

基于土地利用回归模型的大气污染研究 文献计量学及可视化分析

张钰娟 周东花 白志鹏 薛凤霞

300211 天津医科大学第二医院(张钰娟); 300070 天津医科大学图书馆(周东花);
100012 北京,中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室(白志鹏);
300052 天津医科大学总医院(薛凤霞)

通信作者:薛凤霞, Email:fengxiaxue1962@163.com; 白志鹏, Email:baizp@craes.org.cn
DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2018.02.018

【摘要】 目的 定量分析基于土地利用回归(LUR)模型的大气污染研究现状和发展趋势。
方法 检索 PubMed 数据库 2017 年 6 月 30 日前收录的相关文献,采用书目共现分析系统(BICOMB 2.0)统计文献计量学指标,运用引文空间信息可视化分析软件(CiteSpace 5.1.R5)生成关键词共现网络、聚类图谱和时间线图谱,并分析 3 个中文数据库的相关文献。**结果** PubMed 数据库检索到 464 篇文献,年份发文量符合指数增长趋势。发文最多的期刊是 *Environmental Health Perspectives*。共词聚类分析得到 5 个聚类(根据 CiteSpace 5.1.R5 软件自动生成序号):#0 基于出生队列的产前空气污染暴露及健康效应;#1 LUR 模型构建及暴露评估;#2 交通暴露的流行病学;#3 超细颗粒物暴露及健康效应;#4 黑碳暴露及健康效应。时间线图谱显示聚类#0 和#1 是主要研究领域,聚类#3 和#4 是前沿研究领域。中文数据库共检索到 94 篇文献,主要为建模研究。**结论** 我国应开展更多基于 LUR 模型的环境流行病学研究,精细评估大气污染的健康风险。

【关键词】 空气污染; 文献计量学; 聚类分析; 环境流行病学; 土地利用回归模型

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB503801)

Bibliometrics and visualization analysis of land use regression models in ambient air pollution research Zhang Yujuan, Zhou Donghua, Bai Zhipeng, Xue Fengxia

The Second Hospital of Tianjin Medical University, Tianjin 300211, China (Zhang YJ); Library of Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China (Zhou DH); State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China (Bai ZP); Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China (Xue FX)

Corresponding authors: Xue Fengxia, Email: fengxiaxue1962@163.com; Bai Zhipeng, Email: baizp@craes.org.cn

【Abstract】 Objective To quantitatively analyze the current status and development trends regarding the land use regression (LUR) models on ambient air pollution studies. **Methods** Relevant literature from the PubMed database before June 30, 2017 was analyzed, using the Bibliographic Items Co-occurrence Matrix Builder (BICOMB 2.0). Keywords co-occurrence networks, cluster mapping and timeline mapping were generated, using the CiteSpace 5.1.R5 software. Relevant literature identified in three Chinese databases was also reviewed. **Results** Four hundred sixty four relevant papers were retrieved from the PubMed database. The number of papers published showed an annual increase, in line with the growing trend of the index. Most papers were published in the journal of *Environmental Health Perspectives*. Results from the Co-word cluster analysis identified five clusters: cluster #0 consisted of birth cohort studies related to the health effects of prenatal exposure to air pollution; cluster #1 referred to land use regression modeling and exposure assessment; cluster #2 was related to the epidemiology on traffic exposure; cluster #3 dealt with the exposure to ultrafine particles and related health effects; cluster #4 described the exposure to black carbon and related health effects. Data from Timeline mapping indicated that cluster #0 and #1 were the main research areas while cluster #3 and #4 were the up-coming hot areas of research. Ninety four relevant papers were retrieved from the Chinese databases with most of them related to studies on modeling. **Conclusion** In order to better assess the health-related risks of ambient air pollution, and to best inform preventative public

health intervention policies, application of LUR models to environmental epidemiology studies in China should be encouraged.

