



DOI: 10.20103/j.stxb.202207182056

罗珂,田立涛,何豫,王少剑.基于文献计量的城市空间结构与生态环境关联性研究.生态学报,2023,43(17):7352-7365.

# 基于文献计量的城市空间结构与生态环境关联性研究

罗 珂<sup>1</sup>,田立涛<sup>2</sup>,何 豫<sup>1</sup>,王少剑<sup>2,\*</sup>

1 广州市城市规划勘测设计研究院,广州 510060

2 中山大学地理科学与规划学院,广州 510006

**摘要:**以 Web of Science 核心合集中 1999—2020 年期间发表的城市空间结构与生态环境关联性的文献为研究样本,运用文献计量的方法,主要借助 VOSviewer 和 Citespace 软件,厘清该领域研究的主要特征与进展。研究表明:城市空间结构与生态环境关联性研究的文献总量上呈现波动上升的趋势,尤其在近五年的波动骤增态势十分显著,成为地理学、城乡规划学、环境与生态学等学科交叉融合研究的重要方向之一;研究内容主要聚焦于城市空间结构与大气环境的关联性机理,具体涉及温室气体排放、空气污染和城市热岛效应,同时水环境、土壤环境以及生物多样性等方面也越来越受到重视而逐步成为研究热点。未来可围绕构建两者关联性框架和评估体系、面向生态环境问题的城市空间结构优化设计、两者发展变化的模拟和预测等核心问题展开研究。

**关键词:**城市空间结构;城市形态;生态环境;关联性;知识图谱分析

在全球化时代下,城市在世界社会经济发展中占据主导地位,城市化已经成为一种不可逆的发展趋势。截至 2018 年,世界上 55% 的人口居住在城市中,预计到 2050 年,全球城市化率有望达 68%<sup>[1]</sup>。快速的城市化进程产生了一系列的生态环境问题,不仅对城市生态系统造成直接或间接的影响,还严重威胁了人类的生存和发展。城市通过扩张和更新的方式改变其现状肌理,促使城市空间结构及形态发生演变,进而影响城市边界内外的物理、生态和社会经济过程<sup>[2-4]</sup>;加剧与原有生态系统的相互作用和博弈,影响城市生态环境的良性平衡,最终影响城市以及区域的高质量发展<sup>[5-7]</sup>。所以,有必要厘清城市空间结构与生态环境的关联机理,以便更好地掌握和服务城市生态系统。

城市空间结构对城市的集聚与扩散过程起到基础性作用,主要包括城市形态和城市各系统相互作用两方面,其中城市形态是指城市各个要素(包括物质场所、自然环境、人类群体和社会经济活动等)的空间分布模式;城市相互作用是把城市中人类与自然、经济、社会和文化等因素相互作用的结果整合成为一个个功能各异的子系统<sup>[8-10]</sup>。城市空间结构通过一定的组织原则,把城市形态和各个子系统相连接,整合成为一个较为完整的城市系统。因此,城市空间结构与生态环境系统之间产生相互影响、作用和博弈,对城市的建设发展、居民健康、生态环境质量和生物多样性等方面具有重要影响,逐渐成为近年来学者们探讨的热点问题。

国内外不同领域学者对城市空间结构与生态环境的关联性进行探讨研究,学者们基于不同的学科知识背景,对城市空间结构与生态环境的不同要素进行定性与定量分析,使得研究成果呈现出多元化、分散化和广泛化的特点。目前关于两者关联性研究的综述性文章较少,多数学者认为城市空间结构对城市运行及各要素有一定锁定效应,对提高城市土地利用效率、紧凑度、人口密度、能耗效率和景观布局等方面有重要作用<sup>[11-14]</sup>。也

**基金项目:**教育部人文社会科学研究规划基金项目(21YJAZH087);广州市城市规划勘测设计研究院科技基金项目(2022 科研(院)05, 2021 科研(院)09)

收稿日期:2022-07-18; 网络出版日期:2023-04-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 1987wangshaojian@163.com

有学者进行城市空间结构对生态环境某一要素的关联性总结<sup>[15-20]</sup>,忽视了生态环境问题的“全貌”和演化机理。对于城市研究者而言,如何改善城市环境、实现城市可持续发展是亟待解决的科学问题。基于此,本文采用文献计量方法,尝试梳理英文文献中城市空间结构与生态环境关联性研究的发展脉络和核心内容,总结现有研究在发文总量、来源期刊、研究核心热点等方面的特征,揭示该领域现有研究存在的问题和不足,并对未来研究热点进行展望。

## 1 对象与方法

### 1.1 数据搜集与处理

本文所用数据源于 Web of Science 核心合集,采用构建检索式方法对科学引文索引扩展版(SCI-EXPANDED)和社会科学引文索引(SSCI)两大引文索引数据库进行统计分析,时间跨度为 1999—2020 年。检索主题为#1 城市空间结构;检索式(TS)=urban spatial structure、urban structure、urban space、urban form 等;#2 生态环境;TS=environment、ecological environment、environmental effect、ecological effect 等及关键组成要素,例如 CO<sub>2</sub>、carbon sink、carbon reserve、urban heat island、biodiversity、biomass、air pollution、water pollution、soil pollution、noise pollution 等;#3:对研究话题进一步组合识别,通过将城市空间结构关键词与多种生态环境关键词进行组合,得到#1 (8639 篇)和#2 (3313674 篇)共 2588 篇文献,以选出探讨城市空间结构与生态环境相互作用文章的摘要、关键词等关键信息。将检索结果导出“全纪录与引用的参考文献”,以 TXT 格式下载,使用 Citespace 的去重工具得到 2580 篇城市空间结构与生态环境关联性的有效文献。

### 1.2 分析工具与方法

面对海量的文献数据,凭借信息可视化工具将数据通过图谱的形式直观呈现出来,从而实现数据的多元、历时性动态可视化分析<sup>[21]</sup>。目前较为主流的可视化软件 VOSviewer<sup>[22]</sup>、Citespace<sup>[23]</sup>、HistCite 等<sup>[24]</sup>,多应用于情报学、管理学等领域。为了确保数据的准确、真实和全面,以可视化图谱形式来揭示知识间联结和演进规律,识别该领域发展进程中的热点前沿,本文选择由莱顿大学科学技术研究中心(CWTS)多次检验的免费软件 VOSviewer(VOS)为主<sup>[25]</sup>,借助它对英文文献的强大分析功能,对文献核心关键词进行分析;使用 Citespace 软件对文献做聚类鱼眼趋势图分析,找到当前研究的前沿热点领域。由于不同学科关注点有所不同,加上本文的研究数据具有一定局限性,因此在文献计量分析基础上,通过对高被引和前沿热点文献深入阅读,来实现对城市空间结构与生态环境关联性的主要研究内容和热点研究趋势进行梳理总结。

## 2 结果与分析

### 2.1 文献时间序列分析

对城市空间结构与生态环境关联性研究的文献总量进行统计分析(图 1),根据各年度论文发表情况,将研究进程划分为缓慢增加-平稳上升-波动骤增 3 个阶段。其中 1999—2009 年期间发文量为 329 篇,仅占发文总量的 12.75%,呈现出波动式的缓慢增加态势,表明已有学者把城市空间结构作为影响生态环境的一种因素进行研究;2010—2015 年期间发文量为 750 篇,约占发文总量的 29.07%,呈现出稳步提升趋势,表明研究者逐步重视城市空间结构与生态环境存在何种关联;2016—2020 年期间发文量为 1501 篇,约占发文总量的 58.18%,波动骤增趋势明显,表明近年来不同学科领域学者从不同视角的关注点切入,探讨包括碳排放、空气污染和土壤污染等日益严峻的生态环境问题,以及其关联性的影响因素和发展趋势。

