量研究,一般集中在小规模矿区或局部地区。在全国范围内,较为完整的中国煤中有害微量元素含量分布图少有报道。笔者利用ArcGIS技术绘制中国含煤区中Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn的含量分布图,以期为煤中微量元素和地球化学过程研究提供科学信息,并为煤炭环境管理提供直观有效的参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

本文所使用的分析与制图数据来源于中国煤中微量元素数据库(Trace Elements in Coal of China Database, TECC),包括1 167个Be、1 315个Co、1 406个Cu、1 191个Mo、1 247个Th和1 390个Zn样品数据(图1)。TECC是第一个旨在管理中国煤中微量元素数据的数据库系统,收录了中国主要煤矿的地理坐标、微量元素含量、工业分析等数据单元^[19-20]。这些数据主要收集自Web of Science、中国知网(CNKI)文献数据库和相关专著。中国含煤区域的矢量边界绘制依据为开放源地理空间基金会(OSGeo)-中国中心(www.osgeo.cn)网站的“中国煤炭资源分布在线地

图(1:3 200万)”^[21]。

1.2 数据处理与成图

采用箱线图分析获得原始含量数据集的四分位数和异常值。四分位数可反映数据的离散程度,计算过程如下:首先对给定的数据进行排序,排序后的数据范围为 $X_i, i=1,2,\dots,n$ 。随后,第1个四分位数(Q_1)、第2个四分位数(Q_2)和第3个四分位数(Q_3)都计算为 $(1-g)X_i + gX_{i+1}$,其中 i 是等式的整数部分, g 是等式的小数部分; $(n+1)/4$ 、 $(n+1)/2$ 和 $3(n+1)/4$ 分别是用于计算 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 的公式。四分位距(IQR)计算式为 $IQR=Q_3-Q_1$ 。相应地,上限和下限分别使用 $Q_3+1.5IQR$ 和 $Q_1-1.5IQR$ 计算。结合实际情况,将下限指定为0,即超出 $[0, Q_3+1.5(Q_3-Q_1)]$ 范围的数据被定义为异常值。

各元素的含量数据经过对数(lg)转换后,呈现正态分布或近似正态分布(图2)。利用ArcGIS 9.0软件将lg转换后的含量数据和地理坐标整合到地理信息系统中,并运用反距离权重方法绘制中国煤中微量元素含量的空间分布图。地图中的颜色等级根据样本数据的占比进行分类,即:0~10%、10%~25%、25%~50%、50%~75%、75%~90%和大于90%。异常点不参与制图,但其空间位置在地图上标出。

2 结果与讨论

2.1 煤中有害微量元素的含量特征

中国煤中Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn含量均表现出较大的跨度,且数据分布呈正偏性,不符合正态分布(图1)。大部分数据点聚集在相对较低的值上,标准偏差(σ)和变异系数(cv)较高(表1)。

基于箱线图分析排除异常含量值后,识别出中国煤中Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn的一般含量范围分别为0.05~7.51、0.04~22.73、0.06~78.50、0.01~10.60、0.04~26.10、0.38~106.00 mg/kg,分别占样本总量的86%、90%、93%、83%、93%和90%。排除异常值后, σ 、cv、算术均值显著降低。这意味着即使分析中包含相对较少的异常值,统计结果也会受到显著影响(表1)。在不考虑异常值的情况下,中国煤中Be、Co、Cu、Mo、Th和Zn含量的算术平均值与Dai Shifeng^[22]、任德贻^[23]、唐修义^[24]、白向飞^[25]等的计算结果接近。因此,在区域和全国范围内评价煤中微量元素的平均含量水平时,有必要筛选出异常值,以避免造成较大的分析误差。

根据本文计算结果,我国煤中Mo的平均含量为2.19 mg/kg,与全世界煤中Mo的平均水平(2.2 mg/kg)^[26]相当;此外,相比于世界煤炭中Be(1.6 mg/kg)、