【Key words】 Air pollution; Bibliometrics; Cluster analysis; Environmental epidemiology; Land use regression models

Fund program: National Key Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB503801)

我国大气污染形势严峻。2016年全国75.1% (254/338)的监测城市环境空气质量超标,80.3% 的重度和严重污染日的首要污染物为细颗粒物($PM_{2.5}$)^[1]。全球疾病负担研究显示,2016年我国约有108万例死亡归因于大气 $PM_{2.5}$ 污染^[2]。高浓度空气污染物对人类健康的影响备受关注,如何科学评估其造成的健康风险,如何采取干预措施减缓风险、更好地保护人群健康,成为亟待解决的研究课题^[3]。精细、准确的暴露评估,是明确污染物与健康效应之间暴露-反应关系的必要前提,也是开展暴露-生物标志物和暴露-效应机制研究的重要基础。

空气污染暴露评估方法主要包括个体采样法、生物标志物法、环境监测站法和模型法等。在大规模环境流行病学研究中,直接对每位研究对象进行个体采样监测和生物标志物检测的难度较大。我国现有研究多将邻近环境监测站的污染物浓度作为人群或个体暴露水平,存在暴露评估偏差大的问题^[4]。土地利用回归(land use regression, LUR)模型是近年发展的具有高时空分辨率优势的暴露评估方法,基于地理信息系统,结合土地利用类型、交通数据、海拔地形、人口密度、气象因素和污染源排放等环境因素,高效模拟目标污染物浓度的空间分布。模型经时间调整后,可精细模拟每位研究对象住址对应点位每日的目标污染物浓度,显著提高了室外空气污染的个体暴露评估效能^[5]。本研究通过对国内外LUR模型相关文献进行计量学和可视化分析,展现该领域的研究现状、热点主题、演化过程和发展趋势,为我国学者选择研究方向和切入点、开展基于LUR模型的环境流行病学研究提供参考。

资料与方法

1. 资料来源:国际权威生物医学文献检索系统PubMed数据库、中国知网(CNKI)、万方数据知识服务平台和中国生物医学文献数据库(CBM)中收录的基于LUR模型的大气污染研究文献。

2. 检索策略:在PubMed数据库以“land use regression”为检索词,全字段搜索2017年6月30日前收录的所有文献。为避免遗漏,另以检索式[LUR NOT “land use regression”]对“LUR”缩写形式进行全字段搜索。在CNKI、万方数据知识服务平台

台和CBM均以[“土地利用回归”或“土地使用回归”]为检索式,从全文范围内搜索建库至2017年6月30日的所有中文文献,采用NoteExpress 2.0软件做去重处理,并进一步人工去重。

3. 统计学分析:采用文献计量学和可视化分析的方法对检出文献的题录信息和研究主题进行统计分析,分析软件包括书目共现分析系统(Bibliographic Items Co-occurrence Matrix Builder, BICOMB 2.0软件)、引文空间信息可视化分析软件(CiteSpace 5.1.R5)和Excel 2007软件。将PubMed检索到的文献题录信息下载保存为XML格式文档并导入BICOMB 2.0软件,提取年份发文量、语种、发刊国别、作者、期刊、MeSH主题词等常用文献计量学指标作为关键字段,进行频次统计和构成比分析,将统计结果导出至Excel 2007软件以表格形式显示。采用CiteSpace 5.1.R5软件的聚类视图和时间线视图功能对PubMed检索到的文献进行关键词共现分析,绘制的科学网络知识图谱能显示一个学科或知识领域在一定时期发展的趋势与动向^[6]。

结 果

1. 发文量及变化趋势:在PubMed数据库以“land use regression”检索获得461篇文献;以[LUR NOT “land use regression”]检索获得100篇文献,由两位研究者分别独立阅读题目及摘要,必要时阅读全文并共同核对,筛选出3篇LUR模型相关文献^[7-9];故合计为464篇,导入BICOMB 2.0软件进行数据分析。自2005年起逐渐出现LUR模型领域的研究,趋势线分析显示,年份发文量符合指数增长趋势(图1)。将趋势线与经典的研究领域发文量演变“S曲线”进行比对,提示尚处于发展早期,即将进入扩张期,预计发文量增长速度会进一步加快^[10]。

2. 语种及发刊国别:文献语种以英文为主,占98.7%(458/464);另收录中文文献3篇^[5, 11-12],西班牙文、意大利文、俄文各1篇。美国期刊的发文量居首位,占47.0%(218/464);其次为荷兰(24.4%, 113/464)和英国(21.8%, 101/464)。

3. 作者分布:位居该领域发文量前3名的作者均来自荷兰,分别为Bert Brunekreef(77篇)、Gerard Hoek(69篇)和Rob M. J. Beelen(61篇);其次为英国

