

华东地区PM_{2.5}分布特征及其成因分析

贺千山¹ 耿福海¹ 王燕宇² 周广强¹ 高伟¹ 彭玉萍¹

(1 上海市气象局, 上海 200030; 2 复旦大学, 上海 200433)

摘要: 利用2000—2015年MODIS气溶胶光学厚度产品, 采用参数化方法反演得到了华东地区地面PM_{2.5}时空分布产品。从季节特征来看, PM_{2.5}表现出春夏低、秋冬高的特点。而PM_{2.5}年际变化呈现出从2000年开始稳定增加, 2007年达到最高值, 之后逐渐下降的趋势。这种年变化趋势不仅与区域污染物排放有密切关系, 同时也与天气背景环流的年际尺度变化有很大关系。通过对不同季节的PM_{2.5}进行EOF分解, 发现春季的年变化受极涡强度影响较大, 夏季年变化主要受西太平洋台风数量、北半球副高脊线位置以及太平洋—北美遥相关型指数支配。秋季年变化与太阳黑子活动及亚洲区极涡面积关系密切。冬季年变化受冷空气影响次数和Niño A区(25°—35°N, 130°—150°E)海表温度距平指数支配。各季节天气影响因子的组合效应能够很好地反应出区域PM_{2.5}的年变化特征, 表明在全球气候变暖的背景下, 中国东部环流形式的改变对PM_{2.5}区域分布的变化有着不容忽视的影响。

关键词: PM_{2.5}, MODIS, 环流因子, 华东地区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.017

An Analysis of PM_{2.5} Distribution, Variation and Formation in the Eastern China for 2000-2015

He Qianshan¹, Geng Fuhai¹, Wang Yanyu², Zhou Guangqiang¹, Gao Wei¹, Peng Yuping¹

(1 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030 2 Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract: Using satellite-based PM_{2.5} data for 2000-2015, we found that the temporal-spatial variation of PM_{2.5} in the Eastern China was characterized by the high concentrations in the northern part and low in the southern part of the East China with seasonally high in autumn and winter but low in spring and summer, that the regional averaged PM_{2.5} concentration showed an approximative high of 70.69 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and the low of 51.65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2007 and 2000, respectively. The available emissions of atmospheric compositions showed asimilar yearly variation trend as the PM_{2.5} even the synchronization is not meet to each other of composition, implying that the intensity of anthropogenic emissions dominates the temporal variation of PM_{2.5} in East China. The empirical orthogonal function analysis demonstrated that the dominant variability in the seasonal PM_{2.5} in East China was closely associated with the specific climate index of Asia Polar Vortex intensity in the spring, the Western North Pacific Typhoon number, the Northern Hemisphere subtropical high ridge position and the Pacific/ North American Pattern for the leading mode and the Kuroshio Current SST for the second mode in the summer, the Total Sunspot Number and the Asia Polar Vortex Area for the leading mode and the Pacific polar vortex Intensity, the number of landing typhoon on China and the East Asian trough intensity for the second mode in the autumn, the cold air activity and the Niño A (25°—35°N, 130°—150°E) SSTA for the leading mode and the Pacific Decadal Oscillation together with the Pacific polar vortex area for the second mode in the winter. Therefore, apart from anthropogenic emissions effect, our results also provide robust evidence that the climate factor has played a significant role in modulating the PM_{2.5} in the eastern China for the 16 years.

Keywords: PM_{2.5}, MODIS, circulation index, East China

收稿日期: 2017年7月6日; 修回日期: 2017年10月23日
第一作者: 贺千山(1975—), Email: oxeye75@163.com
通信作者: 耿福海(1972—), Email: fuhaieng@263.net
资助信息: 上海市自然科学基金(16ZR1431700)

0 引言

近年来, 发展中国家重污染事件频繁发生, 它不仅与经济快速发展和城市化进程下排放的气溶胶急剧增长密切相关, 同时和人类活动引起的区域气候变化有关。大气气溶胶时空变化趋势以及它们对太阳辐

射和云的影响,对于区域乃至全球环境都是非常重要的。过去的二十年里,华东地区经历了快速的工业化进程,汽车保有量以及工业排放大幅增加。

在全球变暖的背景下,中国东部的气候发生了显著变化。许多研究关注该区域能见度的变化^[1-3]并证实了华东地区霾天气的显著增加使得大气能见度下降。霾天气的年变化趋势可以明确分为三个阶段:1)缓慢增加阶段:20世纪70—80年代,速度为2.3d/10a;2)稳定增加阶段:90年代,速度为5.2d/10a;3)快速增加:2001—2011年,速度为8.8d/10a。其中,空气动力学直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)成分的变化是最显著的,过去一些研究^[4-5]集中分析了该区域 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分和时空变化。

然而,近些年来霾天气急剧增长的机制还不够清楚。空气质量的恶化与人类活动密切相关,包括城市化和工业化进程下的交通和工业污染物的排放^[6-8],但它不仅和人类活动有关,特定的天气背景下也有利于重污染的形成。华东地区由于受季风的影响,包括温度、降水和大气环流影响下的气象要素具有明显的季节特征,是全球气候变化研究的关键区域。因此,大气气溶胶的产生、传输、沉降将受到季风大气环流,甚至是大西洋海表面温度(SST)的影响^[9],这是大气环境和气候变化的热门研究课题之一。Zhang等^[10]通过分析2013年1月中国东部持续性强霾事件,发现东亚冬季风减弱导致西风带减弱,使得水平风切变和大气垂直混合减弱,从而使得大气层结更稳定,污染加重。Guo等^[11]研究证实,风速和风向是影响局部霾事件周期性变化的关键因素。Li等^[12]指出,中国中部和东部冬季霾天气的年际变化主要由东亚冬季季风所主导。Zhao等^[13]利用综合观测霾数据库的数据,研究了中国东部地区的冬季霾天数表现出显著的10年波动现象与太平洋十年涛动指数(PDO)有关。与温室气体不同,对流层的气溶胶具有较短的寿命,这一特点决定了其时空分布的复杂性。因此,对气溶胶颗粒物的观测研究对于探究华东地区污染成因尤为重要。出于这个目的,一系列长期地基气溶胶观测网已经建立,比如中国太阳分光观测网(CSHNET)^[14-15]、中国大气观测网(CAWNET)^[16-17]、中国气溶胶遥感网(CARSNET)^[18]、云与辐射综合观测站(CRIO)^[19]等。尽管有各种观测技术方法和模式的发展,但空气污染与亚洲季风之间相互作用复杂,季风环流和降水等对气溶胶浓度的影响机制还不清楚。此外,中国东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 长时间的年际尺度变化还没有进行过深入的分析。

本研究是在过去16年(2000—2015年)的区域尺度上,用MODIS(中分辨率成像光谱仪)反演得到的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布进行时空特征分析,并对 $\text{PM}_{2.5}$ 与大尺度天气因子之间的关系进行探究。