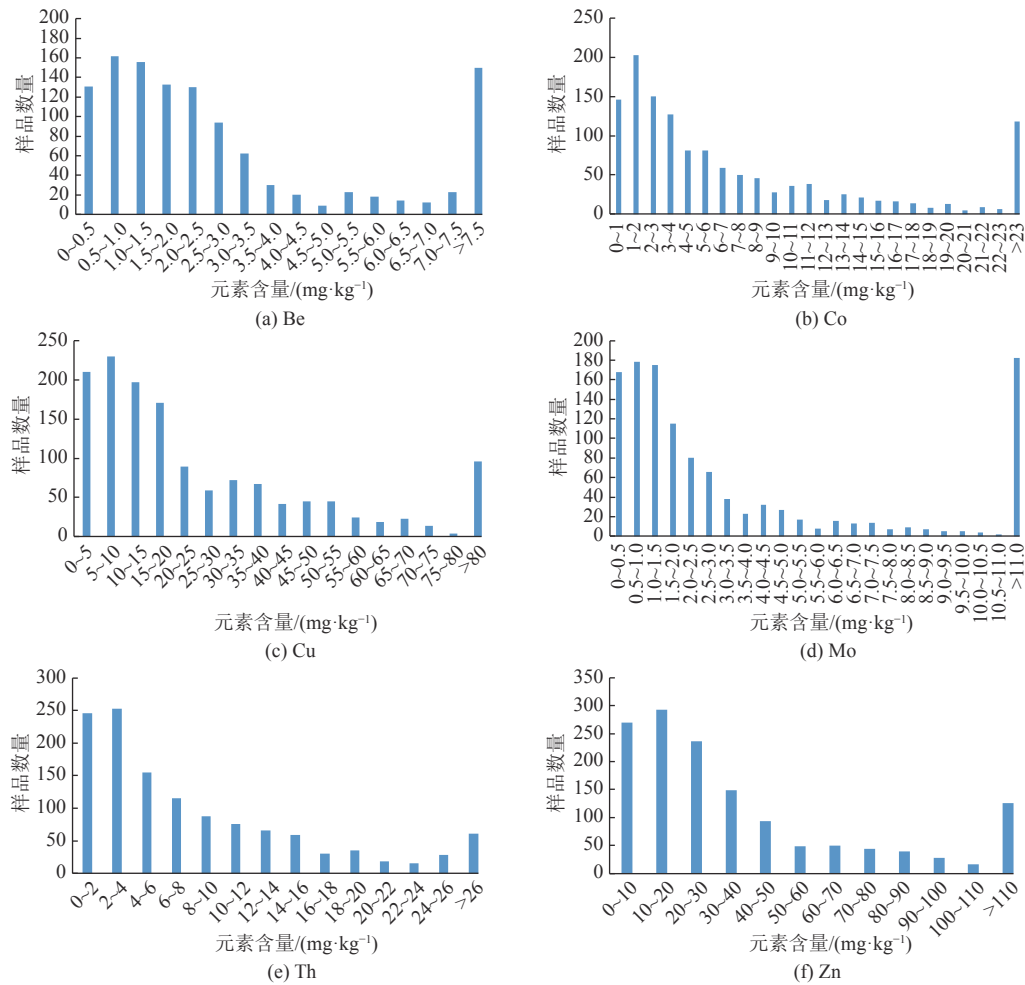
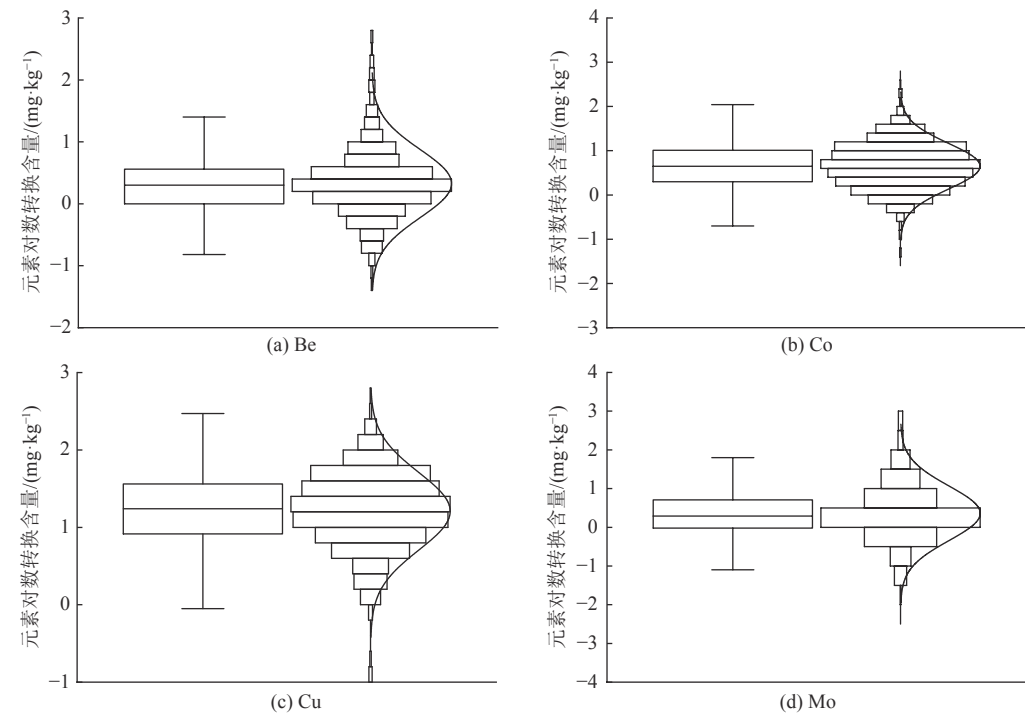


图 1 中国煤炭样品中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 的含量频率分布
Fig.1 Concentration frequency distribution of Be, Co, Cu, Mo, Th and Zn in Chinese coals



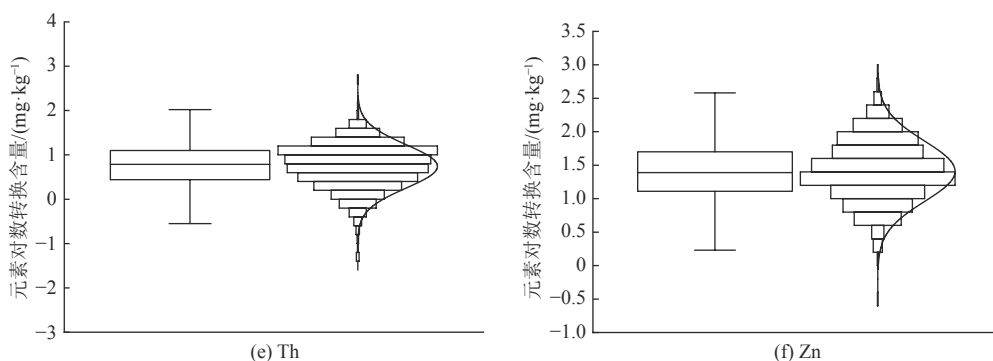


图 2 煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 含量数据转换箱线图

Fig.2 Box plot representing the lg-transformed concentration distribution of Be, Co, Cu, Mo, Th, and Zn in Chinese coals