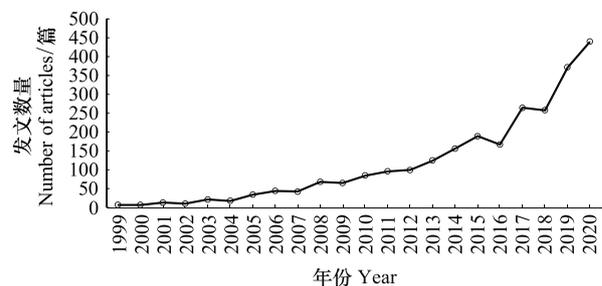


图 1 每年发表总论文数(1999—2020 年)

Fig.1 Annual number of articles from 1999 to 2020

## 2.2 来源期刊与学科特征分析

通过对文献出版的主要来源期刊和 Web of Science 的学科领域类别进行梳理,能够清晰地厘清该研究领域的学科分类。根据前十来源出版物(图 2),表明文献期刊发表相对较为分散,其中刊文量最多的期刊是 *Sustainability*;其次为 *Science of the Total Environment*、*Landscape And Urban Planning*、*Journal of Cleaner Production* 和 *Ecological Indicators* 等。在此基础上,对 Web of Science 进行类别梳理分析,得到学科分类占比表(表 1),城市空间结构与生态环境关联性的研究主要集中在环境科学(64.34%)、城市规划学(18.26%)、生态学(15.62%)、地理学(15.43%)、气象学和大气科学(11.74%)等学科领域(由于一篇文献可能属于多个类别,所以占比超过 100%),表明两者关联性研究已经成为多学科共同关注的热点方向之一。

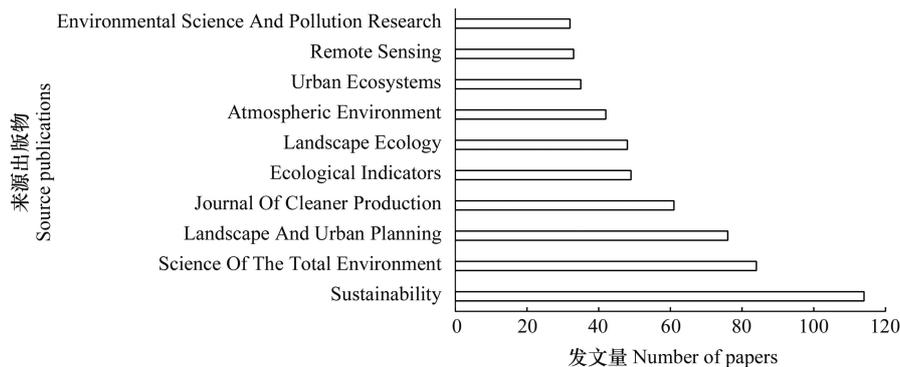


图 2 前十来源出版物的发文章量

Fig.2 Number of articles published in the top 10 source publications

表 1 Web of Science 学科分类占比表

Table 1 The table of subject classification (on the basis of Web of Science)

Web of Science 类别 Web of science category	数量/篇 Number of articles	占比/% Proportion	Web of Science 类别 Web of science category	数量/篇 Number of articles	占比/% Proportion
Environmental Sciences & Studies & Engineering	1660	64.34	Meteorology Atmospheric Sciences	245	9.50
Urban Studies & Regional Urban Planning	471	18.26	Green Sustainable Science Technology	237	9.19
Ecology	403	15.62	Energy Fuels & Transportation	211	8.18
Geography & Geography Physical	398	15.43	Engineering Civil	123	4.77
Biodiversity Conservation & Water Resources	303	11.74	Remote Sensing	108	4.19

## 2.3 关键词特征分析

关键词和文献研究主题都是反映本领域研究的核心内容和热点前沿,也是对文献内容的高度概括。首先,本文采用 VOSviewer 软件对数据中“作者关键词”进行预处理(合并和删减无意义关键词),设置出现频次阈值为 5,共生成 288 个关键词,并绘制关键词聚类图谱(图 3)。如图 3 所示,作者关键词聚类共分为 11 种颜色聚类,由于本文以城市空间结构与生态环境的关联性研究为主,因此提取这两者相关联的聚类,主要包括“urban form”与蓝色聚类(CO<sub>2</sub>排放等)、红色聚类(生物多样性、水环境等)、褐色聚类(土壤环境等)、黄色聚类(空气污染等)和绿色聚类(城市热岛效应等)五大聚类、六大类核心内容,通过与城市形态的连线越多并且较粗,一定程度上说明了两者的关联性也较为密切。

另外,使用 Citespace 对文献进行聚类分析,时间设为 1999—2020 年,时间切片设为 2 年,以潜在语义索引(LSI)方法进行关键词聚类,模板值为 0.5201,认为聚类结果较为合理,聚类结构显著;聚类平均轮廓值为 0.7969,反映聚类结果是高效率,值得信赖;其中#0—#8 依次分别为城市生态、物理活动、重金属、二氧化碳排放、气候变化、城市热岛效应、空气污染、地表温度和排放,最终以鱼眼趋势图的方式呈现(图 4)。

综上所述,VOSviewer 和 Citespace 的聚类显示:近二十年来的研究热点主题为城市空间结构与 CO<sub>2</sub>排放、



### 3 主要研究内容分析

#### 3.1 城市空间结构与能源消耗和 CO<sub>2</sub>排放的关联性

根据关键词聚类连线显示,与城市形态连线最粗且最为密切的是 CO<sub>2</sub>排放,即温室气体排放。通过深入阅读城市空间结构与 CO<sub>2</sub>排放关联性的研究文献后,本文认为大致可以分为四类文献:①使用新技术、新方法对城市的空间形态及其变化进行量化,分析其对 CO<sub>2</sub>排放的影响,并提出“碳减排”的解决方法<sup>[26-30]</sup>;②基于交通能耗的角度,探讨城市与交通出行有关的空间形态要素对 CO<sub>2</sub>排放的影响<sup>[31-36]</sup>;③对个人、家庭和住宅的能源消耗、城市空间结构与 CO<sub>2</sub>排放之间关系进行研究<sup>[37-43]</sup>;④还有少量关于城市形态对 CO<sub>2</sub>排放预测以及城市地下空间形态的能源消耗与 CO<sub>2</sub>排放的文献<sup>[44-47]</sup>。

另外,城市空间结构主要包括建成环境、空间网络、扩张模式三方面,直接或间接影响 CO<sub>2</sub>排放。在建成环境方面,主要采用密度(人口、住房、就业等)、多样性(土地混合利用和出行行为等)、规模大小(城市和各类用地斑块)、单中心、多中心以及建筑物朝向和阴影等要素指标。多数学者认为密度对 CO<sub>2</sub>排放的影响是间接的,主要通过人类活动对通勤距离的长短、出行行为的偏好和住房类型的选择等来影响能源消耗,进而影响 CO<sub>2</sub>排放<sup>[38,42,48-49]</sup>。在城市中心区域,往往分布大量的就业机会、密集建筑物以及发达的公交地铁网,满足居民生活的方方面面,因此与 CO<sub>2</sub>排放的关系呈现出负相关<sup>[35,36,44]</sup>。但是,随着城市规模的不断扩大,各类用地斑块逐步趋向破碎化,有些发达的城市地区还会形成多中心的城市空间结构,这些也会对能源消耗产生的 CO<sub>2</sub>排放造成影响。还有学者认为建筑物的朝向和阴影等对能源使用有一定关系<sup>[50]</sup>,如 Ko 等在加州的研究中认为东西向的街道方向、房屋东南面特别是房屋西侧有较大植被,对减少夏季制冷能源的使用具有显著影响<sup>[41]</sup>。

