DOI: 10.5846/stxb201712142251

韩婧,李元征,李锋.2000—2015 年中国 PM_{2.5}浓度的时空分布特征及其城乡差异.生态学报,2019,39(8): - . Han J, Li Y Z, Li F.Spatio-temporal distribution characteristic of PM_{2.5} concentration and the difference of PM_{2.5} concentration between urban areas and rural areas in China from 2000 to 2015.Acta Ecologica Sinica,2019,39(8): - .

2000—2015 年中国 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征及其城 乡差异

韩 婧^{1,2},李元征³,李 锋^{4,*}

1 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
2 中国科学院大学,北京 100049
3 河南财经政法大学资源与环境学院,郑州 450046
4 清华大学建筑学院,北京 100084

摘要:近40年来,中国快速经济发展引发较为严重的大气污染,PM_{2.5}是一种重要的空气污染物,掌握其时空分布规律是对其进 行防治的重要前提。本研究基于遥感反演出的PM_{2.5}浓度数据集,研究了中国2000—2015年PM_{2.5}浓度的时空分布特征,并基 于界定的1376个城镇城区及对应乡村的边界分析了每年PM_{2.5}浓度值的城乡差异,用线性趋势分析法计算城镇PM_{2.5}浓度的年 际变化速率及显著性。结果表明,研究期内,PM_{2.5}浓度高于35 µg/m³的面积比例由18.58%增加至32.03%,低于15 µg/m³的面 积从43.92%减少到25.12%。PM_{2.5}污染最严重的地区分布在塔里木盆地、河北南部、河南北部和山东西部。从2000年到2015 年,中国绝大多数城镇PM_{2.5}浓度显著增加,尤其是在东北平原、太行山以东的河北省西南部、燕山以南的北京天津及河北唐山、 鲁中南山地丘陵及周围平原地区、华北平原江苏省北部。PM_{2.5}城乡差异在河北省、山西省两条东北—西南向S形条带区域、浙 江省-福建省条带及天山北部绿洲区域较大。本研究对PM_{2.5}高浓度区域、PM_{2.5}浓度增长较快区域以及城区PM_{2.5}浓度对乡村 影响较大区域进行图示,为中国进一步控制雾霾污染提供一定科学依据。 关键词:空气污染;PM_{2.5};时空分布;变化趋势;城乡差异

Spatio-temporal distribution characteristic of $PM_{2.5}$ concentration and the difference of $PM_{2.5}$ concentration between urban areas and rural areas in China from 2000 to 2015

HAN Jing^{1,2}, LI Yuanzheng³, LI Feng^{4,*}

State key laboratory of urban and regional ecology, Research center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China

4 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The rapid economic development has caused serious air pollution in the past 40 years. $PM_{2.5}$ is one of main air pollutants, examination of its spatial and temporal distribution is an important prerequisite for its prevention and control. Based on remote-derived $PM_{2.5}$ concentration date set, this study explored the spatio-temporal distribution characteristic of $PM_{2.5}$ concentration in China from 2000 to 2015, and analyzed the annual difference of $PM_{2.5}$ concentration between urban areas and corresponding rural areas of 1376 towns according to their boundary. Furthermore, we calculated the rate and

基金项目:国家自然科学基金重点项目资助(71734006,71533004);国家重点研发计划资助(2016YFC0502800)

收稿日期:2017-12-14; 网络出版日期:2018-00-00

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: feng_li@ tsinghua.edu.cn

significance of interannual variation of $PM_{2.5}$ concentration for each town using linear trend analysis method. The results showed that the proportion of area with $PM_{2.5}$ concentration higher than 35 µg/m³ increased from 18.58% to 32.03%, and lower than 15 µg/m³ decreased from 43.92% to 25.12% during the study period. The most severely polluted areas were located in Tarim Basin, south of Hebei province, north of Henan province, and west of Shandong province. In addition, $PM_{2.5}$ concentration increased significantly in most towns in China from 2000 to 2015, especially in the Northeast Plain, southwest of Hebei Province located to the east of Taihang Mountain, Beijing, Tianjin, Tangshan located to the south of Yanshan Mountain, Mountains and Hills in central and south of Shandong Province and the surrounding Plains, and north of Jiangsu Province in North China Plain. The difference of $PM_{2.5}$ concentration between urban areas and rural areas is large in two northeast-southwest S-shaped belts in Hebei and Shanxi Province, Zhejiang-Fujian Province belt, and oasis area located to the north of Tianshan Mountain. In this study, we identified the area with high $PM_{2.5}$ concentration, high rate of increase of $PM_{2.5}$ concentration, and intense effect of urban areas on surrounding rural areas, providing some scientific basis to further control the haze pollution in China.