表 1 样品数据统计指标
Table 1 Statistical indicators of sample data

指标	Be	Co	Cu	Mo	Th	Zn	备注
样品数量	1 167	1 315	1 406	1 191	1 247	1 390	
标准差 σ	31.17	17.10	37.44	47.67	18.79	58.69	
变异系数cv	4.10	1.88	1.31	3.94	2.07	1.34	
含量范围和算术平均值/(mg·kg ⁻¹)	0~542/7.61	0~250/9.11	0~559/28.66	0~665/12.10	0~581/9.08	0~865/43.70	原始数据
Q3 (25%)/(mg·kg ⁻¹)	1	1.90	8.10	0.90	2.58	12.85	
Q2 (50%)/(mg·kg ⁻¹)	2	4.30	16.71	1.85	5.69	24.76	
Q1 (75%)/(mg·kg ⁻¹)	3.63	10.25	36.77	4.91	12.13	50.47	
样品数量	1 002	1 190	1 306	984	1 162	1 255	
标准差 σ	1.65	5.05	18.05	2.12	6.27	24.49	剔除异常值后的数据
变异系数cv	0.78	0.91	0.85	0.97	0.85	0.82	
含量范围和算术平均值/(mg·kg ⁻¹)	0.05~7.51/2.10	0.04~22.73/5.53	0.06~78.5/21.36	0.01~10.6/2.19	0.04~26.1/7.35	0.38~106/30.02	
元素平均含量/(mg·kg ⁻¹)	Dai Shifeng等 ^[22] 任德貽等 ^[23] 唐修义等 ^[24] 白向飞等 ^[25]	2.11 7.08 7.05 7.00 10.62	17.5 18.35 13.00 17.87	3.08 3.11 4.00 2.70	5.84 5.81 6.00 5.88	41.4 42.18 38.00 —	

Co(5.1 mg/kg)、Cu(16 mg/kg)、Th(3.3 mg/kg) 和 Zn (23 mg/kg) 的平均含量^[26],我国煤中 Be、Co、Cu、Th、Zn 的平均含量更为富集,平均含量分别为 2.10、5.53、21.36、7.35 和 30.02 mg/kg。

2.2 煤中有害微量元素含量的空间分布

根据聚煤作用特征及聚煤盆地的演化形成,我国煤炭资源分布被划分为 5 个赋煤区:东北赋煤区、华北赋煤区、西北赋煤区、华南赋煤区以及滇藏赋煤区(图 3)。就成煤时代而言,晚石炭世-早二叠世(C₂-P₁)、晚二叠世(P₃)、晚三叠世(T₃)、早-中侏罗世(J₁₋₂)、晚侏罗世和早白垩纪 (J₃-K₁),以及古近纪和新近纪 (E-N) 是我国 6 个主要煤炭成煤期。其中,可采煤炭储量主要为 J₁₋₂、C₂-P₁ 和 J₃-K₁ 煤,分别占煤炭总储

量的 39.6%、38.1% 和 12.1%; P₃、T₃ 和 E-N 煤的占比相对较小,分别为 7.5%、0.4% 和 2.3%^[22]。就地域而言,C₂-P₁ 煤主要分布在华北地区,J₁₋₂ 煤主要分布在中国西北地区,东北地区以 J₃-K₁、E-N 煤为主,南部地区以 P₃、T₃ 煤为主,少量的 E-N 和 T₃ 煤分布在西藏-云南西部地区。

本文绘制了中国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 含量的空间分布(图 4—图 9)。以地域进行统计而不区分成煤时代的情况下,根据本文计算得到的我国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 的平均含量作为衡量基准(表 1),各元素含量的空间分布情况如下:① 对于 Be 元素,安徽、四川、黑龙江、重庆、云南、湖北等地煤中的平均含量较高,高于全国平均水平;山西、新疆、

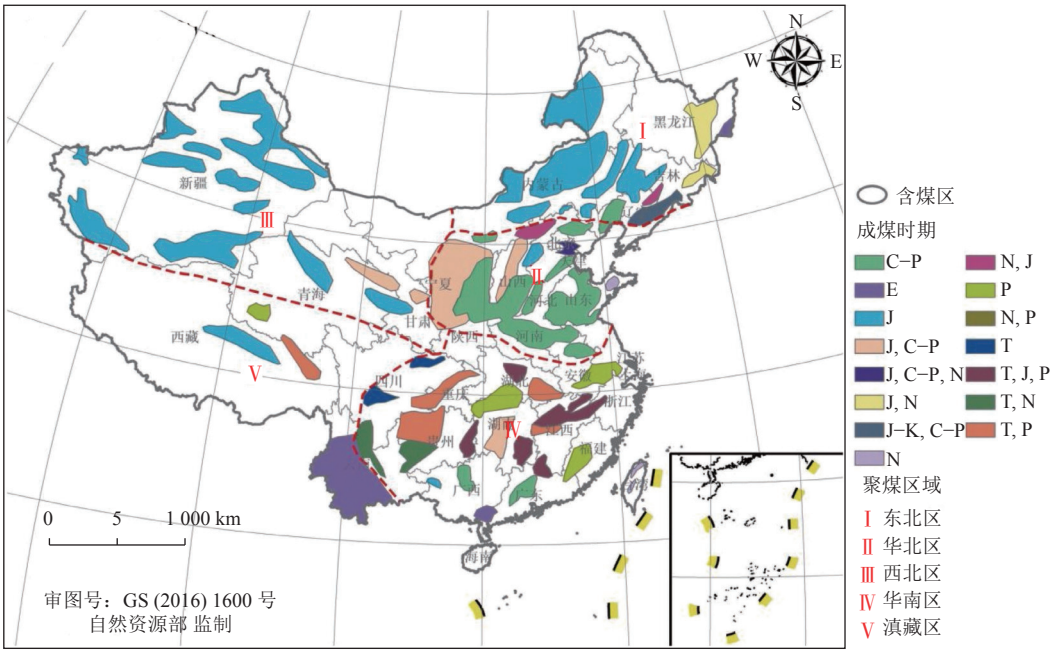
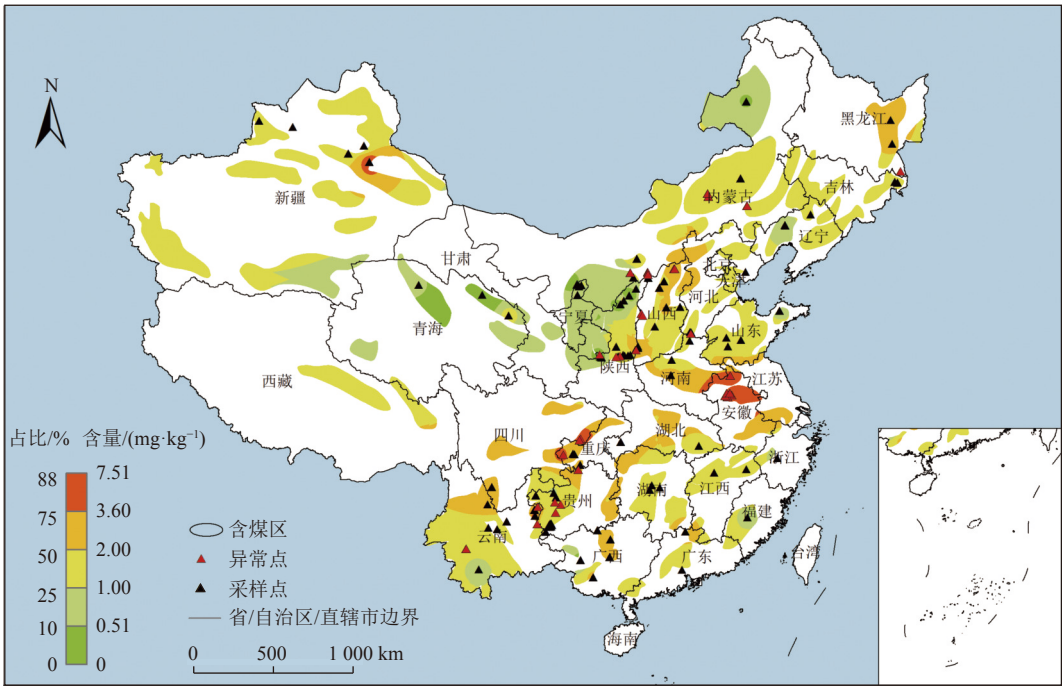


