

文章编号: 1009-6000(2018)08-0088-07
中图分类号: TU984 文献标识码: A
doi: 10.3969/j.issn.1009-6000.2018.08.012

基金项目: 上海市政府咨询项目“崇明生态文明智库”。

作者简介: 方怡青, 华东师范大学中国现代城市研究中心, 华东师范大学城市与区域科学学院硕士研究生, 主要研究方向: 城市地理与城市规划;
曲凌雁, 通信作者, 华东师范大学中国现代城市研究中心, 华东师范大学城市与区域科学学院副教授, 主要研究方向: 城市规划。

城市空间形态与空气质量相关性研究综述

Study on the Correlation between Urban Form and Air Quality

方怡青 曲凌雁

FANG Yiqing QU Lingyan

摘要:

近年来我国空气环境问题已严重影响到生产生活等各方面, 引起各界的关注。本文聚焦城市形态与空气质量的相关性的研究进展, 以期能以城市自身的自组织机制解决产生于城市的空气质量问题。查阅相关文献发现, 目前关于城市形态与空气质量的关系的研究方兴未艾。基于现有研究, 本文首先对城市形态及空气质量的概念进行了界定, 并选取了现有文献中具有代表性的指标对它们进行表征, 分别总结了城市形态的不同指标例如城市规模、城市密度、城市形状与空气质量之间关系, 并梳理了与空气质量相关的其他城市特征。继而从交通、住房和产业等方面进一步探讨了相关性背后的机制。在此基础上, 结合中国实际, 构建了一个以概念界定、指标选取、相关性分析和机制探究为内容的研究框架, 并指出了这个问题未来的研究前景与重点方向。

关键词:

城市形态; 空气质量; 空气污染; 相关性研究

Abstract: In recent years, China's air pollution has seriously affected the production, living and other aspects and has attracted attention from all circles. This paper focuses on the progress of researches which discussed the correlation between urban form and air quality and builds a research framework of this issue, in the hope that urban itself can solve the problem of air pollution which arose from the process of urbanization. Researches on this issue are not very mature but prosperously developing. According to existing researches, this paper defines the conception of urban form and air quality, and selects the representative indicators to characterize them including urban size, urban density, urban shape and etc. Then this paper summarizes the correlation between every aspect of urban form and air pollution. Other urban characteristics that may relate with air quality are also summed up. Then the mechanisms behind the correlation are discussed in terms of transportation, housing and industry. On this basis, combined with the reality of China, a research framework based on concept definition, index selection, correlation analysis and mechanism exploration is constructed, and the future research prospects and key directions of this issue are pointed out.

Key words: urban form; air quality; air pollution; correlation

0 引言

改革开放后的中国正面临前所未有的大变革,伴随着经济快速增长和城市化进程加速,城市中的环境问题也日益加重,成为了关系国计民生的重要议题。从2013年冬季爆发的时间长、强度高、范围广的雾霾,到2016年冬季南北方多地同时爆发的面积达到188万 km^2 (相当于中国国土面积的1/5)的雾霾,越来越频繁和严重的空气污染事件带来的影响也越来越大:航班大规模延误、城市道路事故多发、呼吸道疾病的发病率明显上升等等。为应对严重的雾霾,工厂被迫停工、学校被迫停课、不少城市实行限行,生产、学习、生活效率降低,各种直接或间接的经济损失巨大。根据国家环境公报,2014年开展空气质量新标准监测的地级及以上的161个城市中,只有16个城市空气质量达标(优于国家二级标准),占总数的9.9%;也就是说90.1%的城市空气质量不合格^[1]。

由于空气环境问题日益严重,因此空气质量相关话题逐渐成为了研究的热点。以“雾霾”为例,在中国知网数据库进行检索,可以发现2013年前每年的文献数量在1500篇以下,而2013年文献数量显示了爆炸性的增长,猛增至21581篇,之后每年均保持在这一数量之上,涉及环境科学^[2]、建筑科学^[3]、气象学^[4]、化学^[5]、经济学^[6]、法律^[7]、医学^[8]等诸多学科,这些文献分别从特征、产生条件、影响、治理等各方面对雾霾这一空气环境问题进行了详细的分析。

