



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目: 焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析
作者: 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅
DOI: 10.13227/j.hjlx.202008218
收稿日期: 2020-08-21
网络首发日期: 2020-12-02
引用格式: 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅. 焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202008218>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析

顾高铨^{1,2}, 万小铭^{1,2*}, 曾伟斌^{1,2}, 雷梅^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100089)

摘要：焦化场地作为典型的工业污染场地, 其特征污染物重金属严重危害人体健康, 研究其场地内外污染物的空间分布及驱动因子, 对于后续的采样设计、风险评估、污染防控等工作具有重要指导意义。本研究基于反距离加权法分析某在产焦化厂内部及外部的重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的空间分布, 并利用地理探测器分析焦化厂内部及外部的重金属空间分布驱动因子差异。结果表明, 该焦化厂内部及周边除 As、Ni 和 Zn 外, 其余重金属的超背景值率均在 50% 以上, 且内外部重金属变异系数超过 30%, 空间分布连续性较差。其中内部平均变异程度为: $Hg > Cd > As > Cu > Zn > Cr > Pb > Ni$, 外部平均变异程度为: $Hg > Cu > Cd > As > Zn > Pb > Cr > Ni$ 。根据分异及因子探测结果, 理化性质因子中对焦化厂内部及外部重金属空间分布贡献最大的均为土壤全氮、有机质和有效中微量元素含量; 距离污染源因子中对内部重金属空间分布贡献最大的为粗苯、冷鼓工段, 对外部重金属空间分布贡献最大的为焦炉熄焦工段, 并且污染源及土壤理化性质的交互因子对内部重金属空间分布的贡献度略高于外部。根据结果可知, 决定焦化厂内部及外部的重金属空间分布的理化性质驱动因子较为一致, 其主要基于土壤养分元素对重金属有效性的影响。而决定焦化厂内外部重金属分布的污染源存在差异, 内部重金属分布主要受到焦化产品精制工艺中排放含重金属废气及废水等的驱动, 外部重金属分布主要受到炼焦制气工艺中排放废气沉降的驱动。

关键词：重金属; 变异系数; 反距离加权法; 地理探测器; 驱动因子

DOI: 10.13227/j.hj.kx.202008218

Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking plant and its Driving Factors Analysis

GU Gao-quan^{1,2}, WAN Xiao-ming^{1,2*}, ZENG Wei-bin^{1,2}, LEI Mei^{1,2}

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089, China)

Abstract: Coking plant is a kind of typical industrial pollution sites. It may release heavy metals to the environment, posing harm to human health. Scholars have discovered that different types of heavy metals were released from different coking production processes and led to spatial differences in heavy metals. Research on the spatial distribution and driving factors of pollutants in soil inside and outside the coking plants is important for the sampling design, risk assessment, pollution prevention and control, etc. Inverse distance weight was used to analyze the spatial distribution of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn inside and outside of the coking plant. Geo-detector was used to find out the difference in the driving factors for the spatial distribution of heavy metals between soil from inside and that from outside of the coking plant. The results showed that except As, Ni, and Zn, the over-background value rate of other heavy metals was above 50%, and the continuity of the spatial distribution of heavy metals in soil was poor. The coefficient of variation exceeded 30%, representing a moderate variation. The average degree of CV inside the coking plant was $Hg > Cd > As > Cu > Zn > Cr > Pb > Ni$, and the external average degree of CV was $Hg > Cu > Cd > As > Zn > Pb > Cr > Ni$. Heavy metals content show that the content of As, Cd, Cr, Pb, and Zn outside of the coking plant is bigger than inside. According to geo-detector result, the physicochemical

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1800302)

作者简介: 顾高铨 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为场地土壤污染修复, E-mail: gugq.18s@igsrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: wanxm.06s@igsrr.ac.cn

properties factors with large contribution rate to the spatial distribution of heavy metals inside and outside the coking plant was the soil total nitrogen, organic matter and available medium-micro element content. Pollution source factors contributed the most to the heavy metal inside spatial distribution was the crude benzol and cold drum section, while the coke oven and quench section determined the outside spatial distribution of heavy metals. The q value of strongest factor inside of the coking plant was more than 0.5 while that outside of the coking plant was less than 0.5. According to the interaction detector result, the interaction factors value of pollution sources and soil physicochemical properties to the inside spatial distribution of heavy metals was higher than that of outside. According to the distribution and geo-detector results, the strongest physicochemical properties driving factors which determined the inside and outside spatial distribution of heavy metals were relatively consistent. These factors were soil nutrient factors, which mainly influenced the availability of heavy metals. The difference in the production process led to the difference between the inside and outside spatial distribution of heavy metals and the content of heavy metals outside of the coking plant was higher than inside because these heavy metals come from various pollution sources. Driving forces for distribution of heavy metals inside of the plant higher than that outside show that heavy metals inside of the plant was mainly come from the coking plant. Heavy metals distribution inside of the coking plant was mainly driven by the pollution source factor of the coking product refining process and coking water, while heavy metals distribution outside of the coking plant was mainly driven by the coking gas production process and other emission pollution source factors.

Key words: heavy metals; coefficient of variation; inverse distance weighting; geo-detector; driving factor

我国是世界上最大的焦炭生产国和出口国，焦化生产过程产生的 PAHs、重金属和氰化物等有毒物质，通过大气沉降及淋溶扩散等途径进入焦化场地内部并造成污染^[1, 2]。其污染物中，重金属具有难降解、易富集、持久性和不可逆性等特点，不仅导致土壤质量恶化，也会通过蔬菜等食物摄取及皮肤接触等途径进入人体，诱发癌症等疾病并危害人体健康^[3~5]。因此，自 2016 年文献[6]发布后，焦化场地作为典型的工业污染场地，其污染种类多和污染范围广，成为污染防治重点关注行业之一^[7, 8]。

污染物空间分布情况能够揭示污染物的空间变异性，对于提高污染调查的准确性、降低污染研究的不确定性具有重要作用^[9, 10]。近年来对焦化场地特征污染物的空间分布特征研究中，多数通过污染物含量描述性统计结果，结合地统计学方法，简要分析焦化场地内部及周边土壤污染物的空间分布状况，并根据污染物空间分布情况简要判断污染物的来源^[11~16]。已有研究中较少有系统性针对焦化厂内外部污染物空间分布驱动因素的深入探讨。此外，焦化场地污染物空间分布的不均一性，不仅受到土壤理化性质、污染物迁移特性等因素的影响^[17]，也受到污染源分布及类型的影响。学者研究发现焦化生产环节中，备煤阶段主要产生重金属及 PAHs 污染^[18, 19]，焦炉生产阶段主要产生 PAHs 污染及少量重金属^[20, 21]，不同生产环节的分布也导致污染物分布的空间差异。

因此，本研究通过空间插值分析及地理探测器，对某在产焦化场地内外部重金属的空间分布及分布驱动因子进行系统性分析，揭示焦化场地内外部重金属分布的主导驱动因子，对于准确判断污染物在焦化厂内部及周边的空间分布，指导后续的场地采样设计、污染风险评估及防控工作具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究选取某焦化厂土壤作为研究对象，该焦化厂成立于 2004 年，占地面积 68hm²，主要经营范围包括焦炭、焦油、煤气和粗苯的生产销售，年产焦炭约 1.1×10⁶t、焦油 5×10⁴t、粗苯 1×10⁴t 和煤气约 5×10⁸Nm³，属于该地区的重点监管企业。该焦化厂址主导风向以东南

风为主，四周地形平坦开阔，海拔高度约 26m。地表为第四系地层覆盖，第四纪覆盖层厚度约 45m，岩性自上而下由细砂、粉质黏土、砂质黏土、砂岩、泥岩和夹煤层互层沉积。

1.2 数据获取及处理

1.2.1 采样点污染物含量

本研究结合布点原则^[9, 22]，对点位的布设采用判断布点的方法，根据焦化厂主要工艺，判断选择炼焦熄焦区、制气区、冷鼓脱硫区、粗苯制造区、油库区和煤场区等疑似污染区及厂区周边土壤进行采样点布设（图 1），土壤样品为采样深度 0~20cm 的表层土壤。取每个采样点的土样风干后取大约 0.50g 过 100 目筛后放入聚四氟乙烯的微波消解管中，加入浓硝酸 5mL、氢氟酸 3mL 及过氧化氢 1mL 并轻微晃动直至摇匀，加塞旋紧后将消解管放置于微波消解仪并按照设定的升温程序进行消解。消解完全后将消解液自然冷却 1h，置于石墨加热板于 150℃加热赶酸，当液体呈现粘稠状后停止赶酸并冷却。将处理后的消解液用 50mL 容量瓶定容，之后取部分液体至离心管中，并使用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）测定消解液中的 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量，并将数据根据式（1）进行计算：

$$C_{\text{土壤}} = \frac{C_{\text{测定}} \times 50}{m} \quad (1)$$

式中， $C_{\text{土壤}}$ 为各采样点的重金属含量（ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）； $C_{\text{测定}}$ 为 ICP-MS 测定的土壤消解样品的重金属含量（ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ）； m 为每个土样称量的质量（g）。

