

赵积强, 吴先华, 赵红梅. 基于知识进化方法的大气污染灾害研究热点预测研究[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 156–161, 181. [ZHAO Jiqiang, WU Xianhua, ZHAO Hongmei. Research on Hot Spot Prediction of Air Pollution Disasters Based on Knowledge Evolution Method [J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 156–161, 181. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.024.]

基于知识进化方法的大气污染灾害 研究热点预测研究^{*}

赵积强¹, 吴先华¹, 赵红梅²

(1. 上海海事大学 经济管理学院, 上海 201306; 2. 上海交通大学 船舶与海洋建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 基于1980—2021年期间CNKI数据库中大气污染灾害研究的相关文献, 采用知识进化方法, 建立了一种适用于大气污染灾害研究热点预测模型, 并以2021年的大气污染物灾害防治研究进行了实证。结果表明: 预测模型准确率比传统灰度预测模型提升了21.43%; 环境政策等外部因素对热点预测模型影响较大; 2023年, 臭氧灾害防治和区域大气污染灾害协同治理是大气污染灾害研究领域的热点内容, 在外部政策影响下, 重污染天气消除和柴油货车污染治理成为新增研究热点。

关键词: 大气污染灾害; 知识进化; 趋势预测; 大气污染灾害防治

中图分类号: X51; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0156–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.024

随着气候变暖和静稳天气日数增加, 大气污染灾害成为我国生态文明建设中不容忽视的重要问题。挖掘并厘清大气污染灾害科学文献中的知识传递脉络、当前研究热点和未来趋势, 可以帮助科研人员迅速掌握研究先机以提高科研效率, 为政策制定者科学合理地分配环保资金和制定管制政策提供可靠依据^[1–4]。对加快实现生态环境绿色可持续发展具有重要指导价值和现实意义^[5–6]。但是, 如何在海量的文献中快速聚焦关键信息, 精准定位研究热点, 把握大气污染灾害领域的研究趋势, 成为学者们关心的重要问题^[7–8]。

大多数学者采用文献计量法预测研究趋势^[9–11]。文献计量法主要基于Citespace和Vosviewer等软件提取高频关键词, 梳理和归纳当前的研究热点, 对未来研究趋势进行预判^[12–15]。然而, 该方法缺乏客观的数学模型支撑, 具有一定的主观性^[16]。有的研究采用时间序列预测法、机器学习和灰度预测等方法预测研究热点和趋势^[17–18]。时间序列法(ARMA和AR等)是比较常用的线性研究趋势预测方法, 该方法基于历史时间序列进行回归, 分析未来的研究趋势, 消除了偶然事件造成的随机因素对预测结果的影响^[19]。但是, 时间序列预测法对数据的平滑性要求较高, 大气污染灾害领域的研究容易受政策和热点事件的影响, 导致数据平滑性较差。近年来, 机器学习领域的非线性预测方法(如SVM法等)被应用到研究热点预测中, 该方法具有适应性好、覆盖范围广和预测精准度高的特点^[20–21]。然而, 而机器学习对样本量的要求较高, 科研文献中的样本数据不够丰

富, 容易导致预测结果不稳定。灰度预测模型对小样本的预测具有独特优势^[22–23]。但是, 该方法难以考虑外部事件对研究趋势的影响, 从而降低预测精度。为准确地把握科学知识网络的演变规律和未来趋势, 英国哲学家KARL Popper基于达尔文进化论思想的启发提出知识进化理论^[24]。该方法普适性较好, 对样本量和数据特征要求较低, 同时考虑了外部环境对知识进化网络的影响, 对于学科的发展和知识创新具有重要作用。

本文运用知识进化理论, 提出一种大气污染灾害领域研究热点预测方法, 并以大气污染物灾害防治研究趋势预测为例进行了实证研究, 旨在为科研人员精准把握研究领域发展趋势提供辅助工具。

1 基于知识进化的热点分析模型

1.1 思路与方法

首先, 根据CNKI基础数据库的数据进行数据采集及预处理, 构建大气污染灾害领域文献数据集; 其次, 根据构建的大气污染灾害领域文献数据集, 提取关键词特征以及词频特征, 创建大气污染灾害领域热点关键词网络; 然后, 考虑大气污染灾害政策等外部环境对关键词网络演变的扰动影响, 基于知识进化理论建立一种大气污染灾害领域研究热点预测模型; 最后, 以大气污染灾害防治研究趋势预测为例展开实证分析和结果验证, 并预测2023年的研究热点。研究框架见图1。

* 收稿日期: 2022–12–11 修回日期: 2023–03–10

基金项目: 国家社科重大招标项目“大数据时代大气污染物排放的优化管控研究”(18ZDA052)