我国地理学界对空气质量以及空气环境问题的研究主要是从气象学和生态学切入的,集中探讨形成机制和构成成分特征,较少的学者从城市地理角度切入,从城市整体入手,探讨城市形态、规划政策等与空气质量的关联性。事实上,空气环境问题的出现离不开城市,其解决也必须以城市为主要空间尺度,所以,

作者认为从城市地理角度切入空气质量的研究是相当必要的。在城市诸多要素与特征中,城市空间形态是最显性的特征,所以本文选取它作为研究重点,试图探究城市空间形态与空气质量相关性。在国内目前的研究中,对这一主题的研究方兴未艾,相关文章基本出现在2013年以后,而且数量并不多,相比之下国外研究开展较早。

西方学者对这一方面的问题进行了数量可观的、较成熟的研究,值得我们借鉴。由于西方各国工业化和城市化都早于中国,在它们发展过程中也历过严重的环境问题。虽然初期(20世纪七八十年代)他们也着重发展技术革命,希望通过节能环保技术改善空气,但在20世纪后期,用城市要素解决空气环境问题的思路也开始出现^{[9][10]}。近年来,西方各国空气质量较20世纪有大幅改善,在新的环境背景下,这一问题仍然吸引学者深入研究:美国学者^[11]以及欧洲学者^[12]都采取了新的方法或新的视角对这一问题进行了更加深入的探究。

本文主要梳理与这一主题相关的现有文献,总结出城市空间形态与空气质量的概念,分析城市空间形态与空气质量之间的关系,探讨其中作用机制,希望能为之后的研究奠定基础、梳理思路,并希望引起学术界对这一问题的关注,为科学的城市规划提供理论依据。

1 城市空间形态:城市外部的空间物质状态

城市空间形态是聚落地理、城市规划方面的重要概念,但它常与城市结构这一概念混用,以至于对这两者的界定一直模糊不清,不同学者对其有不同的定义。

国际上最早定义城市形态的是斯卢特(O.Schluter),城市形态是人类行为遗留在地表上的痕迹,由土地、聚落、

交通线和地表上的建筑等要素构成^[13]。较为经典的定义是伯纳(1971)给出的,他将城市形态定义为场所、地形、以及内部形态(包括密度、异质性、组织原则、社会行为)^[14]。

国内也有学者对这一概念进行了界定,并且在界定城市形态时注重将其与城市结构的概念进行比较。武进博士在自己的著作中,较早地系统地阐述了城市空间形态的定义,他认为城市空间形态反映城市的外部形状,它由结构(要素的空间分布)、形状(城市的外部轮廓)和相互关系(要素间的相互作用和组织)组成的一个空间系统^[15]。在他的界定中,城市形态包括城市结构。朱喜钢教授的观点与前者相反,他认为城市空间结构可划分为包括城市形态在内的三个层次:微观的内部空间结构(功能空间)、中观的外部空间结构(城市形态)和宏观的群体空间结构(城镇体系)^[16]。孙久文、张佰瑞等则把城市形态看作是城市空间结构的整体形式,是城市内部空间布局 and 密度的综合反映,是城市平面的立体的形状和外观的表现^[17]。熊国平认为城市结构是内部的,而城市形态是外部的^[18]。

在上述研究的基础之上,近几年的研究中,我国学者们倾向于将城市空间形态作为城市外部的、显著的、实体的空间物质状态,将其逐渐与内部结构区别开来:潘竟虎、戴维丽认为城市空间形态指城市发展变化过程中城市空间在外部形状、紧凑度和破碎性等方面所表现出的特征,是城市在自然环境、历史发展、城市功能结构、空间发展政策以及规划管理等多因素相互作用下的结果^[19]。

随着概念界定的不断推进,学界对城市形态的研究也进一步细化,对城市形态的指标,以及它们的量化手段的研究也逐渐增加。刘志林、秦波在研究城市形态与低碳城市时将空间形态分为:密度、邻近度和可达性三个指标^[20]。

Lara P 等人在对美国空气质量与城市形态的相关性研究中,将城市形状(强调破碎度)、道路密度、人口密度、人口集中度作为空间形态的主要指标^[21]。西方国家的城市研究中通常选取的指标包括中心性、城市紧凑度、城市用地碎裂化程度、路网构型等,来进行具体城市形态的测度^[22]。还有学者将城市建成区面积^[23],以及粗糙度、开敞度^[24],引入了城市形态的研究中。