图 3 中国含煤区和成煤时代分布
Fig.3 Distribution of coal-bearing areas and coal-forming periods in China

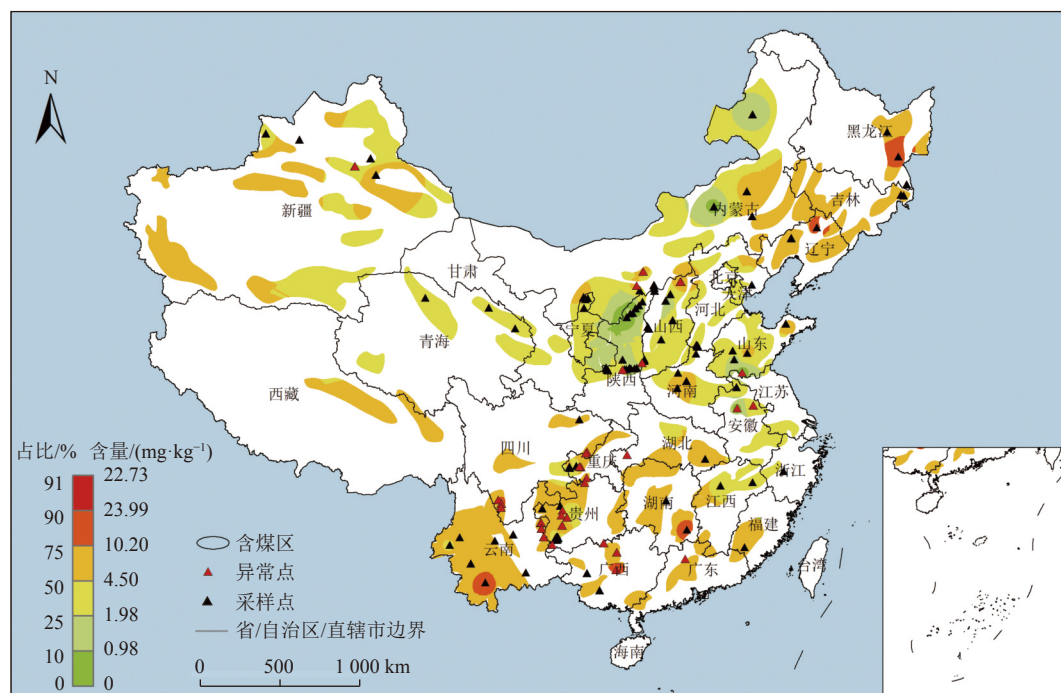


审图号: GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制
注: 图例中色柱两侧数值含义: ≤ 7.51 mg/kg 的样品占比 88%; ≤ 3.60 mg/kg 的样品占比 75%; ≤ 2.00 mg/kg 的样品占比 50%; ≤ 1.00 mg/kg 的样品占比 25%; ≤ 0.51 mg/kg 的样品占比 10%; 图 5—图 9 含义相同