第一作者简介: 赵积强(1991–), 男, 汉族, 甘肃武威人, 博士研究生, 主要从事大气污染灾害管理研究。

E-mail: zhaojq@shmtu.edu.cn

通信作者: 吴先华(1977–), 男, 汉族, 湖北荆州人, 教授, 博士生导师, 主要从事灾害管理等研究。

E-mail: 185390@shmtu.edu.cn

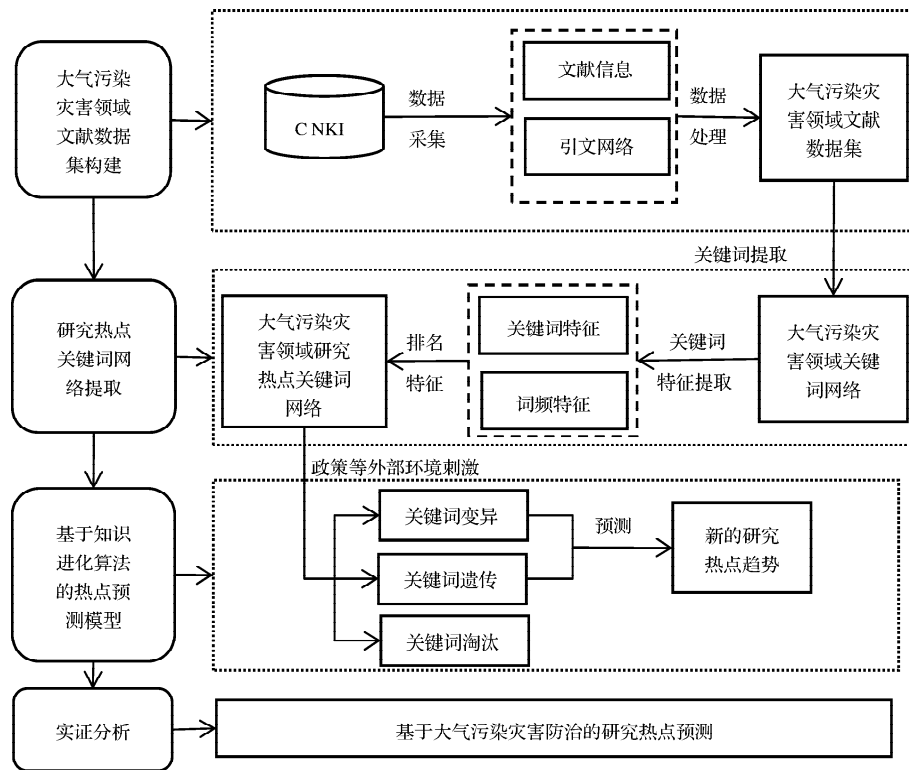


图1 研究方法的框架

1.2 知识进化理论

知识进化理论的核心思想源于达尔文的物种进化理论^[25-26]。该思想认为，物种种类和数量的发展基于遗传、变异和淘汰，适应新环境者被遗传下来，不适应新环境者将被大自然逐步淘汰，在新的阶段又有新物种加入，逐渐形成复杂的物种网络^[27-28]。与生物进化论相似，科学知识的进化及传播同样遵循优胜劣汰的规律。CAMPBELL在知识进化思想的基础上进一步指出，科学知识在传播过程中的保留和淘汰过程即为知识进化^[29]。受外部环境变化的影响，科学知识的传播随环境进行新旧更替方可保持其创新性和竞争性。例如，当面临全球变暖的困境和环境治理政策的调整时，大气污染灾害治理研究热点应适应外部环境变化，以保持其传播的稳定性。在知识进化过程中，与过去以及现在相适应的环境治理措施将被保留，不适应环境的治理措施将被淘汰，同时基于新挑战又会衍生出新的环境治理措施，并加入到知识传播网络中。因此，知识进化网络主要基于遗传、变异和淘汰三个因素来保障知识传播网络的稳定性和创新性。知识进化的原理如图2所示。