在城市形态具体指标的基础上,相应的量化手段也不断增加。Chen Lu 等人使用了紧凑度指数、分形维数、形状指数科学地量化了城市形态^[25]。还有网络分析、图形特征值法等都可用于量化城市形态中的各个指标。

综上所述,目前的国内外研究对于城市形态的概念尚未形成共识,在此基础上选取的指标也各不相同,尤其是与城市结构这一概念的区分虽有学者论述但尚未有权威的观点出现。为了进行后续相关性和机制的研究,本文在此将城市形态定义为城市外部的空间物质状态,与内部用地布局等要素所表征的城市结构相区别。

2 空气质量:污染物种类与综合感受

空气中所含有的污染物越多,则空气质量越差,空气中的污染物可分为无机污染物、有机污染物以及颗粒物,这些污染物不仅影响环境质量,严重者会对人体以及生产造成显著的不良影响。

不同国家的空气中污染物组成成分不同,监测数据也不同,所以,在研究空气质量时所选取的要素也不相同。中国城市空气主要污染物 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ ^[11],所以中国的很多研究都会采用这4个指标作为量化空气质量的数据。美国的研究则会加入 O_3 ^{[21][23]}。当前研究中,也有学者使用一些新的指标,例如杨肃昌、马素琳等人认为 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10}

等指标都是负向指标,而且直接引用这些污染物浓度或者排放量数据有忽略本地净化能力的缺陷^[26],所以创新地选取空气质量达标天数这一正向指标,不仅能够综合以上几项因素,还能够反映居民对空气质量的综合感受^[27]。

空气质量的概念和指标较统一,近年来也有新的指标被引入,但大体并没有太大的争议和显著的创新。

3 城市空间形态与空气质量的相关性:实证研究综述

根据城市空间形态的不同定义,相关性的研究也有不同的侧重。下文根据本文第二部分对城市形态概念和指标的综述,整理出城市空间形态中较有代表性的几个方面,分别详细阐述现有的实证研究中它们与空气质量的关联。

3.1 城市规模与空气质量

在城市形态的诸多指标中,城市规模是最明显的部分。需要说明的是,此处的城市规模是指城市建成区的面积,而不是城市的经济规模或是人口规模——虽然,建成区大的城市的经济规模和人口规模一般也较大,但城市空间形态在本文中被总结为城市外部的空间物质状态,而经济与人口终究是城市内部的特性,故本文不对人口规模等方面重点讨论。

Stone 通过计算美国城市的蔓延指数(Sprawl index)与 NO_x 、挥发性有机物以及臭氧的在空气中的浓度得出结论:城市扩张得越厉害,其空气质量就越差^[28]。李茜等人则对中国237个地级以上城市作出了实证分析,最终证实:城市的建成区面积与城市空气主要污染物浓度呈正相关关系——建成区面积的增加代表着城市的扩张,随之而来的城市建设、道路建设会直接带来扬尘和粉尘的增加,间接带来资源能源利用的加大、生活污染排放的增加,都会对城市空气质量带来不利影响^[23]。张纯用面板数据对这一

问题进行了探究,也得出了类似的结论^[29]。

3.2 城市密度与空气质量

广义的城市密度包括人口密度、建筑密度、交通密度、产业密度等。但此处定义的、作为空间物质状态的城市密度,指的是城市物质空间的紧凑度,表征了城市的蔓延状态。低密度的城市蔓延似乎一度成为了消极城市形态的原罪。

城市密度的测量有两种方法:第一种方法较为直接,即通过遥感图像计算城市紧凑度指数或破碎程度,进而直接得出城市物质形态的密度情况^{[11][23]};第二种方法是基于人口密度与物质形态的高度相关性的,一般来说人口密度越高的城市空间上的密度也越高,所以,通过测算城市的人口密度也能大概了解城市的空间密度状况,这是一种间接的方法,也与本文定义的城市形态有所出入,但由于数据易获得,所以有较多应用^{[27][28]}。