Key Words: air pollution; PM2.5; spatio-temporal distribution; variation trend; urban-rural differences

PM_{2.5}指大气中空气动力学直径小于或等于 2.5 μm 的细颗粒物,由于 PM_{2.5}的比表面积比 PM₁₀大,可以吸 附更多的细菌、病毒和多环芳烃、过渡金属等有毒有害物质,且 PM_{2.5}可以通过呼吸道,沉积于人体的肺泡,对 人体健康的危害更为严重,因此引起了广泛关注^[1]。近年来,PM_{2.5}污染尤为严重,掌握中国 PM_{2.5}分布特征及 变化情况,是对其开展防治工作的重要前提。

关于 PM_{2.5}时空分布特征方面的研究,研究尺度包括城市尺度^[2-3]、区域尺度^[4]及全国尺度^[5-7]。从数据 源来看,研究分为两大类。一类是利用监测站点的数据,研究全国城市 PM_{2.5}浓度的时间变化规律及 PM_{2.5}年 均值、年均值超标率和日均值超标率的空间分异规律^[5-6];南京市三年平均 PM_{2.5}浓度值空间分布及每年的季 节变化、月变化、周变化和日变化规律^[2]等。另一类是利用遥感反演数据,如利用 van Donkelaar 等基于 MODIS、MISR 和 SeaWIFS AOD(Aerosol Optical depth)产品用 GEOS-Chem 全球化学传输模型反演出的 0.1°分 辨率全球 1998—2012 年三年移动平均的 PM_{2.5}浓度栅格数据集,分析中国大陆 PM_{2.5}浓度年均值的空间分布 变化及不同等级面积比例的年际变化^[8];利用从哥伦比亚大学获取的 0.5°分辨率全球 2001—2010 年每年平 均 PM_{2.5}栅格数据,研究中国 PM_{2.5}浓度年均值空间格局变化及各 PM_{2.5}浓度水平所占面积的时间分布^[9];基于 2000—2015 年 MODIS AOD 产品反演得到的 10 km 分辨率日均地表 PM_{2.5}质量浓度数据,分析中国东部每年 平均 PM_{2.5}浓度值空间分布年际变化、季节平均 PM_{2.5}分布对比及区域 PM_{2.5}年变化速率空间分布^[4]等。如今 对 PM_{2.5}城乡梯度分布差异的研究日趋重要,城区具有明显的混浊岛效应^[10], PM_{2.5}浓度在城乡梯度上分布具 有明显的差异性^[11-12],研究多基于建成区及乡村的监测站数据。

然而 PM_{2.5}监测数据源于的台站数量有限,分布不均,且观测时间短,在大尺度全国范围内长时间序列估 算 PM_{2.5}浓度时空分布特征及变化趋势存在一定的局限性,此外,以往研究采用的遥感反演数据分辨率较粗, 城乡差异研究以地级市为基本单元,没有具体到更细的研究单位。因此,本文1)基于目前大尺度精度最高的 遥感反演数据分析 2000—2015 年中国 PM_{2.5}浓度的时空分布特征及变化。2)分析中国 1376 个城镇 2000— 2015 年 PM_{2.5}浓度变化的趋势及变化速率。3)研究中国城镇城区和周围乡村地区 PM_{2.5}浓度的差异,以期揭 示城市化导致的生态环境效应,为政府相应的雾霾治理对策提供一定的科学依据。

1 数据及方法

1.1 数据来源

1.1.1 PM_{2.5}数据

全球年均0.01°×0.01°分辨率(赤道处约为1 km×1 km)PM2.5数据来源于戴尔豪斯大学大气成分分析组网

3

站(http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/? page_id = 140)^[13]。地面细颗粒物(PM_{2.5})通过 NASA MODIS、 MISR、和 SeaWIFS 传感器的气溶胶光学厚度 AOD(Aerosol Optical Depth)反演值与 GEOS-Chem 化学输送模式 模拟值结合估计得到。为了匹配常用的标准化测量程序,在35%相对湿度的情况下估计,随后用地理加权回 归模型(GWR)校正到全球 PM,,的地面观察值。精度验证结果显示交叉验证点地理加权回归模型校正的估 计值与地面监测值高度一致(R²=0.81),具有很好的精度。