数据分析及作图中，通过 Excel 2010 处理计算采样点距离各污染源的远近，SPSS 22.0 进行重金属污染数据描述性统计，Origin 9.0 进行 q 值柱状图绘制，ArcGIS 10.2 进行污染物空间分布可视化及采样点因子数据提取。

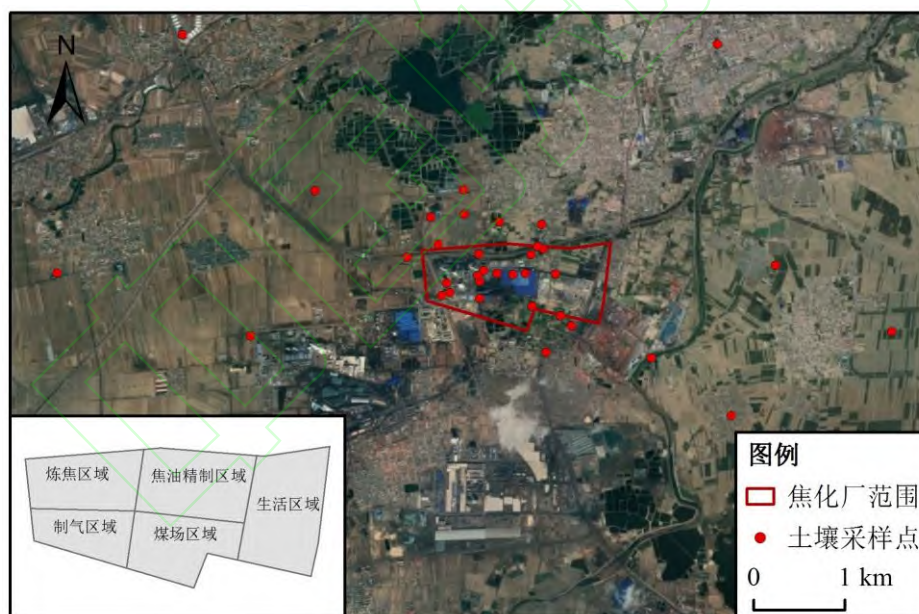


图 1 焦化厂范围及采样点分布示意

Fig.1 The scope of coking plant and distribution of sampling point

1.2.2 驱动因子数据获取与分类

本研究选择土壤理化性质（图 2）和距离污染源远近作为污染物空间分布的驱动因子。理化性质的测定中，pH 值利用 PHS-3C 酸度计进行测定，EC 值通过土壤原位 EC 计进行测定。土壤全氮含量选用重铬酸钾-硫酸消化法，有机质含量选用重铬酸钾容量法，并用元素分析仪（Vario EL, Elementar）测定。土壤碳酸钙测定方法采用中和滴定法。土壤有效硼选用沸水浸提-甲亚胺比色法，有效硅选用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法，并分别用酶标仪（EnSpire, Perkin Elmer）于 420nm 和 700nm 波长处测定。土壤粒度组成通过激光粒度分析仪（Mastersizer

2000, Malvern) 测定。距离因子方面, 采样点与各污染源的距离通过 Arcgis 10.2 的 analysis tools-point distance 工具计算。

理化性质方面, 根据测定的项目包括了土壤 pH 值、土壤 EC 值、有机碳含量、全氮含量、有机质含量、碳酸钙含量、有效硅含量、有效硼含量和土壤质地共 9 个因子。距离污染源远近方面, 根据该焦化厂的工艺, 选择了一号焦炉、二号焦炉、一号熄焦、二号熄焦、煤气柜、硫铵工段、粗苯工段、油库工段、冷鼓工段和煤场共 10 个因子。由于各因子数据属于数值量, 本研究需要将其进行数据离散化处理, 获得各因子数据的类型量。对于理化性质因子的离散化, pH 值根据土壤酸碱度等级划分标准划分为 4 类; 土壤 EC 值和碳酸钙含量根据 SPSS 19.0 的 K-Means 聚类结果划分为 4 类^[23]; 土壤质地根据国际制土壤分类标准划分为 4 大类; 其余土壤养分因子根据全国第二次土壤普查养分分级标准划分。对于距离的划分中, 由于聚类分析能够解释不通污染点间的相似性和关联性^[24-25], 且根据 q 值最大原则, 因此利用 K-Means 聚类将距不同污染源的距离因子划分为 6 类。此外, 利用 Arcgis 10.2 工具箱中的 spatial analyst tools-extraction-extract values to points 功能, 对研究点位对应的驱动因子数据进行提取。

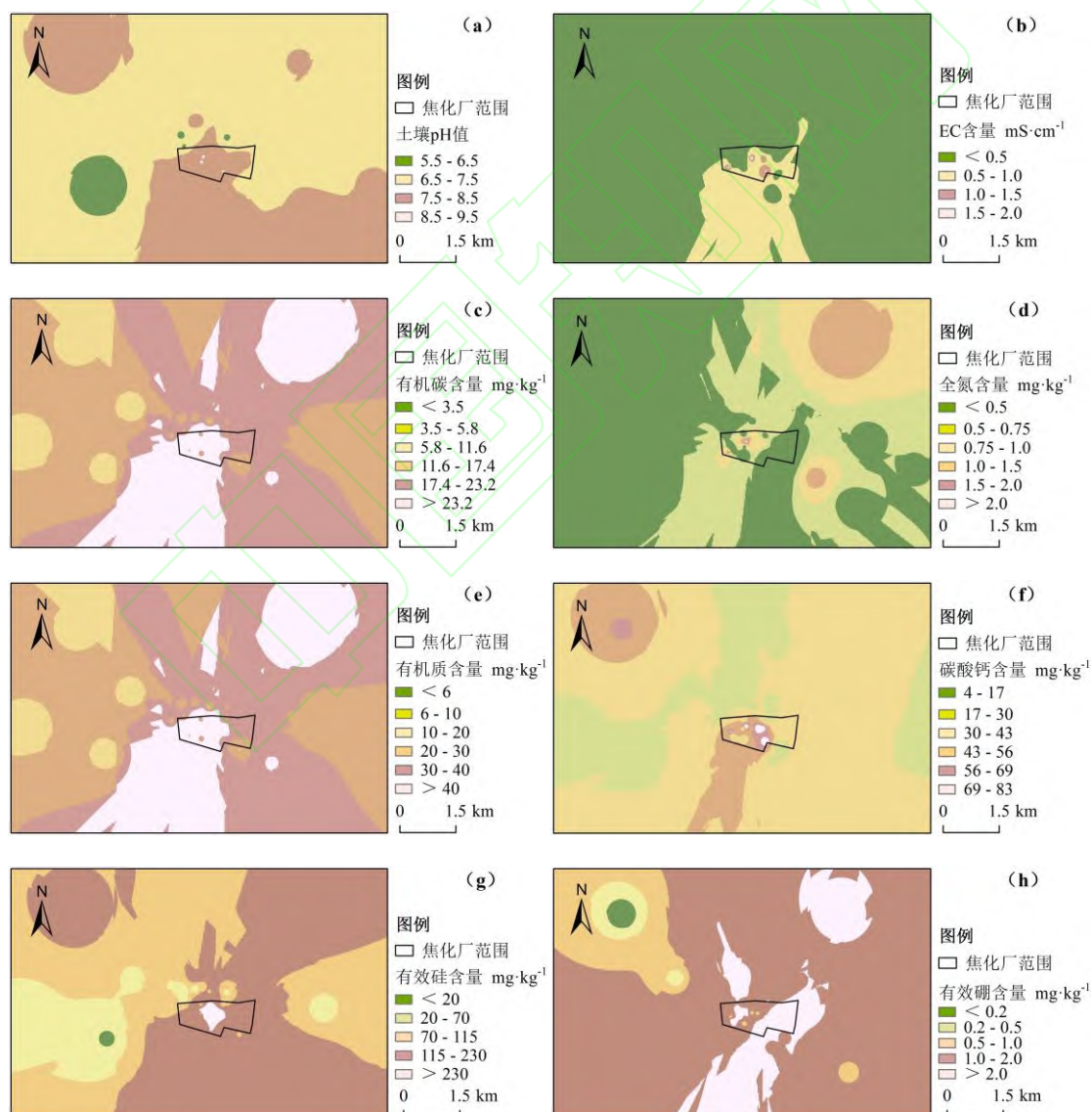




图 2 理化性质因子分布示意

Fig.2 Distribution of physicochemical properties

1.3 研究方法

1.3.1 反距离加权法

反距离加权法 (inverse distance weight, IDW) 是以插值点与样本点之间的距离作为权重的一种插值方法, 距离插值点越近的样本点赋予的权重越大^[26]。IDW 方法因其原理简单易行, 插值结果精确, 已被广泛应用在数据插值处理中^[27]。各样点污染物的 IDW 插值通过 ArcGIS 10.2 软件进行。

