

张恒德,张碧辉,吕梦瑶,等,2017.北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用[J].气象,43(8):998-1004.

北京地区静稳天气综合指数的初步构建 及其在环境气象中的应用*

张恒德 张碧辉 吕梦瑶 安林昌

国家气象中心,北京 100081

提 要: 静稳天气与大气重污染的发生有紧密联系,为定量描述大气的静稳程度,文章研发了静稳天气综合指数。结合统计和预报经验,挑选发生大气污染的气象要素及其阈值条件,通过权重求和得到初步构建静稳天气指数(SWI)。此后,基于近 13 年的气象数据,分段统计各气象要素不同区间内雾-霾天气出现概率相对气候态的倍数作为分指数,根据分指数最大值和最小值的比值排序,得到 10 个对静稳天气具有较强指示意义的气象要素,对这 10 个要素的分指数求和得到静稳天气指数。改进后的指数和 $PM_{2.5}$ 浓度有更好的相关性。以 2015 年 1 月一次重污染过程为例,分析不同阶段 SWI 和 AQI 指数的变化,两者具有较好的一致性,均表现出发展阶段稳定增长,消散阶段迅速降低的特征。应用静稳天气指数评估发现,APEC 减排期间京津冀地区大气静稳程度和减排之前相当,但污染持续时间和峰值强度较减排前明显降低。SWI 可以在重污染天气预报和重大活动减排措施评估中得到有效应用。

关键词: 静稳天气指数(SWI),雾-霾天气过程,污染减排评估

中图分类号: X16,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.010

Development and Application of Stable Weather Index of Beijing in Environmental Meteorology

ZHANG Hengde ZHANG Bihui LÜ Mengyao AN Linchang

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Stable weather index (SWI) of Beijing is developed to meet the demand of quantitative description of the degree of stable weather which is conducive to the formation of fog and haze in China. During a heavily polluting process in January 2015, both the SWI and AQI (air quality index) showed consistent trend: stable growth in the developing stage and rapid decrease in the ending stage. SWI is also used to assess the effect of reduction measure of pollution source. Under the similar stable weather as described by SWI, reduction measures contained air pollution in Beijing during APEC. SWI is developed further based on meteorological data lasting 13 years. Subindex of any parameters is defined as the conditional probability of fog-haze divided by the climatology probability when the threshold of the parameter is met. The top 10 stable-weather-implication parameters are chosen, of which subindexes are added up as the final SWI. The developed SWI shows better correlation with $PM_{2.5}$ concentration which means better characterization of stable weather.

Key words: stable weather index (SWI), fog-haze processes, pollution reduction assessment

* 科技部国家重点研发计划项目(2016YFC0203301)、气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M70)、国家科技支撑计划项目(2014BAC16B02)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306015)共同资助