1.1.2 土地利用数据

2000年1km分辨率的中国土地利用现状遥感监测数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn),是以 Landsat TM/ETM 遥感影像作为主要的数据源,通过人工目视解译生成,土地利 用类型包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地6个一级类型以及25个二级类型[14]。2015年中国 土地利用现状遥感监测数据同样来源于中国科学院资源环境科学数据中心,是在2010年数据基础上,基于 landsat8 遥感影像,通过目视解译生成,土地利用类型与 2000 年相一致。

1.1.3 DEM 数据

中国1km分辨率数字高程模型数据集来源于"黑河计划数据管理中心"(http://westdc.westgis.ac. $\operatorname{cn})^{[15]}$

1.2 研究方法

1.2.1 中国 PM25浓度的时空分布特征

世界卫生组织的空气质量指南制定的 PM,,空气质量准则值年平均浓度为 10 μg/m³,过渡时期目标值-1 (IT-1)年平均浓度为 35 μg/m³,过渡时期目标值-2(IT-2)为 25 μg/m³,过渡时期目标值-3(IT-3)为 15 μg/ m^{3[16]}。国内的环境空气质量标准最新版本(GB 3095—2012)规定,颗粒物(粒径小于等于 2.5 μm)年平均一 级浓度限值为 15 µg/m³,二级浓度限值为 35 µg/m^{3[17]}。此外,一些研究中用到 70 µg/m³和 100 µg/m³作为 分类值^[8,10]。因此,基于上述依据并结合本文全国 PM,、栅格数据集的最大值最小值,将年均 PM,、浓度分为 七个等级,等级一:1-10 µg/m³,等级二:10-15 µg/m³,等级三:15-25 µg/m³,等级四:25-35 µg/m³,等级 五:35-70 μg/m³,等级六:70-100 μg/m³,等级七:100-130 μg/m³,对全国 PM,;栅格数据集重分类,每一类 别对应每一等级,分别统计各等级占全国面积的比例,绘制百分比堆积柱形图,进而宏观层次上分析全国各处 的空气污染物的年际变化规律。

1.2.2 中国 PM25浓度的城乡差异

1) 城乡范围的界定

城区范围是利用 ArcGIS 10.2 软件采用 1 km 的搜索半径对 2015 年土地利用图分类体系中的城镇用地 (指大、中、小城市及县镇以上建成区用地)进行聚合操作得出的[18]。这样既使得与主城区相近的离散城镇 用地与主城区合并为同一城镇的城区,又使得较大的城市与其卫星城分离为不同的城镇[18]。然后,仅保留面 积大于 6 km²的斑块,它们可以包含中国东部人口密集且经济发达地区的绝大部分县城^[18]。最后,将 2015 年 提取出的城镇用地与 2000 年进行叠合分析得到两个时期均为建成区的不变像元作为研究 2000—2015 年年 际变化的城镇城区范围。

与这些城镇城区对应的乡村被定义为距离 2015 年提取出的城镇城区 5—10 km 的环形缓冲区中排除掉 城镇用地、水体及数字高程高于城区高程最大值或低于其最小值 50 m 的部分^[18-19]。考虑到水体和高程的限 制主要是因为它们对 PM2.5浓度均有负向的影响^[8,20]。同样提取出 2000 年的乡村区域,并选定两个年份中同 为乡村的不变像元作为用于分析 2000—2015 年年际变化的乡村区域。由上述城乡定义,提取得到 1376 个城 镇城区及其对应的乡村,如图1所示。

