

城市化与PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素的研究进展

韩立建

(中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:快速的城市化和经济发展在改善我们物质生活的同时,也因其剧烈人为活动导致了严重的环境污染,尤其是近年来以细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物的城市与区域空气污染问题凸显。而传统的研究更注重孤立地开展空气污染或城市化的研究,缺乏对二者相互耦合关系的综合研究。本文以中国近年来广受关注的以PM_{2.5}为首要污染物的城市空气污染为切入点,系统地分析总结了在城市化与PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素方面的主要研究进展,包括研究框架、主要方法和相关的主要研究成果等。指明该领域的研究已从空间格局分析逐步深入到健康影响、社会经济驱动等相关方向,并已延伸至复合主题的研究。未来,开展更为深入细致的研究,对于拓展城市与景观生态学的理论体系,了解城市化与城市空气质量的影响关系,解析不同城市发展阶段所面临的城市空气质量问题,将具有重要的科学与现实意义。

关键词:城市空气质量;大气污染;PM_{2.5};生态城市;时空格局;城市化

1 引言

改革开放以来、尤其是2000年以来,中国经历了快速的城市化过程。2017年,中国城市化率达到58.52%,城市常住人口达8.13亿;预计到2030年,中国城市化水平将达到65%。虽然中国城市化水平与世界发达国家尚有差距,但其城市化的发展速度却远高于世界平均水平(Zhu et al, 2011; Bai et al, 2014)。这种短期快速的城市化在改善我们的物质生活的同时,也因其产生剧烈人为活动而导致严重的环境污染,尤其是近年来出现了以细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物的城市与区域空气污染问题(Chan et al, 2008; Han et al, 2014)。

PM_{2.5}是指近地表空气中粒径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物,相比于传统的氮氧化物和硫氧化物,它能够较

长时间地悬浮于空气中,降低大气能见度,形成日常认识中的“霾”(Hyslop, 2009; Pope et al, 2012)。随着人民群众对美好生活的需求和对空气污染问题的关注日益增长,对霾的认识也从史书中的粗浅记载上升到科学系统的认知。中国历史上最早对“霾”的认识始于甲骨文和《说文解字》,认为霾就是“风雨土也”。而对霾的成因的认识则归因于强风和干燥的下垫面,这可追溯到《甘州·祈雪文》中记载的长期不雪与霾的相互关系:“一月不雪兮,绿意早凋。两月不雪兮,沙飞尘走。三月不雪兮,雾霾障重。四月不雪兮,斯民生愁。”。古人局限于上述粗浅的认识,对霾的治理也更多地求助于神灵:“元六年(1340年)腊月,雾锁大都,多日不见日光,都门隐于风霾间;风霾蔽都城数日,帝恐天神之怒,遣礼部焚香祭天,祈神灵驱风霾而散”。近代,随着科技

收稿日期:2018-03-12;修订日期:2018-07-05。

基金项目:国家自然科学基金项目(41301199, 41771201);国家重点研发计划项目(2016YFC0503004) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301199, No.41771201; National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0503004]。

作者简介:韩立建(1981-),男,辽宁建昌人,博士,副研究员,从事城市发展与空气质量的权衡研究, E-mail: ljhan@rcees.ac.cn。

引用格式:韩立建. 2018. 城市化与PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 37(8): 1011-1021. [Han L J. 2018. Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China[J]. Progress in Geography, 37(8): 1011-1021.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.08.001

的进步,对霾的本质认识不断深化,发现霾是自然源与人为源排放的一次颗粒物,在特定的气象流场与大气边界层结构下,通过一系列物理与化学过程形成二次颗粒物PM_{2.5}并具有消光效应而导致的(Huang et al, 2014)。PM_{2.5}作为致霾的主要污染物,会对人群的健康产生显著的负面影响,尤其是导致心脑血管系统的疾病,并诱发癌变等(Lim et al, 2012)。同时,PM_{2.5}相比于传统空气污染物的去除难度更大,传统的空气净化设备主要针对花粉、宠物毛等易对人群产生不适的小范围、小剂量的致敏物质进行净化,而对于高浓度的城市与区域性PM_{2.5}污染,净化器和日常的口罩防护所起到的作用也仅是杯水车薪。目前中国虽在PM_{2.5}污染治理方面取得了一些进展,但与日本等发达国家相比依旧存在显著的差距(McNeill, 2000)(表1)。中国在空气污染的治理方面相比发达国家也存在新的特点,即中国快速的经济、社会发展与城市化并行的复合效应对大气环境造成不同程度的影响。

此前的研究注重独立地进行空气污染或者城市化的研究。针对空气污染物的研究,由早期的硫氧化物(如SO₂)、氮氧化物(如NO₂)、总悬浮颗粒物(TSP)等常规的污染物的研究逐步深入到PM_{2.5}和臭氧(O₃)等新污染物,并从关注单一污染向复合空气污染转变(Han, Zhou, Pickettl, 2018)。而针对城市化的研究,更多地关注于城市的空间格局时空动态变化及其驱动因素。虽然有些研究将生态和环境质量等作为定量依据说明城市化的生态环境效应,但尚未直接提出城市化产生的主要生态环境问题,更没有开展深入细致的空间格局特征与影响因素的多尺度研究(陈利顶等, 2016; 周伟奇等, 2017)。可以说,国内外关于城市化与空气污染物的耦合关系的研究均较为少见。而实际上,系统地解析城市化与空气污染的关系,将有助于探索环境友好的城市化模式、评估城市对周边生态系统的影响、制定城市发展的总体规划等。在此背景下,笔者在国家

自然科学基金青年基金项目资助下,以遥感数据为主要数据源,以遥感信息反演、特征提取和GIS空间分析为技术手段,结合典型气象、环境和地面调查数据,从以下3个方面对城市化与空气污染的相互关系开展研究:①中国PM_{2.5}浓度的时空分异格局;②中国城市PM_{2.5}污染对其周边区域影响的时空分异格局特征;③全球、区域、城市和局地多尺度城市化与PM_{2.5}污染的关联。在以上3个方面取得的一系列进展,逐步加深了PM_{2.5}污染的研究,从空间格局分析逐步深入到健康影响、社会经济驱动等相关方向,并推动了部分复合问题的研究与解析(表2)。本文在上述基金项目研究的基础上,梳理国内外相关研究的成果,总结城市化与空气污染相互关系研究的进展,以供该方向开展更为深入细致的研究,拓展城市与景观生态学的理论体系,了解城市化与城市空气质量的影响关系,解析不同城市发展阶段所面临的的城市空气质量问题,为可持续、环境友好的城市发展之路提供科学的参考。