在空间网络方面,以道路交通网络为主,采用可达性、连通性、到中央商务区(CBD)的距离以及道路的设计和层级结构等因素。一般认为公共交通可达性高、道路连通效果好、到 CBD 的距离较短或适中,有利于减少交通通勤相关的 CO<sub>2</sub>排放量<sup>[51]</sup>。通过城市土地利用规划,设计出社区居民适合步行或骑行的街道,土地利用混合度高的城市用地,便于居民更倾向“低碳”出行<sup>[31,43,47]</sup>。在扩张模式方面,即为城市化过程中采用紧凑型、还是分散型发展方式,衍生出更为复杂的城市空间结构,从而影响 CO<sub>2</sub>排放。尤其是基础设施处于新兴阶段的发展中国家城市,采用紧凑的城市形态和交通规划可以鼓励更高的人口密度,有利于避免形成高碳排放模式,而迫使城市形态碎片化或不规则性可能会增加 CO<sub>2</sub>排放<sup>[27,37,45,52]</sup>。究竟选择何种城市开发建设模式也是学者讨论的焦点,在北美城市以“公共交通为导向(TOD)”的开发模式已经较为成熟<sup>[53]</sup>,在我国采取“城市公园(POD)”、“自行车交通(BOD)”,还是“TOD”为导向的开发模式应该因城而议,适度开发。综上所述,根据城市空间结构与 CO<sub>2</sub>排放关联性的已有研究文献来看,多数学者都是探讨两者关联性的影响机制并提出合理化的碳减排措施。但同时也存在以下问题:一方面,由于影响因素的选择上存在差异性,因此没有形成一套综合的城市空间结构量化指标体系,从而影响因子产生的关联性强弱也存在差异;另一方面,提高能源使用效率、调整产业结构、控制 CO<sub>2</sub>直接排放等措施虽然已经基本得到认可,然而却无法从根本上解决温室气体大量排放的问题,因此需要深入挖掘 CO<sub>2</sub>排放的潜在影响因素,综合研究优化城市空间结构、提高公共交通运行效率、预测 CO<sub>2</sub>排放趋势和减少碳足迹等多方面。

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,未来应着眼于构建综合的评价指标体系和高效可行的“碳减排”方法作为城市研究的“侧重点”与城市规划建设的“发力点”,促进城市实现可持续发展的低碳目标。通过遥感和地理信息系统(GIS)技术构建度量城市空间结构的综合指标体系,来分析城市在不同发展阶段和不同发展模式上差异化的关联特征,揭示不同城市空间结构对 CO<sub>2</sub>排放的影响机理,提出多维度的城市碳排放绩效提升路径,实现城市低碳发展和空间结构优化目标。另外,可以借鉴计算机科学的群集智能算法,结合系统动力学和元胞自动机模型,建立基于空间结构和形态的城市碳排放情景模拟模型,预测社会经济发展情景和模拟城市空间扩张,研发可操作、可推广的低碳城市空间智能规划技术;运用 GIS 技术和大数据手段,结合百度地图

基于位置服务(LBS)开放平台的出行起点-终点(O-D点)智能查询系统的开发与应用和出行调查问卷等方法,对居住自选择效应进行检验和控制,探究多地理尺度与地理背景建成环境对居民出行碳排放的影响机理,分析居民出行的“碳减排”潜力,提出城市功能区空间形态优化的措施。最后,城市作为能源利用强度最高的中心地区,提高能源利用和转化效率,评估能源利用碳排放变化的环境效应,结合城市总体规划和土地利用规划提出具有针对性的短期和中长期调控政策,制定差异化、地区化的城市能源利用低碳化路径,加快构建绿色低碳循环发展经济体系,对于未来建设资源节约型、环境友好型城市至关重要。

### 3.2 城市空间结构与空气污染的关联性

城市空间结构与空气污染的关联性主要表现为城市人口密度、交通和土地利用等影响城市的经济增长、工业生产、化石能源消费和交通运输结构等,从而影响 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ 、CO等空气污染物的产生、流动与扩散<sup>[54-57]</sup>;影响人体与污染物接触的强度、频率以及持续时间,严重损害居民身心健康,并导致额外经济损失<sup>[58-60]</sup>。另外,不同的国家和区域城市所处的发展阶段和产业结构不同,使得空气污染物分布具有一定的时空格局差异,运用监测工具和测量手段不同,影响学者选取不同的污染物种类进行研究。

以欧美为主的发达国家,城市化水平较高,城市空间结构变化相对较小,对空气污染的认知水平较高、研究成果也较为丰富。研究主要认为人口和居住密度高、公交供给量大、扩张水平较低、绿地面积大和形状复杂性较小等特点的高紧凑型城市空间结构及形态有利于减少空气污染,相较城市形态碎片化、无序蔓延的城市发展模式而言,对城市可持续发展的大气环境更加友好<sup>[54,55,61-62]</sup>。另外,各国污染物排放标准有所不同,学者们在选取污染物种类和城市形态要素也会考虑本国实际情况。例如,Martins认为葡萄牙波尔图市的扩张导致 $PM_{10}$ 年平均值和超过日极限值的增加,而 $O_3$ 的差异较小<sup>[58]</sup>。Cárdenas等在欧洲选取了249个大型城区进行研究,指出碎片化、高度建设城市的 $SO_2$ 和 $PM_{10}$ 浓度较高,人口密集城市的 $SO_2$ 浓度较高<sup>[63]</sup>。在美国111个城市的 $O_3$ 、 $PM_{2.5}$ 以及空气质量指数(LAQI)污染物研究中,Clark等发现人口密度、人口中心度、公交供给量与空气污染相关<sup>[57]</sup>。Bereitschaft等指出美国86个大都会地区的扩张程度越高, $O_3$ 和 $PM_{2.5}$ 的浓度也越高,而居住密度是影响 $O_3$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度、 $NO_x$ 非点源排放的重要因素<sup>[64]</sup>。随着发展中国家城市化进程的加快,空气污染问题也日益突出和备受关注。在借鉴发达国家经验的基础上,我国编制了大气污染物排放清单和标准。在我国的研究中,多数学者认为城市形态主要通过城市斑块大小、形状多样性、紧凑度和土地利用配置来影响空气质量,采用紧凑型、多中心的城市形态可以减少通勤距离和交通污染总量,有利于形成高空气质量大气环境<sup>[56,65-67]</sup>,而碎片化程度较高、土地利用配置不合理的城市空间结构及形态则会起到促进城市大气污染排放的效果<sup>[68]</sup>。

综上所述,紧凑式的城市形态可以减轻空气污染,进而提高空气质量;但不可忽视的是人口密度增加的同时,会增加环境暴露,危害居民健康,因此,从地理学、城乡规划学、环境学和医学等多学科交叉融合的视角出发是切实可行的研究途径。另外,全球多数发展中国家处于快速的城市化和工业化阶段,日新月异的城市形态会对大气污染的影响产生一定滞后性,合理控制城市形态要素、非城市形态要素以及污染物数据等变量,需要构建完整且有说服力的测度模型;同时研究需采集大量具有时间跨度的城市数据作为资料基础,而目前获取这方面的大数据存在一定难度,虽已有多个城市和区域进行尝试构建高精度度的城市建设和大气污染物数据库,但仍需要长期资金和技术研究的支撑。未来应加强跨部门和跨区域的广泛合作,形成有效的“协同治理”联盟,对城市国土空间进行合理开布局,形成具备混合功能的多中心城市空间结构,提高公共医疗卫生和环保绿化设施的占比,降低非必要交通需求、改变居民时空行为,降低居民暴露概率和健康风险,形成完善合理的城市空间结构;增强公众对环境的关注度,有效推动政府、企业和个人等多主体更加关注环境治理问题,制定“本土化”大气污染等生态环境治理政策,使之能够更加符合公众偏好,从而提升环境规制政策效果及公众满意度,促使空气污染的环境库兹涅茨曲线(EKC)更早地跨越拐点,从而进入增长与环境改善双赢的发展阶段。