2) 城乡 PM, 5浓度的年际变化的对比

首先计算各个年份各个城乡处 PM,,浓度的面积加权后的均值,及其城乡差值。然后,采用线性趋势分析

法计算 1376 个城镇城区及对应乡村处 PM25浓度在 2000—2015 年期间的变化速率及其显著性。

2 结果与分析

2.1 不同 PM_{2.5}浓度等级的面积比例及空间分布年际 变化

图 2显示所有 PM_{2.5}浓度等级所占面积比例的年际 变化。结果表明,2000—2015年期间,PM_{2.5}低浓度区域 面积比例显著减少,等级一从 2000年的 26.97%减少到 2015年的 16.50%,等级二从 2000年的 16.95%降低到 8.62%。与此相反,PM_{2.5}高浓度区域的面积比例显著增 加,如等级五的面积比例从 2000年的 15.13%增加到 2015年的 24.39%,等级六的面积比例从 2000年的 3.45%上升到 2015年的 6.93%,等级七的面积比例从



图 1 1376 个城镇的区位图 Fig.1 The location of 1376 towns

2000年的0.00%变为2015年的0.71%,比例最高值为2010年的1.35%。总体来说,等级六和等级七面积比例变化较小,增加幅度较小,是因为这两个等级代表极其严重的空气污染区,主要为塔克拉玛干沙漠及中东部华北平原部分地区,占整个国土面积的比例小,因此变化幅度相对其他等级来说也较小。此外,中等浓度的面积比例也发生了显著的变化,等级三面积比例减小,从2000年的24.97%到2015年的18.87%,等级四面积比例增加,从2000年的12.53%到2015年的23.98%。PM_{2.5}浓度超过国家二级标准(35 µg/m³)的面积范围从18.58%增加到32.03%,约等于国土面积的三分之一,浓度介于国家一级标准与二级标准之间的面积范围在40%左右波动,而浓度值小于国家一级标准(15 µg/m³)的面积范围从43.92%减少到25.12%。上述所有等级年际变化均为波动式,其中有的年份值较高或较低,但总体的趋势为等级一、二、三面积比例减少,等级四、五、六、七面积比例增加,表明全国2000—2015年PM_{2.5}污染加剧,中高浓度范围扩大。





图 3 显示研究期内中国不同 PM_{2.5}浓度等级的空间分布。全国 PM_{2.5}浓度的平均值显著上升,从 22.31 μg/m³增加到 31.78 μg/m³。高浓度区域主要分布在华北平原上的河北南部、河南北部和山东西部,以及西部 的塔里木盆地。等级六(70—100 μg/m³)常年分布在塔里木盆地、华北平原河北东南部、山东西北部、河南省

5

北部,除此之外,部分年份会分布在四川省成都市、湖北省武汉市和孝感市、江苏省长江两岸及甘肃省兰州市 附近地区,2015年在东北平原地区和江苏省有大范围成片分布。此等级在华北平原的分布范围变化过程为: 从 2000年仅在一些城市零星点状分布,到 2001、2002年在河北东南部小范围面状分布,然后分布范围逐年增 加,到 2007年分布范围达到最大,几乎涵盖了整个华北平原,继而范围缩小、波动,在 2010年又相对增加,后 又减少,2013年又增加,然后又继续缩小。等级七超高浓度(100—130 µg/m³)仅在部分年份有分布,2006年 在河北省东南部分布较广,2010、2011、2013、2015年在塔里木盆地分布较广。在研究期内,等级五的分布范 围整体呈现扩大的趋势,2000年主要分布在三个区域,即(1)塔里木盆地外围和柴达木盆地(II)甘肃宁夏内 蒙陕西交界处(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地和黄土高原)(III)中国中东部华北平原长江中下游平 原部分区域(河北南部、山东西部、河南省、湖北省、江苏省及安徽省北部)。随后,除了 II 区域在多数年份范 围缩小外,其余各区域的范围都不断扩大,中东部囊括了河北省南部、山东河南江苏安徽湖南全境以及湖北东 部、江西浙江北部、贵州广西东部、广东西部地区,再纳入山西和陕西的汾渭平原、四川省东部和重庆及东北平 原地区,整体几乎连成一片呈Y字形分布。低浓度区域主要分布在内蒙古高原北部大兴安岭山脉周围、青藏 高原南部、新疆北部阿尔泰山脉附近区域及台湾,同时这几个区域在研究期内变化很小,中等浓度如等级三和 四主要分布在高浓度区域外围,值得一提的是内蒙古自治区阴山山脉以北、福建省、云南省和海南省浓度相对 较低,空气质量较好。