2 城市化与PM_{2.5}关系研究框架与主要方法

针对城市景观格局特征及其演变的研究工作积累了大量的方法,这些方法对研究快速城市化过程的生态环境效应和效益具有较好的借鉴和参考意义。因此,在景观与城市生态学、自然和经济地理学等学科的研究方法的基础上,架构了研究框架,拓展了已有研究方法的应用范围。

研究的总体框架是在分析PM_{2.5}污染的时空格局分析的基础上发现城市的PM_{2.5}浓度高于周边区域,进而建立评估模型,定量分析城市PM_{2.5}污染对其周边区域的影响,发现城市是PM_{2.5}的主要污染源,因此在全球、区域、城市和局地多尺度开展了城市化与PM_{2.5}污染的关联分析,因篇幅所限,本文仅对主要方法进行简要介绍,详细分析方法可参阅相

表1 中国与日本空气污染治理手段对比
Tab.1 Comparison of air pollution control approach between China and Japan

	政策	技术	公众认知	治理周期	环境教育
中国	立法、低效产业和能源结构转型、强力行政管控	限行、限购、管控排放规模、缺乏有效的技术措施;新能源汽车	初级水平,无有效的维权认知和渠道	未知 (2013-)	环境教育严重弱于应试科目,且体系不完善
日本	立法、高效的产业和能源结构转型	大幅度的技术进步和改良;混合动力汽车	对污染企业的大规模集体诉讼,捍卫权力,保护赖以生存的环境	10年 (1970-1980)	完备的环境教育体系;高效科普策略

注:本表内容由笔者基于 McNeil, 2000 的著作归纳总结得出。

表2 近年来中国开展的空气质量研究主要案例

Tab.2 Typical studies focusing on air pollution (PM_{2.5} pollution) in China

研究主题		主要相关SCI文章(基于遥感反演PM _{2.5} 浓度数据)	中文论文案例
格局分析	时空格局分析	<u>Han et al, 2014</u> ; Lin et al, 2014; <u>Han et al, 2015a, 2015b</u> ; Ma et al, 2016; Peng et al, 2016; Luo et al, 2017.	王振波等, 2015.
	空间相互作用分析	<u>Han et al, 2014, 2015b</u> .	李沈鑫等, 2017; <u>别同, 韩立建, 何亮等, 2018</u>
健康影响	健康风险评估	Lim et al, 2012; Wang et al, 2013; Fleischer et al, 2014; Fu et al, 2015; Brauer et al, 2016; Ford et al, 2016; Liu et al, 2016; Xie et al, 2016; Guo et al, 2017; Lu et al, 2017.	王德庆等, 2012; 李辉等, 2013; 傅尧等, 2016;
	人群污染暴露	<u>Han et al, 2015a</u> ; van Donkelaar et al, 2015; He et al, 2016; Lin et al, 2016; Peng et al, 2016.	张凡等, 2016; 刘帅等, 2016.
社会经济影响	城市化与PM _{2.5}	<u>Han et al, 2014</u> ; <u>Han et al, 2015b</u> ; <u>Han et al, 2016</u> ; Larkin et al, 2016; Li et al, 2016; <u>Han et al, 2018a, 2018b</u> .	<u>张淑平等, 2016a</u> ; 王桂林等, 2017;
	其他因素	Lin et al, 2014; Li et al, 2016; Luo et al, 2017.	王桂芝等, 2017.
气象要素影响		Lin et al, 2015.	<u>张淑平等, 2016b</u> .
复合主题	城市化对人群暴露的贡献	<u>Han et al, 2017</u> .	孙敏等, 2018;
	复合空气污染及其与城市化的关系	<u>Han, Zhou, Pickett et al, 2018</u> .	<u>别同, 韩立建, 田淑芳等, 2018</u> .
			无

注:表中斜体带下划线的参考文献为基于国家自然科学基金项目(41301199,41771201)完成的工作。

关参考文献。

(1) PM_{2.5}浓度时空格局分析

时空格局分析是生态学和地理学较为常用的分析方法,在城市化与PM_{2.5}关系的研究中,我们借鉴了这方面的成熟技术与方法,利用地理空间分析平台对PM_{2.5}污染的时空格局开展了分析,包括:计算长时间序列的PM_{2.5}浓度的平均情况及其显著变化趋势,叠加不同的土地覆盖类型,分析不同覆盖类型PM_{2.5}浓度以及进一步分析地级市尺度的PM_{2.5}浓度分布情况等(Han et al, 2014; Han et al, 2015a)。

(2) 城市PM_{2.5}污染对其周边区域的定量影响分析方法

城市PM_{2.5}污染对其周边区域的影响受自然地理特征、气候气象因素等多方面的影响,但以往研究中少有量化的成果,尤其是在全国和区域尺度上开展的相关研究更为缺乏。有鉴于此,我们通过格局分析发现城市PM_{2.5}浓度显著高于其他用地类型,为定量评估PM_{2.5}污染对其周边区域的影响程度,在地级市尺度上构建了城市与其周边区域PM_{2.5}浓度差异评估模型,通过该模型可定量地评价城市与其周边区域的PM_{2.5}污染的相互影响关系(Han et al, 2014)。其公式为:

$$D_{PM_{2.5}} = U_{PM_{2.5}} - R_{PM_{2.5}} \tag{1}$$

式中: $D_{PM_{2.5}}$ 表示城市与其周边区域的PM_{2.5}浓度差异, $U_{PM_{2.5}}$ 和 $R_{PM_{2.5}}$ 分别表示城市和其周边区域的

PM_{2.5}浓度。当 $D_{PM_{2.5}} > 0$ 时,表示城市PM_{2.5}污染对其周边区域产生影响; $D_{PM_{2.5}} < 0$ 时,表示城市PM_{2.5}污染受其周边区域PM_{2.5}污染影响; $D_{PM_{2.5}} \approx 0$ 时,表示城市与其周边区域PM_{2.5}污染水平相同或均不受到PM_{2.5}污染影响。需要说明的是该评估模型虽以PM_{2.5}为例,但可进一步拓展到城市化引发的其他生态环境问题(例城市热岛、城市土壤污染等问题中),为开展城市化引发的生态环境影响提供了定量评价模型。