2016 年 2 月 19 日收稿; 2017 年 6 月 7 日收修定稿

第一作者:张恒德,主要从事短期天气预报和环境气象预报服务工作。Email:zhanghengde1977@163.com

引言

随着我国经济发展、城市建设和交通现代化的进程,大气污染成为日益严重的问题。2013年1月我国中东部地区遭遇大范围持续雾-霾天气(关月和何立富,2013;于庚康等,2015),京津冀地区共计发生5次污染天气过程,北京、天津和石家庄 $PM_{2.5}$ 浓度的小时均值最大值分别超过680、500和660 $\mu g \cdot m^{-3}$ (王跃思等,2014),远高于严重污染的标准250 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。高浓度的大气污染物影响人体健康,降低能见度造成视程障碍,导致近50年(1961—2011年)我国能见度明显下降,霾日发生的频率总体上呈增加的趋势(丁一汇和柳艳菊,2014)。静稳天气形势有利于形成雾-霾天气,在高低空有利气象要素的共同作用下,导致气溶胶、水汽在近地层积累,从而形成高污染和低能见度天气。针对形成雾-霾天气的气象条件,童尧青等(2007)统计分析地面风速、相对湿度对南京地区霾天气的影响,指出低风速和高相对湿度有利于形成霾天气,96.7%的霾日日均风速在0~4 $m \cdot s^{-1}$,相对湿度和年均霾日能见度呈负相关关系。高空环流形势也是形成雾-霾天气的重要条件,尤其在中长期预报中,地面要素预报准确率下降,环流形势在预报中的作用更加重要。大气对流层中层出现较强的纬向环流、对流层低层在弱高压脊控制下并且出现较弱的表面风时,有利于珠三角地区严重霾天气的发生(吴兑等,2008)。此外,台风外围下沉气流也会导致珠三角出现持续霾天气(夏冬等,2013)。冬季受冷高压控制,配合下沉气流有利于浙江地区霾天气的形成(翁之梅等,2016)。槽后西北气流、稳定的垂直层结及地面较弱的气压场,有利于上海地区污染物的积聚和污染天气的维持(陈镭等,2016)。

地面气象要素、高空环流形势等都是雾-霾天气形成的条件,在环境气象预报评估中需要一个综合指数定量描述气象条件是否有利于形成雾-霾天气。Wang and Angell(1999)定义了大气静稳的判别条件:当某地满足日平均海平面地转风 $< 8 m \cdot s^{-1}$,500 hPa日平均水平风速 $< 13 m \cdot s^{-1}$,并且没有降水,则定义为一个大气静稳日;如果850 hPa及以下出现逆温,则将海平面地转风放宽至 $< 8.8 m \cdot s^{-1}$ 。静稳日持续4 d以上定义为一次静稳天气过程。美国国家气候数据中心(NCDC)根据上述定义计算发

布美国地区逐月空气静稳天气指数(air stagnation index),定义为每月静稳日数所占百分比。Horton et al(2012)根据NCDC定义的空气静稳天气指数模拟评估21世纪全球气候变化对静稳天气的影响,发现中国东部等高度工业化地区属于气候变化敏感区,静稳天气出现频率较20世纪增加12%~25%。值得注意的是静稳天气只是表征气象条件对大气污染物积聚的作用,是污染天气形成的必要不充分条件。静稳天气高发区并不等同于大气污染区域,Horton et al(2012)计算发现西伯利亚地区是静稳天气高发区,但由于人为污染源排放较少,该区域空气较为清洁。Tai et al(2010)基于上述大气静稳日的定义统计发现美国大气静稳日的 $PM_{2.5}$ 浓度较非静稳日平均高2.6 $\mu g \cdot m^{-3}$ 。上述工作给出大气静稳的定性判断依据,无法满足我国环境气象业务对定量描述大气静稳程度的迫切需求。

国内学者也开展了综合指数研发工作。朱蓉等(2001)基于中国气象科学研究院建立的非静稳多箱大气污染浓度预报和潜势预报系统CAPPS开发的空气污染潜势指数(potential pollution index, PPI),被定义为标准源强在实际气象条件下生成的浓度与在标准气象条件下产生的浓度的比值。杨元琴等(2009)选取敏感气象要素:气压、气温、风、相对湿度、稳定度,并引入凝结函数开发了空气质量气象条件参数(parameters linking air-quality to meteorological elements, PLAM)指数,对北京局地污染气象条件的客观定量诊断和预测,并可指示周边地区污染物向北京输送有利或不利于的强度和方位。上述指数可以体现气象条件对空气污染的综合作用,但在环境气象业务中应用存在一定难度,需要结合气象业务部门现有数据环境开发物理意义明确且便于本地化推广的静稳天气综合指数。

1 静稳天气指数建立

静稳天气是在高、低层大气的综合作用下形成的,有利于污染物和水汽在排放源附近和近地层累积,造成重污染和低能见度天气。在环境气象预报实践中通过相关气象条件的叠加得到静稳天气指数,具体方法是:

- (1) 根据文献调研结合预报经验挑选静稳天气相关气象因子;
- (2) 确定各气象因子阈值,如果因子落在阈值

范围内则表示该因子支持静稳天气的形成；

(3) 根据各因子在不同阈值范围内对静稳天气形成作用的大小分配权重,作用越大给予越高的权重；

(4) 对所有落在阈值范围内的因子权重求和,得到静稳天气指数(stable weather index, SWI)

$$SWI = \sum_{i=1}^n W_i$$

式中, n 为静稳天气相关气象因子个数, W_i 为各因子在不同阈值范围内给予的权重。

统计分析 2013 年 1 月我国中东部大范围雾-霾天气过程中主要气象要素的分布情况,结合预报经验筛选对雾-霾天气形成具有较好指示意义的因子并确定其阈值范围和权重。

水平风速较低时空气流通能力差,不利于大气污染物水平输送,是静稳天气的重要指标。统计 2013 年 1 月我国中东部气象站点出现雾-霾天气时 10 m 风场 U 、 V 分量的频率分布,发生雾-霾天气时

U 、 V 风速多低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1), 低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的频率分别为 89% 和 78%。

低层逆温有利于形成霾天气(吕翔等, 2015; 何心河等, 2016)。在华北空气质量达到严重污染的 2013 年 1 月 13 和 28 日, 根据 NCEP FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 08 时华北、黄淮地区低层(925~1000 hPa, 850~1000 hPa)都存在逆温(图 2)。逆温层对空气垂直交换有强烈的抑制作用, 造成大量水汽和气溶胶聚集在逆温层下, 形成污染天气。

混合层高度是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的敏感要素(Dawson et al, 2007; Kleeman, 2008)。统计发现 2013 年 1 月 7—16 日重污染过程中出现雾-霾天气时混合层高度均较低, 雾: 200~600 m, 轻雾: 400~900 m, 霾: 400~1200 m。较低的混合层高度意味着水汽和污染物在垂直方向可以有效扩散的高度较低, 导致低层浓度升高。其中混合层高度计算采用罗氏法(Nozaki, 1973), 该方法通过地面气象资料估算混合层高度, 所需资料容易获取, 适宜在业务中

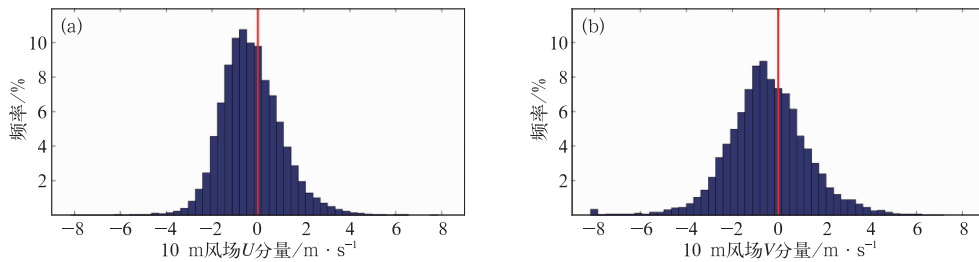


图 1 2013 年 1 月我国中东部出现雾-霾天气时 10 m 高度风场(a) U 和(b) V 分量分布
Fig. 1 Frequency distribution of (a) U , (b) V components of 10 m wind field during fog and haze process over central and eastern China in January 2013