1 资料和方法

1.1 数据

MODIS的气溶胶光学厚度产品(AOD)常用于研究对流层气溶胶的空间分布情况^[20]。在本研究中,采用搭载于Terra卫星的MODIS L2 10 km气溶胶AOD数据集(2014年10月1日前是collection 5产品数据集,之后是collection 6数据集)反演得到地面的气溶胶消光系数。研究的时间序列为2000年2月25日—2015年12月31日。中国气象局(CMA)的数据库提供超过400个全国站点的相对湿度数据,用于湿度订正。根据《地面气象观测资料质量控制》(QX/T 118-2010),国家气象信息中心对数据进行了质量控制。NCEP FNL数据提供了每个格点的气象要素(温度、相对湿度、风速和风向)的垂直各层的资料。臭氧监测仪(OMI)卫星数据采用DESCSO(卫星观测排放量每日估算限制,version4)反演算法得到2007—2014年月均 NO_2 排放数据。年均 SO_2 排放量来自2005—2014年OMI观测的对流层 SO_2 垂直柱浓度产品资料(version 1.0)。人为VOC的排放是由2007—2012年6—8月OMI卫星数据对流层HCHO垂直柱浓度输入IMAGESv2全球化学—传输模式来反算得到的。农业废料燃烧产生的CO排放数据也来自OMI卫星。所选区域为华北平原($32^\circ\text{—}40^\circ\text{N}$, $112.5^\circ\text{—}120^\circ\text{E}$)。所有数据产品均来源于荷兰皇家气象研究所(KNMI),空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 。

1.2 方法

本研究利用He等^[21]垂直订正方法从MODIS/AOD产品中获得近地面气溶胶消光系数,然后采用He等^[22]中湿度订正方法反演得到近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。从MODIS/AOD产品中获得近地面气溶胶消光系数的空间分辨率与反演得到的近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分辨率相同,都为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 。具体而言,在气溶胶垂直分布模型即假设气溶胶消光系数在边界层高度以上呈指数衰减的基础上,利用AOD数据反演得到近地面消光系数时需要知道两个参数,边界层高度(PBL)和气溶胶高度(ALH)。PBL通过WRF模式(版本3.2.1)模拟获得,模式采用三层双向嵌套模拟。采用流程图算法,利用NCEP FNL分析资料中的每个格点气象要素(温度、相对湿度、风速和方向)垂直方向上每一层的数据,来自动计算整个区域的ALH。

通过卫星数据与地面雷达实测进行对比验证了整个数据集的可信度，90%的样本量的相关系数超过0.6，超68%的样本量的相关系数大于0.7^[21]。用相对湿度和获得的气溶胶消光系数代入湿度公式，得到能反映华东地区综合湿度影响的量 (α_{ext}, γ) 的空间分布，来订正PM_{2.5}浓度（湿度订正）。并且验证了考虑吸湿增长系数后计算的PM_{2.5}与实测的PM_{2.5}浓度变化一致，相关系数高达0.85^[22]。

2 结果与讨论

2.1 年际变化和季节变化

图1给出了本研究得到的2000—2015年华东地区每年平均PM_{2.5}浓度的空间分布情况。由图1可知，

PM_{2.5}的高值区主要分布在人口密集和工业化程度高的地区（城市群和单个城市），例如长三角地区、淮河平原西北部、鄱阳湖平原。PM_{2.5}低值区分布在南部和东部地区的一些山区（武夷山等）。长三角地区本身也是气溶胶排放量的大值区。与长三角相比，山东西北部地区的城市化程度较低，本身气溶胶排放量不大，但很容易受到北方气流传输过来的气溶胶的影响。淮河平原上的气溶胶分布特征也很大程度上取决于地形和工业的位置。鄱阳湖平原由于盆地的地形再加上人为污染物的排放量很大，气溶胶在山周围积累，污染严重。此外，山东东部的沂蒙山阻挡了西风气流，导致了气溶胶扩散不出去，从而造成污染。

2000—2015年，华东地区北部的细颗粒浓度增加

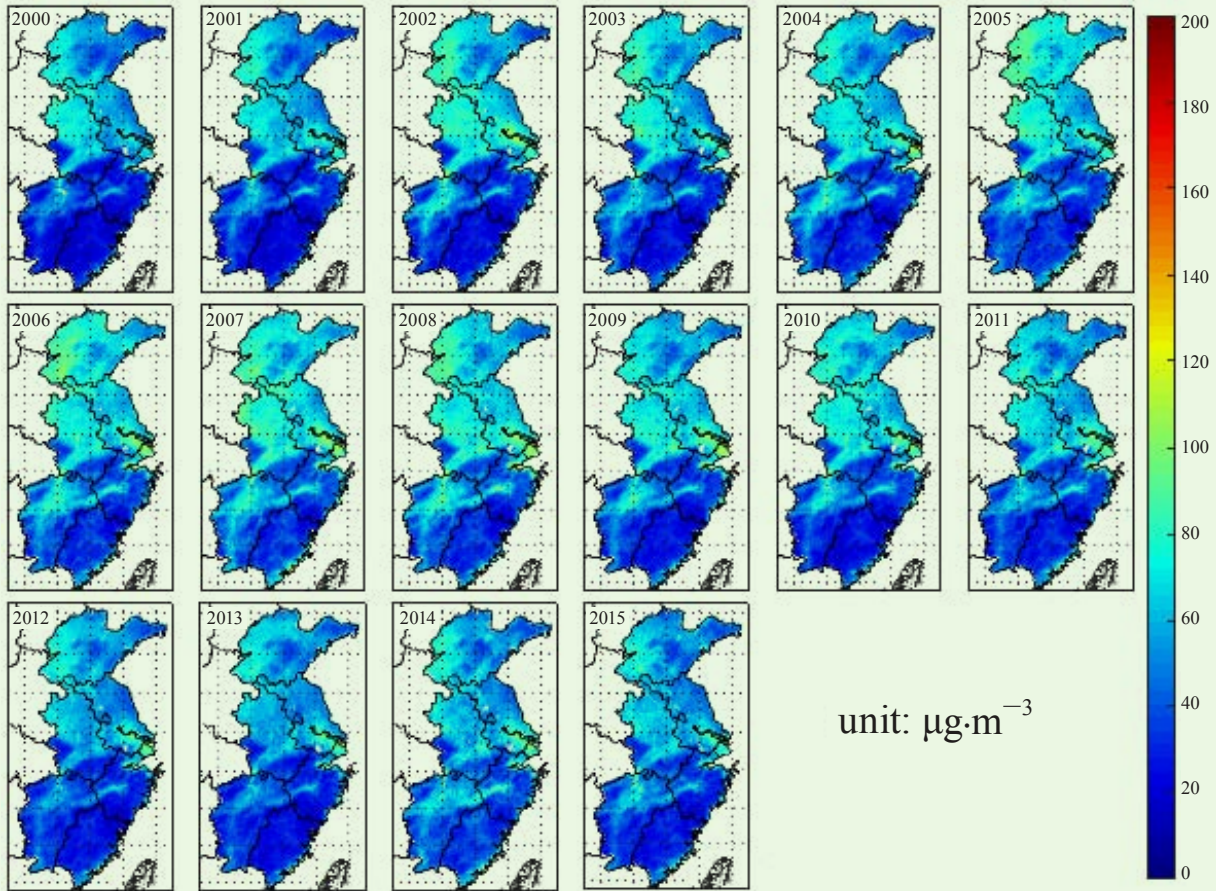


图1 2000—2015年华东地区PM_{2.5}浓度的年平均空间分布图（单位：µg·m⁻³）
Fig. 1 The annual average PM_{2.5} distribution in the Eastern China (unit: µg·m⁻³)