2.2 PM_{2.5}浓度在城区及乡村的变化趋势

图 4 显示,总体来看,城区和乡村 PM_{2.5}浓度的变化趋势非常类似。经统计,城区 2000—2015 年 PM_{2.5}浓 度有显著性变化趋势(P<0.05)的城镇有 873 个,占总数的 63.44%,变化速率的最小值为-1.32 μg m⁻³ a⁻¹,最 大值为 2.27 μg m⁻³ a⁻¹,平均为(1.12±0.49) μg m⁻³ a⁻¹。与之相对应的,PM_{2.5}浓度有显著性变化的乡村有 873 个,显著变化速率的最小值为-1.33 μg m⁻³ a⁻¹,最大值为 2.26 μg m⁻³ a⁻¹,平均为(1.12±0.48) μg m⁻³ a⁻¹。结 果表明,仅有少数几个城镇表现为显著的负向趋势,分布较为零散,主要位于宁夏、陕西、内蒙的交界处和台 湾。相反,显著正向趋势广泛分布在全国各地城镇的城区及乡村,变化速率最快的地区为东北平原哈尔滨— 长春—沈阳连线沿线,并以此为核心向四周扩散,速率逐渐降低。变化次快的为华北平原上太行山以东的河 北省西南部、燕山以南的北京天津及河北唐山、鲁中南山地丘陵及周围平原地区、华北平原江苏省北部、长江 中下游平原巢湖周边,再其次为华北平原河南省东部、安徽省北部、长江中下游平原位于湖北湖南安徽江苏上 海的地区及广西盆地,然后是河南省西部、江西鄱阳湖平原、杭州湾周边地区、广东省中西部、山西内蒙与河北 三省交界处及新疆北部吐鲁番盆地、准噶尔盆地的绿洲等地区。

2.3 PM_{2.5}浓度的城乡差异

图 5显示,2000—2015年中国 1376个城镇 PM_{2.5}浓度城乡差值的年际变化很小,每年全国城乡差值的平均值在 4.5 µg/m³上下波动,最小值为 4.41 µg/m³,最大值为 4.64 µg/m³。绝大部分城镇的 PM_{2.5}浓度城乡差值分布在-5—0 µg/m³、0—5 µg/m³、5—10 µg/m³区间,占城镇总数约 83%—85%,在全国各地都有分布,没有特定的明显的分布规律。仅少数一两个城镇在部分年份差值小于-5,具体原因尚待进一步研究分析。差值超过 10 µg/m³的城镇占 15%—17%,等级越高,分布范围越小,主要分布在(I)华北平原沿燕山、太行山延伸的从河北遵化到河南郑州的东北—西南向 S 形条带(II)从河北张家口沿大同盆地、忻州盆地、太原盆地、临汾盆地、运城盆地到关中平原的东北—西南向 S 形条带(III)天山北部准噶尔盆地南部的绿洲(IV)浙江省-福建省条带,以及海峡对岸的台湾环岛城镇。

3 结论

本文基于长时间序列 PM_{2.5}浓度遥感反演数据分析了中国 2000—2015 年 PM_{2.5}浓度的时空分布特征,且 比较了 1376 个城镇的城区和周围乡村地区 PM_{2.5}浓度的差异,得出了以下几条结论:

1)PM25污染较严重的地区为华北平原的河北南部、河南北部和山东西部,以及中国西部的塔里木盆地,



图 3 2000—2015 年中国 PM_{2.5}浓度的空间分布图

Fig.3 Spatial distrubution of $PM_{2.5}$ concentration in China from 2000 to 2015

而低浓度区域主要分布在内蒙古高原北部大兴安岭山脉周围、青藏高原南部、新疆北部阿尔泰山脉附近区域及台湾。

2)2000—2015 年等级一、二、三面积比例减少,等级四、五、六、七面积比例增加,中高浓度范围扩大,全国 PM₂₅污染状况恶化。



图 4 2000—2015 年中国 1376 个城镇的城区及乡村的 PM_{2.5}浓度变化趋势 Fig.4 Variation trend of PM_{2.5} concentration of 1376 towns' urban areas and rural areas in China from 2000 to 2015

3)PM_{2.5}浓度显著的强正向变化趋势主要位于东北平原、太行山以东的河北省西南部、燕山以南的北京天津及河北唐山、鲁中南山地丘陵及周围平原地区、华北平原江苏省北部、长江中下游平原巢湖周边。