图 4 中国煤中 Be 的空间分布
Fig.4 Spatial distribution map of Be in Chinese coals

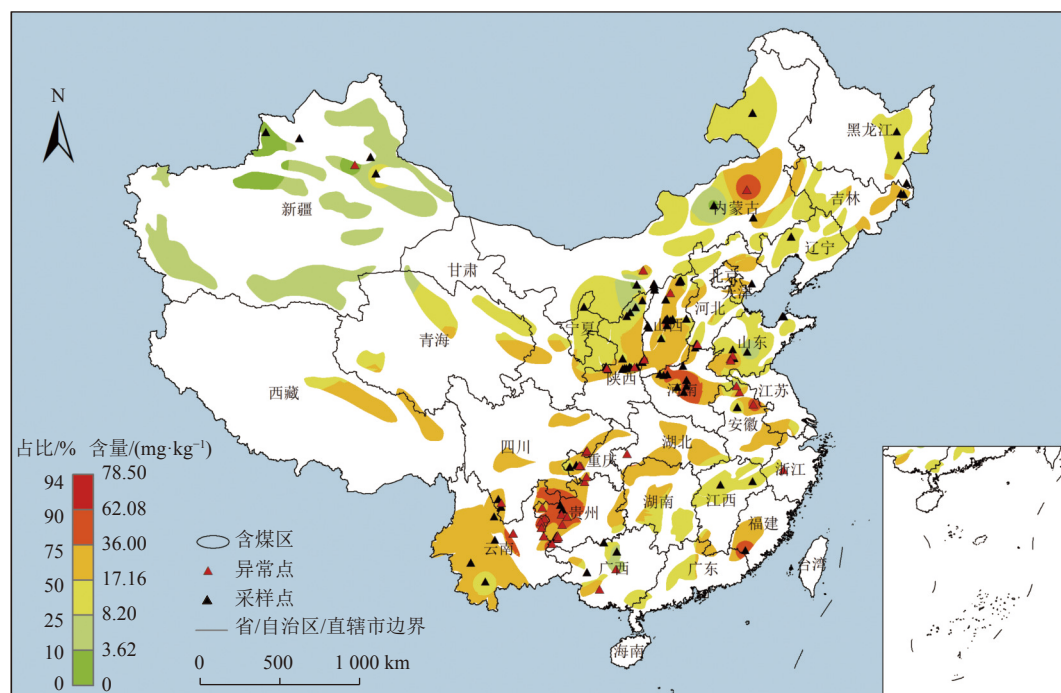
湖南、宁夏等地平均含量在全国平均水平附近; 其余省份/自治区的含量低于全国平均水平(图 10)。
② 对于 Co 元素, 高于全国平均含量的煤主要分布在四川、云南、吉林、贵州、河南、宁夏、广西、重庆等地;

安徽、黑龙江、山东、湖南、新疆等地的煤接近全国平均水平; 其余地区的含量相对较低。③ 对于 Cu 元素, 云南、贵州、四川、吉林、河南、湖北等地煤中的含量较高; 湖南、重庆、陕西、安徽、山西、河北等地处于中



审图号: GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制

图 5 中国煤中 Co 的空间分布
Fig.5 Spatial distribution map of Co in Chinese coals

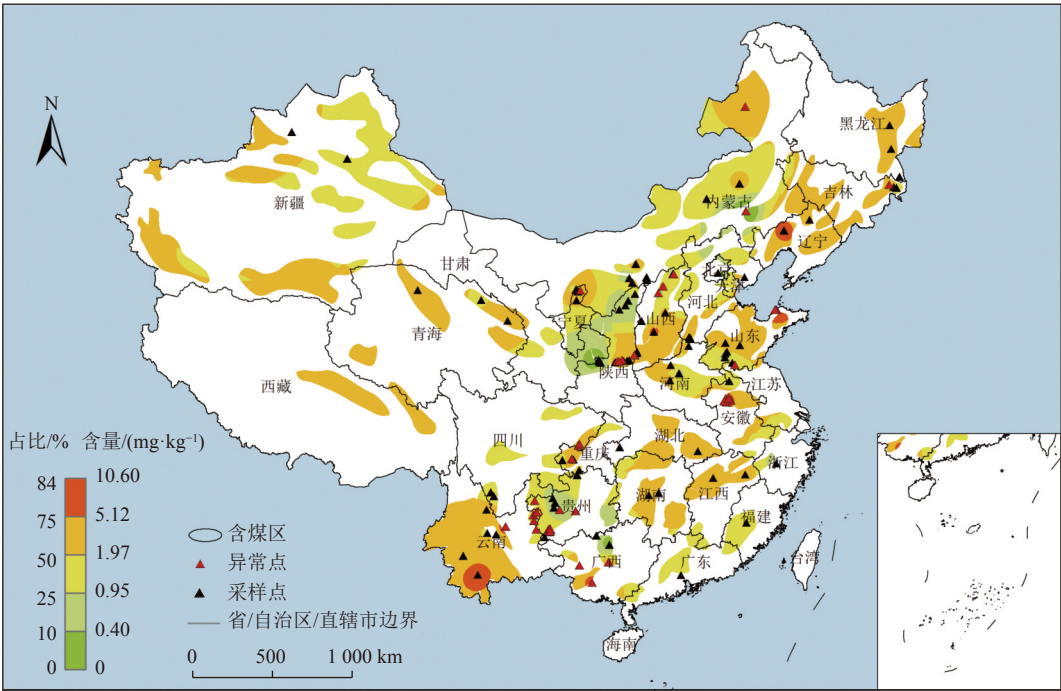


审图号: GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制

图 6 中国煤中 Cu 的空间分布
Fig.6 Spatial distribution map of Cu in Chinese coals

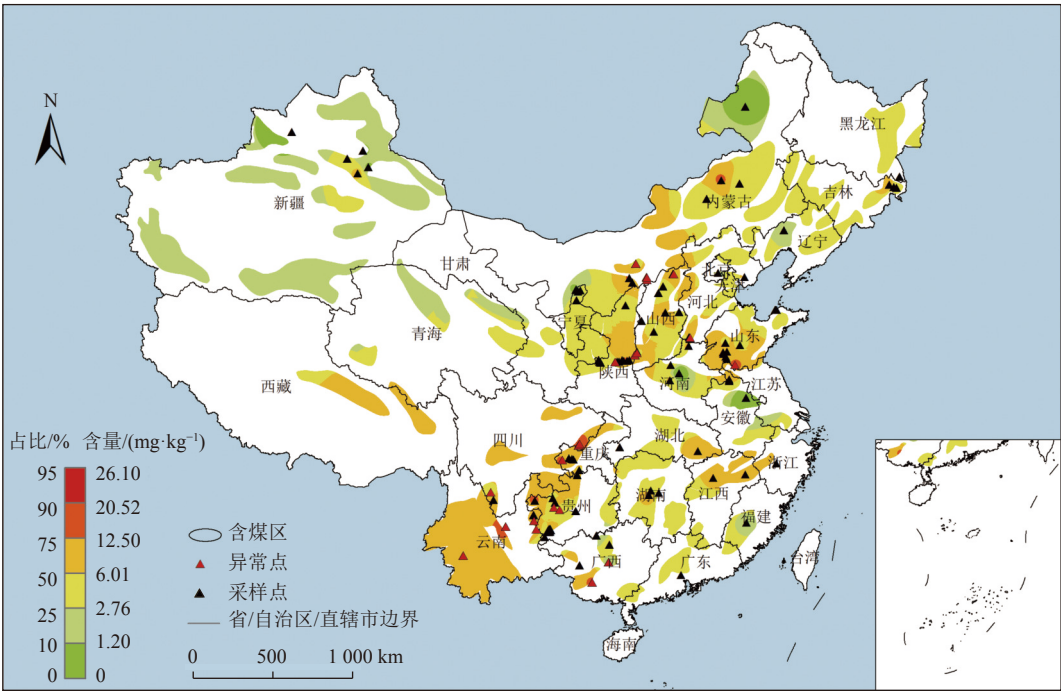
等水平;新疆和辽宁地区煤中 Co 元素较低。④ 对于 Mo 元素,安徽、辽宁、云南、宁夏、广西等地煤中含量较高;陕西、河北、河南等地的含量低于全国平均含量;其余地区处于中间水平。⑤ 对于 Th 元素,广西、云南、内蒙古、四川、江西、吉林、重庆等地的含量较高,且