1.3.2 地理探测器

地理探测器是由王劲峰^[28]提出的一种揭示空间分异性及驱动力的统计学方法, 是度量、挖掘和利用空间异质性的新工具。探测器内部包含分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器共 4 个探测器, 并且被广泛应用于自然因素和人为因素等驱动力因素的影响机制研究^[29, 30]。本研究为揭示焦化厂内外部重金属空间分布的驱动因子, 选择了分异及因子探测器、交互作用探测器进行驱动因子探测。

(1) 分异及因子探测器 用于探测变量的空间分异性, 以及探测某因子能够在多大程度上解释变量的空间分异, 其解释能力根据 q 值度量^[28]。 q 值取值范围为 $[0, 1]$, 值为 1 时表明因子完全控制了因变量的空间分布, 值为 0 时则表明因子与因变量不能存在影响关系, q 值大小表示因子解释了 $100 \times q\%$ 的因变量, 其数值表达公式如下。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^H N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

式中, H 为离散化后的类型值变量的分类数; N_h 和 N 分别为分层层内和全局的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为分层 h 和全局因变量数值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和以及全区总方差。

(2) 交互作用探测器 识别不同风险因子之间的交互作用, 即评估因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力, 或这些因子对因变量的影响是相互独立的, 其交互作用关系可以分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、非线性增强及独立共 5 类。

本研究将测定的 9 种理化性质因子和选定的 10 种污染源距离因子作为探测因子, 分别对表层土壤采样点的 6 种重金属含量进行分异性探测, 探测某单一因子对焦化重金属污染物空间分布格局的影响作用, 判断焦化厂内外部主要影响因子的差异。同时, 本研究利用交互作用探测器探测影响因子两两间的交互作用, 对比交互因子对研究区内部及外部土壤重金属的空间分布格局的影响差异。

2 结果与讨论

2.1 焦化场地污染物分布

2.1.1 重金属空间分布

本研究中焦化厂内部及周边的重金属含量 (表 1), 均未超出我国土壤环境质量标准中所限定的筛选值, 但大部分区域超过河北省土壤环境背景值^[31, 32]。焦化厂内部重金属超背

景值率由大至小为：Hg=Ni>Cd>Pb=Cu>Cr>Zn>As，焦化厂外部重金属超背景值率由大至小为：Ni>Hg>Cd>Pb>Cu>Cr>Zn>As。而焦化厂内部及周边各重金属变异系数均大于 15%，属于中等变异，其内部平均变异程度由大至小为 Hg>Cd>As>Cu>Zn>Cr>Pb>Ni，最大为 Cd 的 78.6%；外部平均变异程度由大至小为 Hg>Cu>Cd>As>Zn>Pb>Cr>Ni，最大为 Cu 的 156.2%，属于强变异。该结果说明该焦化厂内部及外部的土壤均受到重金属不同程度的影响，空间连续性较差，分异性较大，重金属含量分布受到焦化厂生产影响的可能性大。

表 1 焦化厂内外部重金属含量描述性统计结果¹⁾

Table1 Statistical results of heavy metal content inside and outside the coking plant

重金属	区域	样点数	最大值 /mg kg ⁻¹	最小值 /mg kg ⁻¹	平均值 /mg kg ⁻¹	标准偏差 /mg kg ⁻¹	变异系数 /%	背景值 /mg kg ⁻¹	筛选值 /mg kg ⁻¹	超背景值率 /%
As	内部	13	9.14	0.55	2.90	2.18	75.1	7.61	20	7.7
	外部	23	7.95	0.91	3.10	1.68	54.2	7.61	20	5.7
Cd	内部	13	0.46	0.09	0.14	0.11	78.6	0.09	20	100
	外部	23	0.57	0.09	0.18	0.13	72.2	0.09	20	100
Cr	内部	13	116.40	36.94	70.28	22.69	32.3	68.30	200	53.8
	外部	23	109.92	41.09	67.28	17.69	26.3	68.30	200	48.6
Cu	内部	13	81.93	17.76	31.01	16.27	52.5	21.80	2000	84.6
	外部	23	448.18	17.76	78.30	116.40	148.7	21.80	2000	85.7
Hg	内部	13	2.98	0.18	0.57	0.97	170.2	0.04	8	100.0
	外部	23	0.64	0.02	0.13	0.16	123.1	0.04	8	97.1
Ni	内部	13	56.50	28.40	37.21	7.62	20.5	25.00	150	100.0
	外部	23	47.76	26.29	34.96	5.65	16.2	25.00	150	100.0
Pb	内部	13	45.68	19.87	26.26	6.66	25.4	21.50	400	84.6
	外部	23	71.59	21.61	29.09	10.28	35.3	21.50	400	91.4
Zn	内部	13	171.01	35.78	74.53	37.38	50.2	78.40	250	30.8
	外部	23	205.53	41.93	81.75	46.42	56.8	78.40	250	34.3

1) As、Cd、Cu、Hg、Ni 和 Pb 选取 GB 36600-2018 规定的筛选值，该国标未规定总 Cr 和 Zn 的筛选值，因此总 Cr 筛选值选取 GB 15618-2018 规定的 6.5<pH≤7.5 土壤中其他农用地的标准，Zn 筛选值选取 GB 15618-2018 规定的 6.5<pH≤7.5 土壤中的标准

结合 IDW 插值的焦化厂内部重金属分布情况（图 3），可知焦化厂内部 Cd、Cu 和 Hg 主要富集区域在煤气制气区附近，As、Hg、Ni、Pb 和 Zn 主要富集区域分布在焦炉熄焦区附近，该结果与已有学者的研究发现炼焦设备排放的颗粒物中吸附有 As、Hg、Zn 和 Pb 等重金属元素的结果相似^[33, 34]。Cr 主要富集区域分布在焦炉熄焦区、粗苯区和脱硫区，说明焦化厂的多个化学生产过程均会产生 Cr 排放。综上，该焦化厂内部整体呈现出西北区域重金属含量高于东南区域的状况，该分布状况也与焦化厂基本生产工艺集中于西北区域相符合。

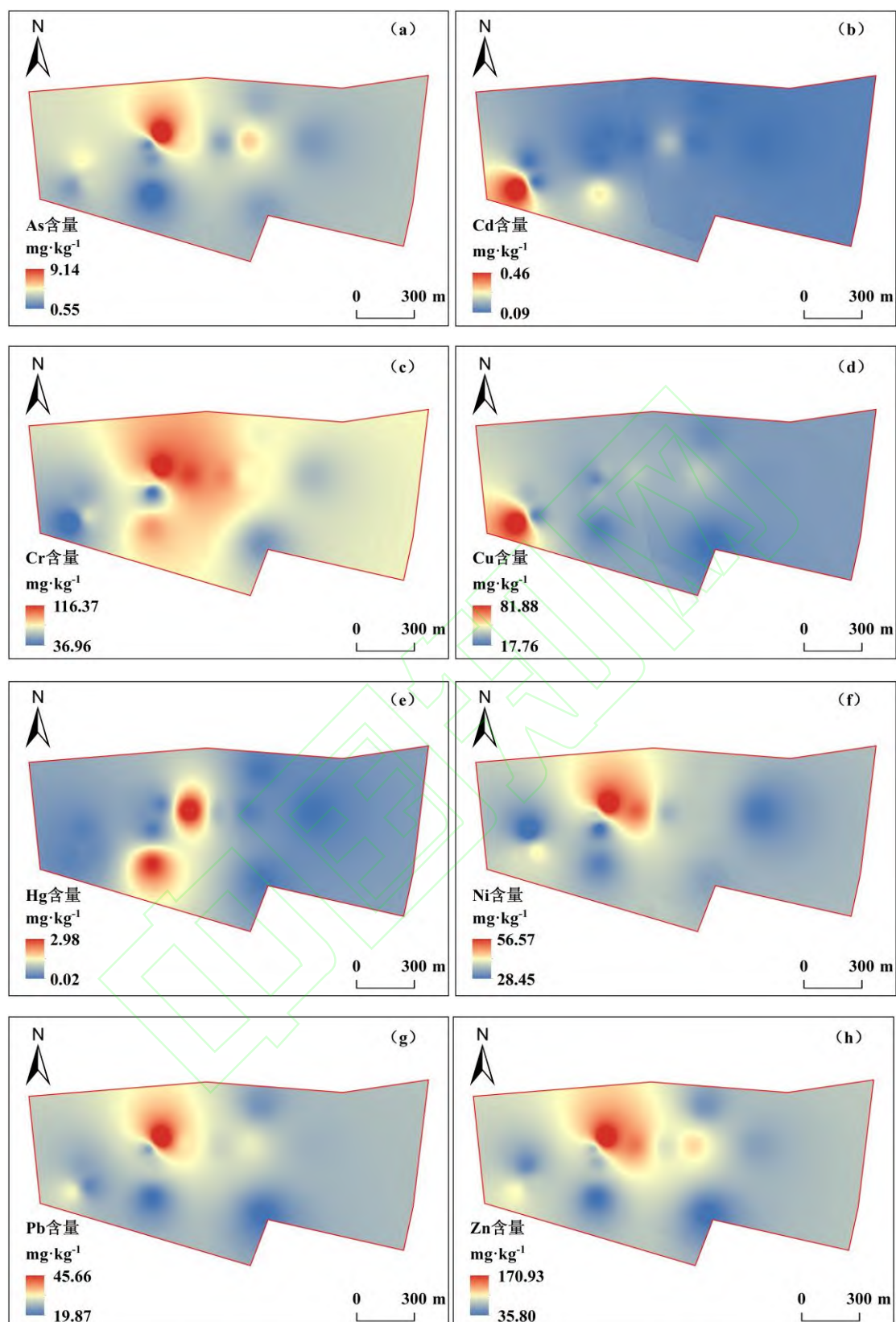


图3 焦化厂内部重金属空间分布情况

Fig.3 Distribution of heavy metals inside of the coking plant

结合 IDW 插值的焦化厂外部重金属分布情况 (图 4), 除了 As 以外, Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Zn 和 Pb 在焦化厂外部的的主要分布在焦化厂周边, 且主要分布在焦化厂东南部。该结果