速率远远大于南部地区。南部地区虽然也出现了污染趋势，但其强度较弱。南部由于本身山多，植被覆盖范围广，人类活动少，使得PM_{2.5}变化相对比较稳定。而北部的人类活动越来越多，建筑扬尘、工厂、交通等排放的大量污染物，加上从我国北方传输来的沙尘气溶胶导致北部地区污染较重，而南部可能更多

地与自然排放相关。尽管垂直扩散和区域传输等这些外部气象条件可以影响PM_{2.5}浓度，但PM_{2.5}浓度空间分布显著不均匀的现象很大程度上还是本地排放污染物占主导。

不同季节PM_{2.5}的空间分布差异与当地排放量的变化及整体环流情况（边界层结构、水汽、温度、风

和降水量等)有关。图2给出了PM_{2.5}每个季节空间分布的变化。总体来看,秋冬季浓度PM_{2.5}偏高而春夏季低。这与Cheng等^[23]数值模拟的结果是一致的。春季(3—5月)PM_{2.5}的空间变化受区域传输和当地人为排放影响较大;夏季(6—8月)降水较多,使得夏季的污染相对较轻;秋季(9—11月)受强西风带主导,有利的大气扩散条件使得PM_{2.5}浓度相对较小;而冬季(12—2月)PM_{2.5}的空间变化主要受稳定天气系统的影响。具体来说,春季,山东、淮河地区和鄱阳湖平原PM_{2.5}的浓度最高,为100 μg·m⁻³。夏季,除了鄱阳湖平原、山东等内陆地区以及上海为高值区,其余华东大部分地区的PM_{2.5}浓度值都不太高。鄱阳湖平原

PM_{2.5}浓度最高可达100 μg·m⁻³,这是人为气溶胶排放增加造成的。受夏季快速移动的天气形势的影响,不稳定大气条件和降水使得排放的大量气溶胶得到稀释和沉降,近地面PM_{2.5}浓度减少,改善了大气能见度。秋冬季的华东北部地区都呈现出PM_{2.5}浓度相对较高的现象。由于秋季的太阳辐射增加,气-粒转化速率增加,因此二次细颗粒物的形成增多。此外,降水减少也是北部PM_{2.5}浓度升高的重要因素。在冬季,华东地区PM_{2.5}在稳定的气象条件以及由华北地区传输来的人为气溶胶的强烈影响下,风速相对较低,再加上边界层高度较低,降雨较少,污染物很容易积累,从而造成严重污染。

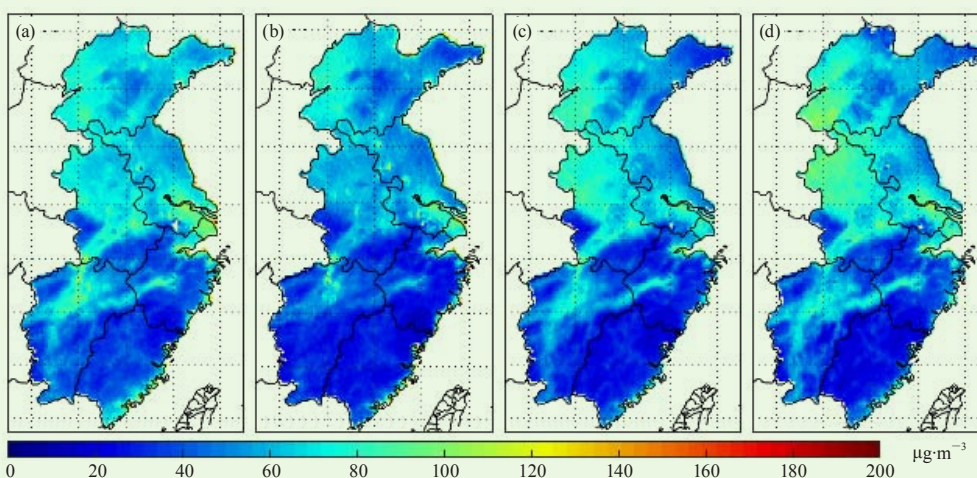


图2 2000—2015年华东地区各季节PM_{2.5}平均浓度分布图(单位: μg·m⁻³):
(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季

Fig. 2 The seasonal average PM_{2.5} distribution in the Eastern China (unit: μg·m⁻³):
a) spring, b) summer, c) autumn, d) winter

图3显示了华东地区年均PM_{2.5}浓度分布直方图(2000—2015年)。采用对数正态分布函数(1)进行拟合,表1中列出了拟合参数。

$$F = \frac{C}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

式中, x 是PM_{2.5}浓度, C 是峰度系数, μ 是平均值, σ 是标准偏差。PM_{2.5}主要分布在20-80 μg·m⁻³。根据《环境空气质量标准》(GB3095-2012)的年均浓度标准35 μg·m⁻³,在大部分年份里,华东约30%地区符合标准。从2005—2008年,年均值小于35 μg·m⁻³的地区明显减少,超过80 μg·m⁻³的地区明显增多。从对数正态分布的拟合系数中可以发现, C 和 μ 以及算术平均值 c_{mean} 均呈单调递增的趋势,而 σ 从2000—2007年呈单调递减,并且某些地区在均值 μ 的附近,PM_{2.5}浓度最大值与峰度系数成正比。这说明,在这8年间,华东

很多地区PM_{2.5}浓度逐年增长,甚至是那些空气质量良好(PM_{2.5}浓度低于40 μg·m⁻³)的地区,也出现了增长,显然这是大范围高强度的人类活动造成的。2007年以后,拟合系数下降,之后从2011—2015年呈现出强烈的波动。尽管PM_{2.5}浓度明显下降,且浓度超过80 μg·m⁻³的地区污染程度有所减轻,但有些地区PM_{2.5}仍未恢复到2000年的浓度水平。

2.2 人类活动的影响

人类活动是影响PM_{2.5}分布的关键因素,这与经济的快速发展,人口爆炸式增长和污染物排放的增加密不可分。图4显示了2000—2015年华东地区PM_{2.5}每年平均浓度的变化情况和不同污染物年均排放量的变化情况。其中,黑色曲线代表PM_{2.5},红色,绿色、蓝色和青色曲线分别代表挥发性有机物(VOC,单位: kg·y⁻¹)、一氧化碳(CO,单位: kg·y⁻¹)、氮氧化物

