

中国有色金属采选企业用地时空格局 演化及其驱动力

魏长河^{1,2}, 雷梅^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有色金属采选作为中国制造业支柱产业之一, 在支撑国民经济发展的同时也是重金属污染防控的重点, 掌握其企业用地空间格局及驱动力对推进产业布局优化及环境污染统筹治理意义重大, 但当前对全国尺度有色采选企业用地格局演化研究仍较为欠缺, 难以满足国土空间优化及产业污染防控实际需要。本文基于地理大数据、网络地图POI和环境专题数据等多源信息融合, 获取高分辨率企业用地数据, 借助GIS分析方法研究了中国有色采选企业用地时空格局与演变特征, 并采用空间回归模型探讨了其驱动因素。结果显示, 中国有色采选场地增长总体经历了早期平稳缓慢发展(20世纪初—1978年)、改革开放后逐渐增长至达峰(1979—2006年)、随后趋稳(2007—2019年)的发展趋势; 空间上, 由湘东南、滇东向资源和能源丰富的中西部地区不断扩展, 并呈现出显著的聚集, 聚焦特征逐渐增强, 最终形成了以滇东、湘赣粤结合区、皖南、豫西为核心热区, 西北、东北等局部为副核心热区的“四核多副”聚集模式。上述时空演变特征受到资源禀赋、路径依赖及前期鼓励性产业政策的正向推动, 但2010年后密集推出的限制性产业及环保政策对有色采选企业用地的扩展具有明显的抑制作用。本文可为相关产业优化宏观战略决策及环境空间治理提供科学依据。同时, 本文提出的应用多源地理大数据技术构建全国尺度高精度企业用地信息数据集的方法体系, 也可为大区域尺度的相关评估工作提供方法参考。

关键词: 有色采选; 企业用地; 地理大数据; 时空格局; 驱动机制

DOI: 10.11821/dlxb202305013

1 引言

有色金属采选行业是指进行常用有色金属矿、贵金属矿, 以及稀有稀土金属矿的开采、选矿活动的工业类型^[1]。作为有色金属工业的前缘和上游, 有色金属采选行业是冶金和制造业的基础产业之一, 对国民经济发展和实现制造强国具有关键支撑作用^[2]。1978年改革开放以来, 中国有色金属采选工业发展迅速, 截止到2017年中国有色金属精矿产量达到748.14万t, 在顶峰时期的2013年产量一度达到1032万t^[3], 为中国经济社会发展和国防科技工业建设发挥了重要的作用。同时, 由于不合理的过度开采, 加之生产工艺和管理水平低下, 造成资源枯竭、土壤侵蚀和诸多环境污染及公众健康风险问题^[4-7], 严重影响到环境可持续发展。科学、合理加强有色金属采选行业管控, 在发展中实现生态环境保护已势在必行。而中国共产党“十八大”以来颁布的多项产业调整和污染防治政

收稿日期: 2022-12-19; 修订日期: 2023-03-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1800100); 国家自然科学基金项目(42277475) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2018YFC1800100; National Natural Science Foundation of China, No.42277475]

作者简介: 魏长河(1988-), 男, 河南驻马店人, 讲师, 主要从事环境数据挖掘。E-mail: weichanghe@hebeu.edu.cn

通讯作者: 雷梅(1973-), 女, 浙江丽水人, 研究员, 主要从事土壤环境保护和环境数据挖掘。E-mail: leim@igsnnr.ac.cn
1271-1289 页

策^[8-11],对有色金属产业发展提出了如“推进矿业结构优化升级”“优化空间布局”“严控工矿污染”和“开展污染治理与修复,改善区域土壤环境质量”等目标,而准确把握有色金属企业用地空间分布格局并探索其影响因素,是优化中国有色采选产业规划与空间布局的基本前提,并对现阶段开展土壤、水、大气环境的空间综合治理和国家生态环境建设的宏观战略决策具有重要意义^[12-13]。

但目前,包括有色金属采选用地在内的涉污企业用地和加工场地识别研究虽然已部分开始向区域尺度过渡^[2,14],但仍以中小尺度及其周边环境为研究区域,涉及有色金属企业用地的研究多是对单个或几个场地周边受体(如土壤、地下水、地表水、大气等)的污染评价以及影响研究,在国家尺度或长时间跨度上对工矿企业用地的空间分布格局演变及其成因分析的研究鲜见报道^[15-18],这在一定程度上影响了国家生态环境建设的宏观决策以及对土壤、水和大气环境空间治理的有效开展。另一方面,随着大数据的蓬勃发展,针对工业场地及企业用地的识别也引入了新的技术手段和方法,应用互联网和大数据手段的大范围精准监测正成为当前的研究热点^[19-20]。例如,Zhang等^[21]基于中国土地利用数据集探明了1990—2015年农村工业用地格局。王紫薇等^[14]利用互联网大数据技术,探究了江苏省1990—2020年化工类企业的时空分布特征并模拟了化工企业的潜在影响区。刘振坤等^[18]基于互联网共享数据平台收集的全国焦化场地信息研究了2000—2020年中国焦化场地时空格局演变及其驱动因素。日益增多的研究表明互联网大数据所蕴含的海量企业用地信息可望为涉污工矿企业用地时空格局演化提供良好的数据分析潜力。

随着数据的丰富,核密度分析可以对空间点要素或线要素的分布密度进行连续模拟,从而作为更精确的分析工具,可对空间特征分布做更深层次的特征规律挖掘^[22-24]。标准差椭圆空间统计方法可以从多个角度揭示地理要素空间分布整体特征及时空演化过程^[25],其基于研究对象的空间区位和空间结构,从全局性空间的角度定量解释地理要素空间分布的中心性、展布性、方向性、空间形态等特征^[26]。如果应用相关研究方法分析有色金属采选企业用地的时空格局,将能够更加明确中国有色金属采选行业的发展特征。

关于格局的驱动因子,当前的经济地理学理论认为地形起伏条件直接会影响企业用地的生产运营,资源密集型产业的地理分布更多依赖于资源禀赋、交通成本与市场规模的相互作用^[27-28],同时区位的历史产业基础^[29]和政策 and 制度因素对产业格局的控制也不可忽略^[30]。但对于有色金属矿企业用地时空格局的演化驱动力,尚未开展过全国尺度的相关分析研究。

因此,本文基于多源地理大数据、网络地图POI和环境专题数据等信息,采用探索性空间数据分析(ESDA)进行全国有色采选企业用地历史分布格局及其演变趋势分析,并借助宏观经济地理学相关理论,运用空间回归模型(SRM)及考虑空间变异性的地理加权回归模型(GWR)对不同时期有色金属采选企业用地空间格局演变的影响因子变化及其驱动机制加以分析,以期为中国现阶段环境空间治理、国家生态环境建设的宏观战略决策以及有色金属产业行业结构优化和宏观调控提供依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 有色采选企业用地信息数据收集与整合 本文基于多数据来源及多信息种类的网络地理大数据手段,通过数据的挖掘、清洗与整合获取有色金属采选企业用地数据集。主要步骤如图1所示。

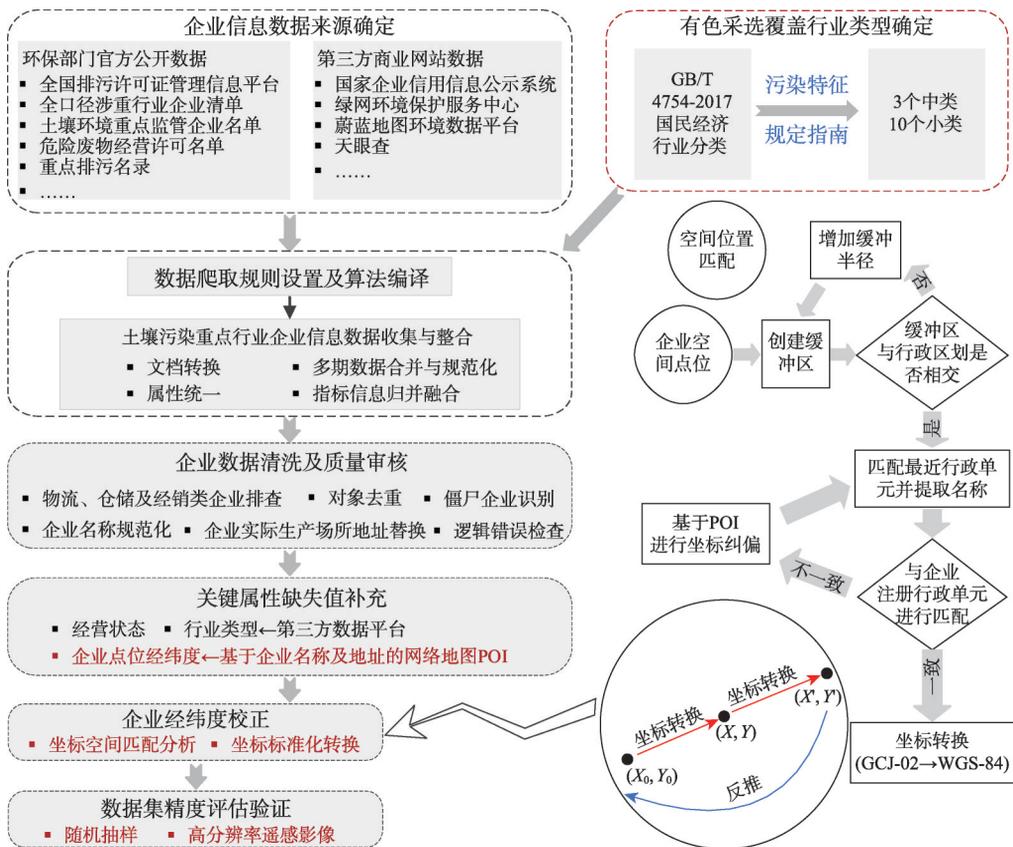


图1 有色金属采选企业用地信息数据收集整合技术流程

Fig. 1 Technical flowchart for data collection and integration of non-ferrous mining enterprise sites in China