与高燕等^[35]的研究结果相一致，说明焦化厂周边土壤重金属含量与污染源距离有关，距离污染源越近重金属含量越高。而 As 主要富集区域为焦化厂外部东北区域及东南区域，结合 As 超背景值率低而变异系数较大的结果，可以判断 As 受到除焦化厂以外的其他污染源影响。此外，结合图 4 及表 1 可以发现，多种重金属在焦化厂外部的含量高于内部，说明焦化厂生产过程中产生的废气会经过一定距离的迁移扩散，最终重金属沉降在焦化厂外部区域。综上，该焦化厂外部整体呈现出东部区域重金属含量高于西部区域的状况，而焦化厂所处区域盛行西北风，进一步证明外部重金属分布受生产过程中废气沉降及风向的影响较大。

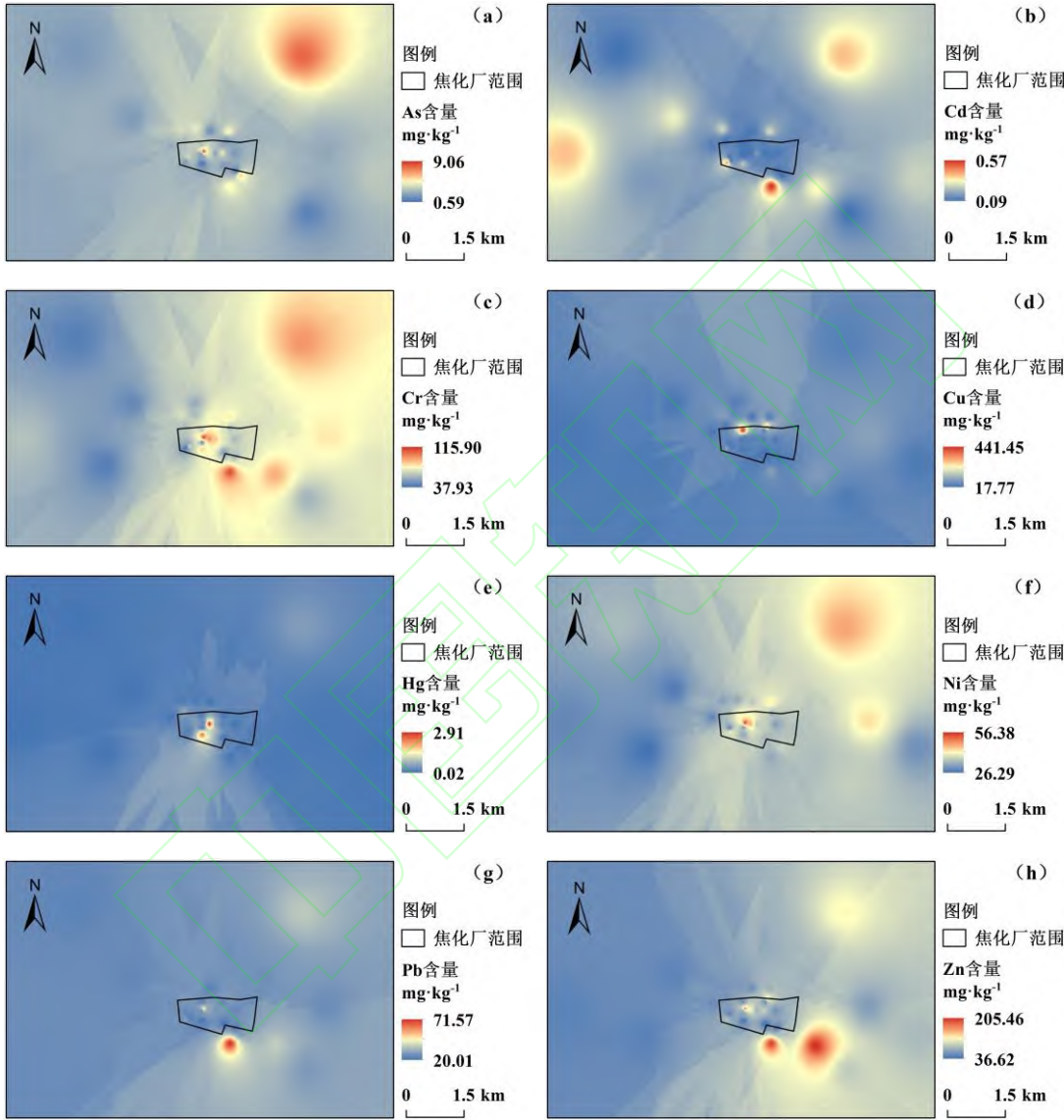


图 4 焦化厂外部重金属空间分布情况

Fig.4 Distribution of heavy metals outside of the coking plant

2.1.2 焦化厂重金属空间分布差异讨论

重金属含量在焦化厂内部（图 3）与外部（图 4）的空间分布，存在重金属 As、Cd、Cr、Pb 和 Zn 在场地外部个别点位的含量高于内部点位的情况。对于焦化厂外部重金属含量的空间分布，由于化石燃料相关企业是 As 和 Cr 排放的主要来源，由此判断东北区域可能存在相关的污染企业，导致东北部区域 As 和 Cr 含量高于焦化厂内部^[36, 37]；而 Cd 来源于农业施肥等途径，因此周边土壤中个别点位的高 Cd 含量可能来自于农业投入品^[38]；Pb 和 Zn 则可能与交通排放和烟尘沉降有关^[39]。

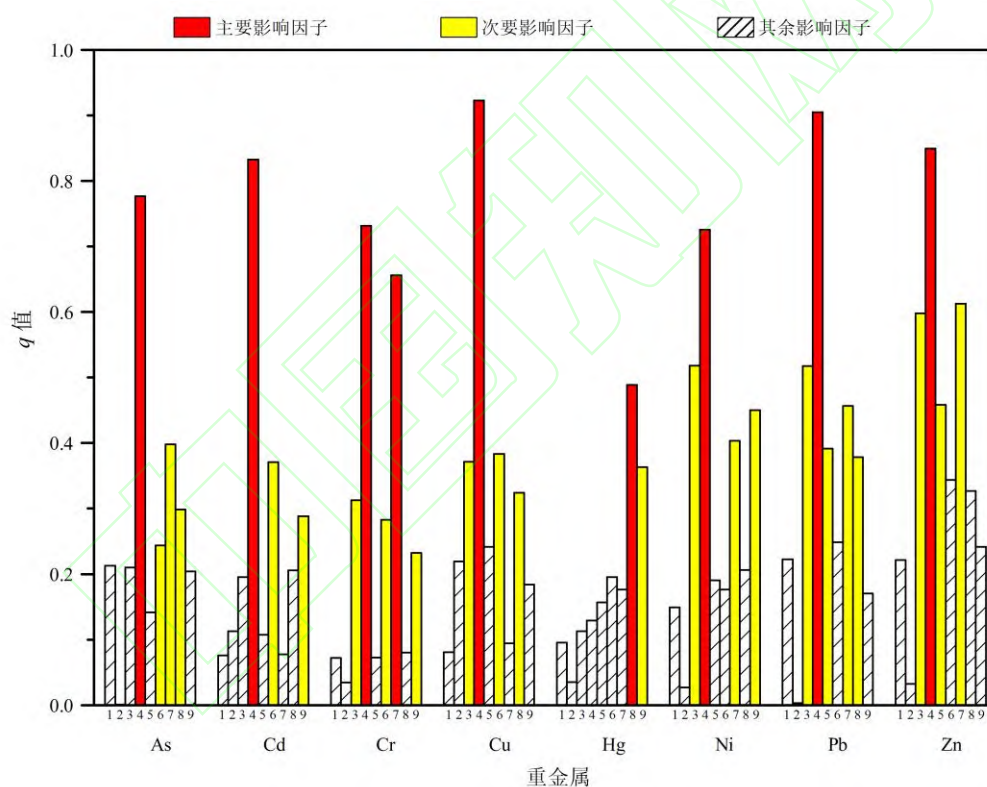
2.2 分异及因子探测器分析

由于重金属空间分布存在较大差异,为进一步判断焦化厂内外部重金属分布的主要驱动因子之间的差异,本研究利用地理探测器分析土壤理化性质因子和距污染源远近因子对该焦化厂内部及外部重金属的驱动作用。