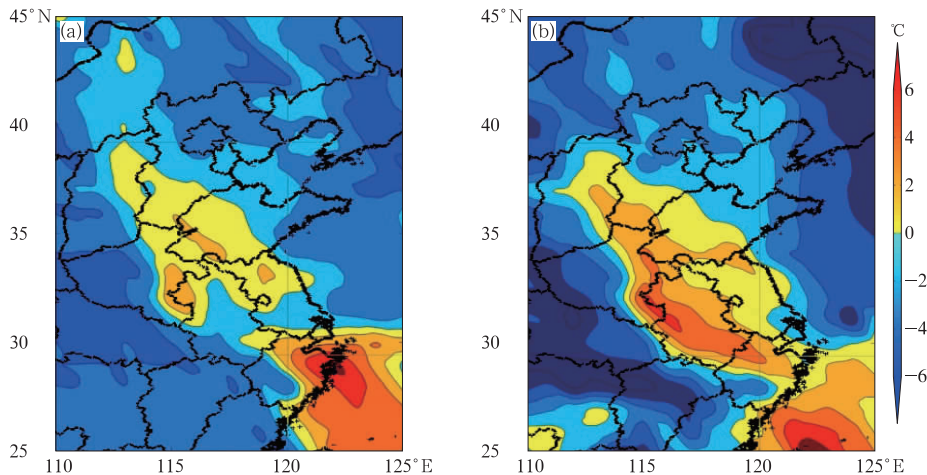


图 2 2013 年 1 月(a)13 日 08 时 925~1000 hPa 和(b)28 日 08 时 850~1000 hPa 逆温强度分布
Fig. 2 Intensity of inversion layer (a) 925~1000 hPa at 08:00 BT 13 January, (b) 850~1000 hPa at 08:00 BT 28 January in 2013

应用。本文采用地面常规气象观测数据计算混合层高度。

进一步分析发现低能见度多对应弱的 24 h 变温、变压,即天气形势较为稳定,没有较强天气系统影响的背景下易形成静稳天气。

相对湿度是影响能见度和污染浓度的重要因子。分析 2013 年 1 月北京相对湿度垂直分布-时间剖面(图略)发现重污染天气对应上干下湿的湿度层结构,即近地层相对湿度高,850 hPa 及以上高度相对湿度低。上层相对湿度低导致天空晴朗无云有利于夜间辐射降温形成逆温;低层湿度高有利于污染物吸湿增长,形成雾-霾天气。

结合上述重污染过程气象要素统计分析和预报经验,最终确定计算静稳天气指数的气象要素、阈值及权重如表 1 所示。静稳天气指数考虑了低层大气(850 hPa 以下)和污染物扩散相关的动力、热力条件。对关键要素 2 m 相对湿度、10 m 水平风速和混合层高度在不同阈值区间赋予不同权重。

表 1 计算静稳天气指数的气象要素、阈值及权重

Table 1 Meteorological factor, threshold value and weight for SWI

| 因子(<i>i</i>) | 阈值 | 权重(<i>W</i>) |
|----------------|---|----------------|
| 地表 24 h 变温 | <3 C | 2 |
| 海平面气压 | 1010~1030 hPa | 1 |
| 24 h 变压 | <3 hPa | 1 |
| 2 m 相对湿度 | 40%~60% | 1 |
| 2 m 相对湿度 | 60%~70% | 2 |
| 2 m 相对湿度 | 70%~80% | 3 |
| 2 m 相对湿度 | 80%~90% | 4 |
| 2 m 相对湿度 | >90% | 5 |
| 850 hPa 散度绝对值 | <2×10 ⁻⁵ s ⁻¹ | 1 |
| 10 m 水平风速 | 3~4 m·s ⁻¹ | 1 |
| 10 m 水平风速 | 2~3 m·s ⁻¹ | 3 |
| 10 m 水平风速 | <2 m·s ⁻¹ | 4 |
| 850 hPa 垂直速度 | <0.2 hPa·s ⁻¹ | 2 |
| 混合层高度 | 800~1500 m | 1 |
| 混合层高度 | 300~800 m | 2 |
| 混合层高度 | <300 m | 4 |
| 逆温层 | 850~925、925~1000 和 850~1000 三层中只要存在一层逆温 | 3 |