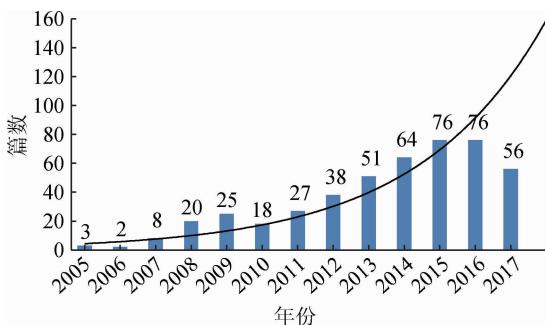


图1 PubMed数据库LUR模型相关文献发文量及趋势线

的Kees de Hoogh(45篇)、加拿大的Michael Brauer(44篇)和美国的Michael Jerrett(44篇)。

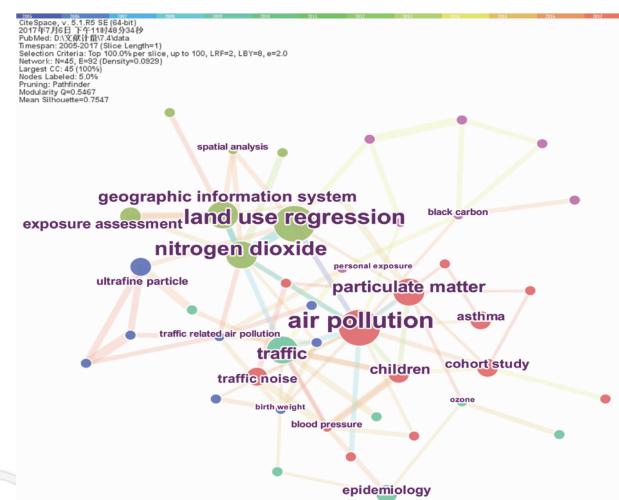
4. 期刊分布:464篇文献发表于全球84种期刊,排名前5位的是Environmental Health Perspectives(63篇)、Environmental Science & Technology(55篇)、Science of The Total Environment(41篇)、Environmental Research(40篇)和Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology(23篇),累计发文量占全部文献的47.8%。

5. 高频主题词:464篇文献通过BICOMB 2.0软件共提取出281个MeSH主要主题词,总出现频次为1 613次。前10位的高频主题词依次为Air Pollutants(空气污染物)、Air Pollution(空气污染)、Environmental Exposure(环境暴露)、Particulate Matter(颗粒物)、Vehicle Emissions(车辆排放物)、Environmental Monitoring(环境监测)、Nitrogen Dioxide(二氧化氮)、Models, Theoretical(模型,理论)、Maternal Exposure(母亲暴露)和Asthma(哮喘);累计频次占总频次的61.4%。

6. 共词聚类可视化分析:初始运行CiteSpace软件生成的共现网络包括59个节点关键词,查询节点信息,将含义相同的节点(单复数、全称、简称、同义词等)进行合并,如将“land use regression(lur)”、“lur”及“land use regression model”均合入“land use regression”,获得准确代表该领域研究主题的45个节点关键词。重新运行生成了更简明清晰的关键词共现网络。

(1)聚类图谱:对关键词共现网络进行聚类分析,自动聚为5类并生成可视化聚类图谱(图2)。每个圆形节点代表1个关键词,节点的圆形和节点标签的字母越大,说明该关键词的共现频次越高,图谱中显示了共现频次前20位的节点标签。每个聚类用一种颜色表示,5个聚类分别代表了5个研究方向(子领域)。图谱的网络模块度为0.55,表明聚类效果理想;CiteSpace软件研发者陈超美^[13]认为,模块

度在0.4~0.8之间的聚类即可较清楚地界定出研究的各个子领域。图谱的平均轮廓值为0.75,表明各聚类内部有很好的同质性;轮廓值越接近1,反映聚类内部的同质性越高^[14]。



注:共词聚类分析得到5个聚类,每个聚类用一种颜色表示:红色#0基于出生队列的产前空气污染暴露及健康效应;橄榄色#1 LUR模型构建及暴露评估;浅绿色#2 交通暴露的流行病学;蓝色#3 超细颗粒物暴露及健康效应;紫色#4 黑碳暴露及健康效应。图谱中显示了共现频次前20位的关键词,其节点标签的字母越大,关键词共现频次越高