2.2.1 土壤理化性质因子

(1) 内部重金属分布驱动因子

根据内部重金属-理化性质的分异及因子探测器的结果(图5),土壤理化性质中土壤全氮含量为该焦化厂内部除 Hg 以外的 7 种重金属分布的主要驱动因子, Hg 的影响因子主要为有效硼含量和土壤质地。此外,影响 As 空间分布的次要因子为碳酸钙、有效硅和有效硼的含量;影响 Cd 空间分布的次要因子为碳酸钙含量和土壤质地;影响 Cr 空间分布的主要因子还包括有效硅含量,次要因子为土壤有机碳、碳酸钙含量和土壤质地;影响 Cu 空间分布的次要因子为有机碳、碳酸钙和有效硼的含量;影响 Ni 空间分布的次要因子为有机碳、有效硅含量和土壤质地;影响 Pb 空间分布的次要因子为有机碳、有机质、有效硅和有效硼含量;影响 Zn 空间分布的主要因子还包括有机质和有效硅含量,次要因子为有机质、碳酸钙和有效硼含量。



1.pH; 2.EC; 3.有机碳; 4.全氮量; 5.有机质; 6.碳酸钙; 7.有效硅; 8.有效硼; 9.土壤质地

图5 焦化厂内部重金属-理化性质分异及因子探测结果

Fig.5 Results of factor detector about heavy metals and physicochemical properties inside the coking plant

(2) 外部重金属分布驱动因子

根据外部重金属-理化性质的分异及因子探测器的结果(图6),该焦化厂外部 8 种重金属分布的主要驱动因子存在一定差异。其中,有机碳含量为 As、Hg 和 Ni 空间分布的主要影响因子,有机质含量为 Pb 和 Zn 空间分布的主要影响因子,全氮含量为 Cd、Cr、Cu 空间分布的主要影响因子。此外,影响 As 空间分布的次要因子为全氮、有机质含量和土壤质地;影响 Cd 空间分布的次要因子为土壤有机碳和有机质含量;影响 Cr 空间分布的次要因子为

有机质、有机碳和有效硼含量；影响 Cu 空间分布的次要因子为土壤质地；影响 Hg 空间分布的次要因子为 pH 和有机质含量；影响 Ni 空间分布的次要因子为全氮含量和有效硼含量；影响 Pb 和 Zn 空间分布的次要因子为全氮和有效硅含量。

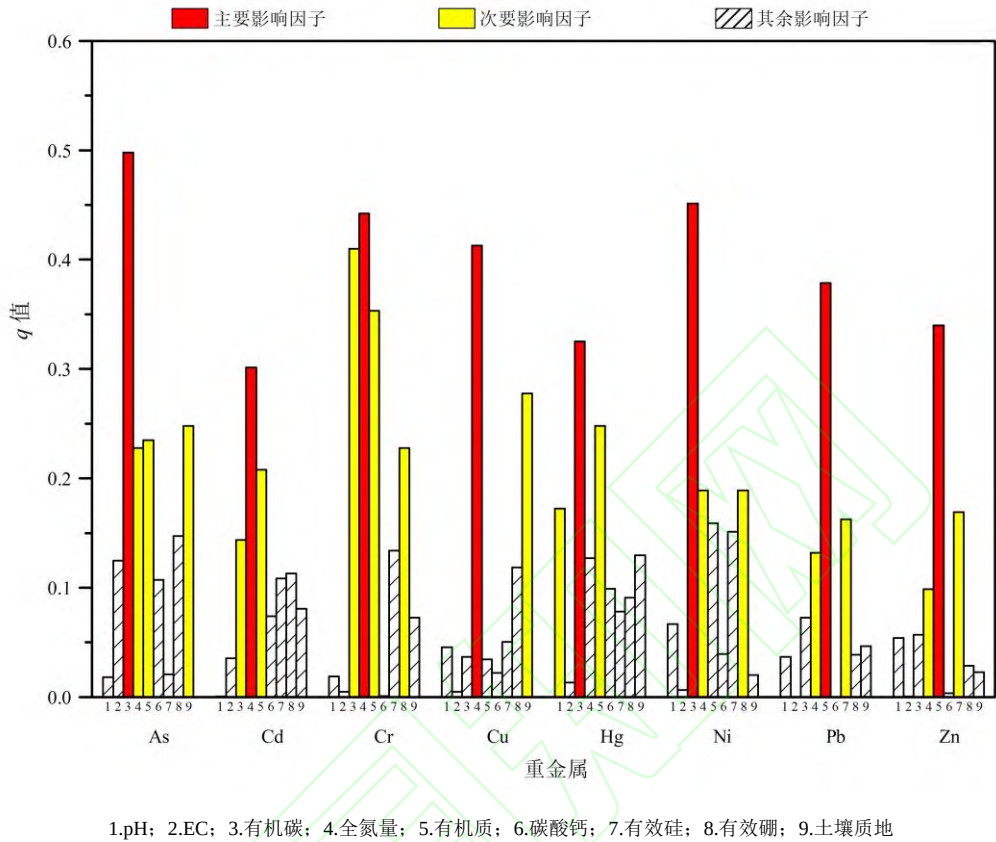


图 6 焦化厂外部重金属-理化性质分异及因子探测结果

Fig.6 Results of factor detector about heavy metals and physicochemical properties outside the coking plant

(3) 焦化厂重金属-理化性质驱动结果讨论

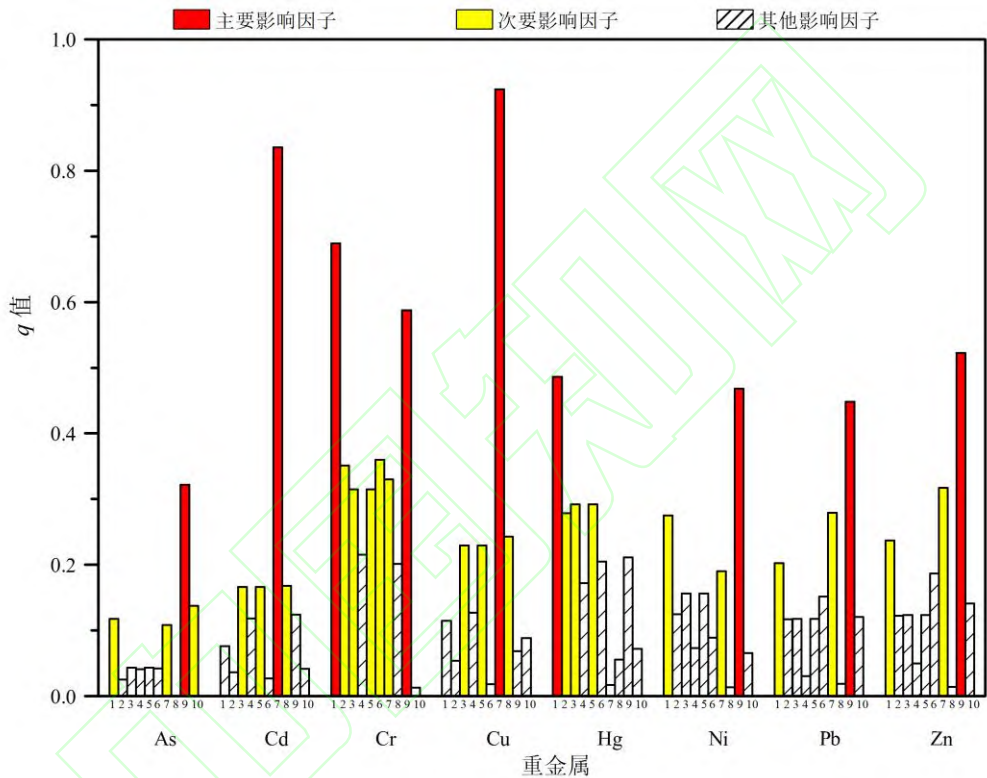
在理化性质驱动因子方面，焦化厂内部及外部的污染物空间分布受到的影响因素较为一致，且焦化厂内部及外部的重金属空间分布，受到土壤的全氮、有机物质和有效元素含量的驱动作用最为明显。赵一鸣等^[40]的研究认为土壤理化性质会对重金属的迁移性和活性等产生影响，影响重金属的迁移转化。土壤理化性质的影响实质就是改变重金属的有效态含量，有研究发现重金属有效态所占比例越多，土壤重金属越活跃，也就更有利于重金属迁移扩散^[41]。其中，土壤氮含量大部分来源于有机质，其含量与有机质含量存在明显相关关系，而土壤有机质能够络合重金属离子，降低重金属的生物有效性和移动性，导致局部土壤重金属含量的增加，因此全氮含量和有机质含量是影响重金属含量的重要指标^[42]。土壤有效元素的含量则通常会与重金属发生吸附作用或形成络合物，降低重金属的生物活性，影响重金属的空间分布^[43]。