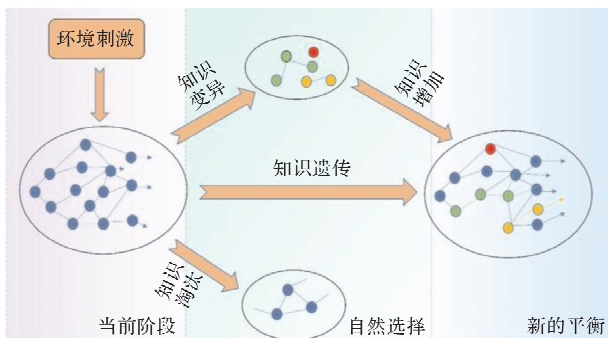


图2 知识传播网络演变示意图

1.3 进化权重系数

与物种进化过程类似，知识传播网络同样需要经历诞生→发展→稳定→衰落四个进化周期。在不同的进化时期，遗传、变异和淘汰的作用力也不尽相同。例如，在新知识诞生的发展初期，知识传播网络主要以奠定知识基础为主，因此，遗传作用力最大，变异作用和淘汰的作用力较小。在发展阶段，知识传播网络基础已经夯实，此时需要增加变异以进一步扩大知识传播网络。因此，遗传和变异作用力最强，淘汰的作用力较小。在稳定阶段，随着外界环境刺激的增加，知识传播网络的节点规模趋于稳定，遗传作用力和变异作用力和淘汰作用力接近平衡。在衰落阶段，最初遗传的知识传播网络中大部分的知识节点已经不能适应环境的要求，此时需要尽快将遗传的知识全部变异或淘汰，因此，淘汰作用力和变异作用力最大，遗传作用力最小。令 α_t 和 β_t 分别表示第 t 个时间段遗传、变异和淘汰三种作用力的权重系数，参考前人的权重设置思想^[30-32]，知识进化周期的四个阶段的权重设置如表1所示。

表1 遗传、变异和淘汰三种作用力的权重系数

知识进化周期	权重系数取值		
	α_t	β_t	γ_t
诞生期	0.80	0.10	0.10
发展期	0.45	0.45	0.10
稳定期	0.33	0.33	0.33
衰落期	0.10	0.45	0.45

1.4 外部环境集合

大气污染灾害领域的研究热点知识传播网络受政府大气污染管制政策和年度环境热词等外部

因素的影响较大^[33-35]。例如,2011年10月,北京市大气污染灾害在微博被热议,PM2.5成为了家喻户晓的年度热词后,2012年CNKI数据库中关键词“PM2.5”的相关发文量比2011年增长了71%;习近平主席在2020年9月的第七十五届联合国气候大会上提出,中国将在2030年和2060年分别实现碳达峰和碳中和的目标,同年该关键词被写入政府工作报告,2021年CNKI数据库中关键词“碳中和”的发文量比2020年增长了6.15倍。基于上述考虑,将国家生态环境部公布的大气污染灾害防治政策文件中的高频主题关键词和新提出的主题关键词等作为知识进化网络的外部环境集合。

1.5 预测模型建立

在前人总结的知识传播演化理论^[32]基础上,考虑淘汰因素,以遗传力、变异力和淘汰力为动力机制,建立环境领域知识网络演变趋势预测模型如下:

$$ST(t) = I(t) \cup V(t) \cup E(t); \quad (1)$$

$$ST(t+1) = ST(t) - E(t). \quad (2)$$

式中: $ST(t+1)$ 表示在 $t+1$ 时间段中知识传播网络的预测节点集合; $ST(t)$ 表示在第 t 阶段知识传播网络的节点集合; $I(t)$ 表示从 $t \rightarrow t+1$ 阶段遗传部分的节点集合; $V(t)$ 表示从 $t \rightarrow t+1$ 阶段为适应外部环境产生变异部分的节点集合; $E(t)$ 表示从 $t \rightarrow t+1$ 阶段经过自然选择被淘汰的节点集合; α_t 、 β_t 和 γ_t 分别表示遗传系数、变异系数和淘汰系数,满足:

$$\alpha_t + \beta_t + \gamma_t = 1. \quad (3)$$

令 $f(x, i)$ 为集合 x 中排名(关键词频次降序)前 i 个元素组成的子集,则 $t+1$ 阶段的知识传播网络节点由 t 阶段的知识传播网络节点、外部环境影响下知识传播网络的节点变异以及由于自然选择作用被淘汰知识节点共同决定。进一步表示为:

$$ST(t+1) = f(ST(t), \alpha_t \cdot |ST(t)|) \cup \bigcup_{k=1}^n f(A_{k,t}, h_{k,t} \cdot \beta_t \cdot |ST(t)|) - [ST(t) - f(ST(t), (1 - \gamma_t) \cdot |ST(t)|)]; \quad (4)$$

$$h_{k,t} = \frac{|A_{k,t} \cap ST(t)|}{\sum_{k=1}^n |A_{k,t} \cap ST(t)|}. \quad (5)$$

式中: $A_{k,t}$ 为时间段第 k 个外部环境集合; $h_{k,t}$ 为时间段第 k 个外部环境集合与知识传播网络的相互影响强度。

2 实证分析

2.1 研究对象和数据来源

为验证提出的知识进化理论预测模型的有效性,选取CNKI数据库中大气污染灾害防治的相关文献作为基础数据进行实证分析。首先,确定检索时间跨度为1980—2021年。其次,选取主题检索方式并对检索式进行反复校准,删除重复和信息缺失的关键词和文献,最终在CNKI中保留4570篇期刊文献。