对于城市密度与空气质量的关系的研究结论是戏剧性的:20世纪初的研究认为人口越稠密、就业越集中的地方,通常空气污染也越严重,所以美国20世纪中期开始的郊区化进程,通过疏解人口到广大的郊区以求改善人居环境,减轻城市的空气环境压力。然而,随后的研究发现低密度的城市扩张会增加城市的通勤距离,进而对空气质量产生负向的影响,相反,紧凑发展的城市能够有效改善空气环境^[30]。近两年的中外研究也支持了这种结论。McCarty 等人在对美国城市进行了分析的过程中,用城市斑块表示连续的城市建设用地,以测算城市用地的破碎程度,然后建立计量模型,发现城市破碎程度(相当于密度)与空气质量成负相关^[11]。Chen Lu 等人则以中国287个城市为案例,通过使用紧凑度指数与空气质量指标之间进行统计分析,也得出类似结论^[25]。

3.3 城市形状与空气质量

城市形状是城市外部物质形态的又

一个重要指标。因为自然、政策等因素，不同的城市发展出了不同的形状。

为了科学地归类和描述每个城市的形状，学者提出了相应的计量指数模型，最早被用来衡量城市形状模型是城市的长短轴比例模型，它可以用来描述城市偏离圆形的程度，在早期和现在的研究中皆有广泛的使用^{[12][31]}，这种描述较为简单，对形状的分类不够详细，有很多独特的形状特征难以被表现出来。类似的模型还有形状率和圆形率^[13]，它们原理简单，测算方便，但是都有反映特征不全的缺陷。为了完善形状的量化，学者引入了 Boyce-Clark 形状指数，在近期的研究中多有使用^{[11][19]}。这一指数的优势在于其可以测算出 X 形、H 形、圆形、竖矩形、星形等多达 15 中具体的城市形状。使得城市形状的研究得以进一步细化。对于形状的描述还在不断完善，上世纪八十年代出现了几何分形维数^[32]，它可以被用来描述城市形状和边界的复杂程度^{[11][19]}。

Lara 等人使用长短轴比例量化美国的城市形状后回归，该变量的系数约等于 0，也就是说，城市形状的长短轴比例并不影响美国城市的空气质量。但是 Bento 等人也以美国为研究范围，也用了长短轴比例进行回归，结果发现这一变量会对人们的出行需求产生显著影响，我们有理由推测，根据 Bento 的数据，城市长短轴会对美国城市的空气质量产生一定的影响^[31]。所以，美国城市的长短轴比例与其空气质量之间的关系尚有争议。Chen Lu 等人使用 Boyce-Clark 形状指数对 287 个中国城市的形状进行量化后回归，得出的结论是：X 形或者 H 形的城市比菱形的城市空气污染少，而分形维数对空气质量的影响较小^[25]。

3.4 其他与空气质量相关的城市特征

城市空气质量与城市的多种特征相关，所以在研究城市形态与空气质量相

关性时必须考虑到其他要素的影响，若建立回归模型则应将这些要素也引入其中，结果才能更加科学。其他要素可分为四类：

其一是城市自然条件，主要包括气候和地形。其中气候着重强调降水、气温和风速，它们影响着空气对污染物的净化水平，同时也通过对供暖等人类活动的影响，与空气质量发生着密切的联系。例如杨阳等人研究发现年平均饱和水气压与年均最高气温都与城市空气质量正相关^[33]，这也就解释了王振波等人发现的中国南方空气质量普遍优于北方的现象^[34]，欧美学者对当地的研究^{[11][12]}也得出相同结论。与气候不同的是，不同学者对于地形与空气质量的相关性的研究结论却有所不同，例如 Rodríguez 等对欧洲的研究发现平均海拔对于空气质量的影响不显著^[12]，而杨阳等人对中国的研究则发现海拔落差是影响当前中国城市空气质量的主要因素之一^[33]。

其二是城市社会经济现状，主要包括城市生产总值或人均收入所表征的城市经济发展总体情况、产业结构尤其是第二产业所占比重、能源结构、人口总数和密度。诸多研究结果均表明经济越落后、人口越多、人口密度越大、二产比重越高、能源结构越传统的城市空气质量就越差^{[11][23][33][35]}。

其三是城市内部特征，包括绿地状况、土地利用结构和公交供给情况等。城市内部特征多种多样，不同文章的指标选取也有所差异，例如张纯的文章中引入了每万人拥有公共汽车数^[29]，Clark 等人的研究中则将职住平衡的情况作为重要指标^[21]，这些指标表征了城市内部的重要特征，但由于数据的难获得性故而在同类论文中并未普遍采用。对于同样的指标，结论也可能存在差异：城市绿地情况是很多研究都关注的重要内部特征，有学者如张纯认为绿地面积与城市空气质量