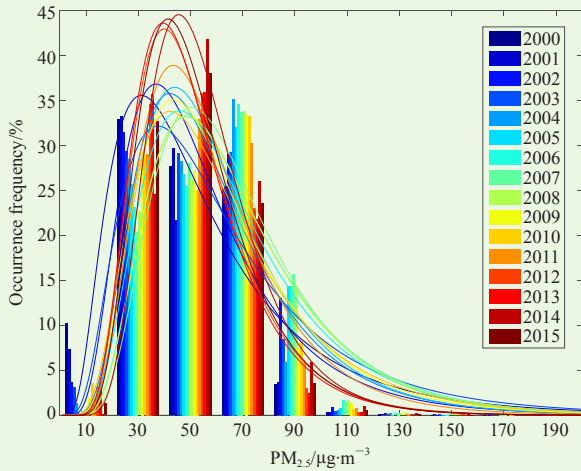


图3 2000—2015年华东地区PM_{2.5}浓度频率分布直方图。其中，不同的颜色代表不同的年份，拟合的曲线为不同年份下对数正态分布拟合曲线

Fig. 3 The occurrence frequency of annual average PM_{2.5} in the East of China for 2000–2015. The different colorful curves are the lognormal distribution fitting for each year

(NO_x, 单位: Gg·N·y⁻¹) 和二氧化硫 (SO₂, 单位: Gg·y⁻¹) 每年排放量的变化。结果表明, 华东地区年均PM_{2.5}浓度变化呈现从2000年开始逐步增加, 2007年达到了最高值 (70.69 μg·m⁻³), 之后逐渐下降的趋势, 在2000年浓度最低 (51.65 μg·m⁻³)。从图中可以看出, SO₂和VOC的排放量与PM_{2.5}年均浓度的变化趋

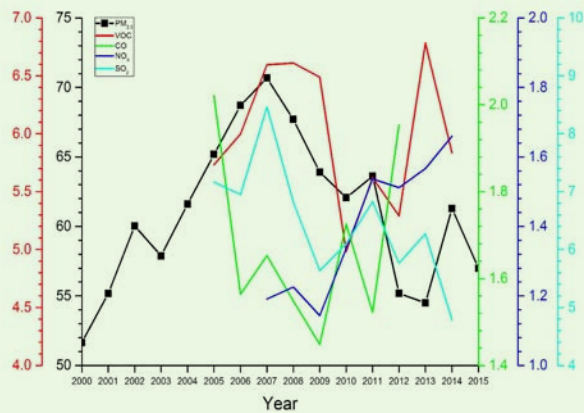


图4 2000—2015年华东地区PM_{2.5}浓度年变化量和各污染物排放量的年变化量。其中, 黑色曲线代表PM_{2.5}浓度 (μm·m⁻³·y⁻¹), 红色、绿色、蓝色、青色曲线分别代表污染物VOC (kg·y⁻¹), CO (kg·y⁻¹), NO_x (Gg·N·y⁻¹), SO₂ (Gg·y⁻¹) 的排放量

Fig. 4 The yearly variation of the regional averaged PM_{2.5} in the East of China for 2000–2015. The available emissions of distinct species are also overlapped against year. Black, red, green, blue and cyan curves represent the concentration of PM_{2.5}, the emission of VOC (kg·y⁻¹), CO (kg·y⁻¹), NO_x(Gg·N·y⁻¹) and SO₂(Gg·y⁻¹) respectively

表1 华东地区每年PM_{2.5}浓度对数正态分布拟合曲线参数表
Table 1 The lognormal distribution fitting parameters for the occurrence frequency of annual average PM_{2.5} in the East of China for each year

年份	C	μ	σ	C _{mean}
2000	1362.95	47.07	0.64	46.18
2001	1559.29	48.74	0.53	47.41
2002	1444.87	53.88	0.60	53.74
2003	1695.42	53.42	0.49	52.38
2004	1789.28	54.88	0.47	53.70
2005	1748.50	58.23	0.49	57.58
2006	1798.45	60.64	0.47	59.23
2007	1903.70	61.43	0.44	60.13
2008	1804.46	60.49	0.47	58.90
2009	1719.04	55.24	0.49	54.26
2010	1628.31	55.05	0.52	53.39
2011	1862.30	52.92	0.45	52.92
2012	1881.70	47.99	0.43	48.02
2013	1882.24	47.22	0.42	47.00
2014	2172.81	52.32	0.37	53.87
2015	1983.60	48.94	0.41	49.39

势相同, 都是在2007年达到最高值。这是因为在2007年, 大气污染控制措施还没有实施, 大部分气溶胶和气溶胶前体物排放到大气中, 使得空气中污染物的含量最高。2007年以后, PM_{2.5}浓度下降了, 其他污染物的排放量也逐渐下降, 这说明节能减排初见成效。从2005—2009年, 农业秸秆燃烧形成的CO排放量急剧减少, 这与2007—2009年PM_{2.5}的变化一致。而与SO₂、VOC、CO三种污染物不同的是, NO_x的排放量却在稳步增加, 在2014年达到最大值1.66 Gg·N·y⁻¹排放的这些大气污染物作为气态前体物, 经过气-粒转化等一系列过程形成了二次气溶胶 (SOA), 而二次有机气溶胶是严重灰霾事件中大气细颗粒物PM_{2.5}浓度的主要来源。因此, 可以得出结论, 华东地区人为污染物年排放量的变化影响PM_{2.5}的年际变化趋势。

变化率 (VR), 即空间分布上每个格点的PM_{2.5}年变化率, 红色代表变化率, 正值表示PM_{2.5}浓度增加, 相应的负值代表减少 (图5)。所有的变化率都通过了99%置信区间的t检验。图5a显示16年VR的变化情况, 图5b是前8年 (2000—2007年) 的变化情况, 图5c是后8年 (2008—2015年) VR的变化情况。对比两个时期 (图5b, 图5c) PM_{2.5}浓度, 可以明显的看出, 前8年中, 除了一些沿海地区未开发的地区, 华东地区的每个格点PM_{2.5}浓度都有所增加。近16年, 长三角和江西西北部地区的PM_{2.5}的年增长率约为 2 μg·m⁻³·y⁻¹, 而在淮河平原, PM_{2.5}每年减少的速度为 2 μg·m⁻³。在前8年间, 长江三角洲、山东、江西和福

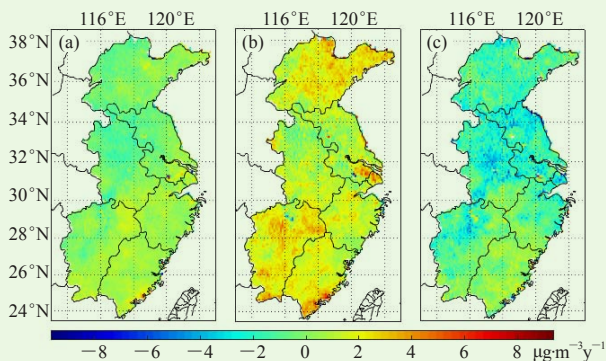


图5 PM_{2.5}浓度的年变化率：(a) 16年(2000—2015年)的PM_{2.5}浓度变化率，(b) 前8年(2000—2007年)PM_{2.5}浓度变化率，(c) 后8年(2008—2015年)PM_{2.5}浓度变化率(单位： $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{y}^{-1}$)