图2 PubMed数据库LUR模型相关文献的共词聚类图谱

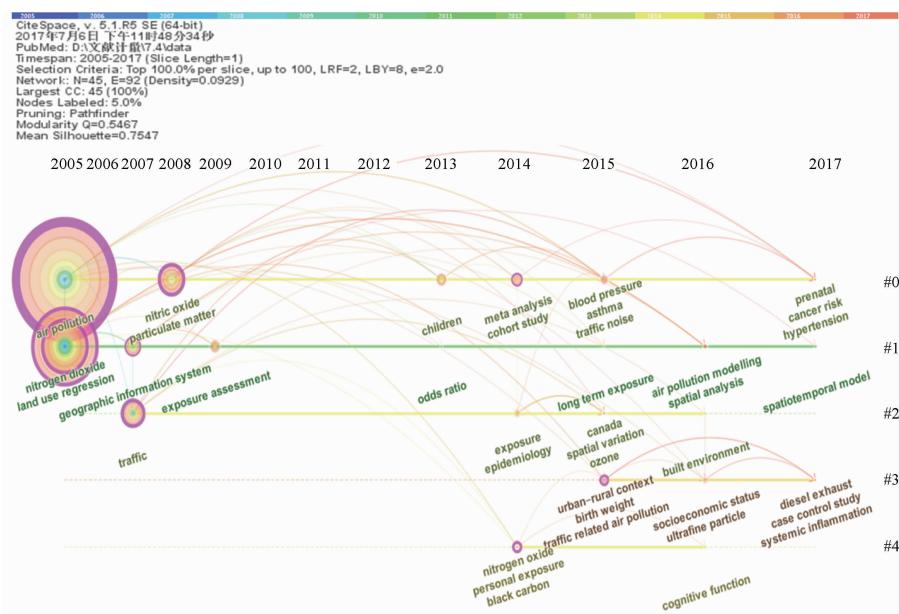
5个聚类的节点个数分别为7~13个,节点关键词按共现频次从高到低的顺序列出,各聚类轮廓值为0.68~0.79,关键词的平均年份为2011—2016年(表1)。通过软件的log-likelihood ratio(LLR)算法自动提取标识词,生成5个聚类标签,即出生队列、暴露评估、流行病学、超细颗粒物和黑碳。再将聚类标签与各自的节点关键词相结合分析,归纳出目前国际上LUR模型的5个子领域(根据CiteSpace 5.1.R5软件自动生成序号):#0基于出生队列的产前空气污染暴露及健康效应;#1 LUR模型构建及暴露评估;#2 交通暴露的流行病学;#3 超细颗粒物暴露及健康效应;#4 黑碳暴露及健康效应。

(2)时间线图谱(图3):5条横线分别代表5个子领域,线下方列出了该领域的节点关键词,每个子领域每年可列出频次最高的3个词。时间线图谱可直观、清晰地展示各子领域发展演变的时间跨度,如聚类#0和#1贯穿了从2005年至今的LUR模型发展的全程,提示这两个是LUR模型的主要研究领域;而聚类#3和#4分别从2015和2014年开始兴起,平均年份也较新,提示这两个是LUR模型的前沿研究领域。