(3) 多尺度城市化与PM_{2.5}浓度关联的分析方法

从时空多尺度解析地理学与生态学的要素之间的关系,可更为系统地了解 and 掌握要素之间相互关系的真实性,以及这种关系在不同尺度之间的转化与转变关系,为多维度理解和探讨地理学和生态学的基本规律提供科学的参考。为此,借鉴生态学和地理学的分析方法,在不同尺度上为定量地解析城市化与PM_{2.5}浓度的关系建立了方法体系:①在全球尺度上,研究分析全球不同区域典型大城市城市化进程与PM_{2.5}浓度的定量关系(Han, Zhou, Pickett et al, 2016; 别同, 韩立建, 何亮, 等, 2018);②在区域(国家)尺度上,分析了全国地级市城市用地规模、人口数量和第二产业比重与PM_{2.5}浓度的定量关系(Han et al, 2014);③在城市尺度上,以北京市为例,建立了人为排放PM_{2.5}浓度反演模型,分析了1973年以来北京市人为排放PM_{2.5}浓度的演变规律,并分

析其与人口数量、GDP、能源消耗总量和汽车数量等城市化指标的定量关系(Han, Zhou, Li et al, 2016);④在城市内部的局地尺度,定量分析了重污染发生阶段城市景观格局和气象要素对PM_{2.5}浓度的影响(Han et al, 2015a)。

(4) 城市化对PM_{2.5}污染人口暴露的贡献的定量分析方法

城市人群健康暴露于PM_{2.5}会对其健康产生一定的影响,世界卫生组织(World Health Organization, WHO)的空气质量标准对PM_{2.5}污染暴露浓度等级进行了设计。考虑到中国PM_{2.5}浓度整体较高,因此我们利用WHO第一阶段(IT-1)PM_{2.5}浓度标准(35 μg/m³,相比健康标准(10 μg/m³)增加15%的健康风险)作为依据,进行了PM_{2.5}污染暴露的定量分析。传统的PM_{2.5}污染人口暴露并不具体分析暴露人口的来源,而仅将其主要归因于PM_{2.5}污染的加剧和面积增加,并未考虑城市化引发的人口迁移所产生的贡献。由此,建立了定量评估模型(式(2)),定量地考虑污染新增区、污染减轻区和污染不变区域的定量人口贡献,以评估城市化对PM_{2.5}污染人口暴露的定量贡献率(Han et al, 2017)。

$$\Delta P = P_a - P_b = P_n + P_m = P_a \Pi(1 + \alpha_i) + P_m \quad (2)$$

式中:ΔP是从a时间点人口暴露数量P_a到b时间点人口暴露数量P_b的人口增长量;P_n和P_m分别代表ΔP中的自然人口增长和迁移人口增长,而迁移人口增长在中国实际上主要受到城市化的驱动影响,因此作为城市化对PM_{2.5}污染的人口暴露定量评价指标;α_i为a时间点和b时间点之间第i时间点的人口自然增长率。

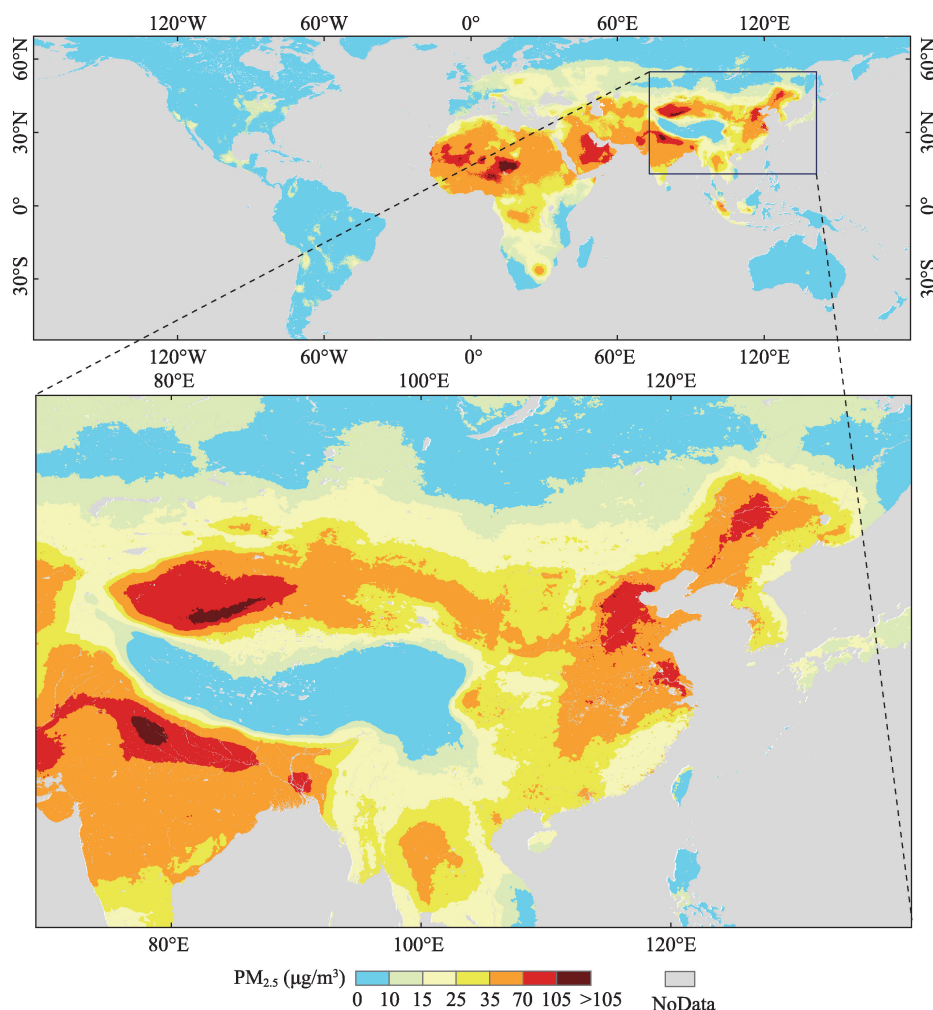
3 快速城市化与空气质量的权衡

3.1 中国PM_{2.5}浓度的时空格局特征

PM_{2.5}作为中国空气污染的首要污染物,首先需要定量地掌握其时空格局演变特征,为后续研究奠定坚实的基础。目前,PM_{2.5}浓度时空格局的量化通常采用四种方法:①“点”和“线”的精确实测技术。近年来随着污染认知和环保意识的逐渐提升,很多主要城市都建设了空气质量监测站,这些监测站在特定的地点较为精确地捕捉到空气污染物浓度数据,同时一些研究机构和环境监测部门还设计了流动的环境监测车对大气污染物进行监测,获取了较好的大气污染线状分布格局。这些基于点和