Fig. 5 The VR in each grid for a) the whole 16 years, b) the first 8 years (2000—2007) and c) the last 8 years (2008—2015) (unit: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{y}^{-1}$): a) for the Spring, b) Summer, c) Autumn and d) Winter

建等地的VR最高，增长速率为 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{y}^{-1}$ ，而这些地区是华东经济增长最快的地区。2007年以后，除了中国东南部的一些地区出现较小的增长之外，大部分地区的PM_{2.5}浓度都在下降，其中长三角和淮河平原的变化趋势是 $4.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{y}^{-1}$ 。这与之前的研究结果^[24-25]，PM_{2.5}在2007年以后东亚地区和中国有些地区减少，有些地区保持稳定的结论相一致。

2.3 天气背景对PM_{2.5}分布的影响

气象条件对本地气溶胶的产生、分布、停留和扩散有一定的影响。同样，大尺度环流的变换也会影响整个地区气溶胶的分布和扩散。利用经验正交函数(EOF)分析，提取出了不同季节PM_{2.5}的主要变化特征。EOF分解的过程在这里不详细列出，空间分辨率为 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 。表2列出了前两种EOF模态所占的总的方差贡献百分率，春季前两种模态总的方差贡献为38.7%，夏季为65.9%，秋季为60.2%，冬季为47.7%，远远比其他模态所占的比重大，一定程度上能够反映出PM_{2.5}主要的时空变化。图6分别展示了各个季节第一模态和第二模态的空间分布特征。通过将第一主分量(PC1)和第二主分量(PC2)的时间系数变化的

表2 不同季节下EOF第一第二模态方差总贡献

Table 2 The contribution of the first two EOF modes in the total variance for each season

季节	方差贡献百分比 (%)	
	PC1	PC2
春	24.9	13.8
夏	50.0	15.9
秋	48.4	11.8
冬	33.9	13.8

线性趋势与不同季节大尺度天气指数进行分析比较，找到了影响PM_{2.5}变化的关键环流因子。

2.3.1 春季

EOF第二特征向量(图6e)的方差贡献为13.8%，华东的北部向量特征值为正，南部为较小的负值，大的负值区在江西的东北部和福建省的沿海地区。PC2从2002年以来呈现明显的下降趋势，其年变化与春季的亚洲极涡强度指数(APVII)的相关性很高，相关系数为0.75(图7)，表明华东春季的PM_{2.5}可能与APVII有关。

2.3.2 夏季

夏季的第一特征向量场空间分布为华东大部分南部和北部地区特征向量值为正值，而鄱阳湖平原和淮河平原上为负值，在江西省和浙江省(图6a)之间有较大的负值。

夏季对应的PC1的时间系数变化先逐渐降低，直到2011年开始增加，随后从正值(2012—2013年)转变为负值(2014年)(图8)。这一趋势与夏季三项指数的相关性很高：西北太平洋台风数($R=0.54$)，北半球副高脊线位置(NHSHRP, $R=0.55$)和太平洋—北美遥相关型指数(PNA, $R=-0.63$)。

采用多元线性回归的方法得到了PC1变化的三项指数的回归方程。PC1(T)的时间系数可以表示为：

$$T = 68.8x_1 + 247.0x_2 - 0.2x_3 - 7588.8, \quad (2)$$

式中， x_1 、 x_2 、 x_3 分别代表夏季的西北太平洋台风数，北半球副高脊线和太平洋—北美遥相关型指数。

T的回归曲线与PC1的时间系数变化是显著一致的，这说明华东夏季PM_{2.5}的变化是上述三项指数综合作用的结果。

2.3.3 秋季

秋季的第一特征向量场空间分布为除了江西省和浙江省交界处、长三角和南部地区特征向量值为正值，东北部地区为较弱的负值(图6c)。PC1时间系数序列(图9)呈现出先降低再增加的趋势，2006年是转折点。通过进行相关分析，发现其与太阳黑子数指数(TSNI)和亚洲区极涡面积指数(APVAI)的相关性很高，相关系数分别为0.72和0.68。

采用多元回归分析来计算第一模态的两个指数的回归系数，PC1(T)的时间系数可以表示为：

$$T = 0.32x_1 + 219.59x_2 - 4110.79, \quad (3)$$

式中， x_1 、 x_2 分别代表太阳黑子数指数和亚洲区极涡面积指数。

T的回归曲线与PC1时间系数变化是显著一致的，这说明秋季华东地区PM_{2.5}的变化主要是上述两项

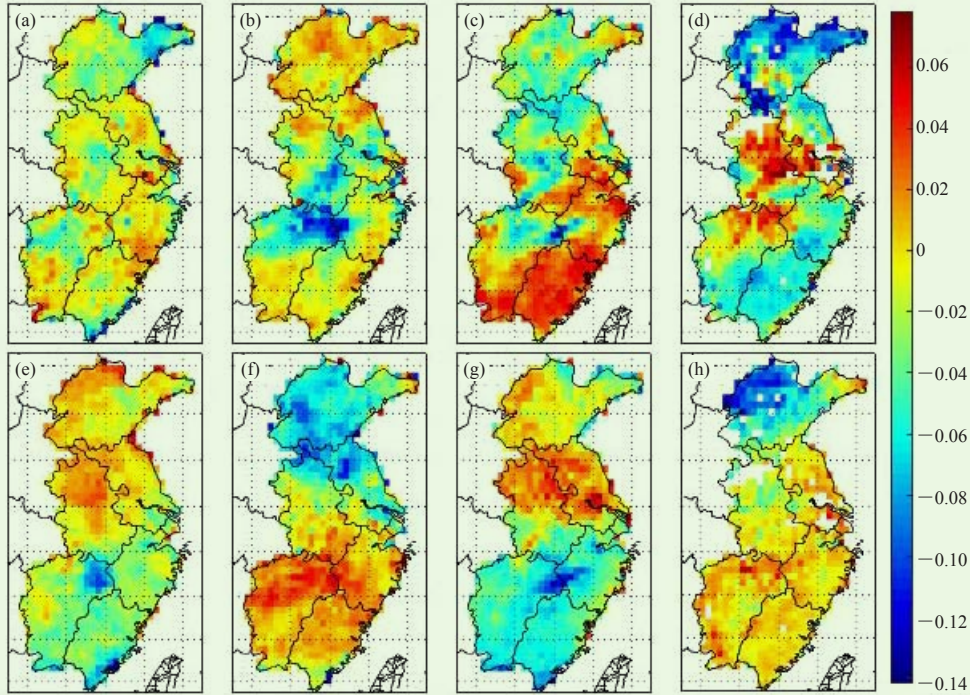


图6 PM_{2.5}的EOF第一模态空间分布：(a) 春季，(b) 夏季，(c) 秋季和 (d) 冬季；PM_{2.5}的EOF第二模态空间分布：(e) 春季，(f) 夏季，(g) 秋季和 (h) 冬季
Fig. 6 The spatial pattern of the first EOF modes in a) spring, b) summer, c) autumn and d) winter. The second EOF modes in e) spring, f) summer, g) autumn and h) winter