(1) 企业用地信息数据来源确定。本文涉及的企业用地信息数据来源由部门权威公开数据和网络大数据两部分构成，前者主要包括全国排污许可证管理信息平台 (<http://permit.mee.gov.cn/permitExt/defaults/default-index!getInformation.action>)，各省市发布的全口径涉重金属重点行业企业清单、重点排污名录、土壤环境重点监管企业名单、危险废物经营许可证名单等，由于信息真实性有所保障，并含有多个关键属性（如企业名称、行业类型、地址、坐标等），其构成了本文企业用地信息数据的主体，后者包括国家企业信用信息公示系统 (<http://gsxt.gdgs.gov.cn/>)、绿网环境保护服务中心 (<http://v2.lvwang.org.cn/search>)、蔚蓝地图环境数据平台 (<http://www.ipe.org.cn/index.html>)、天眼查 (<https://www.tianyancha.com/>) 等第三方商业网站，作为对上述主体数据的补充。由此首先在数据来源上保证信息真实性和可靠性。

(2) 企业用地信息数据收集及清洗。基于选定数据源设置网络数据爬取规则，进行企业用地清单收集，对收集数据通过文档转换和属性标准化过程统一数据类型和字段；之后进行多期数据合并与规范化，并归并融合不同来源数据集属性字段。为确保数据集成质量，在属性信息归并和融合过程中应遵循以下原则：当多数据来源属性一致或仅有单一数据来源时，直接进行归并；多数据来源且属性内容不一致的，优先以较为权威的官方公开数据尤其是全国排污许可信息平台记录为准，官方公开数据中该属性缺失的，以其他来源数据中能够互为验证者为准；对无数据来源的属性字段则在后续数据清洗流程中结合更多网络来源（如第三方网站数据中心或平台等）进行补充^[9]。以上所有数据

的收集均利用 Pycharm 平台通过 Python 网络数据爬取算法实现,数据集整合利用 Microsoft excel 完成。由于数据来源繁杂多样,数据质量参差不齐,整合完成后的企业用地初始数据集还需要作进一步的清洗和质量审核。具体包括重复企业去除、逻辑错误检查、僵尸企业(未发生实际生产活动)排查、非生产型(如物流、仓储和经销)企业用地的排除。同时由于部分企业登记注册地址实际为办公地(如集团公司总部),还需要对数据集进行生产经营场所地址的批量替换,以保证企业与其实际生产场所在空间上的准确对应。同时对于同一个企业多个采选用地,按照多个地块进行统计,而相距较近的小面积破碎地块则按照一个地块进行统计。

(3) 关键属性缺失值补充。对于信息融合后部分关键属性如经营状态和成立时间仍然缺失的,本文结合第三方网站如天眼查数据进行补充^[19],而对于最为关键的经纬度信息仍然缺失的企业用地则根据企业名称及注册地址、结合网络地图 POI 进行批量获取^[20]。作为互联网电子地图服务和国家基础测绘成果的产物,POI 数据以其在数据量、覆盖面、准确性、更新频率等方面的巨大优势在基于空间位置进行的大数据挖掘领域已经得到广泛应用^[22],本文采用高德开放平台(<https://lbs.amap.com/api/webservice/guide/api/search/>)作为 POI 数据来源^[19]。

(4) 企业用地经纬度校正。作为本文重要参数,企业经纬度缺失值补充完成后,还需要进一步通过空间匹配对其进行精度校正,以防止企业重名、地址登记错误,或企业用地变更造成的经纬度信息错误^[20]。具体步骤详见图 1 相关模块。此外由于基于 POI 获取的经纬度多采用 GCJ-02 国家大地坐标系,在完成经纬度空间匹配后还有必要对其进行坐标转换(图 1)^[20]。最终本文共计收录了有色金属采选企业用地 10827 块,包括企业用地位置、所属企业名称、具体行业小类、成立时间与经营状态等信息,最早的记录为上世纪初,截止时间为 2019 年。从行业小类来看,在重复统计多金属矿采选企业情况下,数据集中以铅锌矿采选企业用地数量最多,累积达到 4250 家,其次为铜矿采选(3850 家)、锡锑矿采选(1396 家)以及稀土矿采选(1066 家,其中钨钼矿采选 906 家),此外金银矿采选企业收录 983 家、镍钴矿采选 250 家,其他有色金属矿采选 771 家。

(5) 企业用地数据集精度评估。对构建完成的数据集采用随机抽样方法,应用高分辨率遥感影像,通过专家人工判读对数据集中收录的企业用地信息数据开展精度验证。随机选取数据总量 10% 左右的采样点进行精度检验,数据产品的总体准确性达到 93.21%,证明本文构建的数据集可靠、数据质量合格。

2.1.2 企业用地格局影响因子的选取及处理

(1) 影响因子的选取及数据来源。为探究影响中国不同时期有色金属采选企业用地格局的影响因子,基于数据可得性及以往有关研究,本文选取资源禀赋、路径依赖(也即历史基础)、交通条件(市场通达性)、自然地理、要素成本、市场规模、政府政策(包括产业政策及环保政策)等 8 类变量进行分析。具体可观测指标项及其数据来源见表 1。因变量为有色采选企业用地数量(NFEs)。

(2) 影响因子指标量化及归一化。上述影响因子中产业和环保政策等定性指标,根据“唐健政策赋值法”进行量化^[31]:基于某地区各项相关产业或环保政策级别和发文数量,并区分其对有色金属行业发展的作用方向(正激励和负激励)分别赋值,最终加和得到该地区产业政策指数和环境规制指数。具体分值设置如表 2 所示。

此外,连续型指标量纲及数据量级差异会干扰后续回归模型的构建及驱动力解释,因此本文对各离散型指标(分类指标)数据进行量化处理后,进一步采用 Z-score 方法对自变量中的连续型变量进行归一化处理,消除量纲对回归模型权重的影响^[32]。

表1 有色金属采选企业用地格局驱动变量选取及其数据来源

Tab. 1 Selection and sources of driving factors of the pattern of non-ferrous metal mining enterprise sites

解释变量类型(自变量)		可观测变量	数据来源	
资源禀赋	能源禀赋	本地发电量(EEP)	各省市统计年鉴	
	金属矿产禀赋	有色金属矿产储量(Reserve_ore)	万德数据库	
路径依赖(历史基础)		1980年以前大中型有色采选企业个数(NFEs_1980)	本文构建的有色采选企业用地信息数据集	
交通条件(市场通达性)		铁路及公路总里程(DST)	各省市统计年鉴；国家基础地理信息中心1:100万全国基础地理数据库	
自然地理		年均降雨量(AP)	资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/Default.aspx)	
		年均气温(AT)	500 m分辨率中国气象背景数据集(经DEM校正)	
		地形起伏度(Slope)	全球变化科学研究数据出版系统(www.geodoi.ac.cn)中国地形起伏度公里网格数据集	
要素成本		水资源总量(TWR)	中国水利统计年鉴	
		土地成本	工业用地成交均价(LP)	中国指数研究院数据信息中心；中国国土资源统计年鉴
政府政策		劳动力成本	职工平均工资(Income)	中国劳动统计年鉴
		产业政策	有色金属产业园区数量(NIPs)	前瞻产业园区库；中国开发区审核公告目录
			有色产业政策指数(Index_IP)	基于国家及各省市相关部门网站检索有色内容，按照“唐健政策赋值法”打分
环保政策		环境管制强度(环保投资额占GDP比例, EI%)	基于各省市环境统计年鉴计算	
		环境规制指数(Index_ER)	基于国家及各省市生态环境部门网站检索结果，按照“唐健政策赋值法”打分	
市场规模		地区工业总产值(GIO)	各省市地区工业统计年鉴	
		第二产业占GDP比例(SP%)	各省市地区工业统计年鉴	

2.2 研究方法

2.2.1 时空格局分析模型 应用平均最近邻分析，从全局上解析有色金属行业企业信息数据的空间集聚特征；继而采用核密度、标准差椭圆等分析方法，分析不同时期行业企业用地空间分布热区及其演变趋势。

(1) 平均最近邻分析(ANN)。本文采用平均最近邻分析检验点群是

否存在聚集性特征，从企业用地点位层面揭示其在全国范围内的地理集中程度及其变化趋势。相比于其他聚类性分析方法，平均最近邻方法能够在不同数据集背景下，有效比较多份数据的聚集程度，非常适用于同一类型的研究对象在固定区域内不同时期聚集特征变化情况的研究^[33]。本文根据形成的企业用地空间点位数据集，通过计算每个要素与其最邻近要素之间的观测平均距离 \bar{D}_O 及期望平均距离 \bar{D}_E 来计算最近邻指数(Nearest Neighbor Index) $ANN(\bar{D}_O/\bar{D}_E)$ 。如果最近邻指数 < 1 ，则表现的模式为聚类，且指数越小，聚类程度越大；如果 > 1 ，则表现的模式趋向于扩散。详细计算过程见文献[34]。