4) PM_{2.5}浓度城乡差值较大区域主要包括河北省、山西省两条东北—西南向S形条带、浙江省-福建省条带及天山北部绿洲区域。

4 讨论

前人研究大多表明 PM_{2.5}高浓度区域分布在中国东部平原、四川省及塔克拉玛干沙漠^[21-23],本研究结果显示 PM_{2.5}污染较严重的地区为华北平原的河北南部、河南北部和山东西部,以及中国西部的塔里木盆地,其中华北平原和塔里木盆地与前人结果一致,原因分别是人类活动排放及沙尘天气频发。而四川省存在分歧,本文显示四川东部的污染水平由 2000 年绝大部分区域为 25—35 μg/m³演变为 35—70 μg/m³,仅在 2005、2006、2010 年部分年份在成都市附近有 70—100 μg/m³等级的分布,整体污染程度与中国中东部长江中游平原的污染水平类似,并没有华北平原高。此外,PM_{2.5}浓度超过国家二级标准(35 μg/m³)的面积范围从 2000年的 18.58%增加到 2015年的 32.03%,约等于国土面积的三分之一,佐证了前人研究^[24]。

PM_{2.5}浓度变化趋势分析中,变化速率范围为-1.5—2.5 μg m⁻³ a⁻¹,与前人研究中快速增长类的增长速率 2.21 μg m⁻³ a⁻¹,慢增长类的浓度变化速率 1.10 μg m⁻³ a⁻¹基本吻合^[22]。显著的负向趋势出现在宁夏回族自治区和陕西省的交界处,显著的强正向趋势分布在中国东部平原、河北省南部和山东省^[22]也相一致。但本研究发现东北地区也是显著的强正向趋势分布区,甚至哈尔滨—长春—沈阳连线沿线是 PM_{2.5}浓度变化速率最大的地区。尽管在研究期内东北地区 PM_{2.5}浓度基本都低于华北平原地区,但 2015 年东北平原附近地区 PM_{2.5}浓度已达到 70—100 μg/m³,与华北平原持平,相关研究也指出 2014 年哈长城市群是 PM_{2.5}高污染城市聚集地之一^[5]。原因可能是农作物秸秆的焚烧^[25],中国 2002—2016 年露天农作物秸秆和生物质燃烧产生的 空气污染物排放的时空分布特征研究结果显示,2002—2016 年期间来源于露天农作物秸秆燃烧的 PM_{2.5}年平均排放量最大的地区为华东,随后便是中国东北,且中国东北 PM_{2.5}年平均排放量从 2012 年到 2016 年显著增加了 245.7%。因此国家和地方政府应该对此给予高度重视来控制此地区逐渐加重的雾霾污染。

华北平原的河北、山东不仅 PM_{2.5}浓度高,而且具有强的增长趋势,变化速率快,如果这些地区的空气污染 得不到控制将会继续不断恶化,因此国家和地方政府应该迫切关注这些地区 PM_{2.5}污染的治理。此外,整个华 北平原污染均很严重,许多研究也表明,PM_{2.5}污染具有显著的空间溢出效应^[26],因此每个省或市不能仅依靠



图 5 2000—2015 年中国 1376 个城镇 PM2.5 浓度城乡差值的空间分布

Fig.5 Spatial pattern of PM_{2.5} concentration difference between urban areas and rural areas of 1376 towns in China from 2000 to 2015

将重污染工业转移到邻近省来控制 PM25污染,区域性的联防联控、协同监管来治理污染极为重要。

本研究识别出的城乡差值较大地区与前人研究识别出的北京—四川条带和上海—广西条带^[21]部分一致,反映了城市化导致的城区 PM_{2.5}污染较周围乡村地区更为严重,部分结果不同的原因可能在于研究方法不