进一步对比分析焦化厂内外部主要驱动因子，可以发现土壤全氮含量对内部重金属空间分布的驱动作用明显强于外部。焦化厂在生产过程中容易排放氨氮废水，而废水中也含有一定量的重金属污染物^[44, 45]。当焦化厂内部的废水出现泄漏或处理不当时，导致局部区域的土壤含氮量增加，重金属聚集，影响内部重金属空间分布。因此可以推测该焦化厂内部重金属空间分布受到氨氮废水的影响。综上所述，理化性质因子中的全氮、有机物质和有效元素含量是焦化厂内外部重金属分布的主要驱动因子，且全氮含量对于内部重金属分布的驱动作用更强。

2.2.2 距污染源远近因子

(1) 内部重金属分布驱动因子

根据内部重金属-距离因子的分异及因子探测器结果（图 7），可以得知焦化厂内部重金属 Cd 和 Cu 的主要驱动因素为粗苯工段，且其 q 值均超过 0.8，说明 Cd 和 Cu 空间分布基本受粗苯工段影响，结合相关研究中粗苯废水中 Cd 和 Cu 含量明显高于排放标准^[42]，可以判断该焦化厂粗苯工段周边存在污水排放现象，造成该区域对 Cd 和 Cu 分布驱动力强。焦化厂内部 As、Cr、Pb、Ni 和 Zn 的主要驱动因素为冷鼓工段；Cr 和 Hg 的主要驱动因素为焦炉。此外，Cr 相较于其他重金属受到除煤场外的各生产环节的驱动作用更为强，说明除煤场外的各生产环节均能产生 Cr 并影响其分布；As 比其他重金属受到各生产环节的驱动作用弱，说明各生产环节造成 As 排放及分布的可能性较低，也解释了区域内 As 超背景值率低的原因。



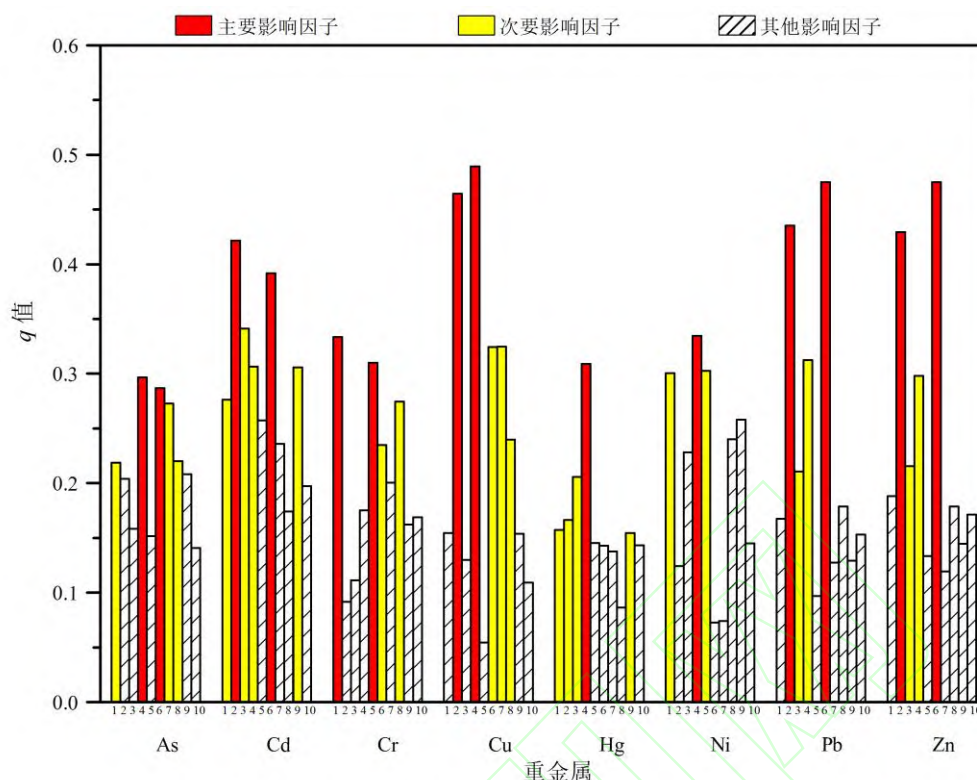
1.一号焦炉；2.二号焦炉；3.一号熄焦；4.二号熄焦；5.煤气柜；6.硫铵工段；7.粗苯工段；8.油库工段；9.冷鼓工段；10.煤场

图 7 焦化厂内部重金属-距离因子分异及因子探测结果

Fig.7 Results of factor detector about heavy metals and distance inside the coking plant

(2) 外部重金属分布驱动因子

根据外部重金属-距离因子的分异及因子探测器结果（图 8），可以得知焦化厂外部重金属 Cr 的主要驱动因素为焦炉、煤气柜、硫铵和粗苯多个工段；Cu、Hg 和 Ni 的主要驱动因素为焦炉和熄焦工艺；As、Cd、Pb 和 Zn 的主要驱动因素为焦炉和硫铵工段。



1.一号焦炉；2.二号焦炉；3.一号熄焦；4.二号熄焦；5.煤气柜；6.硫铵工段；7.粗苯工段；8.油库工段；9.冷鼓工段；10.煤场

图8 焦化厂外部重金属-距离因子分异及因子探测结果

Fig.8 Results of factor detector about heavy metals and distance outside the coking plant

(3) 焦化厂重金属-距离因子驱动结果讨论

由内部的驱动因子结果可知，煤气和焦油精制环节中的粗苯工段和冷鼓工段，对于焦化厂内部重金属空间分布的解释能力最强，即煤气焦油精制区域是焦化厂内部重金属空间分布的主要驱动因子。相关研究也表明，该区域中煤气和焦油等物料所含重金属含量高于炼焦过程排放的废气废水，更容易造成该区域内的重金属富集^[1]。而备煤环节、炼焦环节和煤气焦油精制环节等过程会产生含重金属的废气和废水等，且存在选煤废水的排放、焦油生产的泄露、焦化烟气的沉降等因素导致焦化厂内部重金属空间分布差异^[16]，因此焦化厂内部重金属空间分布除了受到粗苯和冷鼓工段的主要驱动外，也受到了焦炉、熄焦和硫铵等工段的驱动。由外部的驱动因子结果可以得知，焦炉、熄焦和煤气柜等炼焦环节，对于焦化厂外部重金属空间分布的解释能力最强。有研究表明，炼焦环节会产生大量含有重金属的烟尘，且烟尘会随着大气沉降造成焦化厂周边土壤的重金属污染^[46-48]，是影响周边土壤重金属分布的主要因素。

在距污染源远近驱动因子方面，焦化厂内部及外部的污染物空间分布受到的主要驱动因子存在一定差异，焦化厂内部重金属空间分布的主要驱动因子为粗苯工段和冷鼓工段，焦化厂外部重金属空间分布的主要驱动因子为焦炉、熄焦和煤气柜等炼焦环节。受焦化工艺影响，焦化废水主要包括粗苯工段的粗苯分离液、冷鼓阶段的焦油分离液和蒸氨废水、硫铵工段的脱硫废液等^[47]。焦化废气则来自于焦炉煤气柜等在炼焦燃烧过程中排放的粉尘气体，且气体中包含炼焦过程产生的重金属污染物^[48]。结合各主要驱动因子以及理化性质因子中土壤全氮含量在焦化厂重金属空间分布起主要驱动作用的推测，可以判断焦化厂内部的重金属富集主要受到焦化产品制作处理及输送时发生产品泄露和废水处理不完全等的影响，而外部重金属分布受到炼焦制气过程中排放废气的大气沉降影响。此外，污染源排放污染物的差异也造成了内外部重金属空间分布驱动因子存在差异的现象。

2.2.3 最强影响因子对比

对焦化厂内外部重金属分布的最大影响因子进行对比分析（表 2），可以得知：第一，在整体最强驱动因子方面，场地内部驱动因子的 q 值普遍高于场地外部驱动因子的 q 值，说明焦化厂内部重金属的空间分布受焦化厂的影响程度更大。第二，对于单个重金属元素，As 内外部空间分布的最大影响因子为理化性质因子，结合其超背景值率较低的结果，可以判断该焦化厂 As 排放较少，其空间分布主要受土壤理化性质影响。第三，重金属 Cd 和 Cu 在内部分布受粗苯工段的影响较大，在外部分布受焦炉和熄焦的影响较大，说明其内部分布主要受粗苯生产过程重金属泄露而富集，而外部分布受焦炉熄焦过程中产生的烟气沉降而富集。第四，重金属 Cr 在内部分布受焦炉影响较大，在外部分布受土壤全氮含量影响较大，是因为 Cr 属于难挥发元素，主要富集在焦炉生产的气化灰中^[49]，因此在内部的空间分布受焦炉生产影响，在外部的空间分布则受土壤理化性质影响导致富集状况不同。第五，重金属 Pb、Hg、Ni 和 Zn 在内部分布受理化性质影响较大，在外部分布受生产工艺影响较大。说明内部生产生成的 Pb、Hg、Ni 和 Zn 来源较为单一，其在土壤中的分布受到土壤理化性质影响，而外部重金属的分布则受焦炉和硫铵工段的排放废气沉降所决定。