(2) 核密度分析。核密度分析能够对空间点要素或线要素的分布密度进行连续模拟，可更深层次地挖掘有色金属采选企业空间分布的特征规律。本文采用核密度分析从整体尺度测度有色采选企业用地点位空间分布聚集程度，核密度值越大说明企业用地区

表2 产业及环保政策指标量化及其分值设置

Tab. 2 Quantification and score setting of industrial and environmental policy indicators

政策级别	正激励政策分值	负激励政策分值
国家级法律条例	+3	-3
国家级政策文件	+2	-2
省级法律条例	+1.5	-1.5
省级政策文件	+1	-1
地市级及以下政策文件及条例	+0.5	-0.5

集程度越高,反之亦然。在本文中各企业用地点要素的核密度分析方法计算公式可以表示为:

$$f(s) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{s-c_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中: $f(s)$ 为空间位置 s 处的核密度估计 (单位为家企业用地/ km^2); h 为搜索半径, 也称作带宽; n 为与位置 s 的距离 $\leq h$ 的要素点数; c_i 为核心要素点; K 函数则表示空间权重函数。其中搜索半径 h 可使用以下公式进行计算^[35]:

$$h = 0.9 \times \min\left(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln 2}} \times D_m \right) \times n^{-0.2} \quad (2)$$

式中: SD 是标准距离; D_m 是中值距离; n 是点数。核密度计算过程使用 ArcGIS 实现。

(3) 标准差椭圆分析。利用标准差椭圆分析的椭圆重心、方位角、标准差椭圆长短轴等参数, 定量描述中国有色金属采选企业用地的空间分布特征, 揭示其空间扩散方向以及离散程度。其中椭圆转角是指从正北方向开始按顺时针进行测量的长轴夹角; 椭圆长半轴表示企业用地在空间分布上的总体扩散方向; 椭圆短轴的长度代表企业用地的集聚程度, 短轴越短, 表示企业用地越集聚。具体计算公式详见文献[36]。

2.2.2 空间格局驱动因素分析模型 为识别有色金属采选企业用地空间格局驱动因素, 以地市为空间单元, 参考有色采选企业用地数量发展特征, 同时考虑指标数据可得性、有效样本数量以及产业和环保政策发布实施节点, 最终分别选取 1990 年和 2019 年两个时期全国各地市有色采选企业用地数量 (包括在产及关闭搬迁) 作为因变量, 表 1 中 8 类涉及自然地理、社会经济等指标为自变量, 采用空间回归模型 (SRM) 通过空间权重矩阵引入空间效应^[37], 对有色采选企业用地集聚与扩散的驱动因素进行分析, 探讨各潜在影响因素对其全局影响程度及变化。

常用的空间回归模型主要有空间滞后模型 (SLM) 和空间误差模型 (SEM) 两类。对于空间滞后模型, 其通过添加滞后因变量的方式直接引入空间自相关, 其模型表达式为:

$$y = \rho W_y + X\beta + \varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (3)$$

式中: y 是因变量; X 代表自变量; W_y 是空间权重矩阵; ρ 是空间滞后因变量 W_y 的系数; β 为待估参数; ε 为随机误差。如果没有空间相关性, ρ 将接近于零。

空间误差模型描述的是空间扰动相关和空间总体相关, 其模型表达式为:

$$y = X\beta + \varepsilon, \quad \varepsilon = \lambda W_\varepsilon + u, \quad u \sim N(0, \sigma^2 I) \quad (4)$$

式中: y 是因变量; X 代表自变量; W 是空间权重矩阵; λ 是空间误差相关系数, 用于度量临近个体关于被解释变量的误差冲击对于本个体观察值的影响程度; β 为待估参数; u 为白噪声。

本文根据有色金属采选企业用地及其潜在影响因子的具体情况, 首先使用不考虑空间相关性的普通最小二乘回归模型 (OLS) 来估计受约束模型, 在此基础上进行空间依赖诊断。具体的诊断涉及两个拉格朗日乘数 LM(error)、LM(lag) 及其稳健性 R-LM(error)、R-LM(lag) 等共计 4 个统计量。根据 Anselin 等^[38]提出的判断过程, 首先考察 LM(error) 与 LM(lag) 的显著性, 若全部不显著, 说明该观测值不具有空间相关性, 则最终分析采用 OLS 模型即可; 若只有 LM(lag) 显著, 则采用空间滞后模型; 若只有 LM(error) 显著, 则采用空间误差模型; 若两者都显著, 则继续考察 R-LM(error) 与 R-LM(lag) 的显著性, 前者更显著则使用空间误差模型, 后者更显著则使用空间滞后模型。此外, 本文还

引入赤池信息量准则 (AIC)、施瓦兹准则 (SC) 以及对数似然法 (Log-lik) 对空间回归模型的选择进行辅助判别^[39]。空间依赖诊断过程采用行标准化权重 (Row-standardized weights), 以保证空间回归结果的稳健性。OLS 空间依赖诊断及空间回归模型的构建采用 GeoDa (version 1.14.0) 进行。

3 结果与分析

3.1 有色采选企业用地数量发展特征

根据有色采选企业用地产生时间分布以及数量发展趋势, 本文将其时空格局的演变大体划分为4个时期, 即20世纪初—1978年的缓慢平稳发展时期、1979—1988年的缓慢积累期、1989—2006年的高速积累期、2007年至今的减速积累期 (图2)。对数据集中全

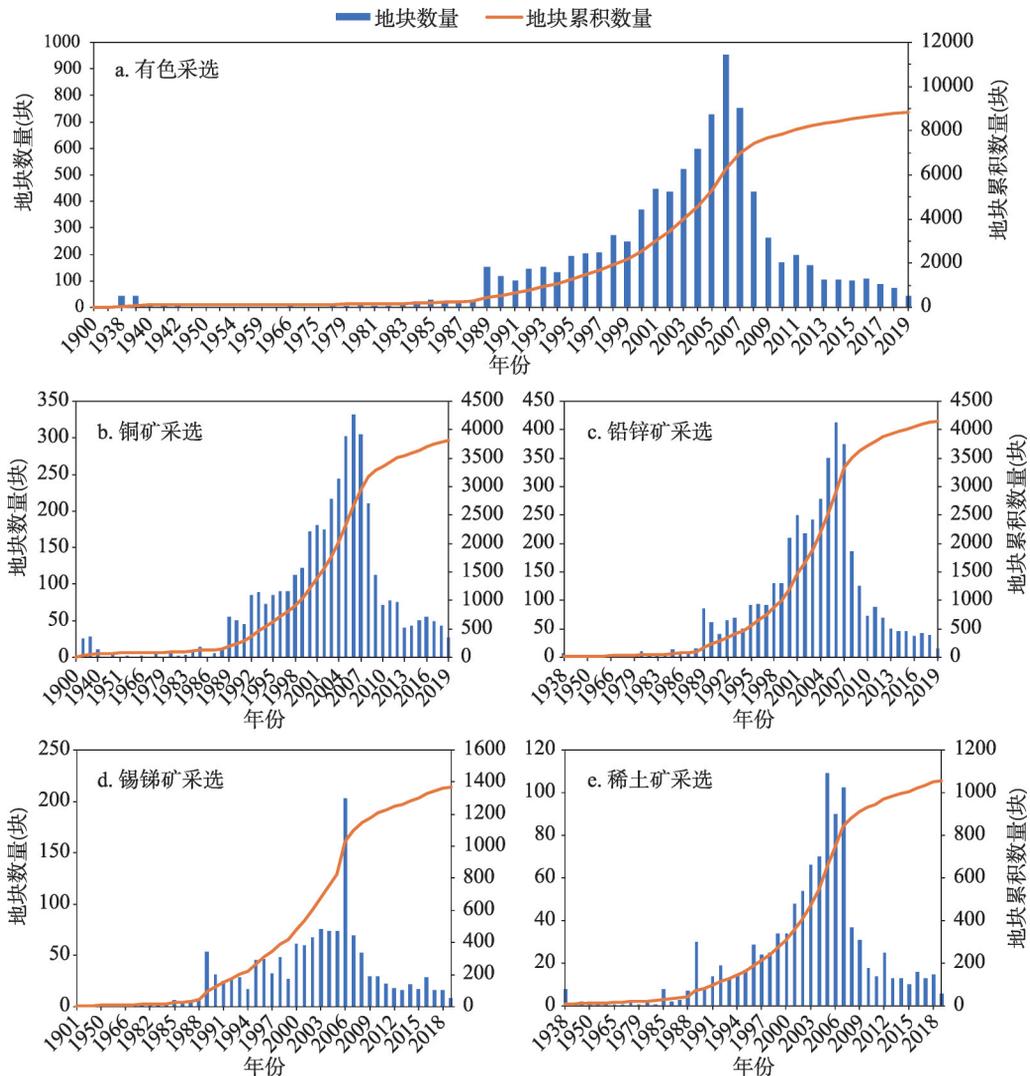


图2 中国有色金属采选企业用地形成时间分布(截至2019年)

Fig. 2 Temporal distribution of non-ferrous metal mining enterprise sites in China in different periods (until 2019)