之间的相关性是显著的^[29]，更多学者如 Rodríguez、杨阳、李陈等均得出相反的结论^{[12][33][36]}。

其四是周边地区的影响，空气污染是极易扩散的，所以周边地区的空气质量会显著影响城市的空气质量。再加上临近城市的资源禀赋、区位条件类似，产业与经济发展情况也常常保持相似性，故而城市的空气质量状况与周边城市或地区的空气质量的相关性更加显著。国内外研究均证明城市空气质量存在显著的正空间自相关即高高集聚或低低集聚^{[11][34]}。

4 机制探究

城市形态与空气质量之间的关系并非直接的，这种相关性的中间机制，也即城市形态是通过什么作用于空气质量的问题，也是值得研究的重点问题。虽然，国内外已有少数学者提出了思路和研究框架^{[10][22]}，但后续的实证研究数量不多，尤其是国内的。

目前学界对于机制的探究多是交通角度的，即城市形态会影响交通通达性和交通需求，进而影响汽车尾气排放，最终影响空气质量。Waddell 等人建立城市仿真模型 (UrbanSim) 时就将交通因素作为连接城市与环境的重要因素^[37]。Borrego 等人则应用中尺度的光化学系统 MEMO/MARS，证实城市形状决定交通，进而影响空气质量^[38]。国外在相关方面进行了较多研究，国内学者近两年也开始重视这一问题，秦波等人对北京的社区展开了实证调研，证实城市形态对居民的建设和出行能源消费有显著影响，进而影响碳排放^[39]。龙瀛等人通过多智能体 (multi-agent) 方法，构建城市形态—交通能耗—环境影响的模型，通过定量分析得出：对于不同的城市空间布局 and 密度分布，通勤交通能耗的弹性范围约为 3 倍^[40]。余倩楠等人以长三角地区为研究对象、建立回归模型也发现道路密

度、交通耦合度等对区域碳排放影响显著,在此基础上推断城市形态主要通过路网交通产生作用,进而影响碳排放和城市空气质量^[42]。

近两年也有学者从住宅角度研究城市形态与空气质量之间的机制。其中解释的思路主要有两种:第一种思路,住宅能耗直接影响空气质量,即不同的城市形态意味着住宅密度和住宅类型差异,而不同的住宅有不同的输电和配电损耗以及不同的能源需求,它们与热岛效应有关的空间加热和冷却要求也有所差异,这三点最终导致空气质量差异^[43],但这种思路也受到一定的争议,例如Hahn的研究结果表明住宅部门的碳排放与城市空间形态关联不大^[44];第二种思路,住宅的密度、分布影响交通出行,进而间接地影响空气质量^[38],Grazi等人在对美国的实证研究中得出居住密度增加500户/平方英里则交通污染排放量能下降15%^[45]。

最后一种机制研究的角度是产业集聚,即不同的城市形态意味着城市内产业集聚情况的差异,一般来说城市规模越大、密度越大则产业集聚越明显,污染物排放量又随着产业集聚情况而异,最终导致空气质量的差异。马素琳等人认为,大部分情况下,城市的规模扩张必然会带来人口向城市的集中并伴随着企业的迁移、产业的集中,在此基础上,他们使用经济规模和经济集聚度等变量分析了城市规模与集聚对空气质量的影响^[27]。此外,刘习平等人也用面板数据对产业集聚与城市环境之间的关系展开了实证研究,证明城市内的产业集聚显著影响环境质量^[46]。

以上角度基本是用污染排放连接起城市形态与空气质量之间的关系。正如郭佳星在文章中总结:目前的研究旨在建立“城市形态→空气质量”或“城市形态→能耗”之间的关系,对城市形态

影响空气污染物产生和扩散的机制尚不清晰^[47]。但也有学者对空气扩散作为中间机制提出了初步的构想:丁沃沃等人引入天空开敞程度和城市粗糙度,认为城市形态通过天空开敞度和城市粗糙度影响城市微气候(尤其是其中的对流和降水),进而影响污染的扩散,最终影响空气质量^[24]。郭佳星则将交通分配模型、交通排放模型、扩散模型等全部引入城市形态与空气质量的关联性的集成模型之中,建立了一个集排放、扩散于一身的,考虑交通、住房多角度的关联机制^[46]。上述两篇文章都仅提出了分析思路与模型框架,缺乏具体的数据支撑和实证结果,所以,“城市形态→污染扩散→空气质量”这一机制的后续研究空间巨大。