线的地面监测虽然可以在较为精细的“点”、“线”尺度上较好地说明特定地点和条带状的空气污染的时空状况,但由于空气污染通常具有较大的空间异质性,仅仅凭点和线的大气污染监测数据很难准确刻画大气污染在空间上的分布。②气候/气象模型模拟技术。采用复杂大气物理或化学机制过程,对区域大气质量进行预测与预报模拟,这种模拟具有较强的时间和空间连续性,是掌握空间大尺度空气质量的主要工具之一,但这种模型模拟通常需要较高的硬件支持与复杂的数据输入,尤其是受计算能力和效率限制,获取大空间尺度公里级或更高空间分辨率的空气污染物浓度数据序列的难度较大。③排放清单推演技术。利用排放清单推演,是环境统计相关领域较为常见的推演方法,该方法可有效地将污染与排放源建立连接,进而为污染源排放等提供管理依据,但这种方法常受排放清单数据的来源与全面性的限制,在其具体应用中,通常只能在特定的程度上解释真实的污染状况。④遥感反演技术。随着遥感技术的进一步成熟,利用全覆盖的卫星影像获取气溶胶光学厚度(AOD)与PM_{2.5}浓度之间的定量物理化学关系建立模型,获取空间全覆盖的PM_{2.5}浓度数据已经取得了较大的进展。目前,利用Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)、Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR)和Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS)获得的AOD产品,通过地球化学传输模型(GEO-Chem Chemical Transport Model)和地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression Model),可较为准确地获取全球全覆盖的PM_{2.5}浓度数据。我们所采用的PM_{2.5}浓度数据就是利用这种方法获得的数据产品,该产品可在加拿大Dalhousie University大气成分分析研究组(Atmospheric Composition Analysis Group)的网站免费下载使用。

全球受到高浓度PM_{2.5}影响的区域主要分布于撒哈拉沙漠—东亚的条带区域,其中尤其以中国和印度的污染最为严重。在对中国的人为排放PM_{2.5}浓度分析中发现中国PM_{2.5}污染的区域分异特征差异显著(图1),具体表现为:①1998-2012年的平均PM_{2.5}浓度显示,中国有31%的国土面积PM_{2.5}浓度优于世界卫生组织的健康标准(10 μg/m³),但这些地区主要分布在人口密度较低的西部地区,而有26%的国土面积高于WHO第一阶段目标(35 μg/m³);②1998-2012年,中国有73%和76%的城市和农田呈

图1 2015年全球和中国区域年均PM_{2.5}浓度空间格局Fig.1 Global and China's nearby regions' annual mean PM_{2.5} concentration in 2015

现出显著增高的趋势($P<0.05$),其中城市地区平均每年增长 $1.81\mu\text{g}/\text{m}^3$,农田平均每年增长 $1.71\mu\text{g}/\text{m}^3$;③在对中国地级市的人为排放PM_{2.5}浓度分析中发现,参与分析的350个地级市中仅有24个地级市的年均PM_{2.5}浓度达到世界卫生组织的健康标准,166个地级市的PM_{2.5}浓度超过世界卫生组织的第一阶段目标;④高PM_{2.5}浓度的区域主要分布于四川省的东南部和从北京、天津到上海的新月形地带。

通过分析中国不同土地覆盖类型的PM_{2.5}浓度发现,中国城市、农田和干旱区受高浓度PM_{2.5}影响比重较大,同时城市区域的浓度高于农田区域,说明城市是PM_{2.5}污染的主要人为源头。从多年的变化可以发现,城市和农田区域的PM_{2.5}浓度增长较为显著,说明城市和农田区域受人为排放因素的影响较为严重。因此进一步对中国城市PM_{2.5}污染对其周边区域的影响开展定量分析。

3.2 中国城市PM_{2.5}污染对其周边区域影响的时空分异格局特征

对于城市PM_{2.5}污染,一般重点关注对人群健康的健康风险评估和人群污染暴露两个方面。在健康风险评估方面,一些研究通过研究PM_{2.5}浓度与孕产妇和新生儿的体重等特征的相关性,PM_{2.5}浓度与心脏病和肺癌的死亡人数的相关性,PM_{2.5}浓度与造成过早死亡人口数的相关性等,揭示PM_{2.5}污染与疾病或死亡在统计学意义上的健康风险,在人群污染暴露影响风险方面也开展了大量的定量评估工作(Forouzanfar et al, 2015)。然而,这些研究忽略了空气污染物的流动特征:PM_{2.5}可在风、浓度等的作用下从上风风向向下风向运移、由高浓度区域向低浓度地区扩散,进而对污染源的周边区域产生显著的影响。这方面的研究一直没有得到足够的重视,进展较为有限,主要是由于对这种假设的定量认识不清

晰。我们通过定量分析判断城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对其周边区域影响的可能性较大,并建立了模型,开展了定量评估工作(Han et al, 2014; Han et al, 2015b)。

研究发现,中国有223个城市内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于其周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,仅41个城市内部的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于其周边区域的浓度,表明中国城市对其周边区域的空气质量存在较强的胁迫效应。同时发现城市内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于其周边区域的地级市主要分布于北京-四川和上海-广西两个条带,其中以北京-四川条带最为严重。该研究成果说明了中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 对其周边区域影响的空间分异特征。进一步分析城市 $\text{PM}_{2.5}$ 对周边区域的影响趋势发现:1999年中国有142个城市的城市内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于其周边区域,而到2011年则有285个城市的城市内部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于其周边区域,尤其是各省会城市,多数城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 增长率均较高(图2)。同时,这种浓度差异随着城市用地规模的增加而显著增强,说明城市用地规模增大会显著增加污染排放负担,进而对城市及其周边产生严重的影响。

3.3 全球、区域、城市(群)和局地多尺度城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关联与权衡

城市化发展进程通过改变人们的生活方式、生产方式及其发生的地点,使得人口、产业、不透水地表等集中分布。在先前研究中已发现一些城市发展与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的潜在关联,但是这种关系目前尚未加以量化的解读,其中就包括城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度到底存在什么样的定量模式? 城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染是否具有交互影响? 为此,从两个角度开展