平均含量基本相当;河北、山西、陕西、河南、贵州、安徽、山东、湖南、黑龙江等地的含量依次降低;宁夏、辽宁、湖北和新疆等地煤中 Th 含量明显低于全国平均含量。⑥ 对于 Zn 元素,高于全国平均含量的煤主要分布在江西、云南、四川、重庆、广西等地;河北、新



审图号：GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制

图 7 中国煤中 Mo 的空间分布
Fig.7 Spatial distribution map of Mo in Chinese coals



审图号：GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制

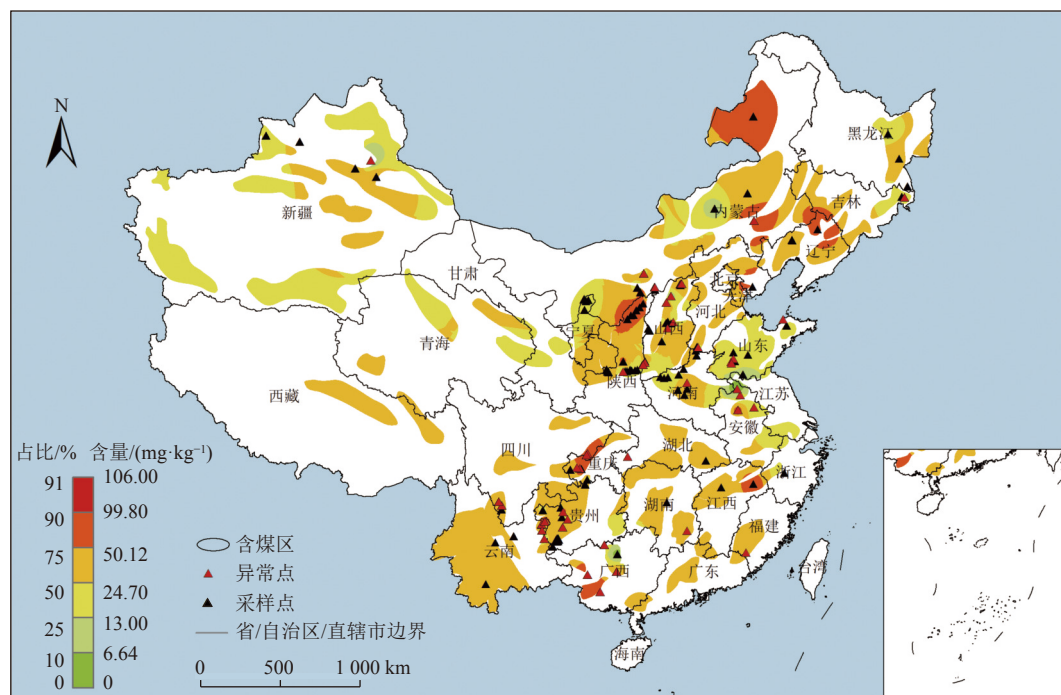
图 8 中国煤中 Th 的空间分布
Fig.8 Spatial distribution map of Th in Chinese coals

疆、山东、黑龙江等地煤中 Zn 含量远低于全国平均含量；其余地区处于中间水平且含量较为接近。

2.3 煤中有害微量元素含量空间分布格局的成因

任德盼等^[27-28]将煤中有害微量元素的富集成因

类型初步划分为 5 类,包括陆源富集型、沉积-生物作用富集型、岩浆-热液作用富集型、深大断裂-热液作用富集型和地下水作用富集型。Dai Shifeng 等^[22]通过对中国煤中微量元素深入分析,将其富集成因类型



审图号: GS (2016) 1600 号 自然资源部 监制

图 9 中国煤中 Zn 的空间分布

Fig.9 Spatial distribution map of Zn in Chinese coals

划分为物源区控制型、海洋环境控制型、热液控制型(包括岩浆控制型、低温热液控制型和海底喷气控制型)、地下水控制型和火山灰控制型。刘桂建等^[29]结合前人研究结论,将煤中微量元素富集成因按照时间进程分为原生因素(物源区母岩、成煤植物、沼泽水介质、气候、古土壤)、次生因素(岩浆热液、煤化程度)和后生因素(构造运动、风化作用、地下水作用、围岩物质交换)3 种类型。由此可知,中国煤中有害微量元素含量空间分布格局的形成是长时期、多阶段、多因素综合作用的结果。Cao Qingyi 等^[30]通过对比中国煤、上地壳和深层土壤(>1 m)中有害微量元素含量特征,指出有害微量元素平均含量在三者中的丰度具有相同的变化规律,并且针对同一元素,其在 3 种介质平面空间上的含量分布特征也是类似的,表明煤、岩石和土壤中微量元素的丰度分布同步受到岩石圈内元素地球化学循环的影响。此外,煤中有害微量元素的异常富集点与断层带分布具有空间关联性,并且异常富集点位置往往伴随着热液作用的痕迹^[30],这指示断裂构造和热液作用可能作为煤中有害微量元素的运移通道和物质来源,热液作用可作为煤中有害微量元素异常富集的典型特征。