2 静稳天气指数改进

2.1 改进方法

第 1 节中静稳天气指数的要素选取、阈值和权重确定结合了统计方法和预报经验,尤其对权重的

确定更加依赖主观经验。此外,不同区域形成静稳天气的关键气象要素、阈值和权重都会有所不同。因此为提高静稳天气指数计算方法的客观性,构建适用于不同地区的静稳天气指数,需要在上述工作的基础上对静稳天气指数进行改进。本文以北京地区为例,对静稳天气指数构建方法进行改进,所用方法可在其他地区推广应用。

静稳程度越高越利于形成雾-霾天气,反之雾-霾天气频率越高意味着对应的气象条件的静稳程度越高。因此,用各气象要素值在不同区间对应的雾-霾发生概率来衡量该要素对静稳天气的影响程度,发生概率越高则该要素在该区间内对静稳天气影响程度越大。在前期静稳天气指数计算因子的基础上,增加静稳相关气象要素和特征高度层建立因子库,统计筛选得到静稳天气指数计算因子并确定相应权重。选取气象要素包括地面要素和高空要素,地面要素有 24 h 变温、24 h 变压、2 m 相对湿度、海平面气压、10 m 风速、10 m 风向;高空要素选取 1000/925/850/700/500 hPa 高度,包括相对湿度,风速 *U*、*V* 分量,水平风速,垂直速度,散度,24 h 变温,高、低层相对湿度差,高、低层位温差,高、低层风速差以及混合层高度。

利用 2001—2013 年 NCEP 再分析资料(Kalnay et al, 1996)和地面观测数据,分段统计不同站点各气象要素值落在不同区间的条件下雾-霾天气出现概率相比气候态概率的倍数作为各要素值区间对应的分指数,该值越大表明雾-霾天气出现概率越高。其中要素统计区间的划分方法如下:首先剔除极端值,按照要素值排序百分位,选取 5%~95% 的值;将选中的值划分为 10 个区间,以满足落在各区间内的要素个数均占总个数的 10%,得到的区间划分用于分段统计。这种区间划分方法保证了各区间有充分的、均匀的样本分布。分指数具体计算如下

$$K_m = \frac{\frac{a_m}{a_m + b_m}}{\frac{a}{a + b}}$$

式中, K_m 为变量 *i* 在区间 *n* 的分指数, a_m 和 b_m 分别为变量 *i* 在区间 *n* 的条件下雾-霾天气和晴好天气出现次数, a 和 b 分别为雾-霾天气和晴好天气出现总次数。以北京 2 m 相对湿度和 10 m 水平风速为例(图 3),当相对湿度>60%或者 10 m 风速≤2 m·s⁻¹ 时,分指数>1,即雾-霾天气出现概率高于气候态概率。随着相对湿度的升高和 10 m 风速的减弱,分指数逐步增大,意味着雾-霾天气出现概率逐步增

大。表明 2 m 相对湿度和 10 m 水平风速在北京地区可以指示静稳天气的发生。值得注意的是由于地面观测数据中 10 m 风速剔除极端值后要素值分布范围较窄,因此图 3b 中区间只划分为 6 段。

在上述分指数计算基础上,按照各要素分指数最大值和最小值的比值进行排序,该分指数比值越大表明要素对静稳天气和非静稳天气区分度越大,北京 2 m 相对湿度和 10 m 风速的分指数比值分别为 566 和 83,表明相对湿度相比 10 m 风速对北京的静稳天气形成有更显著的指示意义。最终从大到小选取分指数比值排序前 10 的要素,对分指数求和得到静稳天气指数。按上述客观方法筛选得到北京静稳天气指数计算要素包括 2 m 相对湿度、10 m 风速、850~925 hPa 位温差、925 hPa 垂直速度、925 hPa 相对湿度、24 h 变压、24 h 850 hPa 变温、700~1000 hPa 相对湿度差、500 hPa 经向风、海平面气压。这些要素综合考虑了静稳天气形成的动力和热力条件,较全面地描述了边界层结构和环流形势的基本特征。利用上述计算方法,统计 2001—2013 年的气象数据,得到北京的分指数查算表,查算表包括 10 个具体要素、要素值的区间划分和各区间对应的分指数。根据气象要素实况或预报值查找所在区间的分指数,将 10 个要素的分指数求和得到最终的静稳天气指数。