时间线图谱还可展示各子领域的发展轨迹和研

表1 PubMed数据库LUR模型相关文献的共同聚类结果

聚类号	聚类标签	节点个数	轮廓值	平均年份	节点关键词
0	birth cohort (出生队列)	13	0.783	2013	air pollution(空气污染), particulate matter(颗粒物), children(儿童), traffic noise(交通噪声), cohort study(队列研究), asthma(哮喘), blood pressure(血压), meta analysis(Meta分析), birth cohort(出生队列), prenatal(产前), nitric oxide(一氧化氮), cancer risk(癌症风险), hypertension(高血压)
1	exposure assessment (暴露评估)	9	0.778	2011	land use regression(土地利用回归), nitrogen dioxide(二氧化氮), geographic information system(地理信息系统), exposure assessment(暴露评估), spatial analysis(空间分析), air pollution modelling(空气污染建模), odds ratio(比值比), spatiotemporal model(时空模型), long term exposure(长期暴露)
2	epidemiology (流行病学)	8	0.683	2013	traffic(交通), epidemiology(流行病学), ozone(臭氧), exposure(暴露), spatial variation(空间变异), built environment(建筑环境), public health(公共卫生), Canada(加拿大)
3	ultrafine particle (超细颗粒物)	8	0.791	2016	ultrafine particle(超细颗粒物), traffic related air pollution(交通相关空气污染), birth weight(出生体重), diesel exhaust(柴油机尾气), urban-rural context(城乡背景), case control study(病例对照研究), systemic inflammation(全身性炎症), socioeconomic status(社会经济状况)
4	black carbon (黑碳)	7	0.739	2014	black carbon(黑碳), personal exposure(个体暴露), nitrogen oxide(氮氧化物), exposure modeling(暴露建模), traffic pollution(交通污染), cognitive function(认知功能), pregnancy(妊娠)



注:5个聚类分别用5条自左向右的时间轴横线表示,节点关键词按其平均年份列于所属聚类的时间线下方,每个聚类每年最多可列出3个关键词

图3 PubMed数据库LUR模型相关文献的关键词时间线图谱

究趋势。整体观察图谱,发现关键词明显聚集在2个时间区域:左侧的2005—2009年为模型构建初期,主要涉及NO₂、NO和颗粒物的暴露评估;右侧的2013年至今为环境流行病学研究阶段。聚类#0和#2体现了从模型构建向环境流行病学研究方向的转化,通过队列研究探讨母体孕期空气污染暴露对子代健康的影响。聚类#3和#4拓展了LUR模型的目标污染物范围,评估超细颗粒物和黑碳的暴露剂量和健康效应。

图谱中紫色圆圈所标识的节点是具有高度中心性的关键词,包括两类,即与其他节点密切相连的枢纽节点和联结不同聚类的节点^[15]。图谱左侧建模阶

段的6个紫圈分别为空气污染、交通、LUR、NO₂、颗粒物和地理信息系统,均为建模的基本元素,也是网络的枢纽节点。图谱右侧环境流行病学研究阶段有3个紫圈,分别代表黑碳、交通相关空气污染和队列研究,是联结不同聚类的导致新兴趋势出现的重要转折点^[13]。

7. 中文数据库检索结果:检索CNKI、万方和CBM,合并去重后人工筛选,得到94篇LUR模型相关的中文文献。陈莉等^[16]于2009年率先在国内探索LUR模型的构建方法,模拟了天津市大气PM₁₀和NO₂浓度的空间分布。后续相关文献逐渐增多,年份发文量亦符合指数增长趋势(图4)。

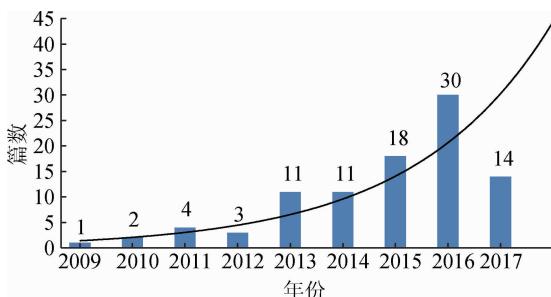


图4 3个中文数据库LUR模型相关文献的总发文量及趋势线

为进一步探究94篇LUR模型中文文献的研究内容,两位研究者分别逐篇阅读题目及摘要,必要时阅读全文并共同核对。发现30篇为模型构建研究,2篇为基于LUR模型的环境流行病学研究^[17-18],13篇为英文文献摘要的译文,其余为提及LUR模型的综述、论著或学位论文。同时,对PubMed收录的我国学者发表的19篇LUR模型文献进行归纳,包括建模研究15篇、环境流行病学研究2篇^[19-20]和综述2篇。

讨 论

1. 基于出生队列的产前空气污染暴露及健康效应:孕期空气污染暴露可能导致早产、低出生体重、出生缺陷、胎儿生长发育迟缓等多种不良妊娠结局^[21-22],但现有环境流行病学研究结果间的异质性较高,关联与否、关联强度的大小仍存在争议^[5]。队列研究具有暴露与健康效应时序关系明确、能在个体水平控制混杂因素的优点,是目前国际上公认的评价大气污染对人群健康影响最为理想的方法^[23]。我国大气污染严重,应尽快实现从LUR建模阶段向环境流行病学研究阶段的转型,开展出生队列研究,评估孕期高浓度污染物暴露对妊娠结局和子代健康的影响,以及暴露-反应关系是否存在阈值效应等。