部有色采选及其主要行业小类下的企业按成立/投产时间分布进行分析,结果表明:在已获取的10827块有色采选企业用地中(其中有成立时间的8944块),1978年以前企业用地的收录较少,累计仅有131块。到改革开放后的早期阶段(1988年),有色采选各行业小类的企业用地数量仍然均处于低位,这段时期中年代久远的部分企业用地逐渐灭失,同时新成立的采选企业数量也较少,如1988年新增在产企业用地仅28块。数据集所收录企业用地集中出现时间主要分布在1989—2012年期间,占到全部地块的86%,其中2000—2008年是有色采选企业用地尤其是铜矿、铅锌矿、锡铋矿以及稀土矿企业用地密集产生的时段,占到总企业用地数的58%,而这一时期也正是中国新增采选企业数量出现爆发式增长的时期,其中除了稀土矿采选新增企业用地提前达峰(2005年)外,包括铜矿、铅锌矿以及锡铋矿在内的新增采选企业用地均在2006年达到顶峰(分别为331块,412块以及203块),这使得总的有色采选企业用地出现时间分布以2006年为最多,仅该年分布的企业用地数量已经是1978年改革开放前出现的有色采选企业地块总和的7.3倍(图2)。此后,各行业小类新投产企业数量逐年下降,2012—2019年每年全部新增的各类有色采选企业用地数量都维持在不足100块的水平,其中锡铋矿以及稀土矿采选新增企业用地更是降至20块以内,而统计截止时的2019年新出现的采选企业用地总数仅有43块,有色采选地块数量的增长基本停滞,这也与统计资料数据显示的新增企业近年快速下降趋势相符。

3.2 不同时期有色采选企业用地全局空间集聚性

由于早期有色采选企业用地数量偏少,全局空间聚集特征分析起点自1978年开始。历年平均最近邻分析(ANN)结果显示(图3),1978—2019年全国有色采选企业用地在空间上始终呈现出显著的聚集分布趋势(最近邻指数 < 1 , $p < 0.01$),并随着时间的推移不断增强,且存在明显的阶段特征:在1988年之前由于企业用地数量积累缓慢,平均最近邻指数的降幅并不明显,而之后随着有色采选企业用地在全国范围内的快速累积,其空间聚集性也进入了长期的持续增强阶段,在平均最近邻分析中则表现为指数的持续降低。但2006年之后伴随着有色采选企业用地进入减速累积阶段(图2),前期的持续聚集趋势也由此放缓,并延续至2019年。总体而言,改革开放以来有色采选企业用地空间聚集性提升也同样经历了地块数量增长所呈现出的“缓速—持续加速—再减速”的发展全过程,但转折点要比地块数量增长的转折点提前显现。

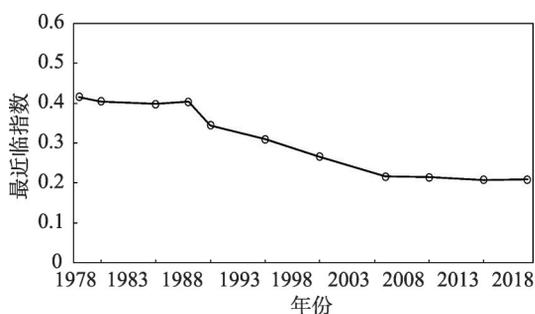
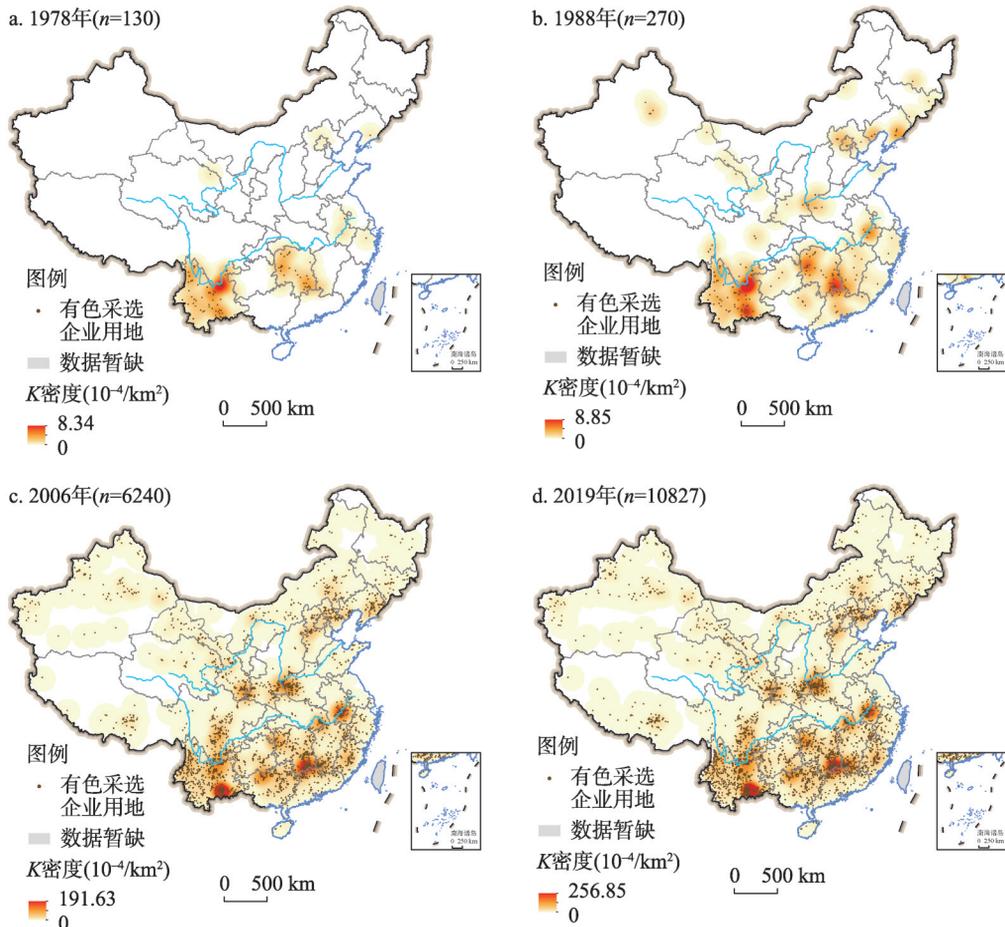


图3 1978—2019年全国有色采选企业用地历年最近邻指数变化(点位尺度)

Fig. 3 Variation of nearest neighbour index of non-ferrous mining enterprise lands during 1978-2019 (point scale)

3.3 有色金属采选企业用地局部聚集特征及演变趋势

针对各时期时间节点有色采选企业用地点位空间聚集分异情况,使用核密度并结合标准差椭圆方法对其局部分异特征及时空演化过程进行分析(图4)。作为典型的资源密集型产业,在1978年以前有色采选企业用地数量较少,且主要分布于云南、湖南两地,格局较为单一(图4a),标准差椭圆分析显示此时采选企业用地的集聚区域也大致呈西南—东北(偏东)分布,其向心力及方向性均十分明显(表3、图5)。而在1978—1988年有色采选企业用地数量的累积虽较为缓慢,但仍在原有聚集区(云南、湖南)密度继续



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4632号标准地图制作，底图边界无修改。

图4 不同时期中国有色采选企业用地点位及核密度空间分布

Fig. 4 The site and kernel density distribution of non-ferrous mining enterprise lands in China

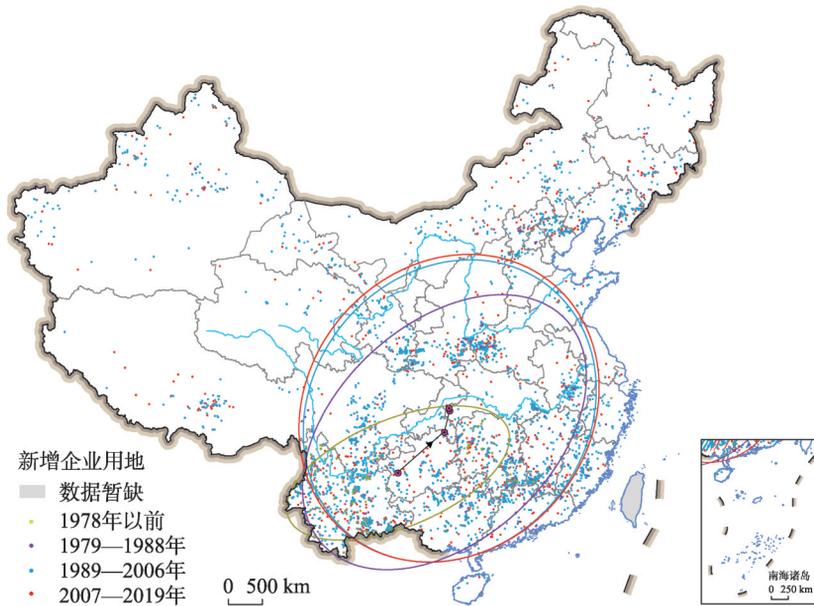
表3 1978—2019年全国有色金属采选企业用地标准差椭圆参数

Tab. 3 Parameter of ellipse with standard deviation of non-ferrous mining enterprise lands in China in 1978-2019

年份	长半轴(km)	短半轴(km)	平均形状指数	方位角($^{\circ}$)
1978	813.02	368.25	2.21	67.87
1988	1134.8	739.23	1.54	47.73
2006	944.67	1089.90	0.87	40.02
2019	968.53	1109.09	0.87	41.19