2.2 大气污染灾害防治研究热点预测及结果分析

首先,确定进化权重系数。1980—2021年期

间的大气污染灾害防治相关研究的年度发文量统计结果如图3所示。CNKI关于大气污染灾害防治相关研究的发文量已经经历了缓慢发展→快速增长→趋于稳定三个阶段。由图3可知,1980—2010年处于缓慢上升的诞生期,该阶段的研究相对较少。2010—2014年处于急速上升的发展阶段。其中2013年国内核心期刊发文量年增长率达到历史最大值,其主要原因是,2013年春季和冬季,中国中东部地区发生了严重的雾霾事件^[36],同年国务院印发了《大气污染防治行动计划》^[37]。受雾霾事件和政府环境管控政策的双重影响,学者们在2013年对大气污染灾害防治研究的重视程度达到了历史最高。2014—2021年处于增速减缓的稳定阶段。其中,2018年生态文明首次被写入《中华人民共和国宪法修正案》^[38],《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》^[39]指出要坚决打赢蓝天、碧水和净土保卫战。受此影响,2019年大气污染灾害防治研究发文量达到历史最高。

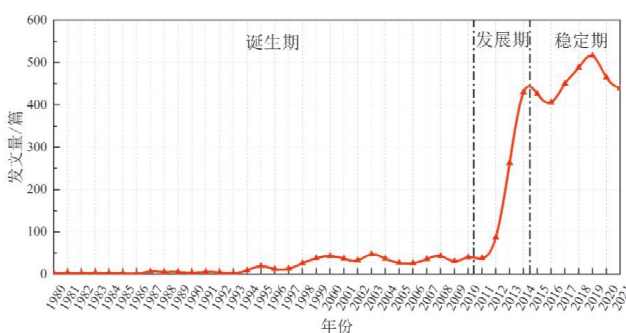


图3 CNKI中大气污染灾害防治相关研究的历史发文量趋势图

因此,选取2014—2020年关键词网络中频次排名前20位的关键词为训练集 $ST(2011-2020)$,以2021年的关键词网络为预测集 $ST(2021)$ 。通过对比2021年的关键词网络的实际值和预测值来验证预测效果。在稳定阶段,遗传作用力、变异作用力和淘汰作用力趋于平衡,故 α_t 、 β_t 和 γ_t 的取值均为0.33。

其次,确定影响关键词传播网络演化的外部环境关键词集合。大气污染灾害防治属于环境管制措施,其关键词演变网络主要受政府环境政策和年度污染事件影响较大^[40-42]。2020年,生态环境部印发的与大气污染灾害防治密切相关文件分别为《京津冀及周边地区、汾渭平原2020—2021年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》^[43]和《长三角地区2020—2021年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》^[44]。基于上述文件,选取与本文主题联系紧密的四个主题关键词作为外部环境子领域,分别为臭氧污染 $A_{1,2020}$ 、协同治理 $A_{2,2020}$ 、环境监测 $A_{3,2020}$ 和 VOCs 污染 $A_{4,2020}$ (表2)。由此形成基于大气污染灾害防治政策的外部子领域关键词网络,即:

$$A_{k,t} = \{A_{1,2020}, A_{2,2020}, A_{3,2020}, A_{4,2020}\}. \quad (6)$$

表 2 大气污染灾害防治外部环境关键词集合

外部环境集合	关键词
$A_{1,2020}$	臭氧污染, 污染特征, 气象条件, 气象因子, 气象要素, 大气污染, 影响因素, 污染防治, 臭氧浓度, 变化特征, 协同控制, 来源解析, 时空分布, 相关性
$A_{2,2020}$	协同治理, 生态环境, 京津冀, 大气污染, 环境治理, 黄河流域, 超低排放, 协同机制, 生态文明, 流域治理, 生态治理, 垃圾分类, 长三角, 燃煤电厂, 雾霾污染, 气候变化
$A_{3,2020}$	环境监测, 环境保护, 质量控制, 生态环境, 对策, 质量管理, 大气污染, 监测技术, 环境污染, 大气环境, 遥感技术, 影响因素, 环境治理, 发展措施
$A_{4,2020}$	排放特征, 臭氧, 来源解析, 排放清单, 吸附, 催化氧化, 催化燃烧, 影响因素, 甲苯, 污染特征, 排放因子, 催化剂, 源解析, 空间分布, 气相色谱, 源成分谱, 工业源

表 3 2021 年关键词网络预测结果

数据类别	主要关键词
$ST(2014-2020)$	大气污染, 污染特征, 臭氧, 空气污染, 京津冀, 来源解析, 重污染, 多环芳烃, 重金属, 影响因素, 细颗粒物, 有机碳, 空气质量, 时空分布, 氮氧化物, 元素碳, 雾霾, 气象因素, 臭氧污染, 环境污染
$ST(2021)$	大气污染, 污染特征, 臭氧, 京津冀, 来源解析, 重污染, 空气污染, 协同治理, 生态环境, 环境监测, 环境保护, 臭氧污染, 气象条件, 排放特征
$T(2021)$	大气污染, 臭氧, 污染特征, 环境监测, 臭氧污染, 污染治理, 来源解析, 氮氧化物, 气象条件, 治理措施, 协同治理, 后向轨迹, 京津冀, 空气污染