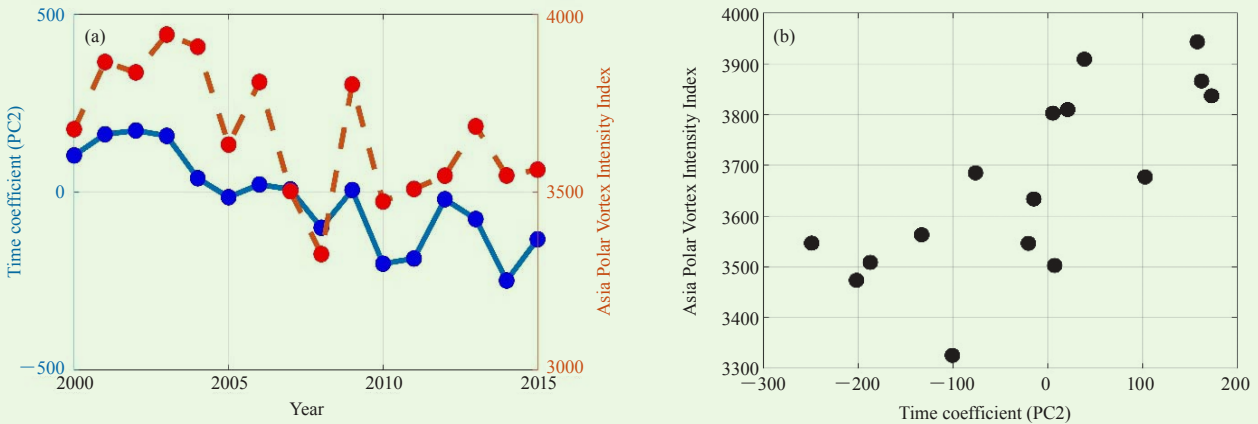


图7 (a) 春季EOF第二模态对应的时间系数序列PC2，其中蓝色代表PC2年变化，红色代表春季APVII的年变化值；
(b) PC2 和 APVII的散点图，其中横坐标为PC2，纵坐标代表APVII
Fig. 7 (a) The time series of the PC2; (b) the scatter diagram between the PC2 and APVII

指数综合作用的结果。

2.3.4 冬季

冬季的PM_{2.5}第一特征向量场空间分布显示，华东中部地区的特征值为正，南部地区为较小负值，大的负值出现在北部地区（图6d）。PC1时间系数变化先是波动震荡，2008年之后下降，到2012年达到最低值，随后上升。如图10所示，PC1的变化趋势与冷

空气活动指数（ $R = -0.51$ ）相关，其次是与Niño A区（25°—35°N，130°—150°E）海表温度距平指数（ $R = 0.77$ ）相关。

采用多元回归分析来计算第一主分量的这两个指数的权重因子，第一主分量的时间序列可以表示为：

$$T = 152.99 - 20.55x_1 + 713.14x_2, \quad (4)$$

式中， x_1 、 x_2 分别代表冷空气活动指数和Niño A区海表

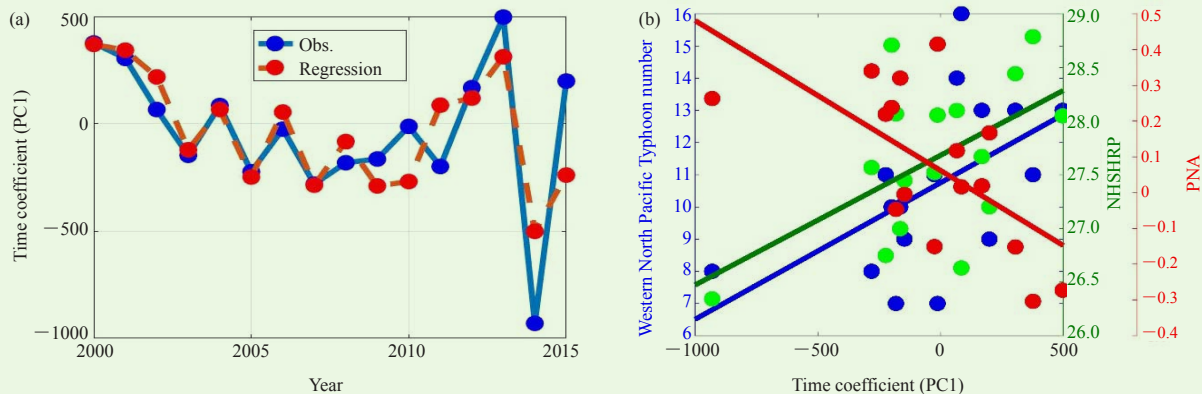


图8 (a) 夏季的PC1的时间系数序列曲线与夏季西北太平洋台风数, NNSHRP和PNA三个因子拟合的回归曲线, 其中蓝色代表PC1, 红色代表拟合的回归值; (b) PC1和不同指数的散点图和对应的线性拟合直线, 其中蓝色代表西北太平洋台风数, 绿色代表NNSHRP, 红色代表PNA

Fig. 8 (a) The time series of the PC1 and the regression values to the 3 factors: the Western North Pacific Typhoon number, NNSHRP and the PNA, (b) the scatter points and fitted lines of the different index to the PC1. Blue represents the Western North Pacific Typhoon number, the green and red represent the NNSHRP and the PNA respectively

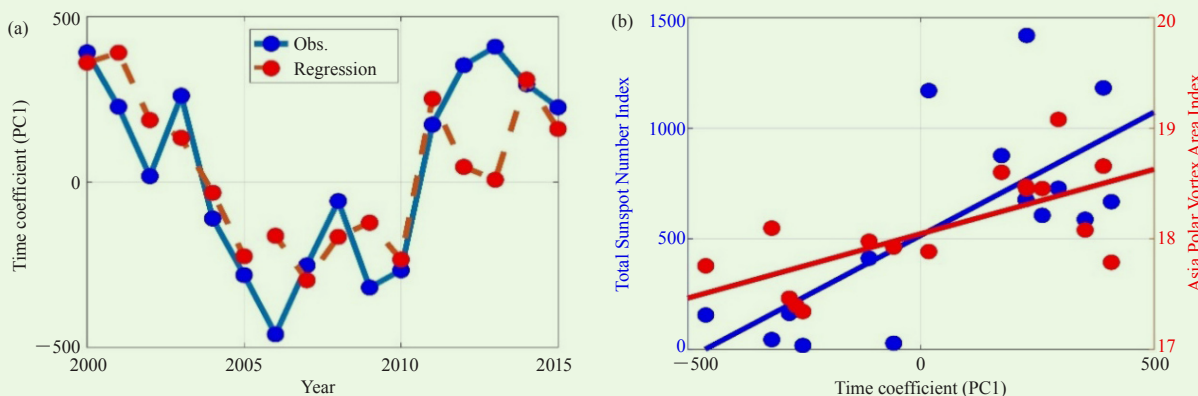


图9 (a) 秋季的PC1的时间序列和TSNI和APVAI拟合的回归曲线, 其中蓝色代表PC1, 红色代表拟合的回归曲线; (b) PC1和不同指数的散点图和对应的线性拟合直线, 蓝色代表TSNI, 红色代表APVAI