5 研究框架与结语

尽管积累了一定的经验和案例研究,并且所有的相关研究的结果都表明城市形态确实会对空气质量产生影响,但城市形态与空气质量之间的关系仍然不十分明朗——因为要素之间的作用大小和作用机制都尚未明确,尤其是针对

中国城市的研究更是稀少。

为解决中国的问题,必须在借鉴西方较成熟的研究的基础上,重视中国本土的自然地理和人文地理特征,对中国的实际情况进行实证的研究。可以从以下四个方面的问题入手,逐步构建研究框架(如图1所示):(1)城市形态是什么?如何测度?(2)空气质量是什么?如何测度?(3)城市形态与空气质量之间是否有相关性?哪些城市形态的要素会影响空气质量?(4)城市形态如何影响空气质量?第一和第二问题对应框架中最左和最右两列,而框架的中间则是第三和第四问指向的相关性和机制的探究。

这方面的研究能够为面临着严峻的环境问题挑战的中国城市提供重要参考和借鉴:开发新技术、调整产业结构、发展公共交通等措施确实能够在较短的时间内直接、有效地减轻空气污染,但是城市形态的改善是一种更加自组织的、持久的、稳定的方式:城市形态的改善并不会直接影响空气质量,但它能够通过城市自身多样的机制对包括空气质量

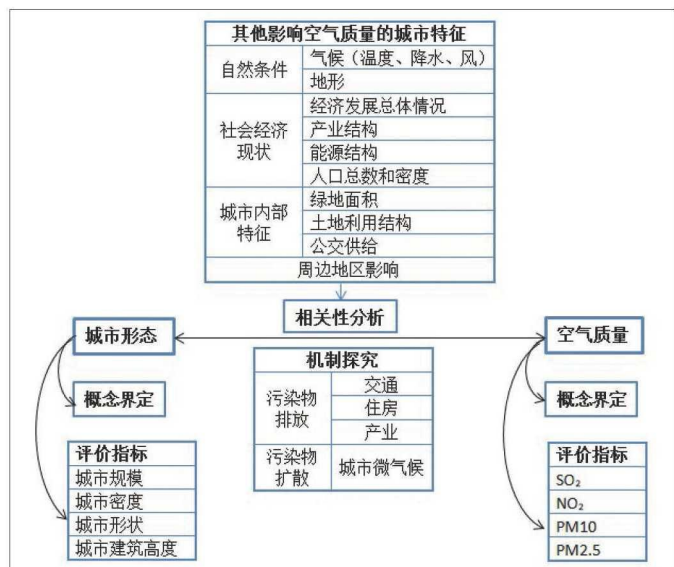


图1 城市形态与空气质量相关性研究框架

在内的城市各种环境要素产生广泛的影响,具体而言,优化城市形态能够引导交通行为、居住行为、生产行为等朝着科学、节能、舒适的方向发展,这些城市要素的综合作用最终带来了空气质量的变化。由于城市形态带动的要素复杂多样,所以影响力产生较慢,但持续时间却很长,不会因为政策的变更或经济形势的变化而丧失效果。所以,在采取直接的行政或者技术手段控制污染的同时,不妨考虑依靠城市自身,去解决产生于城市的空气污染问题。

在阅读文献的基础上,作者认为目前的研究尚有许多亟待完善的空间,未来可在以下几个方面进行重点研究:(1)现有研究较少考虑周边区域对城市的空气质量的影响,如何量化这种影响并将其引入城市形态与空气质量的相关性探究的计量模型中,是未来可以进一步研究的;(2)建筑高度尚未见于相关研究对城市空间形态的考量当中,但当前城市内部高楼愈来愈多,在此背景下,建筑高度及其分布情况是否会影响空气质量也是值得关注的问题;(3)不同类型的城市的空间形态与空气质量之间的关系极有可能存在区别,后期研究可以将城市进行具体分类后进一步探究空间形态与空气质量之间关系,例如按城市规模、所处区域或者城市职能等进行划分,对不同类别的城市进行探究,并在类别之间进行比较,以期提高结论的科学性和其在规划实践中的可借鉴性;(4)不同情形例如不同季节、不同天气情况下,城市空间形态与空气质量之间关系也可能有所差异,探究这种差异及其背后的原因与机制,也是深入研究的一大方向;(5)空气污染可分为污染排放和扩散两方面,将城市形态与这两者的关系分解,并进一步探究其内在作用机制也有很大的研究空间;(6)可尝试将自组织思想和模型运用到这方面的研究中,尤其是