### 3.3 城市空间结构与城市微气候-热岛效应的关联性

城市热岛效应作为城市微气候的主要表现形式之一,最早追溯到1833年霍华德在伦敦的研究中,其发现

伦敦城区的气温明显比附近乡村温度高,又称为“城市热环境”<sup>[69]</sup>。当前关于城市空间结构与城市热岛效应关联性的研究,通过使用景观格局指数(绿地、建筑、水体、裸地、不透水硬质地表等)和空间形态指数(天空开阔度、建筑密度、高度、容积率和迎风面积比例等)来量化城市形态;借助外场试验、遥感反演、数值模型和实验室仿真模拟等数据采集方法,运用非计算流体力学(建筑群热时间常数(CTTC)模型和DUTE软件)和计算流体力学(计算流体动力学(CFD)模型和ENVI-net、PHOENICS、Fluent等软件)两大类模型和软件<sup>[70-72]</sup>,分析影响城市地表温度和空气温度的主要因素。另外,2012年,Stewart等提出了局地气候分区方法(LCZ),LCZ致力于不同的几何形状、建筑密度及地表特征等城市形态与城市热岛之间的关系,将标准化的描述方法应用到两者关系的研究中<sup>[73-75]</sup>。近年来出现了许多基于LCZ分类框架的项目,如世界城市数据库及访问门户工具(WUDAPT)项目<sup>[76]</sup>、应用模型和城市规划法:城市气候和能源(MAPUCE)项目<sup>[77]</sup>与城市通量(URBAN-FLUXES)项目<sup>[78]</sup>等。我国也有部分城市先后加入WUDAPT项目计划,例如,北京、上海、广州、杭州等城市。

当前关于城市空间结构与热岛效应的关联性研究,大都是在分析城市热岛效应形成的驱动因素基础上,探究城市缓解热岛效应的有效途径。城市通过增加生态土地利用面积(包括湿地、水体、绿地等)、以及控制城市的建筑密度和高度等路径来缓解热岛效应,然而这些措施往往受到城市扩张和社会经济发展所限制<sup>[79]</sup>。而影响城市热岛效应的驱动因素多种多样。例如,尤其是较为湿热的城市,街道空间的天空开阔度越小,形成城市热岛效应的概率和强度越大<sup>[80-82]</sup>;建筑密度与城市的通风条件密切相关,是通过控制建筑密度可以加速空气流动,促进热量流散<sup>[83]</sup>。另外,由城市人口活动密度产生的人为热,主要包括驾驶车辆、空调耗能、居民生活、工业生产及建筑物等向外散发的热量来源,对城市热岛的形成起到十分重要的作用<sup>[84]</sup>。还有季节变动、风向、风速、降水等客观因素,尤其是在炎热的夏季,城市热岛强度最为惊人,强度最大值为德国柏林13℃、美国亚特兰大12℃和中国北京9℃等等<sup>[85-87]</sup>。综上所述,城市通过对空间结构的优化、生态用地的修复和建成环境的设计,构建城市的通风系统形成良好的通风环境,实现对热岛效应的有效缓解。

根据现状研究文献,基于城市空间结构对城市热岛的影响研究已经取得显著进展,但仍存在一些不足。一方面,城市空间结构影响因素的量化方法不够深入,各因素对城市热岛强度的影响程度仍不够清晰;同时缺乏对潜在影响因素的探索,包括空间尺度和邻近效应等方面。另一方面,城市气温和地表温度数据的获得手段不够丰富,仅仅依靠城市内数量不多的气象站点观测和卫星热红外遥感来获得相关数据,导致详细数据存在可获得性不高和时效性较差等问题,严重阻碍了进一步深入城市热岛。未来研究应尽可能考虑综合多源数据,通过运用新技术、新方法来获取足量的时间与空间维度的气温和地表温度数据,主要包括合法使用网络爬虫来获取公开数据网站和手机软件(APP)的详细温度数据,以及采用合作式的“众包”方法来实时高效地记录城市街区温度数据;还可以借助各类卫星遥感和无人机搭载红外热像仪等手段来获取高分辨率的地表温度数据,并且可以降低观测成本和提高研究的精确性。另外,从形成机理层面深入探讨城市空间结构与热岛效应关联性的影响因素,增加对潜在影响因素的考量,并运用多模型、多方法对其进行相关分析和模拟预测,增强对以局地气候分区(LCZ)为框架的城市形态与城市热岛效应关联性进行研究,促进城市热岛效应的缓解。

### 3.4 城市空间结构与水环境的关联性

城市空间结构与水环境的关联性主要体现城市形态和土地利用对水网结构的改变、水体污染、给排水系统管理、地表径流的增加以及地下水位下降等方面造成影响。一方面,城市的空间形态一旦形成,短时间内很难发生改变,例如,建筑的密度和高度、不透水路面的增加等<sup>[88]</sup>。再加上受城市热岛、不易扩散的凝结核和高层建筑物的阻碍,城市地区会形成明显的雨岛和内涝现象<sup>[89]</sup>。另一方面,城市土地利用配置的不合理,导致工业、商业以及居民生活对水体造成污染,森林、湿地、湖泊等生态用地的功能丧失<sup>[90-92]</sup>。还有城市空间设计如何管理不断增加的高密度给排水系统<sup>[93]</sup>,减少城市下垫面和物理形态的改变,保护城市河流水质以及水循环生态系统的健康,值得城市研究者深入思考。

传统低密度的空间开发和扩张模式已经不适应城市社会经济快速发展以及人口的增加,容易导致更多的城市内涝、河流干涸断流、水质恶化、水体污染等环境问题。为了实现可持续的水资源管理,将城市发展对周

围环境的水文影响降到最低,多国学者结合本国国情,设计出适合城市水循环的城市规划和设计方法<sup>[94]</sup>。例如,早在 20 世纪 70 年代,美国实施了“最佳管理措施(BMPs)”,后改为“雨水控制措施(SCMs)”<sup>[95]</sup>,还有“低影响开发(LID)”和“绿色基础设施(GI)”等举措<sup>[96]</sup>,其目的是加强城市的雨洪管理、改善水循环和生态环境,典型应用案例有波特兰和西雅图等地区。英国主要采用了“可持续城市排水系统(SUDs)”,通过科学地贴近自然的方式管理雨洪径流,实现城市发展与水环境的良性循环<sup>[97]</sup>。澳大利亚建立了一个较为宽泛的“水敏感性城市设计(WSUD)”体系,它涉及城市水循环的各个方面<sup>[98]</sup>。中国在受到前者经验和技术支持的基础上,提出建设“海绵城市”来实现低影响开发城市空间和修复水环境以及保护原有生态系统<sup>[99]</sup>。还有新西兰建立的“低影响城市设计与开发(LIUIDD)”体系和法国的“替代技术或补偿技术(CTs)”等等<sup>[100]</sup>。

总体而言,在快速城市化的进程中,通过城市空间结构的低影响开布局来维护城市水系、河湖以及蓄排水系统之间的良性平衡。但在研究中考考虑城市水文各环节及其伴生过程变化规律方面仍有不足,不能较好地处理城市水资源短缺、洪涝灾害、水环境污染及生态退化等复杂问题与关系。在城市开发过程中进行坡面道路、管网和河道等多种汇流工程的耦合模拟、构建城市的防洪排涝预警系统、以及合理的风险评估,实现因城制宜,保证城市水环境管理模式和生态修复措施之间的协调性。未来可以通过分析影响水环境效应的关键空间结构指标,探究其对城市水环境产生的直接或者间接效应,探索建立能够适应水环境约束的城市空间结构优化配置方式和空间组合方式,实现将城市水环境容量和水土保持的目标转变为城市国土空间开发的强制力约束,加强城市空间的高效治理和水环境的协同治理。还要积极探索城市空间结构与水环境相适应的演进规律,分析影响土地利用布局变化与水环境演变的关键驱动因素,提出适应水环境的相关要素调控路径,促使城市空间结构变化能够与水环境实现相对自然的演进趋势,实现“生态宜居”的可持续城市建设目标。