3 结论

a. 基于 TECC 数据库,利用 ArcGIS 技术绘制了中国煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn 含量的空间分布地

图。这些地图有助于快速了解元素的空间分布信息,可以为煤中有害微量元素的潜在环境风险研究和煤炭环境管理提供参考。中国煤中有害微量元素含量的空间分布极不均匀。煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th、Zn 的含量主要分布在 0.05~7.51、0.04~22.73、0.06~78.50、0.01~10.60、0.04~26.10 和 0.38~106.00 mg/kg,平均含量水平分别为 2.10、5.53、21.36、2.19、7.35 和 30.02 mg/kg。

b. 煤中有害微量元素含量的空间分布格局的形成是长时期、多阶段、多因素综合作用的结果。典型影响因素包括物源区母岩、热液作用、水运移作用等。煤中有害微量元素含量分布受到岩石圈元素地球化学循环的影响。热液作用是煤中有害微量元素异常富集的典型特征。

c. 尽管 TECC 数据库中已包含了丰富的中国煤中有害微量元素的数据,但尚不能完全覆盖我国所有的含煤地区。来自于内蒙古、山西、陕西、安徽、贵州、广西等地区的样本数据较多,而来自于西北地区和滇藏地区的数据相对较少。今后仍需要进行持续补充分析测试工作。此外,本文中目标元素含量的空间成图范围采用的是含煤区范围,而非煤田范围。这是由于煤田范围较为分散,不利于空间数据展示。因此,今后需要对空间数据模型做进一步优化,提高空间数据的展示精度,使元素含量的空间分布更加符合实际情况。

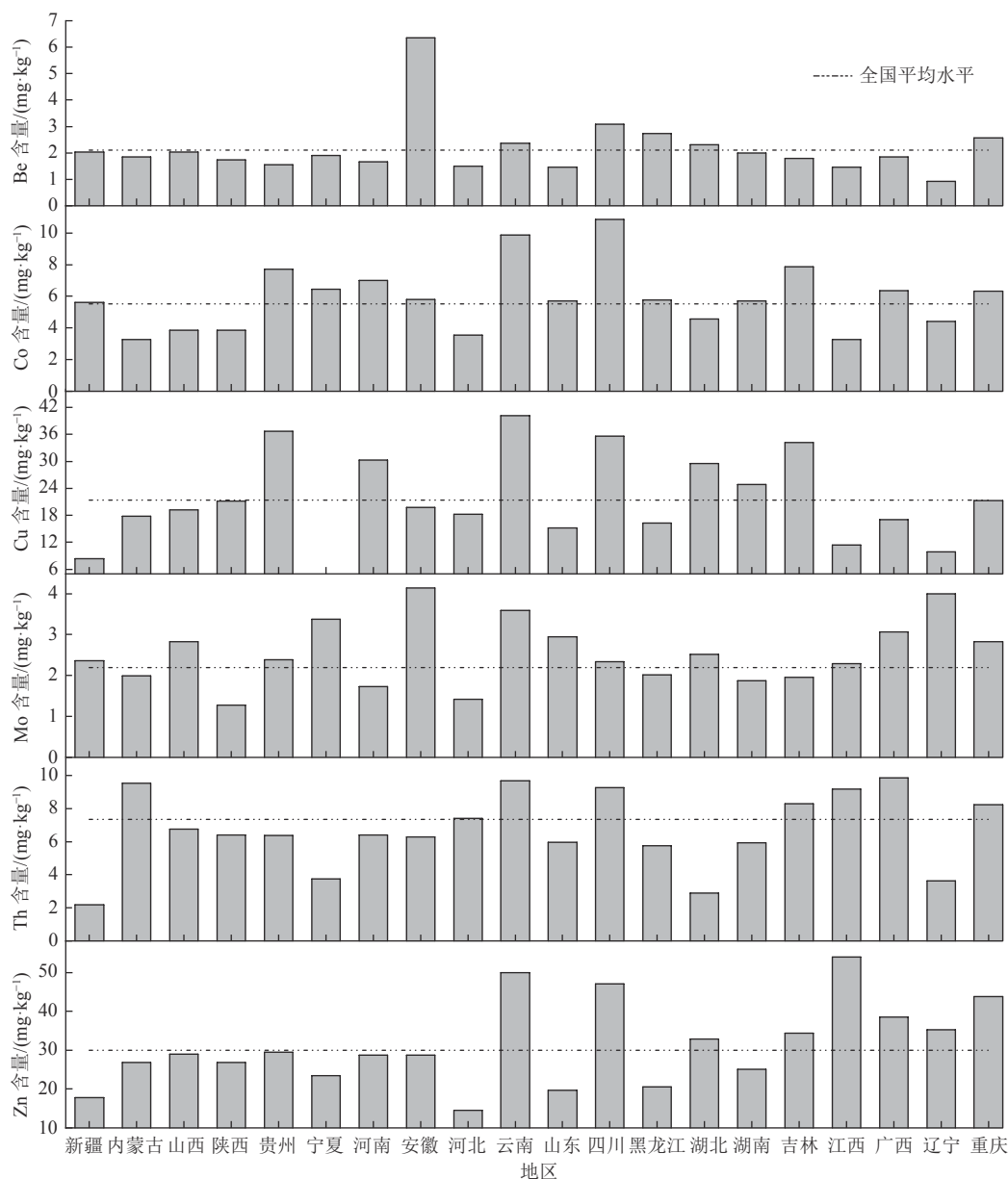


图 10 不同省(自治区、直辖市)煤中 Be、Co、Cu、Mo、Th 和 Zn 的平均含量

Fig.10 Average concentration of Be, Co, Cu, Mo, Th and Zn in coals in different regions