用于机制的解释。

总之,研究这个问题不仅能够助力空气污染问题的解决,还能推进城市成为更加宜居的人类生活空间,且现有研究有所不足,故而未来研究空间巨大,值得深入地进行实证研究。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环保部.2014年中国环境状况公报[R].<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkqb/lssj/zxhjzkqb/>.
- [2] 赵秀娟,蒲维维,孟伟,等.北京地区秋季雾霾天PM_{2.5}污染与气溶胶光学特征分析[J].环境科学,2013(2):416-423.
- [3] 吴叶.绿地规划在城市雾霾治理中的机制研究[J].科技传播,2015(21):121,110.
- [4] 张人禾,李强,张若楠.2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J].中国科学:地球科学,2014(1):27-36.
- [5] 陈杨,杨江峰,欧阳坤,等.基于减少雾霾形成的脱氮材料的研究进展[J].化工新型材料,2016(5):1-3.
- [6] 刘星河.公共压力、产权性质与企业融资行为:基于“PM_{2.5}爆表”事件的研究[J].经济科学,2016(2):67-80.
- [7] 陈海嵩.雾霾应急的中国实践与环境法理[J].法学研究,2016(4):152-169.
- [8] 邢麟,王巍,余洋,等.雾霾天气对老年呼吸系统及心血管疾病的影响[J].职业与健康,2014(16):2277-2279.
- [9] Anderson W P, Kanaroglou P S, Miller E J. Urban form, energy and the environment: A review of issues, evidence and policy[J]. Urban Studies, 1996, 33(1): 7-35.
- [10] Marquez L O, Smith N C. A framework for linking urban form and air quality[J]. Environmental Modelling & Software, 1999, 14(6): 541-548.
- [11] McCarty J, Kaza N. Urban form and air quality in the United States[J]. Landscape and Urban Planning, 2015(139): 168-179.

- [12] Rodríguez M C, Dupont-Courtade L, Oueslati W. Air pollution and urban structure linkages: Evidence from European cities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1-9.
- [13] 段进.城市空间发展论(第二版)[M].南京:江苏科学技术出版社,2006.
- [14] Bourne L S Internal structure of city [M]. New York: Oxford University Press, 1971.
- [15] 武进.中国城市形态:结构、特征及其演变[M].南京:江苏科学技术出版社,1990.
- [16] 朱喜钢.城市集中与分散论[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [17] 孙久文,张佰瑞,等.城市可持续发展[M].北京:中国人民大学出版社,2006.
- [18] 熊国平.当代中国城市形态演变[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [19] 潘竟虎,戴维丽.1990-2010年中国主要城市空间形态变化特征[J].经济地理,2015(1):44-52.
- [20] 刘志林,秦波.城市形态与低碳城市:研究进展与规划策略[J].国际城市规划,2013(2):4-11.
- [21] Clark L P, Millet D B, Marshall J D. Air quality and urban form in US urban areas: Evidence from regulatory monitors[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(16): 7028-7035.
- [22] 张纯,张世秋.大都市圈的城市形态与空气质量研究综述:关系识别和分析框架[J].城市发展研究,2014(9):47-53.
- [23] 李茜,宋金平,张建辉,等.中国城市化对环境空气质量影响的演化规律研究[J].环境科学学报,2013(9):2402-2411.
- [24] 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[J].建筑学报,2012(7):16-21.
- [25] Lu C, Liu Y. Effects of China's urban form on urban air quality[J]. Urban Studies, 2015, 53(12): 2607-2623.