### 3.5 城市空间结构与生物多样性的关联性

城市发展通常与自然栖息地的丧失、生态环境的改变和人为干扰的增加有关,这些方面有可能对本地物种的数量、丰富度和多样性产生负面影响<sup>[101]</sup>。目前,城市空间结构与生物多样性的关联性主要集中在景观格局、扩张蔓延以及微气候对鸟类、地表动植物和水生物多样性等方面的研究。不同的城市会有不同的扩张模式、空间形态、景观组成、土地利用的异质性和更广泛的细微变化都会改变当地的生物物理过程<sup>[102]</sup>,进而影响生态系统的平衡和物种多样性,同时也会对人类的健康产生影响<sup>[103]</sup>。因此,大多数的城市管理者、规划者和居民已经意识到维护生态系统平衡和生物多样性的重要意义,但是对于城市空间结构如何影响各类物种的生存模式、保护栖息地生境需要深入挖掘研究。

实际上,基于城市绿色基础设施(GI)的多功能绿色空间战略规划,具有保护和增强局部生物多样性的巨大潜力<sup>[104]</sup>,改善基本生态系统服务的供给。在大量的研究中,快速的城市扩张被认为是全球生物多样性的主要威胁之一。例如,对于动植物和鸟类多样性的研究中,多数学者认为城市扩张对动植物和鸟类的物种多样性存在重要影响,但在城市蔓延组成和空间尺度对物种丰富度存在很大差异<sup>[105-107]</sup>,通过增加斑块面积、栖息地丰富度和连通性来实现生物多样性的保护<sup>[108-110]</sup>;也有学者认为城市扩张对本地植物和珍稀蚂蚁物种均无显著影响,但外来物种丰富度与其呈正相关<sup>[111]</sup>,由此可以采取对物种类群的分析,提出物种选择策略,尽可能保护本地珍稀物种、辩证看待未来的种植计划和丰富城市生物多样性<sup>[112]</sup>。另外,有的研究指出相对分散的城市形态更有利于河岸植被和水生生物的成长,促进本地物种丰富度和多样性,是支持生态功能比较有效的方式,而集聚的城市形态还与自然植被的生境质量下降和生境枯竭有关<sup>[113]</sup>。

当前对城市空间结构与生物多样性关联性研究中更多考虑人类的生存和发展需要,而恰恰忽略了生物多样性在生态环境的“角色”,从而减少了对物种组成和物种丰度变化的重视度。在未来的研究中,一方面应积极研究城市景观格局演变对生物多样性造成的影响,科学合理地评估、模拟和预测生物多样性对替代景观配置产生的反应,提出保护城市空间中生物多样性和植物群落结构的有效措施;另一方面,综合评估城市形态变化、土地利用异质性对城市区域的生物物理过程产生的影响,构建生物多样性与生态系统平衡的机制体系,合理规划布局城市廊道、湿地和生态绿地等绿色基础设施,实现对生物多样性友好的未来城市景观设计。

### 3.6 城市空间结构与其他环境的关联性

与城市空间结构密切相关的环境问题还有土壤污染、噪声污染等,这些问题不仅对城市生态可持续发展造成影响,还与人类福祉和生物多样性有着诸多关联。城市扩张过程中大量农业用地转换为工业、住宅和其他城市用地,导致土地覆盖变化,改变土壤中的水分、养分组成和初级生产力降低,同时造成城市微气候变化、水土流失、重金属污染等现象<sup>[114-116]</sup>。对土壤重金属污染的研究中,Chen 等揭示了北京市路边土壤中重金属浓度与城市交通相关<sup>[117]</sup>。Guagliardi 等在意大利南部地区的研究中发现,城市和城郊土壤中人类活动有关的潜在毒性微量元素(PTEs)来源包括交通排放、工业排放和城市发展过程<sup>[118]</sup>。Lv 等在高青县的研究中发现,城市建设用地中 8 种元素的平均含量显著高于其他土地利用类型,工业和交通排放以及农业活动加剧了当地土壤中的金属污染<sup>[119]</sup>。对水土流失的研究中,Qishlaqi 等研究了城市土地利用结构对土壤供水、吸水和蒸发特征、土壤元素含量等的影响<sup>[120]</sup>。北京市结合实际建设发展需求,多部门联合印发了城市开发建设项目中加强水土保持工作的要求,来解决水土流失问题。综上所述,城市发展和人类活动改变了城市空间结构的同时,也加重了土壤环境的重金属污染和水土流失问题。当前对城市土壤环境的污染状况及其风险评价不太深入、其空间变异规律缺乏系统的认识、其对地表水和浅层地下水的污染贡献等都是需要解决的科学问题。未来需要加强城市土壤的合理配置与利用,扩展城市空间结构对土壤质量影响的系统研究方法,实现城市良好的水土保持。

另外,城市形态产生噪音污染主要体现在城市道路交通设计不合理,建筑的高度和密度等方面。在综合评估噪音和空气污染的一项研究中,Weber 等研究发现景观指标、建筑高度、建成区面积以及主要道路的占比与噪音暴露显著相关,认为噪声污染的主要来源是城市交通<sup>[121]</sup>。Lakes 等研究柏林住宅区噪音污染中指出,噪声污染严重和环境质量较低的住宅单元大都位于柏林市中心人口密集区<sup>[122]</sup>。当然,城市中噪声的主要来源还包括建筑施工、工业生产和社会生活等方面,而且这些噪声极为难治理,对人类的心理和身体健康影响极大<sup>[123]</sup>。当前对城市空间结构与噪音污染的关注度不高、产生噪音的影响因素揭示较少、以及如何解决噪音污染的存在诸多现实挑战。从人类活动角度来看,居民应该主动减少噪音暴露,提高自身防范意识;城市空间结构的规划者和研究者应该考虑城市交通设计减少噪音生产,建筑内部的隔音性以及建筑间的扩散性等。

## 4 研究结论与思考

### 4.1 结论

本文基于文献计量方法对城市空间结构与生态环境的关联性研究进行知识图谱可视化分析,梳理两者关联性的核心研究内容演变。通过分析两者关联性研究的文献产出时间序列特征,发现其在文献总量上呈现出缓慢增加-平稳上升-波动骤增 3 个阶段,尤其近几年来全球对生态环境问题的关注度日益增加,因此两者关联性研究也迅速增多;从来源期刊和学科分析的特征来看,两者关联性研究的主要来源期刊相对较分散,刊文量最多的是 *Sustainability* 期刊,共计发表 114 篇,由于此研究领域属于多学科交叉融合方向,因此是地理学、城乡规划学、环境学、生态学等学科的热点研究方向之一;最后,借助 VOSviewer 和 Citespace 文献计量软件分析聚类关键词,分析两者关联性研究的核心热点,发现城市空间结构与“温室气体排放”“空气污染”“热岛效应”等大气环境问题是出现频次较高的关键词,同时“水环境污染”“生物多样性”“土壤污染”和“噪音污染”等城市环境问题也是不容忽视的研究热点,并对这些主要研究热点进行详细论述。由于城市空间结构具有较强的差异性,并且生态环境问题既是全球性问题,也是区域性問題,应结合不同国家、区域和城市的发展阶段,提出差异化的优化城市空间结构方法,来缓解和修复生态环境面临的严峻问题。

### 4.2 思考

虽然城市空间结构与生态环境关联性已有较多研究与实践,但由于涉及维度、领域、学科等较为多样,需要更系统综合的研究框架和评估体系,对该话题进行多学科交叉融合研究,为人、城市与生态环境之间和谐稳定提供科学依据与决策支撑。当前全球仅有少数国家对生态环境问题的重视程度较高,而大多数发展中国家