表 2 焦化场地内外最强因子数据对比

Table 2 Comparison of the strongest factor inside and outside the coking plant

重金属	场地内部		场地外部	
	最强驱动因子	q 值	最强驱动因子	q 值
As	全氮含量	0.776	有机碳含量	0.498
Cd	粗苯	0.835	焦炉	0.422
Cr	焦炉	0.689	全氮含量	0.442
Cu	粗苯	0.923	熄焦	0.489
Hg	有效硼	0.488	熄焦	0.309
Ni	全氮含量	0.725	熄焦	0.335
Pb	全氮含量	0.905	焦炉	0.435
Zn	全氮含量	0.849	硫铵	0.475

2.3 交互作用探测器分析

根据对驱动因子进行交互后的交互探测结果，选择其中对焦化厂内部及外部重金属空间分布影响最高的 q 统计值，获得表 3 结果。对交互结果分析表明，焦化厂内部重金属空间分布交互驱动因子 q 值略高于外部交互驱动因子 q 值，说明焦化厂内部重金属的空间分布受到驱动因子的交互影响力更大，外部重金属的空间分布可能受到其余污染源的影响。

根据表 3 焦化厂内部的结果可知，除了 Hg、Ni 和 Zn 以外，其余重金属最强交互因子对均为污染源因子和土壤理化性质因子的交互，说明焦化厂内部工艺对于 Hg、Ni 和 Zn 的分布驱动作用较差，土壤理化性质起主要驱动作用。对于重金属 As、Cu 和 Pb，其受到最强交互因子对为油库工段和土壤有机碳含量，说明其在焦化厂内部的分布主要受到油库产品装配外溢及有机碳的络合作用驱动。对于重金属 Cd 和 Cr，其受到最强交互因子对为焦炉和有效硼，说明其在焦化厂内部的分布主要受到焦炉装煤过程灰尘沉降及有效硼的吸附作用的驱动。

根据表 3 焦化厂外部的结果可知，重金属最强交互因子对均为污染源因子和土壤理化性质因子的交互，但与内部因子对存在差异。焦化厂外部重金属 As 受到最强交互因子对为焦炉和有效硼，Cd 受到最强交互因子对为熄焦和全氮量，Cr 受到最强交互因子对为焦炉和全氮量，说明 As、Cd 和 Cr 在焦化厂外部的空间分布主要受到了焦炉和熄焦废气的沉降驱动以及土壤养分含量对重金属有效性影响的驱动。重金属 Pb 受到最强交互因子对为煤场和有机质，Zn 受到最强交互因子对为粗苯和有机质，说明 Pb 和 Zn 在焦化厂外部的空间分布除

了受到有机质对其有效性的驱动外，还分别受到煤场淋洗过程中的 Pb 排放及粗苯精制过程中的 Zn 排放的驱动影响。重金属 Cu、Hg 和 Ni 受到最强交互因子对为焦化工艺和土壤质地，说明其在焦化厂外部的空间分布主要受到了焦化工艺中煤气柜、熄焦和油库生产过程中排放烟尘沉降的影响，同时其迁移受土壤质地的驱动作用更强。

表 3 重金属的最强交互作用影响力

Table 3 Strongest interaction factor of heavy metals

污染物	焦化厂内部		焦化厂外部	
	交互因子对	交互影响力	交互因子对	交互影响力
As	油 库 ∩ 有 机 碳	0.953	焦 炉 ∩ 有 效 硼	0.813
Cd	焦 炉 ∩ 有 效 硼	0.978	熄 焦 ∩ 全 氮 量	0.872
Cr	焦 炉 ∩ 有 效 硼	0.973	焦 炉 ∩ 全 氮 量	0.903
Cu	油 库 ∩ 有 机 碳	0.996	煤气柜 ∩ 土壤质地	0.998
Hg	有效硼 ∩ 土壤质地	0.987	熄 焦 ∩ 土壤质地	0.974
Ni	全 氮 ∩ 土壤质地	0.982	油 库 ∩ 土壤质地	0.904
Pb	油 库 ∩ 有 机 碳	0.989	煤 场 ∩ 有 机 质	0.989
Zn	碳酸钙 ∩ 土壤质地	0.985	粗 苯 ∩ 有 机 质	0.995

2.4 在产焦化场地及周边土壤防控建议

根据以上对地理探测器结果的分析讨论，在产焦化场地内外部驱动因子存在一定的差异，因此针对焦化场地内部的污染防控，应当着重对焦化场地内部的粗苯工段、冷鼓工段煤气和焦油精制环节进行污染废水排放的把控；针对焦化场地周边土壤的污染防控，应当着重对焦炉、熄焦和煤气柜等炼焦制气环节进行废气排放把控和废气治理。此外，也可通过添加土壤改良剂以改变土壤理化性质，进而降低土壤中重金属的有效性，抑制重金属的迁移。

3 结论

- （1）根据内部驱动因子结果，焦化厂内部重金属空间分布主要受焦化产品精制工艺的驱动影响，且受到精制工艺和土壤质地等理化性质的交互驱动力最强。
- （2）根据外部驱动因子结果，焦化厂外部重金属空间分布主要受焦化排放废气等炼焦制气工艺的驱动影响，且受到炼焦制气工艺和土壤质地等理化性质的交互驱动力最强。
- （3）驱动结果中焦化厂内部驱动因子 q 值高于外部驱动因子 q 值，揭示了焦化厂对内外部土壤重金属分布影响的差异及主要驱动力的差异，对于土壤污染的准确预测和针对性管控具有指导意义。

参考文献:

- [1] 卜凡迅, 王云平. 焦化厂土壤重金属污染影响因素研究进展[J]. 山西农业科学, 2019, **47**(4): 695-700.
Bu F X, Wang Y P. Research progress on influencing factors of heavy metal pollution in soil of coking plant[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, **47**(4): 695-700.
- [2] Mastral A M, Callen M S. A review on polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emission from energy generation[J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(15): 3051-3057.
- [3] 何博, 赵慧, 王铁宇, 等. 典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2869-2876.
He B, Zhao H, Wang T Y, *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2869-2876.
- [4] Sato H, Aoki Y. Mutagenesis by environmental pollutants and bio-monitoring of environmental mutagens[J]. Current drug metabolism, 2002, **3**(3): 311-319.
- [5] 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 等. 宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1887-1894.
Fan X G, Mi W B, Ma Z N, *et al.* Spatial and temporal characteristics of heavy metal concentration of surface soil in Hebin industrial park in Shizuishan northwest China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(5): 1887-1894.
- [6] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知(国发〔2016〕31号)[EB/OL].
http://www.gov.cn/jzhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm, 2016-05-31.
- [7] 张红振, 董璟琦, 吴舜泽, 等. 某焦化厂污染场地环境损害评估案例研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3159-3165.
Zhang H Z, Dong J Q, Wu S Z, *et al.* Environmental damage assessment case study of a coking plant contaminated site[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 3159-3165.
- [8] 蒋慕贤, 葛宇翔, 郭赞. 焦化场地典型污染物分布特征研究进展[J]. 环境与发展, 2016, **28**(6): 50-54.
Jiang M X, Ge Y X, Guo Y. Advances in research of distribution characteristics of typical contaminants at coking plant site[J]. Environment and Development, 2016, **28**(6): 50-54.
- [9] 谢云峰, 曹云者, 杜晓明, 等. 土壤污染调查加密布点优化方法构建及验证[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 981-989.
Xie Y F, Cao Y Z, Du X M, *et al.* Development and validation of a sampling design optimization procedure for detailed soil pollution investigation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 981-989.
- [10] 吴鹏, 马露瑶, 余海波, 等. 污染物空间变异对场地调查影响的初步探讨[J]. 环境与发展, 2019, **31**(10): 119-120, 122.
Wu P, Ma L Y, Yu H B, *et al.* Preliminary discussion on the influence of spatial variation of contaminants on site survey and evaluation[J]. Environment and Development, 2019, **31**(10): 119-120, 122.
- [11] 郝丽虹, 张世晨, 武志花, 等. 低山丘陵区焦化厂土壤中 PAHs 空间分布特征[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2625-2631.
Hao L H, Zhang S C, Wu Z H, *et al.* Spatial distribution characteristics of PAHs in soil at hilly areal coking plant[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2625-2631.
- [12] 刘庚, 郭观林, 南锋, 等. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4256-4262.
Liu G, Guo G L, Nan F, *et al.* Heterogeneous characteristic of PAHs' spatial distribution in a large coking site of China[J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4256-4262.
- [13] 刘庚, 毕如田, 张朝, 等. 某焦化场地苯并(a)芘污染空间分布范围预测的不确定性分析[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 587-593.
Liu G, Bi R T, Zhang C, *et al.* Uncertainty analysis on spatial distribution prediction of BaP in a coking plant site[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 587-593.
- [14] 张荣海, 李海明, 张红兵, 等. 某焦化厂土壤重金属污染特征与风险评价[J]. 水文地质工程地质, 2015, **42**(5): 149-154.
Zhang R H, Li H M, Zhang H B, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil of a coking plant[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, **42**(5): 149-154.
- [15] Zhang G, Guo X, Zhu Y, *et al.* Effect of biochar on the presence of nutrients and ryegrass growth in the soil from an abandoned