表 4 2023 年大气污染灾害防治领域研究热点预测

集合名称	关键词
$ST(2011-2022)$ 训练集	污染特征, 深度处理, 臭氧, PM2.5, 大气污染防治, 排放特征, 臭氧催化氧化, 京津冀, 来源解析, 重污染, 挥发物, 重金属, 影响因素, 细颗粒物, 有机碳, 空气质量, 时空分布, NOX, 雾霾, 气象因素
$A_{1,2022}$ 重污染消除	重污染企业, 环境规制, 绿色创新, 重污染行业, PM2.5, 重污染过程, 环保投资, 后向轨迹, 潜在源区, 污染特征, 双重差分模型, 经验证据, 重污染企业上市公司
$A_{2,2022}$ 臭氧污染防治	污染特征, 深度处理, 臭氧污染, 臭氧催化氧化, 气象条件, 来源解析, 排放特征, 挥发性有机物, 臭氧生成潜势, 光化学反应, NOX
$A_{3,2022}$ 柴油货车污染	排放清单, 柴油车, PM2.5, 来源解析, 重型柴油车, 污染特征, NOX, 机动车保有量, 挥发性有机物, 非道路移动源, 排放特征, 城市市区, 排放因子, 水溶性离子
$A_{4,2022}$ 联防联控	区域联防联控, PM2.5, 污染特征, 大气污染防治、京津冀地区、雾霾污染, 潜在源分析, 空间溢出效应, 前体物, 后向轨迹, 区域传输, 双重差分, 臭氧污染, 挥发性有机物, 传输路径
$ST(2023)$ 预测集	污染特征, 深度处理, 重污染企业, 环境规制, 臭氧, 大气污染防治, 排放特征, 臭氧污染, 来源解析, 区域联防联控, 重污染, 挥发物, 重金属, 影响因素, 细颗粒物, 时空分布, NOX, 雾霾, 柴油车污染

构建大气污染灾害防治关键词网络与臭氧污染、协同治理、环境监测和 VOCs 污染子领域关键词网络之间的连接, 并求出大气污染灾害防治关键词网络与其他子领域关键词网络之间的连接强度大小 $|A_{k,t} \cap ST(t)|$, 进而进一步通过式(5)和式(6)计算大气污染灾害防治与臭氧污染子领域关键

词网络之间的相互影响强度 $A_{1,2020}$ 、协同治理子领域关键词网络之间的相互影响强度 $A_{2,2020}$ 、环境监测子领域关键词网络之间的相互影响强度 $A_{3,2020}$ 和 VOCs 污染子领域关键词网络之间的相互影响强度 $A_{4,2020}$, 即:

$$h_{k,t} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{|A_{1,2020} \cap ST(2014-2020)|}{\sum_{k=1}^4 |A_{k,2020} \cap ST(2014-2020)|}, \frac{|A_{2,2020} \cap ST(2014-2020)|}{\sum_{k=1}^4 |A_{k,2020} \cap ST(2014-2020)|}, \\ \frac{|A_{3,2020} \cap ST(2014-2020)|}{\sum_{k=1}^4 |A_{k,2020} \cap ST(2014-2020)|}, \frac{|A_{4,2020} \cap ST(2014-2020)|}{\sum_{k=1}^4 |A_{k,2020} \cap ST(2014-2020)|} \end{array} \right\} = \{0.31, 0.21, 0.31, 0.17\}。 \quad (7)$$

由此可确定由于外部环境子领域关键词网络影响, 产生大气污染灾害防治变异的关键词集合:

$$V_t = \bigcup_{k=1}^4 f(A_{k,2020}, h_{k,2020} \times 0.33 \times |ST(2014-2020)|)。 \quad (8)$$

根据式(2), 可得出 2021 年大气污染灾害防治关键词网络预测集, 最终预测结果 $ST(2021)$ 与 2021 年的大气污染灾害防治关键词网络的实际值 $T(2021)$ 对比如表 3 所示。

2.3 不同预测模型结果对比

基于历史数据对未来发展趋势预测的工具较多,例如支持向量机 SVM、时间序列 ARMA 等方法。文献计量领域的历史数据通常具有样本较小和平滑性较差的特点。因此,一些学者选用在小样本预测领域具有显著优势的灰度预测模型(Gray Forecast Model)^[45-46]。但灰度预测模型无法准确的识别关键词,仅可对某一关键词的发文量进行预测。因此,选取 2014—2020 年大气污染灾害防治关键词集合中频次 ≥ 6 的 28 个关键词逐个进入灰度模型 GM(1, 1)来预测 2021 年的发文量。具体计算步骤如下:

假设第 i 个关键词在第 n 年的发文量为 $U_i^{(0)}(n)$, 则第 i 个关键词发文量的原始序列表达 $X^{(0)}$ 为:

$$X^{(0)} = \{U_i^{(0)}(1), U_i^{(0)}(2), \dots, U_i^{(0)}(10)\} \quad (9)$$

对上式进行一次累加得到序列 $X^{(1)}$:

$$X^{(1)} = \{U_i^{(1)}(1), U_i^{(1)}(2), \dots, U_i^{(1)}(10)\} \quad (10)$$

其中,

$$U_i^{(1)}(s) = \sum_{r=1}^s U_i^{(0)}(r), s = 1, 2, \dots, 10. \quad (11)$$

对公式(10)加权处理,则可得到均值序列为:

$$W^{(1)} = \{w_i^{(1)}(1), w_i^{(1)}(2), \dots, w_i^{(1)}(10)\}; \quad (12)$$

$$w_i^{(1)}(s) = \frac{U_i^{(1)}(s) + U_i^{(1)}(s-1)}{2} \quad (13)$$

将式(9)和式(12)代入灰色微分方程 $U_i^{(0)}(s) + a w^{(1)} = b$, 其中 a 为发展系数, b 为灰色作用量,二者可根据实际值由最小二乘法求得,则可得时间响应序列方程为:

$$\tilde{U}_i^{(1)}(s+1) = \left(\tilde{U}_i^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-as} + \frac{b}{a} \quad (14)$$

最终得到原始数据序列 $X^{(0)}$ 的预测值为:

$$\tilde{U}_i^{(0)}(s+1) = \tilde{U}_i^{(1)}(s+1) - \tilde{U}_i^{(1)}(s) \quad (15)$$

通过关键词重新排序,选取前 14 位的关键词,并和实际值进行对比。图 4 为灰度预测模型排名前 14 位的关键词训练集和预测集。

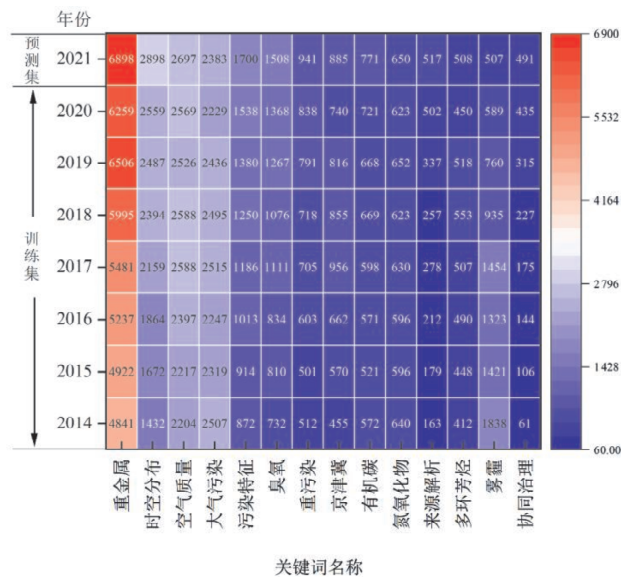


图 4 灰度预测模型训练集和预测集

图 5 列出了本文提出的知识进化预测模型和灰度预测模型的关键词网络预测值以及 2021 年的实际值。预测结果显示,灰度预测模型的 14 个关键词中有 7 个关键词和实际值一致,预测准确率为

50%。知识进化预测模型的 14 个关键词中有 10 个关键词和实际值一致,预测准确率为 71.43%。由此可见,相比灰度预测模型,本文建立的知识进化预测模型在充分考虑外部环境变量对关键词网络演化的影响后,对未来发展趋势的预测效果更准确。进而也发现生态环境政策对大气污染灾害防治研究热点的知识传播网络具有显著影响。

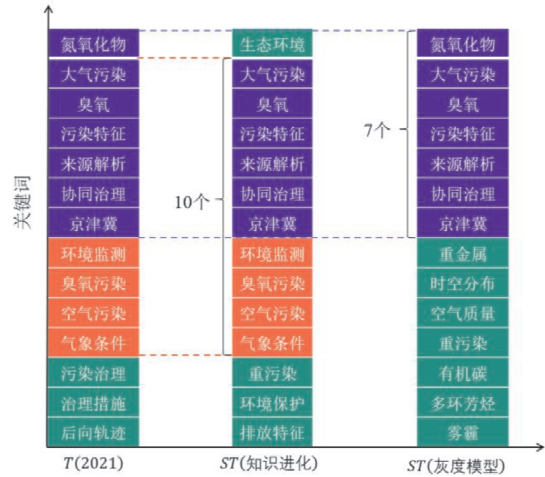


图 5 两种预测模型预测效果对比

2.4 2023 年大气污染灾害防治领域热点关键词预测

利用本文提出的预测模型对 2023 年大气污染灾害防治领域的热点关键词进行预测。首先,选取 CNKI 中 2014—2022 年的大气污染灾害防治领域排名前 20 的关键词作为训练集。其次,选取重污染消除、臭氧污染防治、柴油货车污染和联防联控为外部环境关键词集合。上述关键词均来自于 2022 年中共中央国务院发布的《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》^[47] 文件。表 4 为 2023 年大气污染灾害防治领域的研究热点预测相关集合。由此可知,2023 年,臭氧灾害防治和区域大气污染灾害协同治理仍旧是大气污染物灾害防治研究领域的热点内容,在外部政策影响下,重污染天气消除和柴油货车污染治理成为新增研究热点,排放特征分析和源解析同样受到学者关注。