城市化进程仍在快速推进,城市空间结构变化也日新月异,生态环境问题也越来越多,如何优化城市空间结构,进行土地利用的优化配置,来降低能源消耗,实现节能减排和修复生态环境,仍面临较长时期的严峻挑战。未来研究可通过两者关联性研究的综合框架体系、城市空间结构优化设计,以及未来发展的模拟预测等方面,进一步深化关系研究与优化理论实践,并经过不同类型城市发展的检验才能保证其正确性。

#### 4.2.1 城市空间结构与生态环境的综合性研究框架和评估体系的构建

生态环境系统具有一定程度的多样性与复杂性,就决定了人类不能只停留在城市空间结构与生态环境的某一要素领域进行研究,应该从多学科交叉融合的视角,综合评估城市空间结构对城市经济、社会、环境等各子要素的锁定效应。通过构建综合性研究框架和评估体系,量化城市空间结构的景观格局指数、空间形态指数和土地利用指数等指标,完善与生态环境有关的综合评价指标体系,有利于调整和优化城市空间结构,促进生态环境协调绿色发展。另外,大量的时空尺度城市综合数据是研究的基础和支撑,通过建立城市建设与环境综合数据库,运用大数据、遥感和 GIS 等技术方法,获取包括土地利用、气候气象、能源消耗以及家庭出行等时效性强和精确度高的资料数据,并进行长时期的维护更新,方便调查研究使用。

#### 4.2.2 面向生态环境问题的城市空间结构优化与设计

传统的城市空间结构设计更加注重建设与开发,而新时期如何统筹城市建设与非建设用地的布局,保护与开发城市空间,从宏观和微观层面优化城市空间结构,促进城市低碳可持续循环发展,实现城市的“精明增长”。在宏观层面,需要统筹协调城市建筑物、道路、水体以及绿地等自然与非自然物体空间的布局,发展新兴的低碳空间规划技术和绿色生态基础设施,发挥和增强城市的自我调节和自我恢复功能,促进优化城市空间结构与景观格局;在微观层面,不仅要保护城市残存的“自然”栖息地进行保护,也要对城市“棕地”和未利用地进行修复开发,作为城市生物栖息和绿色基础设施存在的开敞空间。另外,城市管理者 and 规划者切实考虑城市发展建设的现状与需求,充分进行实地调研和数据分析,并在有条件的情况下考虑城市居民的建议和意见,结合城市面临的主要生态环境问题来进行城市空间结构的优化和设计。

#### 4.2.3 城市空间结构与生态环境变化的模拟和预测

当前生态环境问题存在的根源揭示不全面、模拟和预测方法不够精准化,也是亟待提高和解决的重要问题。一方面,综合运用网络爬虫、众包、遥感和无人机等新技术手段,提高数据获取的时效性以及实现获得手段的多样化,有利于准确分析现状生态环境问题的直接或者间接影响因素,提出行而有效的优化路径和解决措施;另一方面,通过借鉴多学科的技术方法,例如:机器学习、元胞自动机和系统动力学等模型方法,加强对城市空间结构的现有要素、潜在影响因素和演变趋势进行深入探索,并对两者关联性的发展演进规律进行模拟和预测,积极推进城市朝着低碳协调可持续的人地系统发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: United Nations, 2019.
- [ 2 ] Luck M, Wu J G. A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from the Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. Landscape Ecology, 2002, 17(4): 327-339.
- [ 3 ] Turner M G. Landscape ecology: what is the state of the science? Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, 36: 319-344.
- [ 4 ] 周春山, 叶昌东. 中国城市空间结构研究评述. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1030-1038.
- [ 5 ] Bourbia F, Boucheriba F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). Renewable Energy, 2010, 35(2): 343-347.
- [ 6 ] Callesano S. Book review: language maintenance and shift. Anne pauwels. Cambridge, UK: Cambridge university press, 2016.
- [ 7 ] 刘小平, 黎夏, 陈逸敏, 秦雁, 李少英, 陈明辉. 景观扩张指数及其在城市扩展分析中的应用. 地理学报, 2009, 64(12): 1430-1438.
- [ 8 ] Bourne L. Internal structure of the city: readings on urban form, growth, and policy. Historian, 1982
- [ 9 ] 沈清基. 城市空间结构生态化基本原理研究. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(6): 6-11.
- [ 10 ] 靳美娟, 张志斌. 国内外城市空间结构研究综述. 热带地理, 2006, 26(2): 134-138, 172.
- [ 11 ] 吕斌, 孙婷. 低碳视角下城市空间形态紧凑度研究. 地理研究, 2013, 32(6): 1057-1067.

- [12] 王少剑, 刘艳艳, 方创琳. 能源消费 CO<sub>2</sub> 排放研究综述. 地理科学进展, 2015, 34(2): 151-164.
- [13] Kahn M E. Urban growth and climate change. *Annual Review of Resource Economics*, 2009, 1: 333-350.
- [14] 柴彦威, 肖作鹏, 刘志林. 居民家庭日常出行碳排放的发生机制与调控策略——以北京市为例. 地理研究, 2012, 31(2): 334-344.
- [15] 范晨璟, 田莉, 李经纬. 城市形态对空气质量影响研究的国内外进展. 城市发展研究, 2017, 24(12): 92-100.
- [16] 丁沃沃, 胡友培, 窦平平. 城市形态与城市微气候的关联性研究. 建筑学报, 2012(7): 16-21.
- [17] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应. 生态学报, 2003, 23(3): 539-546.
- [18] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2011, 31(23): 302-315.
- [19] 颜文涛, 萧敬豪, 胡海, 邹锦. 城市空间结构的环境绩效: 进展与思考. 城市规划学刊, 2012(5): 50-59.
- [20] 叶玉瑶, 陈伟莲, 苏泳娴, 吴旗韬. 城市空间结构对碳排放影响的研究进展. 热带地理, 2012, 32(3): 313-320.
- [21] 刘则渊, 陈悦, 侯海燕. 科学知识图谱: 方法与应用. 北京: 人民出版社, 2008.
- [22] van Eck N J, Waltman L, Dekker R, van den Berg J. A comparison of two techniques for bibliometric mapping: Multidimensional scaling and VOS. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(12): 2405-2416.
- [23] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
- [24] Garfield E. Historiographic mapping of knowledge domains literature. *Journal of Information Science*, 2004, 30: 119-145.
- [25] 宋秀芳, 迟培娟. Vosviewer 与 Citespace 应用比较研究. 情报科学, 2016, 34(7): 108-112, 146.
- [26] Cirilli A, Veneri P. Spatial structure and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions due to commuting: an analysis of Italian urban areas. *Regional Studies*, 2014, 48: 1993-2005.
- [27] Fang C L, Wang S J, Li G D. Changing urban forms and carbon dioxide emissions in China: a case study of 30 provincial capital cities. *Applied Energy*, 2015, 158: 519-531.
- [28] Wong N H, Jusuf S K, Syafii N I, Chen Y X, Hajadi N, Sathyanarayanan H, Manickavasagam Y V. Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*, 2011, 85(1): 57-71.
- [29] Wang S J, Liu X P. China's City-level energy-related CO<sub>2</sub> emissions: Spatiotemporal patterns and driving forces. *Applied Energy*, 2017, 200: 204-214.
- [30] Chen Y M, Li X, Zheng Y, Guan Y Y, Liu X P. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: a case study in the Pearl River Delta, 2005-2008. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(1): 33-42.
- [31] Ma J, Liu Z L, Chai Y W. The impact of urban form on CO<sub>2</sub> emission from work and non-work trips: the case of Beijing, China. *Habitat International*, 2015, 47: 1-10.
- [32] Clark T A. Metropolitan density, energy efficiency and carbon emissions: Multi-attribute tradeoffs and their policy implications. *Energy Policy*, 2013, 53: 413-428.
- [33] Yang W Y, Cao X S. Examining the effects of the neighborhood built environment on CO<sub>2</sub> emissions from different residential trip purposes: a case study in Guangzhou, China. *Cities*, 2018, 81: 24-34.
- [34] Wang Y J, Hayashi Y, Chen J, Li Q. Changing urban form and transport CO<sub>2</sub> emissions: an empirical analysis of Beijing, China. *Sustainability*, 2014, 6(7): 4558-4579.
- [35] Aguilera A, Voisin M. Urban form, commuting patterns and CO<sub>2</sub> emissions: what differences between the municipality's residents and its jobs? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 69: 243-251.
- [36] Cao X S, Yang W Y. Examining the effects of the built environment and residential self-selection on commuting trips and the related CO<sub>2</sub> emissions: an empirical study in Guangzhou, China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 480-494.
- [37] Ye H, He X Y, Song Y, Li X H, Zhang G Q, Lin T, Xiao L S. A sustainable urban form: the challenges of compactness from the viewpoint of energy consumption and carbon emission. *Energy and Buildings*, 2015, 93: 90-98.
- [38] Wiedenhofer D, Lenzen M, Steinberger J K. Energy requirements of consumption: urban form, climatic and socio-economic factors, rebounds and their policy implications. *Energy Policy*, 2013, 63: 696-707.
- [39] Liu X C, Sweeney J. Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO<sub>2</sub> emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 2012, 46: 359-369.
- [40] Yamaguchi Y, Shimoda Y, Mizuno M. Proposal of a modeling approach considering urban form for evaluation of city level energy management. *Energy and Buildings*, 2007, 39(5): 580-592.
- [41] Ko Y, Radke J D. The effect of urban form and residential cooling energy use in Sacramento, California. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2014, 41(4): 573-593.
- [42] Ewing R, Rong F. The impact of urban form on US residential energy use. *Housing Policy Debate*, 2008, 19(1): 1-30.
- [43] Lee S, Lee B. The influence of urban form on GHG emissions in the US household sector. *Energy Policy*, 2014, 68: 534-549.
- [44] He D Q, Liu H, He K B, Meng F, Jiang Y, Wang M, Zhou J P, Calthorpe P, Guo J X, Yao Z L, Wang Q D. Energy use of, and CO<sub>2</sub> emissions from China's urban passenger transportation sector-Carbon mitigation scenarios upon the transportation mode choices. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2013, 53: 53-67.