Fig. 9 (a) The scatter points and fitted lines of the different index to the PC1. The Blue and red represent the TSNI, APVAI respectively; (b) The time series of the PC1 (blue) and the regression values of the PC1 to 2 factors: the TSNI and APVAI (red)

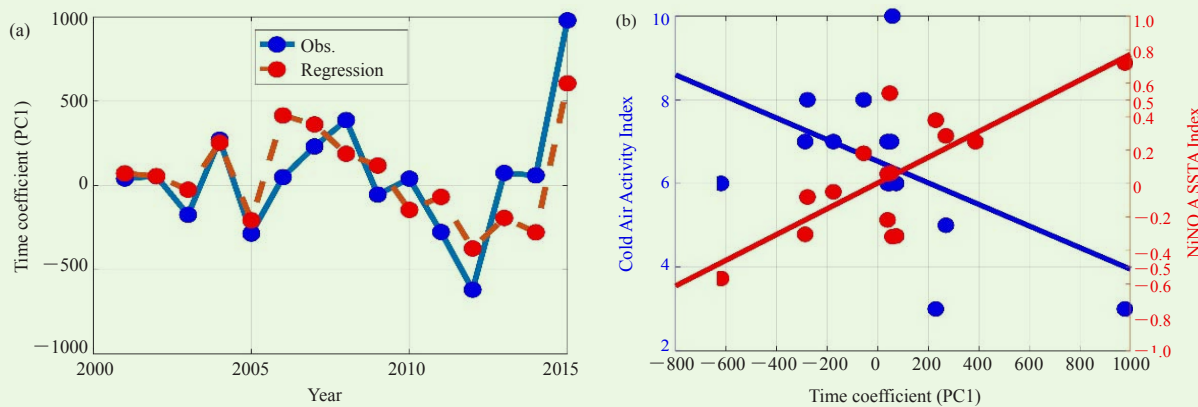


图 10 (a) 冬季的PC1的时间序列曲线和冷空气活动指数和NINO A区海表温度距平指数曲线; (b) PC1在不同指数下的散点图和拟合曲线

Fig.10 (a) The time series of PC1 and the regression line from the Cold Air Activity Index and the NINO A SSTA Index. (b) The scatter points comparison and fitted lines of PC1 with the different index. The Blue and red dots represent the Cold Air Activity Index, NINO A SSTA respectively

温度距平指数。

T 的回归曲线与PC1的时间系数变化是显著一致的,这说明华东冬季 $PM_{2.5}$ 的变化主要是上述两项指数综合作用的结果。

3 结论

本研究利用2000年到2015年MODIS产品,采用He等^[21-22]的参数化方法反演得到了华东地区地面 $PM_{2.5}$ 时空分布产品。进一步分析了华东地区 $PM_{2.5}$ 的时空特征,通过对不同季节下 $PM_{2.5}$ 进行EOF分解,找到了影响华东地区不同季节下关键的大尺度天气因子。得到的结论如下:

1) 得到了2000—2015年每年的华东地区 $PM_{2.5}$ 空间分布,从图上可以直观地看出, $PM_{2.5}$ 的高值区主要分布在人口密集和工业化的地区,例如长三角地区、淮河平原的西北部、鄱阳湖平原,主要原因是由于城市区域的人为活动比较强烈,工厂、汽车交通尾气、建筑扬尘等导致污染物大量排放到大气中,加上从北方传输过来的污染气溶胶,再考虑到有些地区因地形因素导致气溶胶不易扩散,使得这些地区的空气污染十分严重。而南部的山区由于植被较多,受人类活动影响较少, $PM_{2.5}$ 浓度很低。尽管垂直扩散和区域传输等这些外部气象条件可以影响 $PM_{2.5}$ 浓度,但 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布显著不均匀的现象很大程度还是本地排放占主导。

2) 从各个季节 $PM_{2.5}$ 的空间分布来看,秋、冬季污染较重,春、夏季污染相对较轻。尤其在冬季,华东地区 $PM_{2.5}$ 在稳定的气象条件(风速相对较低,边界层高度较低,有时甚至出现大气逆温现象,降雨较少)以及由华北地区传输来的人为气溶胶的强烈影响下,污染物很容易积累从而造成严重污染。

3) 从近16年华东地区 $PM_{2.5}$ 每年平均浓度的变化情况来看,2000—2007年,近地面 $PM_{2.5}$ 浓度逐渐增加,2007年达到最高值,为 $60.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,到2007年以后,逐渐降低。这从华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度的年变化率也能很明显的看出,前8年中,绝大多数地区增长率为正值,如长江三角洲、山东、江西和福建等地,增长率达到 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{y}^{-1}$,而2007年以后,大部分地区的 $PM_{2.5}$ 浓度都在下降,这与国家大气污染物管控措施的施行有密切的关系。同时,挥发性有机物(VOC)、一氧化碳(CO)、氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO_2)这些大气污染物的排放也在波动中下降,这说明国家节能减排的措施有很大的效果。同时,这些大气污染物气体作为气溶胶的前体物,它们排放量的

变化影响着 $PM_{2.5}$ 的年度变化趋势。

4) 通过对不同季节下 $PM_{2.5}$ 时空分布进行EOF分解,选取能代表主要变化特征的第一模态和第二模态进行进一步分析,发现春季的年变化受极涡强度影响较大,夏季年变化主要受西太平洋台风数、北半球副高脊线位置以及太平洋—北美遥相关型指数支配;秋季年变化与太阳黑子活动及亚洲区极涡面积关系密切;冬季年变化受冷空气影响次数和Niño A区海表温度距平指数支配。各季节天气影响因子的组合效应能够很好地反应出区域 $PM_{2.5}$ 的年变化特征,表明在全球气候变暖的背景下,中国东部环流形式的改变对 $PM_{2.5}$ 区域分布的变化起着一定的作用。在接下来的研究工作中,将进行更深一步的分析,探究环流形式的变化是如何影响气溶胶浓度和华东地区的空气污染,期望研究其中所蕴含的机理。