在实际计算静稳天气指数实况时,地面气象要

素采用地面气象观测站数据;由于探空观测站点空间分布和观测间隔较稀疏,高空气象要素由 NCEP 再分析数据插值到站点得到。预报静稳天气指数时所需气象要素均由中央气象台业务使用的欧洲中期天气预报中心 ECMWF 模式提供,可提供每日 08 和 20 时起报的未来 10 d 逐 6 h 预报,其中前 3 d 可提供逐 3 h 预报。

2.2 改进效果

用静稳天气指数和 $PM_{2.5}$ 浓度的相关系数评价静稳天气指数的优劣。以北京 2014 和 2015 年 10 月至次年 2 月为例(图 4),改进后的静稳天气指数和 $PM_{2.5}$ 分布的离散度更小,相关系数更高(原指数 0.54,改进指数 0.64)。尤其当改进后指数 < 10 时,指数降低时 $PM_{2.5}$ 浓度下降趋势更加明显且分布更加集中,即改进后的指数可以更好地指示非静稳天气下的低 $PM_{2.5}$ 浓度。

3 静稳天气指数应用

静稳天气指数综合反映大气对污染物的传输扩散能力,相比天气形势场分析或单个气象要素分析能够更全面地体现气象条件对空气质量的影响,因此静稳天气指数可应用于大气污染过程预报和污染减排评估。

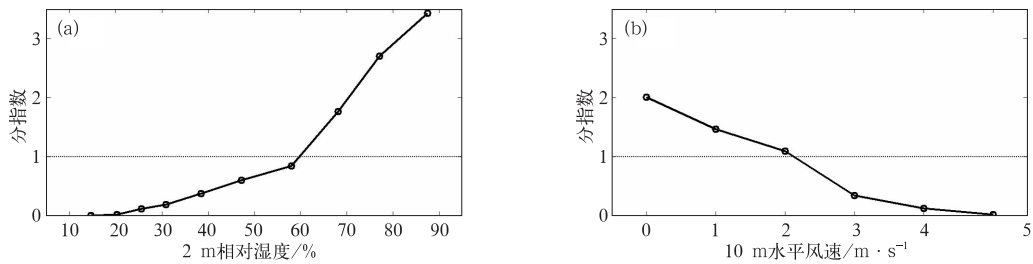


图 3 2 m 相对湿度(a)和 10 m 水平风速(b)分指数分布

Fig. 3 Distribution of sub-indices of (a) 2 m relative humidity, (b) 10 m wind speed

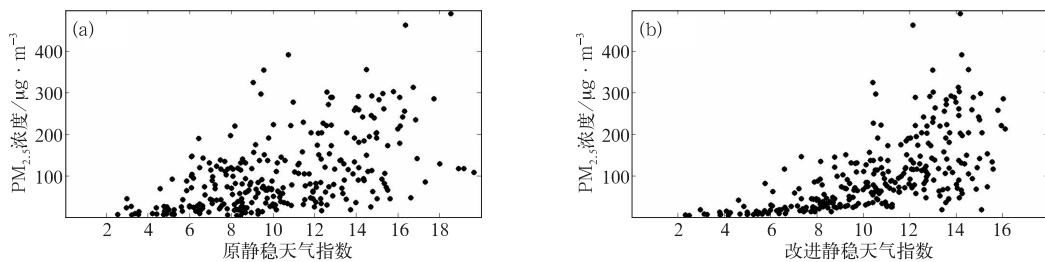


图 4 2014 年北京原有的(a)和改进的(b)静稳天气指数与 $PM_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 4 Distribution of (a) original, (b) modified SWI and $PM_{2.5}$ concentration of Beijing in 2014