- [45] Creutzig F, Baiocchi G, Bierkandt R, Pichler P P, Seto K C. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *PNAS*, 2015, 112(20): 6283-6288.
- [46] Filion Y R. Impact of urban form on energy use in water distribution systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 2008, 14(4): 337-346.
- [47] Li P L, Zhao P J, Brand C. Future energy use and CO<sub>2</sub> emissions of urban passenger transport in China: a travel behavior and urban form based approach. *Applied Energy*, 2018, 211: 820-842.
- [48] Newman P W, Kenworthy J R. The land use—transport connection: an overview. *Land Use Policy*, 1996, 13(1): 1-22.
- [49] Baiocchi G, Creutzig F, Minx J, Pichler P P. A spatial typology of human settlements and their CO<sub>2</sub> emissions in England. *Global Environmental Change*, 2015, 34: 13-21.
- [50] Silva M, Oliveira V, Leal V. Urban form and energy demand. *Journal of Planning Literature*, 2017, 32(4): 346-365.
- [51] Yang W Y, Li T, Cao X S. Examining the impacts of socio-economic factors, urban form and transportation development on CO<sub>2</sub> emissions from transportation in China: a panel data analysis of China's Provinces. *Habitat International*, 2015, 49: 212-220.
- [52] Wang S J, Wang J Y, Fang C L, Li S J. Estimating the impacts of urban form on CO<sub>2</sub> emission efficiency in the Pearl River Delta, China. *Cities*, 2019, 85: 117-129.
- [53] Loo B P Y, Chen C, Chan E T H. Rail-based transit-oriented development: lessons from New York City and Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 97(3): 202-212.
- [54] McCarty J, Kaza N. Urban form and air quality in the United States. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 139: 168-179.
- [55] Mansfield T J, Rodriguez D A, Huegy J, MacDonald Gibson J. The effects of urban form on ambient air pollution and public health risk: a case study in Raleigh, north Carolina. *Risk Analysis*, 2015, 35(5): 901-918.
- [56] Fan C J, Tian L, Zhou L, Hou D Y, Song Y, Qiao X H, Li J W. Examining the impacts of urban form on air pollutant emissions: evidence from China. *Journal of Environmental Management*, 2018, 212: 405-414.
- [57] Clark L P, Millet D B, Marshall J D. Air quality and urban form in US urban areas: evidence from regulatory monitors. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(16): 7028-7035.
- [58] Martins H. Urban compaction or dispersion? An air quality modelling study. *Atmospheric Environment*, 2012, 54: 60-72.
- [59] Hankey S, Marshall J D, Brauer M. Health impacts of the built environment: within-urban variability in physical inactivity, air pollution, and ischemic heart disease mortality. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(2): 247-253.
- [60] Frank L D, Engelke P. Multiple impacts of the built environment on public health: walkable places and the exposure to air pollution. *International Regional Science Review*, 2005, 28(2): 193-216.
- [61] Frank L D, Sallis J F, Conway T L, Chapman J E, Saelens B E, Bachman W. Many pathways from land use to health: associations between neighborhood walkability and active transportation, body mass index, and air quality. *Journal of the American Planning Association*, 2006, 72(1): 75-87.
- [62] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 90(3/4): 102-110.
- [63] Cárdenas Rodríguez M, Dupont-Courtade L, Oueslati W. Air pollution and urban structure linkages: evidence from European Cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1-9.
- [64] Bereitschaft B, Debbage K. Urban form, air pollution, and CO<sub>2</sub> emissions in large US metropolitan areas. *The Professional Geographer*, 2013, 65(4): 612-635.
- [65] Chen L, Yi L. Effects of China's urban form on urban air quality. *Urban Studies*, 2016, 53(12): 2607-2623.
- [66] She Q N, Peng X, Xu Q, Long L B, Wei N, Liu M, Jia W X, Zhou T Y, Han J, Xiang W N. Air quality and its response to satellite-derived urban form in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 297-306.
- [67] Yuan M, Song Y, Huang Y P, Hong S J, Huang L J. Exploring the association between urban form and air quality in China. *Journal of Planning Education and Research*, 2018, 38(4): 413-426.
- [68] Li F, Zhou T. Effects of urban form on air quality in China: an analysis based on the spatial autoregressive model. *Cities*, 2019, 89: 130-140.
- [69] Howard L. *Climate of London Deduced from Metrological Observations*(Vol. 1). London: Harvey and Dorton Press, 1833: 348.
- [70] Megri A C, Haghighat F. Zonal modeling for simulating indoor environment of buildings: review, recent developments, and applications. *HVAC&R Research*, 2007, 13(6): 887-905.
- [71] Blocken B. Computational Fluid Dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 2015, 91: 219-245.
- [72] Toparlar Y, Blocken B, Maiheu B, van Heijst G J F. A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1613-1640.
- [73] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [74] Stewart I D, Oke T R, Kravynhoff E S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations.