- [26] 杨肃昌,马素琳. 空气质量与城市发展: 基于动态面板GMM模型的实证分析[J]. 经济问题探索,2015(8):52-60.
- [27] 马素琳,韩君,杨肃昌. 城市规模、集聚与空气质量[J]. 中国人口·资源与环境,2016(5):12-21.
- [28] Stone B. Urban sprawl and air quality in large US cities[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 86(4): 688-698.
- [29] 张纯. 中国城市形态对雾霾的影响及演化规律研究:基于地级市PM10年均浓度的分析[A]//2014中国城市规划年会论文集[C]. 2014.
- [30] Cambridge Systematics, Inc. Parsons Brinkerhoff Quade and Douglas, Inc. Making the Land Use, Transportation, Air Quality Connection: Analysis of Alternatives, 1000 Friends of Oregon [R]. 1992, Volume 2.
- [31] Bento A M, Cropper M L, Vinha K. The effects of urban spatial structure on travel demand in the United States[J]. The Review of Economics and Statistics, 2005, 87(3):466-478.
- [32] Batty, Longley M. Fractal Cities: A Geometry of Form and Function[M]. Academic Press Professional Inc,1994
- [33] 杨阳,沈泽昊,郑天立,等. 中国当前城市空气综合质量的主要影响因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(6):1102-1108.
- [34] 王振波,方创琳,许光,等. 2014年中国城市PM2.5浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70(11):1720-1734.
- [35] 蔺雪芹,王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. 地理学报, 2016, 71(8):1357-1371.
- [36] 李陈. 中国160座城市空气质量影响因素定量分析[J]. 生态经济(中文版), 2016, 32(10):151-153.
- [37] Waddell P. Urban Sim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning[J]. Journal of the American Planning Association, 2002, 68(3): 297-314.
- [38] Borrego C, Martins H, Tchepel O, et al. How urban structure can affect city sustainability from an air quality perspective [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(4):461-467.
- [39] 秦波,邵然. 城市形态对居民直接碳排放的影响:基于社区的案例研究[J]. 城市规划, 2012(6):33-38.
- [40] 龙瀛,毛其智,杨东峰,等. 城市形态、交通能耗和环境影响集成的多智能体模型[J]. 地理学报, 2011, 66(8):1033-1044.
- [41] 余倩楠,贾文晓,潘晨,等. 长三角地区城市形态对区域碳排放影响的时空分异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(11):44-51.
- [42] Ewing R, Fang R. The impact of urban form on U.S. residential energy use[J]. Housing Policy Debate, 2008, 19(1):1-30.
- [43] Kahn M E. The environmental impact of suburbanization[J]. Journal of Policy Analysis and Management, 2000, 19(4):569-586.
- [44] Grazi F, Ommeren J N V. An empirical analysis of urban form, transport, and global warming[J]. Energy Journal -Cambridge Ma then Cleveland Oh-, 2008, 29(4):97-122.
- [45] 刘习平,宋德勇. 城市产业集聚对城市环境的影响[J]. 城市问题, 2013(3):9-15.
- [46] 郭佳星. 城市形态与空气质量关联性研究框架[J]. 建设科技, 2015(18):58-60.

(上接76页)

- 家空间规划进展及趋势[J]. 中国国土资源经济, 2008, 21(6):30-31.
- [18] 陈成,张丽君. 英国区域空间战略及对我国的启示[J]. 国土资源情报, 2012(1):20-24.
- [19] 孙施文. 英国城市规划近年来的发展动态[J]. 国外城市规划,2005(6):11-15.
- [20] 唐子来. 英国城市规划核心法的历史演进过程[J]. 国际城市规划, 2000(1):10-12.

- [21] 徐瑾,顾朝林. 英格兰城市规划体系改革新动态[J]. 国际城市规划,2015(3):8-83.
- [22] 杨东峰. 重构可持续的空间规划体系:2010年以来英国规划创新与争议[J]. 城市规划,2016,40(8):91-98.
- [23] 杨柳斌. 英国1947-1968年开发规划变革的启示[D]. 广州:华南理工大学, 2007.
- [24] 于立. 控制型规划和指导型规划及未来规划体系的发展趋势:以荷兰与英国为例[J]. 国

- 际城市规划,2011,26(5):56-65.
- [25] 张杰. 英国2004年体系下发展规划实证研究:以英格兰地区为例[J]. 国际城市规划,2015,30(1):6-94.
- [26] 赵景亚,殷为华. 大伦敦地区空间战略规划的评价与启示[J]. 世界地理研究, 2013(2):43-51.