参考文献

- Chang D, Song Y, Liu B. Visibility Trends in Six Megalopolis in China 1973–2007. *Atmospheric Research*, 2009, 94(2): 161–167.
- 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州市区大气能见度变化及其与主要因子的分析. *中国粉体技术*, 2009, 15(2): 56–61.
- Gao L, Jia G, Zhang R, et al. Visual Range Trends in the Yangtze River Delta Region of China, 1981–2005. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2011, 8(61): 843–849.
- Li L, Chen C, H. Fu. Air quality and emissions in the Yangtze River Delta. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(4): 1621–1639.
- Lin G, Fu J Y, Jiang 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*, 2013, 11(1): 173–186.
- Liu J, Diamond J. China's environment in a globalizing world. *Nature*, 2005, 435(7046): 1179–1186.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(9): 26571–26615.
- Yang X C, Yue W Z, Xu H H, et al. Environmental consequences of rapid urbanization in Zhejiang province, East China. *Int J Env Res Pub*, 2014, 11(7): 7045–7059.
- Xiao D, Li Y, Fan S J, et al. Plausible influence of Atlantic Ocean SST anomalies on winter haze in China. *Theor Appl Climatol*, 2015, 122(1): 249–257.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. *Science China: Earth Sciences* 2014, 57(1): 26–35.
- Guo S, Hu M, Zamora M L. Elucidating severe urban haze formation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 2014, 111(49): 17373–17376.
- Li Q, Zhang R H, Wang Y. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East Asian winter monsoon. *International Journal of Climatology*, 2016, 36(1): 346–354.
- Zhao S, Li J P, Sun C. Decadal variability in the occurrence of wintertime haze in central eastern China tied to the Pacific Decadal Oscillation. *Scientific Report*, 2016, 6: 27424.
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. Introduction and Calibration of the Chinese Sun Hazemeter Network. *Environ Sci*, 2006, 27(9): 1697–702.
- Xin J Y, Wang Y S, Li Z Q, et al. Aerosol optical depth (AOD)

(下转149页)

风速均呈减小趋势,以冬春季节的减小最为显著。年相对湿度以0.9%/10 a的趋势显著较小,且四季均呈减小趋势,以春季减小最为显著。

2) 过去56年间,崇明暴雨日数平均增加0.4 d/10 a。小雨、中雨和大雨对全年总降水量的贡献率呈下降趋势,而暴雨和大暴雨对全年总降水量的贡献率呈上升趋势,尤其是大暴雨,其对全年总降水量的贡献率增加1.5%/10 a。大风日数以1.9 d/10 a的线性趋势减少,年极端最大风速也呈减少趋势,平均减少0.9 m/s·10 a。年雾日数以3.0 d/10 a的趋势增加。年高温日数以1.8 d/10 a的线性趋势增加,极端最高气温也以0.5 °C/10 a的趋势增加。

3) 1961—2016年,崇明无霜期初日的出现时间略有提前,终日的出现时间明显推迟,无霜期日数增加。 ≥ 3 °C有效积温增加了402~436 d °C, ≥ 10 °C有效积温增加了284~308 d °C。年平均风功率密度以8.9 W/m²·10 a的速率减少,即风能资源呈现减少趋势。大气混合层厚度以23.5 m/10 a的趋势降低,污染物的扩散和稀释高度降低,环境条件不利于空气质量改善。稳定类和不稳定类天气出现频率分别以3.3%/10 a和2.1%/10 a的趋势增加,而中性类天气出现频率呈减少趋势。人体舒适日数总体上以4.3 d/10 a的趋势增加。

随着大气中温室气体浓度的增加以及土地利用的变化,全球变暖是其主要特征^[14],并导致水循环的变化、极端天气和气候事件频率和强度增加等一系列问题^[15-16]。以上崇明主要气候要素和天气现象的气候变化特征反应了崇明地区气候对全球气候变化的响应。然而与上海城区相比,崇明岛城市化程度较低,城市热岛、雨岛效应较弱,污染物扩散条件较好,更适宜

动植物生长等,充分体现了在全球变暖大背景下,其生态岛的独特优势。

参考文献

- [1] 王绍武,叶谨林. 近百年全球气候变暖的分析. 大气科学, 1995, 19(5): 545-553.
- [2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [3] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2012.
- [4] Meehl G A, Karl T R, Easterling D R, et al. An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections. Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81(3): 413-416.
- [5] Wang Q, Fan X, Qin Z, et al. Change trends of temperature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961-2010. Global and Planetary Change, 2012, 92: 138-147.
- [6] Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S. Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region, China. Climatic Change, 2012, 110: 403-429.
- [7] de Vyver H V. Evolution of extreme temperatures in Belgium since the 1950s. Theor Appl Climatol, 2012, 107: 113-129.
- [8] 王瑞静,赵敏,高峻. 城市森林主要植被类型碳储量研究——以崇明岛为例. 地理科学, 2011, 31(4): 490-494.
- [9] 于泉洲,梁春玲,刘煜杰. 近30年长江口崇明东滩植被对于气候变化的响应特征. 生态科学, 2014, 33(6): 1169-1176.
- [10] 郭茹,王丹青,卢慧楠,等. 基于遥感的城镇化过程碳储量格局变化研究——以上海市崇明岛为例. 环境污染与防治, 2015, 37(12): 105-110.
- [11] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003.
- [12] 国家环境保护总局监督管理司. 中国环境影响评价培训教材. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [13] 中国气象局国家气候中心. 2013年全国气候影响评价. 北京: 气象出版社, 2014.
- [14] Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: surface and atmosphere climate change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [15] Schneider S H, Semenov S, Patwardhan A, et al. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [16] Gleick P H, Adams R M, Amasino R M, et al. Climate change and the integrity of science. Science, 2010, 328: 689-690.
- [17] and Angstrom exponent of aerosols observed by the Chinese Sun Hazemeter Network from August. J Geophys Res, 2007, 112(D5): 1703-1711.
- [18] Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, et al. Aerosol monitoring at multiple locations in China: Contributions of EC and dust to aerosol light absorption. Tellus B, 2008, 60(4): 647-656.
- [19] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [20] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, et al. Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network. J Geophys Res, 114: D03206.
- [21] Zheng Y, Yuan T, Zhao F. Preface to special section on East Asian study of tropospheric aerosols: an international regional experiment (EAST-AIRE). J Geophys Res, 2007, 112: D22S00.
- [22] Li Z Q, Niu F, Lee K H, et al. Validation and understanding of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China. J Geophys Res, 112: D22S07.
- [23] He Q S, Li C C, Geng F H, et al. A parameterization scheme of aerosol vertical distribution for surface-level visibility retrieval from satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment, 2016, 181: 1-13.
- [24] He Q S, Zhou G Q, Geng F H, et al. Spatial distribution of aerosol hygroscopicity and its effect on PM2.5 retrieval in East China. Atmospheric Research, 2016, 170: 161-167.
- [25] Cheng N L, Meng F, Wang J K, et al. Numerical simulation of the spatial distribution and deposition of PM2.5 in East China coastal area in 2010. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(6): 305-310.
- [26] Boys B L, Martin R V, Van Donkelaar A, et al. Fifteen-year global time series of satellite-derived fine particulate matter. Environmental Science Technology, 2014, 48(19): 11109-11118.
- [27] Ma Z, Hu X, Sayer AM, et al. Satellite-based spatiotemporal trends in PM2.5 concentrations: China, 2004-2013. Environmental Health Perspectives, 2016, 124(2): 184-192.

(上接142页)