了定量分析,以证明城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的定量关联存在。

(1) 城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的多尺度定量关系解析

为探索不同城市化模式与城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系,在全球尺度上,首次考察了全球456个大城市的城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的关联,结果发现:发达国家的城市人口规模增加并没有引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的显著变化;发展中国家的城市人口规模增加与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化呈现显著促进关系或无显著影响模式。具体表现为:非洲和拉丁美洲的大城市城市人口增长与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化无显著性规律,美国的大城市随着人口增长, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的加速降低;而中国的大城市则表现为随着人口增长, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升(图3)。因此,在城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度权衡过程中,中国应更多地学习发达国家的经验,实现同步提高城市化水平和城市空气质量。

为在区域尺度上获取城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的定量关系,为区域城市化与空气质量的调控提供科学建议,在全国尺度上,以地级市为基本分析单元开展定量分析,结果发现:城市建成区面积与城市空气质量并无显著的相关性,而城市人口数量($r=0.99, P<0.05$)和第二产业比重($r=0.84, P<0.05$)则与城市空气质量呈显著的相关性。由此证明城市化的经济和人口发展模式(或人类活动强度模式)对城市空气质量产生较为显著的影响,在制定全国的城市化发展布局规划时应充分考虑并优化区域城市化模式,以最大限度确保发展不对环境质量造成影响。

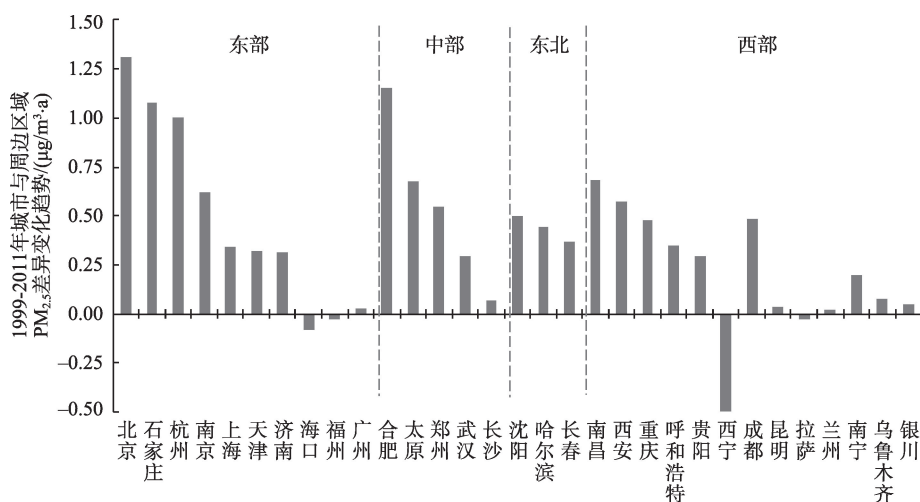


图2 1999-2011年中国省会城市城市与周边区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异变化趋势

Fig.2 Trends of $\text{PM}_{2.5}$ concentration differences between urban areas and their surrounding regions in China's provincial capital cities, 1999-2011

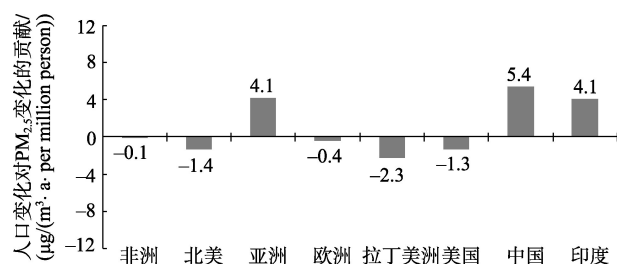


图3 1999-2011年全球不同区域城市人口变化对PM_{2.5}浓度变化的贡献关系

Fig.3 Relationship between urban population change and PM_{2.5} concentration dynamics in selected regions and countries globally, 1999-2011

为探讨典型城市的城市化强度与城市PM_{2.5}浓度之间的关系,在城市尺度,以北京市为典型案例,在以地面观测和气象数据为的支持下,首次重构了北京市1973-2013年的PM_{2.5}浓度变化,从城市化角度解析了人为和自然因素对PM_{2.5}浓度的影响,发现能源利用总量、汽车数量等城市化强度指标与PM_{2.5}浓度的变化呈显著相关,同时发现2004年这种显著关系的趋势发生显著变化,这一年可能是北京市由工业型向生活型空气污染变化的转折点。

为了应对城市污染并为改善优化城市内部景观格局提供科学支撑,在局地尺度,在考察城市景观格局对PM_{2.5}污染过程的影响中首先选定了风速较小的静稳气象条件,将其定义为稳定气象条件,并假设特定景观格局中的空气污染过程受到景观配置的影响。选取了北京市的各城区空气质量监测站周围的1 km范围为研究对象,以NDVI值作为景观格局的代理变量,分析了不同季节景观格局的空气污染过程,结果发现:随着不透水表面比例的增加PM_{2.5}污染程度会呈现显著增长的趋势;同时,城市景观中的绿地对污染扩散具有一定的阻拦作用,表现为夏季的景观格局有助于延缓严重污染过程,而冬季的景观格局对污染过程影响降低。

(2) 城市化对人群PM_{2.5}污染的定量贡献探讨

利用遥感数据与人口空间分布数据进行想分析,发现2010年虽然全球仅有8%的陆地面积暴露于PM_{2.5}>35 μg/m³的污染,但却造成全球30%(约19.4亿)的人口暴露于PM_{2.5}污染,其中受影响较为严重的区域为东亚(9.66亿)和南亚(7.78亿),而受影响人口超过1亿的国家包括中国(9.62亿,占其总人口的72%),印度(5.43亿,占其总人口的48%),巴基斯坦(1.53亿,占其总人口的87%)。在全球尺度上,