注：长半轴表示点位空间分布的方向；短半轴表示点位空间分布的范围，短半轴越短则向心力越明显；平均形状指数用于描述标准差椭圆的扁率，其值越远离1表明点位空间分布的方向性越明显。

增加，地块密度最高的滇东地区也仅为8.85块/万 km^2 。之后，企业用地逐渐开始从云南、湖南双中心向皖南、豫西以及环渤海及北疆地区扩展（图4b），相应的标准差椭圆重心此时也出现了跨区域的大范围波动，移动轨迹总体从西南向长江中游方向有较大幅度偏移，同时椭圆的扁率明显缩小，覆盖面积也迅速增大，企业用地点位分布呈空间扩张趋势（图5）。



注：基于自然资源部标准地图服务网站GS(2020)4632号标准地图制作，底图边界无修改。

图5 不同时期中国有色采选企业用地点位标准差椭圆分析

Fig. 5 Spatial distribution in the standard deviation ellipse of non-ferrous mining lands in different periods

到1989—2006年期间，在云南、湖南、皖南、豫西等早期开发地区企业用地密度继续增大的同时（此时地块分布密度最高的滇东地区已达到 191.63 块/万 km^2 ），有色采选企业用地的扩张也同步推进，两广、福建、辽宁以及川中、内蒙古中西部、陕甘交界、新疆、西藏等地也快速成为新的地块聚集区，中国有色采选企业地块的分布范围已经呈现出从长江以南地区向中西部不断扩展的趋势（图4c），而这一时期也成为中国有色采选企业用地数量累积最为迅猛的时期，并基本形成了当前用地格局。但另一方面，标准差椭圆分析相比前一时期并未出现较大范围的重心移动，而是体现为聚集区域主体方向继续向西北偏转以及聚集区域的持续性扩散（图5），这也说明由于产业的路径依赖，1989—2006年期间企业用地的向外离散和快速扩张并未动摇早期有色采选企业用地高密度聚集区的主体地位。但此后有色采选企业地块的空间拓展进入全面放缓阶段并持续至2019年，此时少量新增的企业用地基本都是对前期形成的企业用地聚集热区的加密和强化（图4d），整体格局相比高速累积时期变化不大，这也与标准差椭圆分析的结果相符（表3）。总体而言，当前中国有色金属采选企业用地主要密集分布于长江以南地区，尤其是云贵川、湖广、赣南等有色产区（其中地块高密度分布的地区仍然是滇东和湘赣交界区，最高达到 256.85 块/万 km^2 ），最终形成了以滇东、湘赣粤结合区、皖南、豫西为主核心，桂西北、川南、陕甘、天山—阿尔泰沿线以及松辽—大兴安岭一带等多个地区为副核心的“四核多副”的集聚分布模式，且格局短期内将不会有太大改变。

3.4 有色采选企业用地空间格局驱动因素分析

3.4.1 OLS回归与空间依赖诊断 在GeoDa中，考虑指标数据可得性、有效样本数量以及各类产业环保政策集中出台节点分布，分别选取1990年和2019年两个典型年代节点，对各地市有色金属企业用地数（NFEs）及8种类型16个潜在影响因子进行OLS回归，并使用行标准化（Row-standardized）矩阵作为空间权重进行空间依赖诊断（表4）。

表4 拉格朗日乘子(LM)空间依赖性诊断结果

Tab. 4 Results of spatial dependence diagnosis with Lagrange multiplier (LM)

因变量	LM 统计量	空间权重矩阵		
		MI/DF	行标准化权重	p 值
NFEs_1990	Moran's I (error)	-0.019	-0.115	0.908
	LM (lag)	1	0.016	0.898
	R-LM (lag)	1	0.038	0.846
	LM (error)	1	0.329	0.566
	R-LM (error)	1	0.350	0.554
NFEs_2019	Moran's I (error)	0.091	3.287	0.001
	LM (lag)	1	9.370	0.002
	R-LM (lag)	1	2.911	0.048
	LM (error)	1	7.415	0.006
	R-LM (error)	1	0.955	0.328

注：MI/DF代表自由度。

空间依赖诊断的结果显示，对于1990年有色采选企业用地数量分布及其影响因子，LM(lag)与LM(error)均未表现出显著性，同时使用行标准化矩阵对残差求解 Moran's I 值仅为-0.115，其 p 值远大于0.05，表明模型残差并不存在显著的空间自相关性，最终诊断结果为不考虑空间属性，保留OLS模型进行空间格局驱动力分析。而对于2019年的回归分析诊断结果显示（表4），LM (lag)和LM (error)均显著性异于0 ($p < 0.01$)，且对残差求解 Moran's I 值统一表现出显著性，这说明对于2019年这一时期的研究需要考虑各地理单元及其相邻单元的空间相关性。而进一步通过Anselin等^[38]提出的判断准则进行鲁棒性测试，仅有空间滞后模型（SLM）的R-LM (lag)表现出显著性 ($p < 0.05$)，因此对于2019年企业用地格局，最终选择空间滞后模型（SLM）对其驱动因素进行分析。

3.4.2 1990年企业用地空间格局主控因子识别 由于未能通过空间依赖诊断，1990年有色采选企业用地格局主控因素分析采用常规的多元线性回归方法（OLS）进行，结果显示（表5）：回归模型的拟合优度 R^2 达到了0.732，拟合效果较好。而对于潜在影响因子，在8种自变量类型中资源禀赋（发电量EEP、有色金属矿产储量Reserve_ore）、路径依赖（1980年以前大中型有色采选及冶炼企业个数NFEs_1980）、自然地理条件（年均降雨量AP、年均气温AT、地形起伏度Slope）、要素成本（职工平均工资Income）以及产业政策（有色产业政策指数Index_IP）均对该时期有色采选企业用地格局产生了一定影响，其中除地形起伏度Slope和年均降雨量AP回归系数为负外，其他因子所产生的影响均为正向作用，但从影响的显著性上来看，仅有1980年以前大中型有色采选企业个数NFEs_1980（回归系数3.216，下同）、有色产业政策指数Index_IP（1.52）、有色金属矿产储量Reserve_ore（1.454）对企业用地格局的影响具有显著性。这说明，在早期有色采选企业数量和密度总体不高的内陆型分布格局下，作为资源密集型产业，1990年以前中国有色采选企业用地格局与有色矿产资源禀赋密切相关，并严重受制于路径依赖，早期为服从国家建设整体战略安排所形成的大型资源型企业布局以及计划经济型产业政策，在改革开放后相当长一段时期依然主导着有色采选行业及其企业用地的地理格局。同时，随着市场经济的引入以及环境问题的出现，环境管制强度此时对企业用地布局和扩张的抑制作用开始显现，但整体驱动能力仍较为有限（回归系数-0.043），其影响程度甚至要低于年均降雨量AP（-0.763）和年均气温AT（0.581）等自然地理条件（表5）。

表5 最小二乘回归(OLS)结果及其性能指标(1990年)
Tab. 5 Ordinary Least Squares regression (OLS) parameters analysis (1990)

变量类型	自变量	回归系数	标准偏差	t统计	p值
资源禀赋	EEP	0.154	0.199	0.778	0.437
	Reserve_ore	1.454	0.251	5.786	0.000
路径依赖	NFEs_1980	3.216	0.266	12.094	0.000
交通替代	DST	-0.002	0.223	-0.008	0.994
自然地理条件	AP	-0.763	0.388	-1.968	0.050
	AT	0.581	0.386	1.504	0.133
	Slope	-0.172	0.276	-0.623	0.534
	TWR	0.020	0.249	0.081	0.936
要素成本	LP	-0.001	0.220	-0.006	0.995
	Income	0.244	0.206	1.186	0.236
产业政策	NIPs	0.004	0.200	0.021	0.983
	Index_IP	1.520	0.246	6.182	0.000
环境政策	EI%	-0.043	0.196	-0.219	0.827
	Index_ER	-0.033	0.250	-0.132	0.895
市场规模	GIO	0.086	0.187	0.460	0.646
	SP%	-0.045	0.215	-0.211	0.833

赤池信息量准则(AIC) = 1795.63
施瓦兹准则(SC) = 1860.72
对数似然估计(Log-lik) = -880.81
拟合优度 R^2 = 0.732

3.4.3 2019年有色采选企业用地空间格局驱动因素分析 根据空间依赖诊断,选择空间滞后模型(SLM)对2019年全国有色金属企业用地格局进行回归,并与最小二乘回归(OLS)结果进行比较(表6)。可以看到,相比OLS模型,SLM模型中各个潜在影响因子系数的显著性均未发生改变,仍然是Reserve_ore、NFEs_1980、Slope、NIPs、Index_IP、Index_ER等6个因子呈现出显著性,但Likelihood Ratio检验的值为8.487, p 值小于0.01 (0.0036),表明使用SLM模型与直接采用OLS回归有着显著差异。模型评价指标方面,对数似然估计(Log-lik)值较OLS回归提高了4.24,而反映模型拟合优良性的AIC与SC也都分别下降了6.49和2.66,这使得回归模型的拟合优度 R^2 也得到了提高(0.620),上述评估均说明对各地级市有色企业用地分布的回归效果SLM模型优于简单线性模型的OLS回归。