3.1 重污染过程预报

2015年1月12—16日,我国中东部出现大范围重污染天气。北京AQI指数从12日开始持续震荡上升,于15日达到严重污染,16日早晨开始受较强冷空气影响,污染天气开始自北向南减弱消散,16日08时北京AQI迅速降低至优等级。此次过程是华北地区典型冬季污染过程:静稳天气形势下污染物浓度累积升高阶段维持时间较长,随着冷空气南下污染物浓度迅速降低。气象条件对污染物浓度变化起关键作用,静稳天气指数可以综合反映污染气象条件的变化。北京地区基于EC模式零场计算的静稳天气指数和AQI指数呈现一致的变化趋势:污染累积阶段静稳天气指数逐渐升高,污染消散阶段指数迅速降低(图5a)。因此,静稳天气指数可以有效反映此次污染过程的不同阶段。

应对重污染过程的减排防控措施布置对预报的时效性提出较高要求,分析静稳天气指数对此次污染过程消散时间的提前预报能力。从实况(零场)可以看到,16日08时静稳天气指数明显回落,标志着北京地区污染过程的结束。9日20时起报的静稳天气指数降低时间较实况滞后12h;10日20时起报(11日早晨结果)的静稳天气指数预报的污染结束时间和实况一致(图5b),因此在11日08时的预报中即可提前5d对此次污染过程结束时间做出准确预报。

3.2 APEC 减排评估

大气污染强度受污染源排放和气象条件的共同作用。举办重大活动期间,为保障空气质量,举办地和周边地区采取各种减排防控措施。如何评估减排措施和气象条件对空气质量的影响是气象部门在气

象决策服务中面临的一个问题。静稳天气指数能够综合反映大气污染物扩散的气象条件,可在上述评估中得到应用。

2014年11月北京举办APEC会议,分析表明,11月7—10日,北京地区静稳天气指数平均为13,与10月17—20和29—31日的两次大气污染事件气象条件相当(平均静稳天气指数分别为13和14),持续时间也相近(图6)。但10月17—20日PM_{2.5}小时浓度超过115 μg·m⁻³(中度及以上污染)的持续时间为71h,峰值浓度达299.8 μg·m⁻³。10月29—31日中度及以上污染的持续时间为62h,峰值浓度达182.1 μg·m⁻³。而11月7—10日中度及以上污染的持续时间仅8h,峰值浓度仅135 μg·m⁻³。在相近的静稳天气条件下,有效的减排措施明显缩短了中度及以上污染的持续时间,也明显降低了PM_{2.5}小时浓度和峰值浓度,有效地避免了重污染天气的发生。

尝试利用静稳天气指数评估减排措施对北京地区PM_{2.5}浓度的影响。减排前10月7日至11月2日PM_{2.5}浓度和静稳天气指数有较好的相关关系,线性拟合得到两者的相关关系如下:

$$PM_{2.5} = 22.8 \times SWI - 151$$

式中,PM_{2.5}和SWI分别为日均PM_{2.5}浓度和静稳天气指数,两者相关系数为0.8。将减排期间11月3—12日的平均静稳天气指数(9.95)代入上式得到PM_{2.5}浓度为75.9 μg·m⁻³,即在此气象条件下,若北京及周边地区未采取减排措施,则APEC会议期间PM_{2.5}浓度将达75.9 μg·m⁻³,与北京市环保局发布的APEC空气质量保障措施效果的评估结果相近(69.5 μg·m⁻³)(<http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/324122/416697/index.html>)。静稳天气指数可定量评估污染减排对PM_{2.5}浓度降低的作用。