一般认为PM_{2.5}浓度增加是导致人口暴露于污染的主要原因,然而分析发现,受PM_{2.5}污染的暴露人口增加并非完全来自于污染区的扩张,事实上2010年全球约25%的受PM_{2.5}污染人口增加归因于本地人口增长,尤其是在非洲和亚洲,这可能与这些区域快速城市化引发的人口集聚存在一定的关联(图4)。对中国PM_{2.5}污染的暴露风险进一步分析也发现,2000-2015年期间PM_{2.5}污染日益严重,影响人口数量巨大且主要位于东部人口高密度的城市区域;而东部地区的广东、上海、浙江、北京和天津,东北地区全境,西部地区的新疆、四川、内蒙古和重庆等省区市的新增PM_{2.5}污染暴露人口主要归因于城市化引发的快速人口迁入。同时,在对典型区域京津冀城市群的分析中,发现2000-2015年新增人口PM_{2.5}污染暴露中,城市化和自然增长贡献基本持平;2000-2005年和2010-2015年新增人口PM_{2.5}污染暴露中城市化贡献率显著高于人口自然增长的贡献率,2005-2010年新增人口PM_{2.5}污染暴露中城市化呈负贡献,自然增长是暴露人口增长的主要因素。同时发现该城市群的北京市和天津市的新增人口PM_{2.5}暴露主要归因于快速的人口增长。由此表明城市化引发的人口迁移对人群的PM_{2.5}污染暴露贡献显著,尤其是在中低收入国家的快速城市化地区。因此,需要进一步开发基于空间大数据技术等数据获取手段,耦合城市人口迁移的生活、生产方式及其发生位置变化更为精准的定量化方法,以解析城市化对人群PM_{2.5}污染暴露的贡献,为城市生态安全提供科学参考。

上述进展为解析快速城市化与空气质量的权衡提供了必要的实证基础,但目前仍有许多尚未解

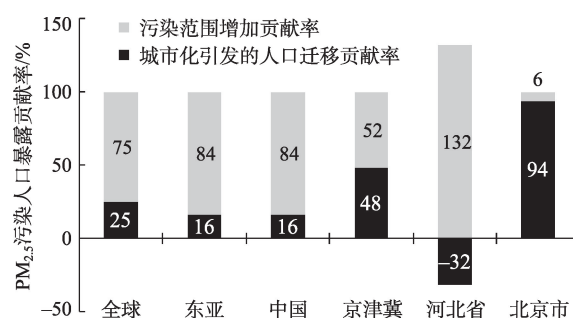


图4 2000-2015年城市化引发的人口迁移对PM_{2.5}人群暴露的定量贡献

Fig.4 Relationship between urbanization-related migration and population exposed to PM_{2.5} pollution (PM_{2.5}>35 μg/m³), 2000-2015

决的科学问题,如:不同城市化阶段城市首要污染物是如何演变的,其主要驱动机制如何?长期的城市空气污染过程中,人为活动排放因素演变、气候变化和其他未知的局地因素的贡献率到底如何分配?进一步完善对这些问题的认知,将有助于为城市发展提供科学支撑,为建设社会—经济—自然复合的可持续生态文明城市提供科学参考。

4 城市化与空气质量的新问题与挑战

在快速城市化对环境质量尤其是空气质量造成损害的背景下,虽然部分区域(如京津冀城市群2017-2018年度取暖季的污染改善)在污染排放的强力管控作用下有显著的改善,但这种管控对地方社会与经济的稳定发展可能会带来一定程度的滞后性的损害,因此,更好地权衡快速城市化与空气质量的关系仍然面临诸多挑战:

(1) 在基础理论研究方面:从城市生态学出发,以城市的生活方式(Lifestyle)、生产方式(Livelihood)、连接性(Connectivity)和位置(Place)为核心以美好城市生态为出发点的研究有待进一步加强和引导。同时,从景观生态学的“源汇”理论出发,发现并量化城市复合景观格局对空气污染物的源与汇效应,也是未来缓解和改善城市空气质量的重要理论基础。

(2) 在核心技术研发方面:一是深入研究城市内部 $PM_{2.5}$ 等污染物浓度的三维分布格局及其精细演变特征。城市空气污染物因其来源于近地表的人类活动,因此,其主要存在于城市近地表,现有的技术手段对其空间分布格局尤其是三维空间分布格局了解甚少,以至于经常的感觉是“抬头蓝天,横看灰天”的状态。目前中国正通过强力的行政管控对重点区域的空气质量开展重点的治理,未来,需要利用更先进的三维激光精细反演、无人机精细遥感制图等手段精确地深入了解,为改善城市内部景观格局、建设通风廊道等空气治理措施提供坚实的科学支撑。二是城市作为空气污染物的主要排放源对其周边区域的精确影响与反馈机制评估。城市污染研究常常比较重视对城市本身的影响,而在研究的过程中发现,随着城市污染的加剧,逐步对其周边区域产生影响,进而形成严重的区域性空气污染。因此,须进一步开展精细尺度的城市与其周边区域空气污染的相互作用机制研究,将为解决区

域空气污染提供有效的途径。

(3) 在未来城市复杂空气污染及其质量的研究方面。近年来的一些复合空气污染研究发现中国复合空气污染也较为严重(Han, Zhou, Pickett et al, 2018),因此在今后的相关研究中,如何从重点关注 $PM_{2.5}$ 等单一污染物拓展至复合空气污染也是面临的重大挑战之一。解决复合空气污染,采用单纯的大气物理化学过程治理难度更大,效果也可能不尽理想;如能从城市可持续发展和城市复合生态学的角度进行剖析,可对污染改善提供有效的途径。

(4) 城市发展策略与空气污染的权衡机制与政策研究。从城市化引发的剧烈人为活动到污染物的排放与持续污染过程的形成,实际上是城市发展策略与空气质量(空气污染)的权衡过程。发达国家用一个多世纪实施“先发展再治理”的权衡过程。但时至今日,中国的发展依旧没有跳出传统的发展策略。党的十八大以来,虽然党和国家及各级地方政府高度重视生态文明建设,将生态环境改善作为国家和地方的首要任务之一,但目前中国采取的空气污染治理方式更多还是针对具体问题(如排污企业等)的治理方式,即“头疼医头,脚痛医脚”,缺乏系统性整体性的考量。因此,希望通过在该领域开展更多深入的案例研究,为以不牺牲生态环境为代价的新型城市发展提供科学参考,进而从根本上转变传统的城市发展模式,形成环境友好的可持续发展模式:将科技创新、体制改革和行为诱导作为基本途径,调节城市发展与空气质量的权衡关系,实现资源高效利用,人与自然和谐发展。这将是建设美丽中国,缓解人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾,实现中华民族伟大复兴的中国梦的必由之路。