同。本文在大范围较高分辨率数据基础上显示了中国城镇水平上城区和乡村 PM_{2.5}浓度的差异,但是由于 PM_{2.5}浓度受当地气象条件、人为排放及区域传输等多种因素的影响,机理复杂,因此本文未探究更深层次的 原因,有待于未来进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物 PM2.5及其危害. 前沿科学, 2012, 6(1): 22-31.
- [2] Chen T, He J, Lu X W, She J F, Guan Z Q. Spatial and temporal variations of PM_{2.5} and its relation to meteorological factors in the urban area of Nanjing, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(9): 921.
- [3] Huang W, Long E S, Wang J, Huang R Y, Ma L. Characterizing spatial distribution and temporal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} mass concentrations in an urban area of Southwest China. Atmospheric Pollution Research, 2015, 6(5): 842-848.
- [4] He Q S, Geng F H, Li C C, Yang S Q, Wang Y Y, Mu H Z, Zhou G Q, Liu X B, Gao W, Cheng T T, Wu Z. Long-term characteristics of satellite-based PM_{2.5} over East China. Science of the Total Environment, 2018, 612: 1417-1423.
- [5] 王振波,方创琳,许光,潘月鹏. 2014年中国城市 PM2.5浓度的时空变化规律. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [6] Xu G, Jiao L M, Zhao S L, Cheng J Q. Spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentration in China. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2016, 21(4): 358-368.
- [7] Wang Y Q, Zhang X Y, Sun J Y, Zhang X C, Che H Z, Li Y. Spatial and temporal variations of the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in China. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23): 13585-13598.
- [8] Luo J Q, Du P J, Samat A, Xia J S, Che M Q, Xue Z H. Spatiotemporal pattern of PM_{2.5} concentrations in mainland China and analysis of its influencing factors using geographically weighted regression. Scientific Reports, 2017, 7: 40607.
- [9] Lin G, Fu J Y, Jiang D, Hu W S, Dong D L, Huang Y H, Zhao M D. Spatio-temporal variation of PM_{2.5} concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2014, 11(1): 173-186.
- [10] 周淑贞. 上海城市气候中的"五岛"效应. 中国科学 B 辑, 1988, 18(11): 1226-1234.
- [11] 苏维, 张帅珺, 赖新云, 古新仁, 赖胜男, 黄国贤, 张志坚, 刘苑秋. 南昌市空气 PM_{2.5}和 PM₁₀的时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2017, 28(1): 257-265.
- [12] So K L, Guo H, Li Y S. Long-term variation of PM_{2.5} levels and composition at rural, urban, and roadside sites in Hong Kong: increasing impact of regional air pollution. Atmospheric Environment, 2007, 41(40): 9427-9434.
- [13] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, Hsu N C, Kahn R A, Levy R C, Lyapustin A, Sayer A M, Winker D M. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors. Environmental Science & Technology, 2016, 50(7): 3762-3772.
- [14] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [15] 吴雪娇,鲁安新,王丽红,张华伟.基于 MODIS 的长江源近 10 年积雪反照率时空分布及动态变化. 地理科学, 2013, 33(3): 371-377.
- [16] World Health Organization. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global Update 2005.Geneva: WHO, 2006.
- [17] 环境保护部科技标准司. GB 3095-2012 环境空气质量标准. 北京:中国环境科学出版社, 2012.
- [18] 李元征. 中国城镇化的热环境效应研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [19] Zhou D C, Zhao S Q, Zhang L X, Sun G, Liu Y Q. The footprint of urban heat island effect in China. Scientific Reports, 2015, 5: 11160.
- [20] Wu J S, Li J C, Peng J, Li W F, Xu G, Dong C C. Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in Beijing, China. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(9): 7045-7061.
- [21] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Li L. Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities. Environmental Pollution, 2014, 194: 163-170.
- [22] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate (PM_{2.5}) in China. Environmental Pollution, 2015, 206: 183-187.
- [23] Li J M, Jin M J, Xu Z. Spatiotemporal variability of remotely sensed PM_{2.5} concentrations in China from 1998 to 2014 based on a bayesian hierarchy model. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(8): E772.
- [24] Peng J, Chen S, Lü H L, Liu Y X, Wu J S. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 109-121.
- [25] Mehmood K, Chang S C, Yu S C, Wang L Q, Li P F, Li Z, Liu W P, Rosenfeld D, Seinfeld J H. Spatial and temporal distributions of air pollutant emissions from open crop straw and biomass burnings in China from 2002 to 2016. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(1): 301-309.
- [26] Wu X H, Chen Y F, Guo J, Wang G Z, Gong Y M. Spatial concentration, impact factors and prevention-control measures of PM_{2.5} pollution in China. Natural Hazards, 2017, 86(1): 393-410.