参考文献(References)

- [1] XIE Xuejing, WANG Xueqiu, CHENG Hangxin, et al. Digital element earth[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2011, 85(1): 1-16.
- [2] WANG Xueqiu, ZHANG Bimin, NIE Lanshi, et al. Mapping chemical earth program: Progress and challenge[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, 217: 106578.
- [3] WANG Xueqiu, ZHANG Qin, ZHOU Guohua. National-scale geochemical mapping projects in China[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2007, 31(4): 311-320.
- [4] KYSER K, BARR J, IHLENFELD C. Applied geochemistry in mineral exploration and mining[J]. *Elements*, 2015, 11(4): 241-246.
- [5] 王学求, 徐善法, 聂兰仕, 等. 全球一张地球化学图与全球资源环境评价[C]//中国地质学会. 中国地质学会2015学术年会论文集摘要汇编(中册). 北京: 中国地质学会地质学报编辑部, 2015.
- [6] LADENBERGER A, DEMETRIADES A, REIMANN C, et al. GEMAS: Indium in agricultural and grazing land soil of Europe: Its source and geochemical distribution patterns[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 154: 61-80.
- [7] CICHELLA D, GIACCIO L, DINELLI E, et al. GEMAS: Spatial distribution of chemical elements in agricultural and grazing land soil of Italy[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, 154: 129-142.
- [8] XIE Xuejing, WANG Xueqiu, ZHANG Qin, et al. Multi-scale geochemical mapping in China[J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2008, 8(3/4): 333-341.
- [9] FEOKTISTOV V M, KHARIN V N, SPECTOR E N. Studying precipitation chemistry by multivariate analysis based on data of

- rural stations in Russian Barents Region[J]. *Water Resources*, 2014, 41(4): 421–430.
- [10] DAVID B S. Geochemical studies of North American soils: Results from the pilot study phase of the North American Soil Geochemical Landscapes Project[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(8): 1355–1356.
- [11] JIANG Ping, YANG Hufang, MA Xuejiao. Coal production and consumption analysis, and forecasting of related carbon emission: Evidence from China[J]. *Carbon Management*, 2019, 10(2): 189–208.
- [12] CHEN Hong, LI Li, LEI Yalin, et al. Public health effect and its economics loss of PM2.5 pollution from coal consumption in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 138973.
- [13] CAO Qingyi, YANG Liu, QIAN Yahui, et al. Study on mercury species in coal and pyrolysis-based mercury removal before utilization[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(32): 20215–20223.
- [14] TONG Yali, YUE Tao, GAO Jiajia, et al. Partitioning and emission characteristics of Hg, Cr, Pb and as among air pollution control devices in Chinese coal-fired industrial boilers[J]. *Energy and Fuels*, 2020, 34(6): 7067–7075.
- [15] WANG Jinxi, YANG Zhen, QIN Shenjun, et al. Distribution characteristics and migration patterns of hazardous trace elements in coal combustion products of power plants[J]. *Fuel*, 2019, 258: 116062.
- [16] CHANG Lin, YANG Jianping, ZHAO Yongchun, et al. Behavior and fate of As, Se, and Cd in an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 722–730.
- [17] JIA Jianli, LI Xiaojun, WU Peijing, et al. Human health risk assessment and safety threshold of harmful trace elements in the soil environment of the Wulantuga open-cast coal mine[J]. *Minerals*, 2015, 5(4): 837–848.
- [18] YAO Enqin, GUI Herong. Four trace elements contents of water environment of mining subsidence in the Huainan diggings, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 146(1/2/3): 203–210.
- [19] CAO Qingyi, YANG Liu, REN Wenying, et al. Spatial distribution of harmful trace elements in Chinese coalfields: An application of WebGIS technology[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 755: 142527.
- [20] YANG Liu, BAI Xue, HU Yinjie, et al. Construction of trace element in coal of China database management system: Based on WebGIS[J]. *Sains Malaysiana*, 2017, 46(11): 2195–2204.
- [21] OSGeo中国中心. 中国煤炭资源(1:3 200万)在线地图[EB/OL]. (2020–02–17) [2021–09–15]. <https://www.osgeo.cn/map/m01c8>.
- [22] DAI Shifeng, REN Deyi, CHOU Chenlin, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3–21.
- [23] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [24] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [25] 白向飞, 李文华, 陈亚飞, 等. 中国煤中微量元素分布基本特征[J]. *煤质技术*, 2007(1): 1–4.
- BAI Xiangfei, LI Wenhua, CHEN Yafei, et al. The general distributions of trace elements in Chinese coals[J]. *Coal Quality Technology*, 2007(1): 1–4.
- [26] KETRIS M P, YUDOVICH Y E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(2): 135–148.
- [27] 任德贻, 赵峰华, 张军营, 等. 煤中有害微量元素富集的成因类型初探[J]. *地学前缘*, 1999, 6(增刊1): 17–22.
- REN Deyi, ZHAO Fenghua, ZHANG Junying, et al. A preliminary study on genetic type of enrichment for hazardous minor and trace elements in coal[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(Sup.1): 17–22.
- [28] REN Deyi, ZHAO Fenghua, WANG Yunquan, et al. Distributions of minor and trace elements in Chinese coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, 40: 109–118.
- [29] 刘桂建, 彭子成, 杨萍玥, 等. 煤中微量元素富集的主要因素分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(4): 1–4.
- LIU Guijian, PENG Zicheng, YANG Pingyue, et al. Main factors controlling concentration of trace element in coal[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2001, 29(4): 1–4.
- [30] CAO Qingyi, YANG Liu, REN Wenying, et al. Environmental geochemical maps of harmful trace elements in Chinese coalfields[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 799: 149475.

(责任编辑 范章群)