3 结论及展望

考虑政府环境管制政策和年度环境热词等外部环境因素对研究热点知识进化网络的影响,基于知识进化理论建立了一种大气污染灾害研究热点趋势预测模型,并以大气污染灾害防治研究进行实证分析和验证。研究结果表明:

(1) 相比于灰度预测模型 GM(1, 1), 基于知识进化网络建立的关键词预测模型的准确率提升了 21.43%。

(2) 基于本文模型预测结果,2023 年,大气污染灾害防治领域的排名的热点关键词依次为: 污染特征,深度处理,重污染企业,环境规制,臭氧,大气污染防治,排放特征,臭氧污染,来源解析,区域联防联控,重污染,挥发物,重金属,影响因素,细颗粒物,时空分布,NOX,雾霾,柴油车污染。

(3) 为大气污染灾害研究热点定量分析提供了

一种途径和方法,通过构建模型和实证研究,证实了大气污染管制政策和年度环境热点关键词对知识网络进化过程具有显著影响,进一步分析了大气污染灾害领域知识进化演变规律。

未来,如何进一步准确界定外部环境变化因素,以及探索不同的变化因素对大气污染灾害领域知识进化网络演进规律的具体影响,如国际研究热点对国内研究趋势的引领作用等,值得进一步深入研究,以进一步提高预测模型的准确率。

参考文献:

- [1] DHITAL S, RUPAKHETI D, RUPAKHETI M, et al. A scientometric analysis of indoor air pollution research during 1990–2019 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 320: 115736.
- [2] PALANICHAMY Y, KARGAR M, ZOLFAGHARINIA H. Unearthing trends in environmental science and engineering research: Insights from a probabilistic topic modeling literature analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 317: 128322.
- [3] MOVAHED S M A, SARMAH A K. Global trends and characteristics of nano- and micro- bubbles research in environmental engineering over the past two decades: a scientometric analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147362.
- [4] 曾穗平, 赵茜雅, 田健. 基于智能算法的大气污染防治知识图谱: 研究方法、演化路径与应用展望 [J]. *灾害学*, 2022, 37(1): 120–128.
- [5] 郭跃, 尹婉玉. 中国灾害学科的发展态势研究: 基于文献统计分析的视角 [J]. *灾害学*, 2021, 36(4): 126–132.
- [6] BAZARGAN A, NEJATI M, HAJIKHANI H, et al. Cross sectional study of the top research topics in environmental science and engineering [J]. *Results in Engineering*, 2022, 14: 100465.
- [7] MATANDIROTYA N R. Research trends in the field of ambient air quality monitoring and management in South Africa: a bibliometric review [J]. *Environmental Challenges*, 2021, 5: 100263.
- [8] YANG F, LI X, GE F, et al. Dust prevention and control in China: a systematic analysis of research trends using bibliometric analysis and Bayesian network [J]. *Powder Technology*, 2022, 411: 117941.
- [9] XIANG C, WANG Y, LIU H. A scientometrics review on non-point source pollution research [J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 400–408.
- [10] YANG Y, GONG Y, WANG Y, et al. Advances in air pollution control for vessels in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 123: 212–221.
- [11] BAO Y, MEHMOOD K, SAIFULLAH, et al. Global research on the air quality status in response to the electrification of vehicles [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148861.
- [12] YAO L, HUI L, YANG Z, et al. Freshwater microplastics pollution: detecting and visualizing emerging trends based on Citespace II [J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125627.
- [13] LI Y, QI X. CiteSpace-based government WeChat research literature measurement and research trend analysis [J]. *Procedia Computer Science*, 2022, 199: 665–673.
- [14] COCOZZA A, MONTANARA D. Free-living nematodes research: state of the art, prospects, and future directions. A bibliometric analysis approach [J]. *Ecological Informatics*, 2022, 72: 101891.
- [15] ALI M, PRAKASH K, HOSSAIN M A, et al. Intelligent energy management: evolving developments, current challenges, and research directions for sustainable future [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127904.
- [16] 丁堃, 李鑫. 我国知识管理领域研究热点问题及发展趋势预测 [J]. *情报杂志*, 2007, 26(9): 2–4, 9.
- [17] SHIN W G, PARK M K, KIM D H, et al. Analysis of research performance and trends in environmental science [J]. *Journal of Environmental Science International*, 2020, 29(3): 283–297.
- [18] MA Q, LI Y D, ZHANG Y. Informetric analysis of highly cited papers in environmental sciences based on essential science indicators [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(11): 3781.
- [19] DING H, LI Z, REN Q, et al. Single-variable method for predicting trends in chlorophyll a concentration based on the similarity of time series [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109027.
- [20] MEHMOOD K, BAO Y, SAIFULLAH, et al. Predicting the quality of air with machine learning approaches: Current research priorities and future perspectives [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 379: 134656.
- [21] POPOFF B, OCCHIALI É, GRANGÉ S, et al. Trends in major intensive care medicine journals: a machine learning approach [J]. *Journal of Critical Care*, 2022, 72: 154163.
- [22] CHEN H, YANG Z, PENG C, et al. Regional energy forecasting and risk assessment for energy security: New evidence from the Yangtze River Delta region in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 361: 132235.
- [23] 姚金海, 邹家骏. 国内恩格斯研究进展与趋势展望: 基于文献计量与关键词趋势预测 [J]. *青海民族大学学报(社会科学版)*, 2021, 47(2): 70–82.
- [24] 王霞, 柯佑祥. 知识进化视角下高校智库影响力提升研究 [J]. *中国高校科技*, 2021(12): 40–44.
- [25] MARCIANO A, KOPPL R. Darwin, Darwinism and social Darwinism: what do we learn from Darwin's theory of social evolution? [J]. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2009, 71(1): 1–3.
- [26] PEREIRA V, BAMEL U, TEMOURI Y, et al. Mapping the evolution, current state of affairs and future research direction of managing cross-border knowledge for innovation [J]. *International Business Review*, 2023, 32(2): 101834.
- [27] KORNENKO A A. Outline of synthesis of cognitive and socio-cultural foundations of scientific knowledge evolution in research programs of western philosophy of science [J]. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2015, 166: 387–392.
- [28] HUO C, MA S, LIU X. Hotness prediction of scientific topics based on a bibliographic knowledge graph [J]. *Information Processing & Management*, 2022, 59(4): 102980.
- [29] CAMPBELL D T. Blind variation and selective retention in creative thought as in other knowledge processes [J]. *Psychological Review*, 1960, 67: 380–400.
- [29] CAMPBELL D T. Blind variation and selective retention in creative thought as in other knowledge processes [J]. *Psychological Review*, 1960, 67: 380–400.
- [30] INKPEN A C, TSANG E W. Social capital, networks, and knowledge transfer [J]. *Academy of Management Review*, 2005, 30(1): 146–165.
- [31] 张建华. 知识管理中的知识进化绩效评价机制研究 [J]. *科学与科学技术管理*, 2013, 34(7): 28–37.
- [31] 张建华. 知识管理中的知识进化绩效评价机制研究 [J]. *科学与科学技术管理*, 2013, 34(7): 28–37.
- [32] 丁玉飞, 关鹏. 知识进化视角下科学文献传播网络演化与预测研究及应用 [J]. *图书情报工作*, 2018, 62(4): 72–80.
- [33] GOYAL P, GULIA S, GOYAL S K. Development of strategic air quality improvement framework for urban hotspots [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 380: 134886.
- [34] WEN Q, ZHANG T. Economic policy uncertainty and industrial pollution: the role of environmental supervision by local governments [J]. *China Economic Review*, 2022, 71: 101723.
- [35] LI G, ZHANG R, MASUI T. CGE modeling with disaggregated pollution treatment sectors for assessing China's environmental tax policies [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 761: 143264.
- [36] LI J, FU Q, HUO J, et al. Tethered balloon-based black carbon profiles within the lower troposphere of Shanghai in the 2013 East China smog [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 327–338.
- [37] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [Z/OL]. (2013-09-13) [2022-08-01]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm.
- [38] 中国人民代表大会. 中华人民共和国宪法修正案 [Z/OL]. (2018-03-11) [2022-08-01]. http://www.npc.gov.cn/zgrdw/npc/lftz/rlyw/node_33714.htm.
- [39] 国务院. 中共中央 国务院关于全面加强生态环境保护 坚决打好污染防治攻坚战的意见 [Z/OL]. (2018-06-06) [2022-08-01]. http://www.gov.cn/jzhengce/2018-06/24/content_5300953.htm.
- [40] ZHAO J, WU X, GUO J, et al. Allocation of SO₂ emission rights in city agglomerations considering cross-border transmission of pollutants: a new network DEA model [J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119927.
- [41] GUO J, ZHAO M, WU X, et al. Study on the distribution of PM emission rights in various provinces of China based on a new efficiency and equity two-objective DEA model [J]. *Ecological Economics*, 2021, 183: 106956.
- [42] ZHAO J, WU X, GUO J, et al. Study on the allocation of SO₂ emission rights in the Yangtze River Delta city agglomeration region of China based on efficiency and feasibility [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104237.