- indigenous coking site: The potential role of biochar in the revegetation of contaminated site[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601**: 469-477.
- [16] 楼春, 钟茜. 焦化厂场地土壤污染分布特征分析[J]. *中国资源综合利用*, 2019, **37**(4): 177-179.
Lou C, Zhong X. Analysis on distribution characteristics of soil pollution in coking plant site[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2019, **37**(4): 177-179.
- [17] 陈运帷, 王文杰, 师华定, 等. 区域土壤重金属空间分布驱动因子影响力比较案例分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(7): 1213-1223.
Chen Y W, Wang W J, Shi H D, *et al.* Comparative case study on the influence of spatial distribution of heavy metals in regional area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(7): 1213-1223.
- [18] 刘大锰, 王玮, 李运勇. 首钢焦化厂环境中多环芳烃分布赋存特征研究[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(4): 746-749.
Liu D M, Wang W, Li Y Y. Distribution and occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons from the Shougang coking plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, **24**(4): 746-749.
- [19] Liu G, Zheng M, Ba T, *et al.* A preliminary investigation on emission of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/dibenzofurans and dioxin-like polychlorinated biphenyls from coke plants in China[J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(5):692-695.
- [20] 邹学军. 焦炉大气污染物排放及清洁生产研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2007.13-14.
Zou X J. Research about the atmosphere discharge of contamination from coke oven and cleaner productions[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2007.13-14.
- [21] Ghose M K. Complete physico-chemical treatment for coke plant effluents[J]. *Water Research*, 2002, **36**(5): 1127-1134.
- [22] 郭世辉, 王作芬, 滕波臣, 等. 污染场地土壤初步调查布点及采样方法探讨[J]. *中国资源综合利用*, 2018, **36**(11): 145-147.
Guo S H, Wang Z F, Teng B C, *et al.* Discussion on preliminary investigation of sampling sites and sampling methods for contaminated sites[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, **36**(11): 145-147.
- [23] Cao F, Ge Y, Wang J F. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment[J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2013, **50**(1): 78-92.
- [24] Chen M, Wang P F, Chen Q, *et al.* A clustering algorithm for sample data based on environmental pollution Characteristics[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **107**: 194-203.
- [25] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 PM_{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient PM_{2.5} in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [26] 王劲峰, 廖一兰, 刘鑫. 空间数据分析教程[M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2019. 66-68.
- [27] 贾悦, 崔宁博, 魏新平, 等. 基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. *农业工程学报*, 2016, **32**(6): 130-138.
Jia Y, Cui N B, Wei X P, *et al.* Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze River Basin based on inverse distance weighted method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(6): 130-138.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [29] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [30] Qiao P, Yang S, Lei M, *et al.* Quantitative analysis of the factors influencing spatial distribution of soil heavy metals based on geographical detector[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 392-413.
- [31] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 692-703.
Zhang X M, Zhang X Y, Zhong T Y, *et al.* Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 692-703.

- [32] 茹淑华, 张国印, 孙世友, 等. 河北省土壤重金属污染源及研究现状[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(28): 3763-3764, 3784.
Ru S H, Zhang G Y, Sun S Y, *et al.* Source and research status of heavy metal pollutions of soils in Hebei province[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(28): 3763-3764, 3784.
- [33] Emily A W, Eric M L, Patrick J P, *et al.* Fine particle emission profile for a large coke production facility based on highly time-resolved fence line measurements[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(36): 6719-6733.
- [34] Mu L, Peng L, Liu X, *et al.* Emission characteristics of heavy metals and their behavior during coking processes[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(11): 6425.
- [35] 高燕, 董苗, 张永清. 吕梁市某焦化厂及周边土壤重金属污染状况与评价[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 318-324.
Gao Y, Dong M, Zhang Y Q. Pollution status and assessment on soil heavy metals of coking plant site and the surrounding farm land in LvLiang[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2015, 35(3): 318-324.
- [36] Lv J S, Liu Y, Zhang Z L, *et al.* Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 261:387-397.
- [37] 车丽娜, 刘硕, 韩金凤, 等. 哈尔滨市融雪径流中重金属污染空间分布及源解析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(5): 1572-1580.
Che L N, Liu S, Han J F, *et al.* Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in the snowmelt runoff in Harbin. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(5): 1572-1580.
- [38] Chen T, Liu X M, Zhu M Z, *et al.* Identification of trace element sources and associated risk assessment in vegetable soils of the urban-rural transitional area of Hangzhou, China. Environmental Pollution, 2008, 151(1): 67-78.
- [39] Fei X F, Xiao R, Christakos G, *et al.* Comprehensive assessment and source apportionment of heavy metals in Shanghai agricultural soils with different fertility levels[J]. Ecological Indicators, 2019, 106, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105508.
- [40] 赵一鸣, 董颖博, 林海, 等. 土壤理化性质对重金属形态的影响[J]. 农业工程, 2018, 8(12): 38-43.
Zhao Y M, Dong Y B, Lin H, *et al.* Influence of Soil Physical and Chemical Properties on Forms of Heavy Metals[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(12): 38-43.
- [41] O'Dell R, Silk W, Green P, *et al.* Compost amendment of Cu-Zn minespoil reduces toxic bioavailable heavy metal concentrations and promotes establishment and biomass production of *Bromus carinatus* (Hook and Arn.)[J]. Environmental Pollution, 2007, 148(1): 115-124.
- [42] 李刚, 卢楠, 魏祥. 矿区污染土壤重金属含量与土壤主要养分相关性研究[J]. 土地开发工程研究, 2019, 4(3): 33-38.
Li G, Lu N, Wei Y. Relationship between heavy metal content in polluted soil and main nutrients in mining areas[J]. Land Development and Engineering Research, 2019, 4(3): 33-38.
- [43] 李朱俊, 吴永津, 金强, 等. 钢渣应用于酸性轻中度重金属污染土壤治理研究进展[J]. 矿产综合利用, 2014, (5): 5-10.
Zhu L J, Wu Y J, Jin Q, *et al.* Advancement in research on application of steel slag in treatment of mild to moderate heavy metal contaminated acidic soil[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014, (5): 5-10.
- [44] 曾青云, 薛丽燕, 曾繁钢, 等. 氨氮废水处理技术的研究现状[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(4): 83-88.
Zeng Q Y, Xue L Y, Zeng F G, *et al.* Research progress of treatment technology for ammonia nitrogen wastewater[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2018, 9(4): 83-88.
- [45] 张万辉, 韦朝海. 焦化废水的污染物特征及处理技术的分析[J]. 化工环保, 2015, 35(3): 272-278.
Zhang W H, Wei C H. Analysis of pollutant characteristics and treatment technologies of coking wastewater[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(3): 272-278.
- [46] 范振华, 李绍京, 寇竹娟. 煤焦化过程中污染物的产生与控制[J]. 煤炭转化, 1997, 20(4): 34-40.
Fan Z H, Li S J, Kou Z J. Producing and controlling of the pollutant in the coal's coking process[J]. Coal Conversion, 1997, 20(4): 34-40.
- [47] 郭江波, 张永波, 常丽芳. 焦化厂对土壤和地下水污染特征及修复技术研究进展[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 230-232.
Guo J B, Zhang Y B, Chang L F. Research progress on soil and groundwater pollution characteristics and repair technology in coking plant[J]. Coal Technology, 2018, 37(9): 230-232.

- [48] 毛晓红. 水系沉积物和焦化区土壤中汞的形态分析及分布规律研究[D]. 太原: 山西大学, 2008, 45-46.
- Mao X H. Studies on the speciation and distribution of trace mercury in the sediment and soil[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2008, 45-46.
- [49] 王云鹤, 李海滨, 黄海涛, 等. 重金属在煤气化过程的分布迁移规律及控制[J]. 中国环境科学, 2002, 22(6): 77-81.
- Wang Y H, Li H B, Huang H T, *et al.* Distribution rule and control of heavy metals during coal gasification[J]. China Environmental Science, 2002, 22(6): 77-81.