对空间滞后模型(SLM)的分析结果,相比1990年,2019年对有色企业用地分布格局影响最为显著的因子仍然包括有色金属矿产储量Reserve_ore(回归系数19.030, $p < 0.001$)、1980年以前大中型有色采选企业个数NFEs_1980(回归系数38.992, $p < 0.001$)以及有色产业政策指数Index_IP(回归系数19.647, $p < 0.001$)等体现资源禀赋、路径依赖以及产业政策类主控因子,还新增了产业政策类型中的相关产业园区数NIPs(回归系数15.291, $p < 0.001$)和自然地理条件的地形起伏度Slope(回归系数9.773, $p < 0.05$)等因子(表6)。这说明随着有色金属行业的蓬勃发展,以及随之而来的企业用地密度的快速增加,早期因企业用地分布稀疏而未能提取出的主控因子逐步显现。值得注意的是,环境政策中的环境管制强度(EI%)和环境规制指数(Index_ER)在1990年和2019年均显示出与企业用地格局的负相关,但1990年时二者对企业用地空间扩展的抑制作用并不显著,而在2019年环境规制指数(Index_ER)对企业用地地理格局的负向抑制作用(回

表6 空间滞后模型(SLM)与最小二乘回归(OLS)结果及其性能对比(2019年)

Tab. 6 Parameters of Spatial Lag Model (SLM) and Least Squares Regression (OLS) results (2019)

自变量	空间滞后模型(SLM)				最小二乘回归(OLS)			
	回归系数	标准差	z值	p值	回归系数	标准差	t统计	p值
EEP	1.601	4.317	0.371	0.711	0.184	4.485	0.041	0.967
Reserve_ore	19.030	3.638	5.231	0.000	19.171	3.787	5.062	0.000
NFEs_1980	38.992	3.894	10.013	0.000	39.910	4.038	9.884	0.000
DST	-2.425	4.335	-0.559	0.576	-2.205	4.513	-0.489	0.625
AP	-6.159	6.386	-0.964	0.335	-7.170	6.648	-1.078	0.282
AT	10.562	6.921	1.526	0.127	13.051	7.198	1.813	0.071
Slope	9.773	4.743	2.060	0.039	10.538	4.933	2.136	0.033
TWR	-1.881	3.802	-0.495	0.621	-1.028	3.941	-0.261	0.794
LP	1.976	3.990	0.495	0.620	1.265	4.145	0.305	0.760
Income	-6.284	4.270	-1.472	0.141	-6.371	4.445	-1.433	0.153
NIPs	15.291	3.667	4.170	0.000	14.510	3.801	3.818	0.000
Index_IP	19.647	3.872	5.074	0.000	21.252	4.007	5.303	0.000
EI%	-5.763	3.408	-1.691	0.091	-5.669	3.546	-1.599	0.111
Index_ER	-12.169	4.501	-2.703	0.007	-15.256	4.531	-3.367	0.001
GIO	-2.220	5.586	-0.397	0.691	-2.328	5.812	-0.400	0.689
SP%	-0.170	3.341	-0.051	0.959	-0.317	3.478	-0.091	0.927
赤池信息量准则(AIC) = 3775.86				赤池信息量准则(AIC) = 3782.35				
施瓦兹准则(SC) = 3844.78				施瓦兹准则(SC) = 3847.44				
对数似然估计(Log-lik) = -1869.93				对数似然估计(Log-lik) = -1874.17				
拟合优度 R^2 = 0.620				拟合优度 R^2 = 0.609				
Likelihood Ratio Test=8.487 (p = 0.0036)								

归系数-12.169) 在这一时期得到完全显现并表现出显著性 ($p < 0.01$), 反映出近年来为环境污染防治出台的一系列政策法规已在遏制有色采选行业无序扩张和发展方面卓有成效。此外, 地形起伏度对企业用地格局的正向驱动主要与有色金属矿产资源主要分布于山区丘陵为主的成矿带上有关, 而年均气温的表现也是与有色矿产多分布于温度较高的西南及长江中下游地区有关。

4 讨论

面对生态环境保护和产业升级优化布局的多重压力, 全面掌握作为中国国民经济发展重要支柱的有色金属采选企业用地时空格局及其驱动力演变具有重要的指导意义。而随着多源地理大数据技术的快速发展并借助多种空间分析方法, 全面精细的获取并识别全国有色金属采选企业用地时空演化轨迹及其背后的驱动机制成为可能。

4.1 有色金属采选企业用地的时空转化

作为生产企业的承载对象, 企业所在地块也即企业用地具有复杂的时空属性: 一方面企业用地必然伴随着企业的建立和产业在空间范围内的扩张而同步产生和扩张; 但另一方面, 企业用地随企业灭失或产业转移, 留下的土地仍然作为产业迁出地的退役用地, 同时伴以迁入地新增企业用地, 使得有色金属采选企业用地的数量不断累积。有色金属采选是典型的资源密集型产业, 1978年以前优良有色矿产资源的地质分布和早期“三线”建设政策导向, 决定了有色采选企业用地早期分布格局^[40]。1978年改革开放后,

有色采选企业用地数量和密度开始逐步增长,呈现出从云南、湖南向皖南、豫西以及环渤海及北疆地区扩展的趋势。尤其是在1989—2006年期间,随着交通等基础设施条件的持续改善以及经济需求规模的不断增长,加以2000年中国西部大开发战略以及2004年东北振兴战略的实施,有色金属工业也得到有力扶持,有色采选企业用地紧随有关产业的聚集、转移和扩散而持续扩张推进,企业地块的分布范围呈现出从长江以南地区向资源和能源丰富的中西部扩展,并基本完成了对中国有色金属矿产产地的全覆盖,基本形成了当前有色采选企业用地格局。但紧随而来的2008年金融危机,造成了中国下游消费市场的萎缩,加之随后持续增长的环保压力,有色采选企业地块的空间拓展进入全面放缓阶段并持续至今。

4.2 资源禀赋和路径依赖的重要影响

以往研究认为,资源密集型产业在工业化早期的布局主要受制于资源禀赋和历史基础^[27],而随着交通条件的改善和成本的不断降低,加之市场需求的不断扩大,资源禀赋对于资源密集型产业的束缚越来越小,资源密集型产业将逐渐转移至市场所在地^[41]。本文发现,在改革开放初期,资源禀赋和路径依赖确实对1990年的有色采选企业用地布局具有主导作用,而交通替代、市场规模以及要素成本等市场经济类因子的影响均不显著,这与以往研究较为一致^[42]。之后,不断扩大的市场规模以及经济高速增长都有力推动了有色产业的发展,但对2019年企业用地格局驱动分析发现,交通替代、市场规模以及要素成本等因子仍然未表现出显著影响,运输条件的改善在短期内并未能替代资源禀赋的影响。作为资源密集型产业,有色采选企业用地分布并未出现从资源集聚地向市场所在地的大规模转移。空间回归结果也显示,新时期有色金属企业用地格局仍然受制于地区资源禀赋和历史基础的依赖性,主要分布在原料产地附近,以及早期国家建设战略部署形成的采选企业布局,这种地理格局保留至今。其结果是造成了产地与消费地的分离,使有色金属采选企业用地格局对交通条件、当地市场规模和地价等要素成本并不敏感。

4.3 产业政策调控效果

企业用地的区位选择受政府行为的引导十分明显^[42-43],政府通过产业政策调整可以提高某一地区对目标产业的吸引力,如加大招商引资力度,或相关的土地和税收优惠,或划定产业园区,以及降低准入标准等^[43]。但以往关于政策影响的研究报导多以定性分析为主^[44],缺乏对政策的定量分析。本文首次在全国尺度定量分析了环保政策及产业政策对中国有色采选企业用地格局演化的影响。结果表明,1990年之前,中国尚处在计划经济向市场经济过渡时期,在这期间,为迅速缓解下游市场需求猛增与有色金属矿产产能不足的矛盾,相关的产业政策在“以经济发展为中心”的指导思想下基本是以“多建快上”的正向激励政策为主(回归系数0.004~1.52),对传统有色金属产区产生了巨大的促进作用(表5),相关行业企业用地数量开始快速增加(图2),这与以往局部地区的研究结论较为一致^[2],促进有色金属产业发展的相关政策对这一时期企业用地格局的形成具有显著的影响(回归系数1.52, $p < 0.001$)。但随着产能的不断提高以及对提高产业集中度的日益重视,中国对有色金属行业的产业政策经历了巨大的转变。2010年以前,中国有色金属行业政策仍然是以积极引导为主,如“西部大开发”“振兴东北老工业基地”和“促进中部地区崛起”等国家宏观发展战略,以及指导2009年至2011年中国有色金属产业综合性应对措施的《有色金属产业调整和振兴规划》,均对企业用地格局分布起到了积极引导作用,使这一时期的有色采选企业用地数量(图2)和密度(图4)也随之迅猛增加。随着开发利用境外资源的比重逐渐加大,有色金属产能开始过剩,2010年之后产业

政策从鼓励逐渐转向淘汰落后产能和提质增效,相关的产业准入门槛不断提高。但前期激励政策所带来正向驱动还存在惯性,致使后期密集出台的负激励政策短时期内未在回归分析结果中显示出明显的影响力。