致谢:感谢中国科学院生态环境研究中心周伟奇、李伟峰、钱雨果、张淑平、赵秀玲、吕明明、别同,和美国卡里生态系统研究所的Steward T.A. Pickett等老师和同学对本项研究的贡献。衷心感谢北京大学范闻捷老师对本文的指导建议。

参考文献(References)

- 别同,韩立建,何亮,等. 2018. 城市空气污染对周边区域空气质量的影响[J]. 生态学报, 38(12): 4268-4275. [Bie T, Han L J J, He L, et al, 2018. Impact of urban air pollution on surrounding areas in Beijing, Tianjin, and Hebei Prov-

- inces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(12): 4268-4275.]
- 别同, 韩立建, 田淑芳, 等. 2018. 城市化对空气污染人群暴露贡献的定量方法研究[J]. *生态学报*, 38(13): 4570-4583. [Bie T, Han L J, Tian S F, et al, 2018. Method for quantifying the contribution of urbanization on population exposure to air pollution[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(13): 4570-4583.]
- 陈利顶, 周伟奇, 韩立建, 等. 2016. 京津冀城市群地区生态安全格局构建与保障对策[J]. *生态学报*, 36(22): 7125-7129. [Chen L D, Zhou W Q, Han L J, et al, 2016. Developing key technologies for establishing ecological security patterns at the Beijing-Tianjin-Hebei urban megaregion[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(22): 7125-7129.]
- 傅尧, 王琛, 王乐, 等. 2016. 河北省PM_{2.5}污染变化特征及暴露人群健康效应评估研究[J]. *环境科学与管理*, 41(12): 187-190. [Fu Y, Wang C, Wang L, et al, 2016. Variation characteristics of PM_{2.5} pollution in Hebei Province and health effects evaluation of exposed population[J]. *Environmental Science and Management*, 41(12): 187-190.]
- 李辉, 郭家秀, 尹华强. 2013. PM_{2.5}对人体健康的影响研究进展[J]. *四川化工*, 16(1): 52-54. [Li H, Guo J X, Yin H Q, 2013. Research progress of PM_{2.5} effects on human health [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 16(1): 52-54.]
- 李沈鑫, 邹斌, 刘兴权, 等. 2017. 2013-2015年中国PM_{2.5}污染状况时空变化[J]. *环境科学研究*, 30(5): 678-687. [Li S X, Zou B, Liu X Q, et al, 2017. Pollution status and spatial-temporal variations of PM_{2.5} in China during 2013-2015[J]. *Research of Environmental Sciences*, 30(5): 678-687.]
- 刘帅, 宋国君. 2016. 城市PM_{2.5}健康损害评估研究[J]. *环境科学学报*, 36(4): 1468-1476. [Liu S, Song G J, 2016. Evaluation of PM_{2.5}'s adverse human health effect in cities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(4): 1468-1476.]
- 孙敏, 陈健, 林鑫涛, 等. 2018. 城市景观格局对PM_{2.5}污染的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 35(1): 135-144. [Sun M, Chen J, Lin X T, et al, 2018. Urban landscape patterns and PM_{2.5} pollution[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 35(1): 135-144.]
- 王德庆, 王宝庆, 白志鹏. 2012. PM_{2.5}污染与居民每日死亡率关系的Meta分析[J]. *环境与健康杂志*, 29(6): 529-532. [Wang D Q, Wang B Q, Bai Z P, 2012. Meta-analysis of association between air fine particulate and daily mortality of residents[J]. *Journal of Environmental Health*, 29(6): 529-532.]
- 王桂林, 杨昆, 杨扬. 2017. 京津冀地区不透水表面扩张对PM_{2.5}污染的影响研究[J]. *中国环境科学*, 37(7): 2470-2481. [Wang G L, Yang K, Yang Y, 2017. The spatio-temporal variation of PM_{2.5} pollution and the its correlation with the impervious surface expansion[J]. *China Environmental Science*, 37(7): 2470-2481.]
- 王桂芝, 武灵艳, 陈纪波, 等. 2017. 北京市PM_{2.5}污染健康经济效应的CGE分析[J]. *中国环境科学*, 37(7): 2779-2785. [Wang G Z, Wu L Y, Chen J B, et al. 2017. A CGE-based analysis on PM_{2.5}-induced health-related economic effect in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 37(7): 2779-2785.]
- 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2015. 2014年中国城市PM_{2.5}浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 70(11): 1720-1734. [Wang Z B, Fang C L, Xu G, et al, 2015. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(11): 1720-1734.]
- 张凡, 苏德奇. 2016. PM_{2.5}对人体健康的影响研究进展[J]. *疾病预防控制通报*, 31(4): 88-91. [Zhang F, Su D Q, 2016. Research advance of PM_{2.5} effects on human health[J]. *Bulletin of Disease Control and Prevention*, 31(4): 88-91.]
- 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 2016a. 城市规模对大气污染物NO₂和PM_{2.5}浓度的影响[J]. *生态学报*, 36(16): 7125-7129. [Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, et al, 2016a. Impact of urban population on concentrations of nitrogen dioxide (NO₂) and fine particles (PM_{2.5}) in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(16): 7125-7129.]
- 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 2016b. 冬季PM_{2.5}的气象影响因素解析[J]. *生态学报*, 36(24): 7897-7907. [Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, et al, 2016b. Relationships between fine particulate matter(PM_{2.5}) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(24): 7897-7907.]
- 周伟奇, 王坤, 虞文娟, 等. 2017. 城市与区域生态关联研究进展[J]. *生态学报*, 37(15): 5238-5245. [Zhou W Q, Wang K, Yu W J, et al, 2017. Understanding the social and ecological connections between cities and surrounding regions for urban and regional sustainability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(15): 5238-5245.]
- Bai X, Shi P, Liu Y. 2014. Realizing China's urban dream[J]. *Nature*, 509: 158-160.
- Brauer M, Freedman G, Frostad J, et al. 2016. Ambient air pollution exposure estimation for the global burden of disease 2013[J]. *Environmental Science & Technology*, 50, 79-88.
- Chan C, Yao X. 2008. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 42: 1-42.
- Fleischer N, Merilä M, van Donkelaar A, et al. 2014. Outdoor air pollution, preterm birth, and low birth weight: Analysis of the World Health Organization Global Survey on Maternal and Perinatal Health[J]. *Environmental Health Perspectives*, 122: 425-430.