- International Journal of Climatology, 2014, 34(4) : 1062-1080.
- [75] Stewart I D, Oke T R. Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. *Keystone: 9th Symposium on Urban Environment*, 2010, 2-6.
- [76] Ching J, Mills G, Bechtel B, See L, Feddema J, Wang X, Ren C, Brousse O, Martilli A, Neophytou M, Mouzourides P, Stewart I, Hanna A, Ng E, Foley M, Alexander P, Aliaga D, Niyogi D, Shreevastava A, Bhalachandran P, Masson V, Hidalgo J, Fung J, Andrade M, Baklanov A, Dai W, Milcinski G, Demuzere M, Brunsell N, Pesaresi M, Miao S, Mu Q, Chen F, Theeuwes N. WUDAPT: an urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(9) : 1907-1924.
- [77] Bocher E, Petit G, Bernard J, Palominos S. A geoprocessing framework to compute urban indicators: the MAPUCE tools chain. *Urban Climate*, 2018, 24: 153-174.
- [78] Bozonnet E, Musy M, Calmet I, Rodriguez F. Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2013, 10(1) : 62-77.
- [79] Wu H, Ye L P, Shi W Z, Clarke K C. Assessing the effects of land use spatial structure on urban heat Islands using HJ-1B remote sensing imagery in Wuhan, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 32: 67-78.
- [80] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 2004, 36(6) : 525-534.
- [81] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 2005, 37(9) : 964-971.
- [82] Middel A, Lukaszczk J, Zakrzewski S, Arnold M, Maciejewski R. Urban form and composition of street canyons: a human-centric big data and deep learning approach. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 183: 122-132.
- [83] Yin C H, Yuan M, Lu Y P, Huang Y P, Liu Y F. Effects of urban form on the urban heat island effect based on spatial regression model. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 696-704.
- [84] Chapman S, Watson J E M, Salazar A, Thatcher M, McAlpine C A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 2017, 32(10) : 1921-1935.
- [85] Gabriel K M A, Endlicher W R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9) : 2044-2050.
- [86] Dixon P G, Mote T L. Patterns and causes of atlanta's urban heat island - initiated precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(9) : 1273-1284.
- [87] Miao S G, Chen F, LeMone M A, Tewari M, Li Q C, Wang Y C. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3) : 484-501.
- [88] Bach P M, Deletic A, Urich C, McCarthy D T. Modelling characteristics of the urban form to support water systems planning. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 104: 249-269.
- [89] Cai Z, Han G F, Chen M C. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature? *Sustainable Cities and Society*, 2018, 39: 487-498.
- [90] Houlihan J E, Findlay C S. Estimating the 'critical' distance at which adjacent land-use degrades wetland water and sediment quality. *Landscape Ecology*, 2004, 19(6) : 677-690.
- [91] Pratt B, Chang H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209/210: 48-58.
- [92] Shandas V, Parandvash G H. Integrating urban form and demographics in water-demand management: an empirical case study of Portland, Oregon. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2010, 37(1) : 112-128.
- [93] Farmani R, Butler D. Implications of urban form on water distribution systems performance. *Water Resources Management*, 2014, 28(1) : 83-97.
- [94] Urich C, Rauch W. Modelling the urban water cycle as an integrated part of the city: a review. *Water Science and Technology*, 2014, 70(11) : 1857-1872.
- [95] Lee J G, Selvakumar A, Alvi K, Riverson J, Zhen J X, Shoemaker L, Lai F H. A watershed-scale design optimization model for stormwater best management practices. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37: 6-18.
- [96] Eckart K, McPhee Z, Bolisetti T. Performance and implementation of low impact development-A review. *The Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 413-432.
- [97] Ellis J B, Lundy L. Implementing sustainable drainage systems for urban surface water management within the regulatory framework in England and Wales. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 630-636.
- [98] Kuller M, Bach P M, Ramirez-Lovering D, Deletic A. Framing water sensitive urban design as part of the urban form: a critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 96: 265-282.
- [99] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, He S, Wang L F, Yu Z B. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4) : 652-658.

- [100] van Roon M R. Water sensitive residential developments: application of LIUDD principles and methods in the Netherlands, Australia and New Zealand. *Urban Water Journal*, 2011, 8(6): 325-335.
- [101] McKinney M L. Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience*, 2002, 52(10): 883.
- [102] Plummer K E, Gillings S, Siriwardena G M. Evaluating the potential for bird - habitat models to support biodiversity-friendly urban planning. *The Journal of applied ecology*, 2020, 57(10): 1902-1914.
- [103] Cox D T C, Shanahan D F, Hudson H L, Plummer K E, Siriwardena G M, Fuller R A, Anderson K, Hancock S, Gaston K J. Doses of neighborhood nature; the benefits for mental health of living with nature. *BioScience*, 2017, 67(2): 147-155.
- [104] Sadler J, Bates A, Hale J, James P. Bringing Cities alive: the importance of urban green spaces for people and biodiversity. *Urban Ecology*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010: 230-260.
- [105] Concepción E D, Obrist M K, Moretti M, Altermatt F, Baur B, Nobis M P. Impacts of urban sprawl on species richness of plants, butterflies, gastropods and birds: not only built-up area matters. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(1): 225-242.
- [106] Blair R. The effects of urban sprawl on birds at multiple levels of biological organization. *Ecology and Society*, 2004, 9(5): art2.
- [107] Scolozzi R, Geneletti D. Spatial rule-based assessment of habitat potential to predict impact of land use changes on biodiversity at municipal scale. *Environmental Management*, 2011, 47(3): 368-383.
- [108] Shanahan D F, Miller C, Possingham H P, Fuller R A. The influence of patch area and connectivity on avian communities in urban revegetation. *Biological Conservation*, 2011, 144(2): 722-729.
- [109] Grafius D R, Corstanje R, Warren P H, Evans K L, Norton B A, Siriwardena G M, Pescott O L, Plummer K E, Mears M, Zawadzka J, Richards J P, Harris J A. Using GIS-linked Bayesian Belief Networks as a tool for modelling urban biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 382-395.
- [110] Beninde J, Veith M, Hochkirch A. Biodiversity in cities needs space: a meta-analysis of factors determining intra-urban biodiversity variation. *Ecology Letters*, 2015, 18(6): 581-592.
- [111] Forsy E A, Allen C R. The impacts of sprawl on biodiversity: the ant fauna of the lower Florida keys. *Ecology and Society*, 2005, 10: art25.
- [112] Zhang H, Jim C Y. Contributions of landscape trees in public housing estates to urban biodiversity in Hong Kong. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(2): 272-284.
- [113] Guida-Johnson B, Faggi A M, Zuleta G A. Effects of urban sprawl on riparian vegetation: is compact or dispersed urbanization better for biodiversity? *River Research and Applications*, 2017, 33(6): 959-969.
- [114] Livesley S J, McPherson G M, Calfapietra C. The urban forest and ecosystem services; impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 119-124.
- [115] Apeayei E, Bank M S, Spengler J D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2310-2323.
- [116] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 2010, 94(2): 99-107.
- [117] Chen X, Xia X H, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1/2/3): 640-646.
- [118] Guagliardi I, Buttafuoco G, Cicchella D, Rosa R. A multivariate approach for anomaly separation of potentially toxic trace elements in urban and peri-urban soils: an application in a southern Italy area. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(1): 117-128.
- [119] Lv J S, Yu Y H. Source identification and spatial distribution of metals in soils in a typical area of the lower Yellow River, Eastern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(21): 21106-21117.
- [120] Qishlaqi A, Moore F, Forghani G. Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(1): 374-384.
- [121] Weber N, Haase D, Franck U. Assessing modelled outdoor traffic-induced noise and air pollution around urban structures using the concept of landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 105-116.
- [122] Lakes T, Brückner M, Krämer A. Development of an environmental justice index to determine socio-economic disparities of noise pollution and green space in residential areas in Berlin. *Journal of Environmental Planning and Management*, 2014, 57(4): 538-556.
- [123] Barber J R, Crooks K R, Fristrup K M. The costs of chronic noise exposure for terrestrial organisms. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25(3): 180-189.