4.4 环保政策对企业用地格局的调控日益突出

驱动力分析已经表明,中国环保政策对有色采选企业用地发展格局的影响在近30年间经历了由不显著到极显著的过程,这与中国环境政策的发展与转变有很大关系。改革开放初期,面对中国经济发展对有色矿产需求的日益增长以及环境保护让位于经济发展的早期观念,相关环保法规制度无论是数量还是力度均处于较低水平,虽然这一阶段中国也出台了《环境保护法》(1979年)、《工业“三废”排放试行标准》(GBJ4-73)和《重有色金属工业污染物排放标准》(GB4913-85)等相关法律、标准和规范,此时的环保政策整体上尚未对有色金属行业发展产生明显影响(回归系数 $-0.043\sim-0.033$)。但随着经济发展质量的不断提高以及中国生态文明建设提上日程,环保政策逐渐从以排污费制度为代表的末端治理为主转向当前的前端预防和清洁生产为主,环境效益成为各地方尤其是经济较为发达的中东部地区产业准入及产业退出所考量的重要内容,同时在涉污产业传统聚集区环境治理压力不断加大、环保政策日益收紧,由此极大限制了各重污染行业产业发展空间及相关企业用地的无序扩张。具体到有色金属工业,由于其所导致的环境污染量大面广,尤其采选场地的土壤污染问题日益突出^[45-46],国家和地方政府对有色金属采选行业的环境整理力度越来越大。2010年以后,随着国家水、土、气一系列污染防治政策和法律法规的陆续出台^[47],作为中国重金属排放的重点行业^[48],针对有色金属工业的环境防治关注力度(环境规制指数)和环境投资力度(环境管制强度)也得到前所未有的加强,尤其是针对中东部地区。针对企业用地,这一时期加强了在产企业用地的持续退出,同时严格审批新增有色项目,产生的负向抑制作用强度相比1990年大幅提高(由不显著变为具有显著影响),环保政策成为遏制有色采选企业用地空间发展格局最主要的驱动力,而在可预测的未来这一负向抑制作用势必伴随着有色行业负激励产业政策的逐步落实而继续增强。需要指出的是,环保政策与企业用地格局实际上是互相影响的,基于环境保护的产业调整政策快速减少在产企业用地数量,而有色企业用地分布密集程度则也直接影响了有关环境政策出台的力。此外,空间滞后模型分析也表明,代表实际环境投资占GDP比重的环境管制强度对有色金属企业用地的负向抑制作用(-5.76)远弱于环境规制指数(-12.17),且并未表现出显著性(表6),说明中国对有色行业在环境政策导向上已做出了大量的工作,但对环境投资的实际落地和执行仍待进一步加强。

5 结论与展望

本文基于地理大数据、网络地图POI和环境专题数据等多源信息融合,定量分析了中国有色采选企业用地历史分布格局及其演变趋势,并借助宏观经济地理学相关理论,运用空间回归模型(SRM),对不同时期有色采选企业用地空间格局演变的驱动因素进行了讨论,主要结论如下:

(1) 中国有色采选企业用地的演变经历了缓慢平稳发展时期(20世纪初—1978年)、缓慢积累期(1979—1988年)、高速积累期(1989—2006年)以及减速积累期(2007年至今)4个主要时期。期间,有色采选企业用地在空间上始终呈现出显著的聚集分布趋势($p < 0.01$),并由改开前的云南、湖南两地逐步向长江中下游、豫西、环渤海

及北疆等中西部有色金属赋存区扩展,最终形成了以滇东、湘赣粤结合区、皖南、豫西为核心热区,桂西北、川南、陕甘、天山—阿尔泰沿线以及松辽—大兴安岭一带等多个地区为副核心热区的“四核多副”的企业用地热区分布模式。

(2) 有色矿产资源禀赋、路径依赖及计划经济型产业政策塑造了中国早期有色采选企业用地空间分布的基本格局。后期虽然有色金属企业用地数量和密度得到了普遍提高,有色矿产资源禀赋及路径依赖所形成的正向促进作用依然主导着有色金属企业用地的地理格局。而对矿产资源产地的高度依赖也使企业用地格局对当地交通条件、市场规模以及要素成本始终都不敏感。

(3) 政策行为量化分析表明,产业政策收紧前的正向驱动惯性仍持续影响着中国有色采选企业用地分布。而不同于早期环境政策对企业用地分布的微弱影响,得益于近年来国家对有色金属工业环境污染问题的持续关注,当前环保政策对有色采选企业用地格局的显著性抑制作用已经凸显,相比之下环境管制强度的作用并不显著,对环境投资的实际落地和执行还有待加强。

本文提出的基于多源地理大数据融合、高效获取企业用地信息数据的方法体系打破了传统调查数据的局限性并具备较高的精度,对大区域尺度的评估工作提供了方法支撑,可以推广至全国其他重污染行业企业用地时空格局及其成因研究。而解析得到的有色采选企业用地时空格局演变及其驱动力变化特征也将为中国有色金属工业空间布局优化及产业调整提供有力决策支持。

参考文献(References)

- [1] China National Standardization Administration. Industrial Classification of National Economy: GB/T 4754-2017. Beijing: China National Standardization Administration, 2017. [中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类: GB/T 4754-2017. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.]
- [2] Feng Dekun, Yang Xue, Wan Yongyong, et al. Spatial and temporal pattern and cause analysis of non-ferrous metal industrial sites in Hunan province. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2022, 44(9): 144-155. [冯德坤, 杨雪, 万咏咏, 等. 湖南省有色金属工业场地时空格局及成因分析. *西南大学学报: 自然科学版*, 2022, 44(9): 144-155.]
- [3] Ministry of Industry and Information Technology. Chinese Nonferrous Metals Industry Yearbook. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology, 2019. [工业和信息化部. 中国有色金属工业年鉴. 北京: 工业和信息化部, 2019.]
- [4] Chen J, Zhang J L, Qu M K, et al. Pollution characteristics and risk assessment of soil heavy metals in the areas affected by the mining of metal-bearing minerals in Southwest China. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(6): 1070-1079.
- [5] Shao M M, Zhu Y, Hao R, et al. The health hazards of potentially toxic metals in the daily diets of adults and children from a mining and smelting region (Hezhang County) in southwestern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(7): 432. DOI: 10.1007/s10661-018-6816-y.
- [6] Cheng X F, Danek T, Drozdova J, et al. Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(4): 194. DOI: 10.1007/s10661-018-6574-x.
- [7] Song Z C, Wang C, Ding L, et al. Soil mercury pollution caused by typical anthropogenic sources in China: Evidence from stable mercury isotope measurement and receptor model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125687. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125687.
- [8] State Council. Adjustment and revitalization plan of non-ferrous metal industry. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/13/3/Document/524871/524871.htm>, 2010/2021-05-08. [国务院. 有色金属产业调整和振兴规划. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/13/3/Document/524871/524871.htm>, 2010/2021-05-08.]
- [9] Ministry of Industry and Information Technology. Non-ferrous Metal Industry Development Plan (2016-2020). http://gxt.jl.gov.cn/xxgk/zewj/bwgz/201610/t20161024_2453629.html, 2016/2021-05-08. [工业和信息化部. 有色金属工业发展规划(2016—2020年). http://gxt.jl.gov.cn/xxgk/zewj/bwgz/201610/t20161024_2453629.html, 2016/2021-05-08.]