2. LUR模型构建及暴露评估:为增强模型对污染物浓度空间分布的解释能力,可通过获取更详尽、精确的建模变量信息,还可尝试将卫星遥感数据融入LUR模型的构建^[24-25]。时间调整LUR模型采用背景监测站目标污染物日均浓度与年均浓度的比值作为调整系数代入回归方程,得到任意暴露窗尤其是短期暴露窗的日均值,经验证获得了更高的拟合度^[26]。但我国部分地区大气污染严重,需要评估背景监测站的数据是否能反映当地背景值。因此,亟待开展相应污染物的区域背景值研究,获得精细有效的区域背景值,将模型的时间分辨率提高至“每天”,从而使我国的时间调整LUR模型可动态反映污染物的短期浓度波动,满足大气污染急性健康效

应评估的需求。

3. 交通相关空气污染:LUR模型的建模变量包括了道路类型、长度、车流量等交通特征因素,因此可用于交通相关空气污染的暴露评估。当前交通相关空气污染是城市大气颗粒物的主要来源^[27],对人体呼吸、心血管、神经和生殖系统的影响日益受到关注^[28]。我国部分城市交通运输压力大、机动车尾气排放严重,亟需评估交通相关空气污染对健康的影响,或评价限号限行等措施对人群暴露及健康效应的干预效果。

4. 超细颗粒物与黑碳:超细颗粒物是指空气动力学当量直径<0.1 μm的颗粒物,也叫纳米颗粒物。毒理学研究提示超细颗粒物可对人体的呼吸、心血管、中枢神经及消化系统产生危害,并有潜在的致癌风险^[29]。黑碳由含碳物质不完全燃烧产生,是PM_{2.5}的主要组分之一,与心血管疾病和肺癌死亡率有关,并可能对出生结局和中枢神经系统造成不良影响^[30-31]。我国研究者也初步尝试了LUR模型对黑碳浓度的空间模拟^[32],尚未见关于超细颗粒物的LUR模型报道。今后应运用采样车移动监测、无人机航空监测等技术,获取超细颗粒物和黑碳的空间分布数据,拓展LUR模型的目标污染物种类,并用于环境流行病学研究。

本研究对基于LUR模型的大气污染研究文献进行计量学和可视化分析,清晰展示了该领域的研究主题及演化进程,为我国应用LUR模型开展相关研究提供参考依据。我国尚处于LUR模型构建和初步应用阶段,亟待开展基于该模型的环境流行病学研究,精细评估高浓度大气污染物长期和急性暴露的健康风险,为采取有效的防控干预措施、保护公众健康提供科学依据。

利益冲突 无

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2016中国环境状况公报[R]. 北京:中华人民共和国环境保护部,2017:7-16.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. The 2016 report on the state of the environment in China [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, 2017:7-16.
- [2] Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). GBD Compare Data Visualization [EB/OL]. Seattle, WA: IHME, University of Washington, 2017. (2017-09-14) [2017-09-16]. <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>.
- [3] 施小明. 应重视大气污染和气候变化急性健康风险评估与适应研究[J]. 中华流行病学杂志, 2017, 38(3): 280-282. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.002.
Shi XM. Attaching importance to study on acute health risk assessment and adaptation of air pollution and climate change [J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38(3): 280-282. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.002.
- [4] Bai ZP, Han JB, Azzi M. Insights into measurements of ambient air PM_{2.5} in China [J]. Trend Environ Anal Chem, 2017, 13:

- 1–9. DOI: 10.1016/j.teac.2017.01.001.
- [5] 张钰娟,薛凤霞,白志鹏.时间调整土地利用回归模型用于孕期空气污染暴露评估的研究进展[J].中华预防医学杂志,2017,51(3):265–276. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2017.03.015.
Zhang YJ, Xue FX, Bai ZP. Applying temporally-adjusted land use regression models to estimate ambient air pollution exposure during pregnancy [J]. Chin J Prev Med, 2017, 51(3) : 265–276. DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2017.03.015.
- [6] 陈超美,陈悦,侯剑华,等. CiteSpace II :科学文献中新趋势与新动态的识别与可视化[J]. 情报学报,2009,28(3):401–421. DOI:10.3772/j.issn.1000-0135.2009.03.012.
Chen CM, Chen Y, Hou JH, et al. CiteSpace II : detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. J Chin Soc Sci Technol Informat, 2009, 28 (3) : 401–421. DOI:10.3772/j.issn.1000-0135.2009.03.012.
- [7] Saraswat A, Kandlikar M, Brauer M, et al. PM_{2.5} population exposure in New Delhi using a probabilistic simulation framework [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50 (6) : 3174–3183. DOI:10.1021/acs.est.5b04975.
- [8] Colicino E, Power MC, Cox DG, et al. Mitochondrial haplogroups modify the effect of black carbon on age-related cognitive impairment [J]. Environ Health, 2014, 13(1):42. DOI: 10.1186/1476-069X-13-42.
- [9] Ghosh JK, Wilhelm M, Su J, et al. Assessing the influence of traffic-related air pollution on risk of term low birth weight on the basis of land-use-based regression models and measures of air toxics [J]. Am J Epidemiol, 2012, 175(12) : 1262–1274. DOI: 10.1093/aje/kwr469.
- [10] Shibata N, Kajikawa Y, Matsushima K. Topological analysis of citation networks to discover the future core articles [J]. J Am Soc Inf Sci Technol, 2007, 58 (6) : 872–882. DOI: 10.1002/asi.20529.
- [11] 吴健生,谢舞丹,李嘉诚. 土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用[J]. 环境科学,2016,37(2):413–419. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.02.002.
Wu JS, Xie WD, Li JC. Application of land-use regression models in spatial-temporal differentiation of air pollution [J]. Environ Sci, 2016, 37 (2) : 413–419. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.02.002.
- [12] 吴健生,廖星,彭建,等. 重庆市PM_{2.5}浓度空间分异模拟及影响因子[J]. 环境科学,2015,36 (3) : 759–767. DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.03.001.
Wu JS, Liao X, Peng J, et al. Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing [J]. Environ Sci, 2015, 36 (3) : 759–767. DOI: 10.13227/j.hjkx.2015.03.001.
- [13] 陈超美. 如何选取CiteSpace中的各项参数[EB/OL]. (2010-10-31) [2017-06-16]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-496649-378974.html>.
Chen CM. How to select the parameters in CiteSpace [EB/OL]. (2010-10-31) [2017-06-16]. <http://blog.sciencenet.cn/blog-496649-378974.html>.
- [14] 李杰. CiteSpace中文版指南(2015) [EB/OL]. (2015-05-03) [2017-06-16]. <http://cluster.ischool.drexel.edu/~ccchen/citespace/manual/CiteSpaceChinese.pdf>.
Li J. Chinese version of the guide of CiteSpace (2015) [EB/OL]. (2015-05-03) [2017-06-16]. <http://cluster.ischool.drexel.edu/~ccchen/citespace/manual/CiteSpaceChinese.pdf>.
- [15] Chen CM. Science mapping:a systematic review of the literature [J]. J Data Informat Sci, 2017, 2 (2) : 1–40. DOI: 10.1515/jdis-2017-0006.
- [16] 陈莉,白志鹏,苏笛,等. 利用LUR模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J]. 中国环境科学,2009,29(7):685–691. DOI:10.3321/j.issn:1000-6923.2009.07.003.
Chen L, Bai ZP, Su D, et al. Application of land use regression to simulate ambient air PM₁₀ and NO₂ concentration in Tianjin City [J]. China Environ Sci, 2009, 29 (7) : 685–691. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2009.07.003.
- [17] 徐薇. 城市区域大气污染物暴露评估方法及其健康评价[D]. 上海:华东理工大学,2016.
Xu W. Approach of city ambient pollutant exposure assessment and the application in health evaluation [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [18] 李妙竹. 基因-基因-基因、基因-环境互作在银屑病和特应性皮炎中的关联研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