- Ford B, Heald C. 2016. Exploring the uncertainty associated with satellite-based estimates of premature mortality due to exposure to fine particulate matter[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16: 3499-3523.
- Forouzanfar M, Alexander L, Anderson H, et al. 2015. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990-2013: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013[J]. *Lancet*, 86: 2287-2323.
- Fu J, Jiang D, Lin G, et al. 2015. An ecological analysis of $PM_{2.5}$ concentrations and lung cancer mortality rates in China[J]. *BMJ Open*, 5: e009452.
- Guo Y, Zeng H, Zheng R, et al. 2017. The burden of lung cancer mortality attributable to fine particles in China[J]. *Science of the Total Environment*, 579: 1460-1466.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F, et al. 2014. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles ($PM_{2.5}$) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 194: 163-170.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2015a. City as a major source area of fine particulate ($PM_{2.5}$) in China[J]. *Environmental Pollution*, 206: 183-187.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2015b. Increasing impact of urban fine particles ($PM_{2.5}$) on areas surrounding Chinese cities[J]. *Scientific Reports*, 5: 12467.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2016. Fine particulate ($PM_{2.5}$) dynamics during rapid urbanization in Beijing[J]. *Scientific Reports*, 6: 23604.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F, et al. 2017. Global population exposed to fine particulate pollution by population increase and pollution expansion[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10: 1221-1226.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2018a. Growing urbanization and the impact on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) dynamic[J]. *Sustainability*, 10: 1696.
- Han L J, Zhou W Q, Li W F. 2018b. Urbanization strategy and environmental changes: An insight with relationship between population change and fine particulate pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 642: 789-799.
- Han L J, Zhou W Q, Pickett S T, et al. 2016. An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate ($PM_{2.5}$) concentration[J]. *Environmental Pollution*, 208: 96-101.
- Han L J, Zhou W Q, Pickett S T, et al. 2018. Multicontaminant air pollution in Chinese cities[J]. *Bulletin of the World Health Organization*, 96: 233-242E.
- He C, Han L J, Zhang R. 2016. More than 500 million Chinese urban residents (14% of the global urban population) are imperiled by fine particulate hazard[J]. *Environmental Pollution*, 218: 558-562.
- Huang R, Zhang Y, Bozzetti C, et al. 2014. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 514: 218-222.
- Hyslop N. 2009. Impaired visibility: The air pollution people see[J]. *Atmospheric Environment*, 43: 182-195.
- Larkin A, van Donkelaar A, Geddes J, et al. 2016. Relationships between changes in urban characteristics and air quality in East Asia from 2000 to 2010[J]. *Environmental Science & Technology*, 50: 9142-9149.
- Li G, Fang C, Wang S, et al. 2016. The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 50: 11452-11459.
- Lim S, Vos T, Flaxman A, et al. 2012. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *Lancet*, 380: 2224-2260.
- Lin C, Li Y, Lau A, et al. 2016. Estimation of long-term population exposure to $PM_{2.5}$ for dense urban areas using 1-km MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 179: 13-22.
- Lin G, Fu J, Jiang D, et al. 2014. Spatio-temporal variation of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11: 173-186.
- Lin G, Fu J, Jiang D, et al. 2015. Spatial variation of the relationship between $PM_{2.5}$ concentrations and meteorological parameters in China[J]. *Biomed Research International*, 25: 259-265.
- Liu M, Huang Y, Ma Z, et al. 2016. Spatial and temporal trends in the mortality burden of air pollution in China: 2004-2012[J]. *Environmental International*, 98: 75-81.
- Lu X, Lin C, Li Y, et al. 2017. Assessment of health burden caused by particulate matter in southern China using high-resolution satellite observation[J]. *Environmental International*, 98: 160-170.
- Luo J, Du P, Samat A, et al. 2017. Spatiotemporal pattern of $PM_{2.5}$ concentrations in mainland China and analysis of its influencing factors using geographically weighted regression[J]. *Scientific Reports*, 7: 40607.
- Ma Z, Hu X, Sayer A, et al. 2016. Satellite-based spatiotempo-

- ral trends in PM_{2.5} concentrations: China, 2004-2013[J]. *Environmental Health Perspectives*, 124: 184-192.
- McNeill J R. 2000. Something new under the sun: An environmental history of the twentieth-century world[B]. W. W. Norton & Company, Inc. New York, N.Y. 10110, U.S.
- Peng J, Chen S, Lu H, et al. 2016. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 174: 109-121.
- Pope III C, Dockey D. 2012. Health effects of the fine particle air pollution: Lines that connect[J]. *Journal of the Air Waste Management Association*, 56: 709-742.
- van Donkelaar A, Martin R, Brauer M, et al. 2015. Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter[J]. *Environmental Health Perspectives*, 123: 135-143.
- Wang Z, Liu Y, Hu M, et al. 2013. Acute health impact of airborne particles estimated from satellite remote sensing[J]. *Environmental International*, 51: 150-159.
- Xie R, Sabel C, Lu X, et al. 2016. Long-term trend and spatial pattern of PM_{2.5} induced premature mortality in China[J]. *Environmental International*, 97: 180-186.
- Zhu Y, Loannidis J, Li H, et al. 2011. Understanding and harnessing the health effect of rapid urbanization in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 45: 5099-5140.

Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China

HAN Lijian

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,
CAS, Beijing 100085, China)

Abstract: Urbanization is essentially a geographical concentration of population and industry, and change of landscape patterns. The proportion of the urbanized population in China has increased to more than 50% during the recent decade. The rapid growth in such a short time period has not only led to an improvement of material wealth and a higher standard of living, but also caused severe environmental pollution, particularly the air pollution in many urbanized regions of China. In this research, multi-resolution remote sensing images, meteorological records, environmental monitoring data, and ground survey records were employed at multiple scales to understand the relationship between rapid urbanization and urban air quality, taking PM_{2.5} concentration as an indicator of air quality. The key findings are in the following three areas: (1) The spatial-temporal patterns of PM_{2.5} concentration in China; (2) The spatial-temporal patterns of the relationship between urban PM_{2.5} pollution and rural PM_{2.5} pollution in China's major cities; and (3) The linkage between urbanization and PM_{2.5} concentration at global, regional, city, and local scales. The results of this research also encourage different approaches to urbanization study in order to mitigate the negative impact caused by urban air pollution, both in China and in other rapidly developing mid- and low-income countries.

Key words: urban air quality; atmospheric pollution; PM_{2.5}; ecological city; spatial temporal pattern; urbanization