- [10] Ministry of Environmental Protection. The Ministry of Environmental Protection announced the 2013 assessment results of the 12th Five Year Plan for Comprehensive Prevention and Control of Heavy Metal Pollution. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201412/t20141217_293091.htm, 2014/2021-01-08. [环境保护部. 环境保护部公布《重金属污染综合防治“十二五”规划》2013年度考核结果. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201412/t20141217_293091.htm, 2014/2021-01-08.]
- [11] State Council. Circular of the State Council on printing and distributing the national major functional area plan. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm, 2010/2020-10-10. [国务院. 国务院关于印发全国主体功能区规划的通知. http://www.gov.cn/zw/gk/2011-06/08/content_1879180.htm, 2010/2020-10-10.]
- [12] Peng Yizhe, Huang Fenglian, Jiang Pinghong, et al. Study on Thallium emission control of Hunan industrial wastewater based on surface water environmental capacity. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 2070-2080. [彭逸喆, 黄凤莲, 姜苹红, 等. 基于地表水环境容量的湖南工业废水铊污染物排放控制研究. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2070-2080.]
- [13] Wang Qin, Li Wei. Progress and prospect of regional resources and environment carrying capacity evaluation. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7): 1487-1498. [王秦, 李伟. 区域资源环境承载力评价研究进展及展望. *生态环境学报*, 2020, 29(7): 1487-1498.]
- [14] Wang Ziwei, Cai Hongyan, Chen Mulin. A method of spatio-temporal characteristics analysis of chemical enterprises using big data and their potential impacts on waterbodies. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(4): 673-683. [王紫薇, 蔡红艳, 陈慕琳. 基于大数据的化工企业时空变化特征及其对水域的潜在影响分析方法. *地球信息科学学报*, 2022, 24(4): 673-683.]
- [15] Bian Zhengfu, Zhang Yanping. Analysis of land use pattern evolution in Xuzhou coal mining area. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(4): 349-358. [卞正富, 张燕平. 徐州煤矿区土地利用格局演变分析. *地理学报*, 2006, 61(4): 349-358.]
- [16] Ang M L E, Arts D, Crawford D, et al. Socio-environmental land cover time-series analysis of mining landscapes using Google Earth Engine and web-based mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 21: 100458. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100458.
- [17] Guo Changqing, Chi Wenfeng, Kuang Wenhui, et al. Mapping and spatio-temporal changes analysis of energy mining and producing sites in China using multi-source data from 1990 to 2020. *Journal of Geo-information Science*, 2022, 24(1): 127-140. [郭长庆, 迟文峰, 匡文慧, 等. 1990—2020年中国能源开采和加工场地多源数据综合制图与时空变化分析. *地球信息科学学报*, 2022, 24(1): 127-140.]
- [18] Liu Zhenkun, Wu Huayong, Liu Feng, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and its driving factors of national coking sites in the last 20 years. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(3): 604-613. [刘振坤, 吴华勇, 刘峰, 等. 中国焦化场地近20年时空演变特征及驱动因素. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 604-613.]
- [19] Wei C H, Lei M, Wang S B. Spatial heterogeneity of human lifespan in relation to living environment and socio-economic polarization: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(27): 40567-40584.
- [20] Jiang Y F, Wang H L, Lei M, et al. An integrated assessment methodology for management of potentially contaminated sites based on public data. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 146913. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146913.
- [21] Zhang C, Kuang W H, Wu J G, et al. Industrial land expansion in rural China threatens environmental securities. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, 15(2): 29. DOI: 10.1007/s11783-020-1321-2.
- [22] Jia X L, Hu B F, Marchant B P, et al. A methodological framework for identifying potential sources of soil heavy metal pollution based on machine learning: A case study in the Yangtze Delta, China. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 601-609.
- [23] Jayasinghe D Y, Jayasinghe C L. An investigation into adult human height distributions using kernel density estimation. *Sankhya, Series B*, 2022, 84(May Pt.1): 79-105.
- [24] Yang J, Zhu J, Sun Y Z, et al. Delimitating urban commercial central districts by combining kernel density estimation and road intersections: A case study in Nanjing City, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(2): 93. DOI: 10.3390/ijgi8020093.
- [25] Li Deren, Yu Hanruo, Li Xi. Analysis of the spatial-temporal pattern of urban development in countries along the "the Belt and Road" based on luminous remote sensing images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2017, 42(6): 711-720. [李德仁, 余涵若, 李熙. 基于夜光遥感影像的“一带一路”沿线国家城市发展时空格局分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(6): 711-720.]
- [26] Wang N, Fu X D, Wang S B. Spatial-temporal variation and coupling analysis of residential energy consumption and economic growth in China. *Applied Energy*, 2022, 309: 118504. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.118504.
- [27] He Canfei, Zhu Yangang. An empirical study on the geographical distribution of resource-based industries in China: A

- case study of oil processing and coking industry and ferrous metal smelting and rolling processing industry. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(3): 488-501. [贺灿飞, 朱彦刚. 中国资源密集型产业地理分布研究: 以石油加工业和黑色金属产业为例. *自然资源学报*, 2010, 25(3): 488-501.]
- [28] Fujita M, Krugman P R, Venables A. *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*. Cambridge: MIT Press, 2001.
- [29] Bai C E, Du Y J, Tao Z G, et al. Local protectionism and regional specialization: evidence from China's industries. *Journal of International Economics*, 2004, 63(2): 397-417.
- [30] Li Junhua. Research on industrial agglomeration and distribution of China's manufacturing industry [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. [李君华. 产业集聚与中国制造业分布研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.]
- [31] Tang Jian. Study on Farmland Protection System and Policy in China. Beijing: China Social Sciences Press, 2006. [唐健. 我国耕地保护制度与政策研究. 北京: 中国社会科学出版社, 2006.]
- [32] Cao Zhengfeng. Research on optimization of random forest algorithm [D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2014. [曹正凤. 随机森林算法优化研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.]
- [33] Eka M S, Heru S, Prima W, et al. The rabies distribution pattern on dogs using average nearest neighbor analysis approach in the Karangasem District, Bali, Indonesia, in 2019. *Veterinary World*, 2021, 14(3): 614-624.
- [34] Altman N S. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 1992, 46(3): 175-185.
- [35] Sheather S J, Jones M C. A reliable data-based bandwidth selection method for kernel density estimation. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 1991, 53(3): 683-690.
- [36] Wang B, Shi W Z, Miao Z L. Confidence analysis of standard deviational ellipse and its extension into higher dimensional Euclidean space. *Plos One*, 2015, 10(3): e0118537. DOI: 10.1371/journal.pone.0118537.
- [37] Ward M D, Gleditsch K S. *Spatial Regression Models*. Thousand Oaks: Sage Publications, 2018.
- [38] Anselin L, Florax R J G M. Small sample properties of tests for spatial dependence in regression models: Some further results. *New Directions in Spatial Econometrics*. Berlin and Heidelberg: Springer, 1995: 21-74.
- [39] Vuong Q H. Likelihood ratio tests for model selection and non-nested hypotheses. *Econometrica*, 1989, 57(2): 307-333.
- [40] Chen X, Lin B Q. Assessment of eco-efficiency change considering energy and environment: A study of China's non-ferrous metals industry. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123388.
- [41] Sun Xiangdong, Zhang Liangliang. Geographical distribution of China's nonferrous metals industry: An empirical analysis based on spatial Dubin model. *Journal of Technology Economics*, 2016, 35(6): 96-100, 118. [孙祥栋, 张亮亮. 中国有色金属行业的地理分布: 基于空间杜宾模型的实证分析. *技术经济*, 2016, 35(6): 96-100, 118.]
- [42] He Canfei, Liang Jinshe, Zhang Hua. Location analysis of foreign funded manufacturing enterprises in Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 122-130. [贺灿飞, 梁进社, 张华. 北京市外资制造企业的区位分析. *地理学报*, 2005, 60(1): 122-130.]
- [43] Wang Junsong. Evolution of spatial pattern and influencing factors of manufacturing industries in Yangtze River Delta region. *Geographical Research*, 2014, 33(12): 2312-2324. [王俊松. 长三角制造业空间格局演化及影响因素. *地理研究*, 2014, 33(12): 2312-2324.]
- [44] Tan Shaohua, Ni Shaoxiang. Cause analysis of driving force of regional land use change. *Geography and Geo-Information Science*, 2005, 21(3): 47-50. [谭少华, 倪绍祥. 区域土地利用变化驱动力的成因分析. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(3): 47-50.]
- [45] Guang X, Chen J, Qu M K, et al. Effects of mining on the potentially toxic elements in the surrounding soils in China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153562. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153562.
- [46] Zhang Jianlin, Qu Mingkai, Chen Jian, et al. Meta-analysis of the effects of metal mining on soil heavy metal concentrations in Southwest China. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4414-4421. [张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 等. 中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析. *环境科学*, 2021, 42(9): 4414-4421.]
- [47] Li X N, Jiao W T, Xiao R B, et al. Soil pollution and site remediation policies in China: A review. *Environmental Reviews*, 2015, 23(3): 263-274.
- [48] Ministry of Ecology and Environment. Bulletin of the second national pollution source survey. Beijing: Ministry of Ecology and Environment. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020/2020-12-13. [生态环境部. 第二次全国污染源普查公报. 北京: 生态环境部. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk01/202006/t20200610_783547.html, 2020/2020-12-13.]

Spatio-temporal evolution and its driving factors of non-ferrous mining sites in China

WEI Changhe^{1,2}, LEI Mei^{1,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038,

Hebei, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As one of the pillar industries, the non-ferrous mining industry has caused severe environmental problems while supporting the development of the national economy. Understanding the spatial pattern and driving force of non-ferrous mining industrial sites (NMISs) is of great significance in promoting the optimization of industrial layout and the overall control of environmental pollution. However, the current research on the evolution of the national distribution pattern of NMISs is still insufficient, which is challenging to meet the actual needs of the existing related industry and environmental protection situation. In this paper, we obtained a high-resolution NMISs dataset, based on multi-source information fusion, including geographic big data, Gaode POI, and special environmental data. We also investigated the spatio-temporal pattern, evolution characteristics, and driving factors of NMISs from the beginning of the 20th century to 2019 based on the spatial regression model and the GIS platform. The results showed that the growth of NMISs in China has generally experienced a stable and slow development trend in the early period (before 1978), gradually reaching a peak after the reform and opening up (1979-2006), and then stabilizing again (2007-). With the continuous enhancement of spatial agglomeration of NMISs, the hotspot areas gradually extended from southeast Hunan and central Yunnan to central and western China, which is rich in resources and energy, presenting an agglomeration pattern of "four cores and multiple sub-cores". The cores include eastern Yunnan, the Hunan-Jiangxi-Guangdong junction area, southern Anhui, and western Henan. The sub-cores included parts of Northwest and Northeast China. Further, the above spatio-temporal evolution characteristics were controlled by the positive promotion of resource endowment, path dependence, and the earlier encouraging industrial policy. However, we observed the emerging negative restraining effect on the recent pattern of NMISs from the tightening of related restrictive industrial and environmental policies introduced intensively after 2010. This paper could provide a reliable scientific basis and information support for optimizing related macro-strategic decision-making and environmental spatial governance by analyzing spatio-temporal patterns and the driving factors of China's NMISs. Furthermore, this study proposed the methodological system for constructing national-scale high-precision industrial site datasets by applying multi-source geographic big data technology. The current paper also provided a new perspective and ideas for the related assessment at a large regional scale.

Keywords: non-ferrous mining; industrial site; spatio-temporal pattern; driving factors; multi-source geographic data