Li MZ. Association studies of genes, gene-gene and gene-environmental interactions in the induction of psoriasis and atopic dermatitis [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [19] Xie YY, Zhao B, Zhao YJ, et al. Reduction in population exposure to PM_{2.5} and cancer risk due to PM_{2.5}-bound PAHs exposure in Beijing, China during the APEC meeting [J]. Environ Pollut, 2017, 225: 338–345. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.02.059.
- [20] Wang WY, Zhong CR, Huang L, et al. Prenatal NO₂ exposure and ultrasound measures of foetal growth: a prospective cohort study in Wuhan, China [J]. Occup Environ Med, 2017, 74 (3) : 204–210. DOI: 10.1136/oemed-2016-103980.
- [21] 朱鹏飞,张翼,班婕,等. 中国空气污染与不良出生结局的研究进展[J]. 中华流行病学杂志,2017,38 (3) : 393–399. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.024.
Zhu PF, Zhang Y, Ban J, et al. Air pollution and adverse birth outcome in China: a comprehensive review [J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38(3):393–399. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.024.
- [22] 王伟业,赵荣仙,郭恒,等. 空气污染物对胎儿生长发育影响的研究进展[J]. 中华流行病学杂志,2017,38(1):128–130. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.01.024.
Wang WY, Zhao RX, Guo H, et al. A review of progress in research of effect of air pollutants on fetal growth [J]. Chin J Epidemiol, 2017, 38(1):128–130. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.01.024.
- [23] 周晓丹,陈仁杰,阚海东. 大气污染队列研究的回顾和对我国的启示[J]. 中华流行病学杂志,2012,32(10):1091–1094. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.10.023.
Zhou XD, Chen RJ, Kan HD. Cohort studies on air pollution: review and implications in China [J]. Chin J Epidemiol, 2012, 32 (10) : 1091–1094. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.10. 023.
- [24] Yang XF, Zheng YX, Geng GN, et al. Development of PM_{2.5} and NO₂ models in a LUR framework incorporating satellite remotessensing and air quality model data in Pearl River Delta region, China [J]. Environ Pollut, 2017, 226: 143–153. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.03.079.
- [25] Lee HJ, Chatfield RB, Strawa AW. Enhancing the applicability of satellite remote sensing for PM_{2.5} estimation using MODIS Deep Blue AOD and land use regression in California, United States [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50 (12) : 6546–6555. DOI: 10.1021/acs.est.6b01438.
- [26] Ross Z, Ito K, Johnson S, et al. Spatial and temporal estimation of air pollutants in New York City: exposure assignment for use in a birth outcomes study[J]. Environ Health, 2013, 12: 51. DOI: 10.1186/1476-069X-12-51.
- [27] Karagulian F, Belis CA, Dora CF, et al. Contributions to cities' ambient particulate matter (PM) : A systematic review of local source contributions at global level [J]. Atmo Environ, 2015, 120: 475–483. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.08.087.
- [28] 黄婧,郭新彪. 交通相关空气污染的健康影响研究进展[J]. 中国环境科学,2014,34(6):1592–1598.
Huang J, Guo XB. Research progress on the health effects of traffic-related air pollution [J]. China Environmental Science, 2014, 34(6):1592–1598.
- [29] 熊丽林,吴添舒,唐萌. 大气纳米颗粒物对人体健康效应的研究进展[J]. 中华预防医学杂志,2015,49(9):835–839. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2015.09.014.
Xiong LL, Wu TS, Tang M. Research on advance of health effects of nanoparticles on air pollution in China [J]. Chin J Prev Med, 2015, 49 (9) : 835–839. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2015.09.014.
- [30] United States Environmental Protection Agency. Report to congress on black carbon: executive summary [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 2012: 4.
- [31] Grahame TJ, Klemm R, Schlesinger RB. Public health and components of particulate matter: the changing assessment of black carbon [J]. J Air Waste Manag Assoc, 2014, 64 (6) : 620–660. DOI: 10.1080/10962247.2014.912692.
- [32] 彭霞,余倩楠,龙凌波,等. 基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟[J]. 环境科学,2017,38 (11):4454–4462. DOI: 10.13227/j.hjkx.201705026.
Peng X, She QN, Long LB, et al. Spatial simulation of black carbon concentration based on land use regression model and mobile monitoring over Shanghai, China [J]. Environ Sci, 2017, 38(11):4454–4462. DOI: 10.13227/j.hjkx.201705026.

(收稿日期 2017-07-28)
(本文编辑:斗智)