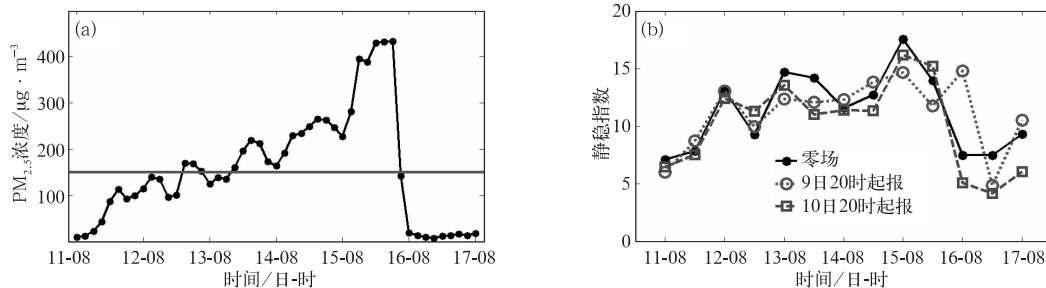


图5 2015年1月污染过程PM_{2.5}浓度(a)和不同起报时间静稳天气指数(b)变化

Fig. 5 PM_{2.5} concentration (a) and SWI (b) during a severe pollution process of Beijing in January 2015

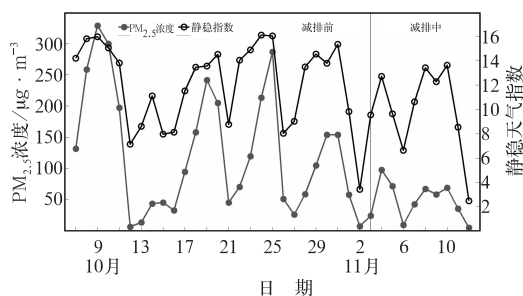


图 6 2014 年 10 月 7 日至 11 月 11 日北京城区静稳天气指数与 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig. 6 SWI and $PM_{2.5}$ concentration of Beijing from 7 October to 11 November 2014

4 结论和讨论

本文介绍了北京地区静稳天气综合指数的建立及其改进算法和效果,以一次重污染天气过程和 APEC 会议减排为例,讨论静稳天气指数在重污染天气预报和重大活动污染源减排防控措施有效性评估中的应用,得到以下结论。

(1) 改进的静稳天气指数可以更好地描述静稳天气程度对污染物累积的作用,和 $PM_{2.5}$ 浓度有更好的相关性。

(2) 针对 2015 年 1 月一次重污染过程预报分析表明:静稳天气指数和 AQI 指数变化具有较好一致性,可以有效预报此次污染过程稳步发展、迅速消散的不同阶段。

(3) 静稳天气指数应用于 APEC 期间北京地区污染减排效果评估,在静稳程度相当条件下,污染减排措施有效降低了污染持续时间和峰值强度。静稳天气指数可以从气象条件角度定量评估减排措施对降低污染物浓度的作用。

改进的静稳天气指数构建方法将导致不同城市的静稳天气指数采用不同的气象要素、阈值和权重,因此区域内不同城市的静稳天气指数将没有直接的可比性。如何将静稳天气指数转换为(重)污染天气发生概率,从而可以在不同城市间进行比较,需要更加深入的研究。

参考文献

陈镭,马井会,耿福海,等,2016. 上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析[J]. 气象,42(2):203-212.

- 丁一汇,柳艳菊,2014. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系[J]. 中国科学:地球科学,44(1):37-48.
- 关月,何立富,2013. 2013 年 1 月大气环流和天气分析[J]. 气象,39(4):531-536.
- 何心河,马建中,徐敬,等,2016. 2014 年 10 月京津冀地区一次 $PM_{2.5}$ 污染过程的数值模拟[J]. 气象,42(7):827-837.
- 吕翔,刘端阳,李冰峰,等,2015. 徐州持续性霾过程的季节特征分析[J]. 气象,41(9):1134-1143.
- 童尧青,银燕,钱凌,等,2007. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学,27(5):584-588.
- 王跃思,姚利,王莉莉,等,2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析[J]. 中国科学:地球科学,44(1):15-26.
- 翁之梅,李丽平,杨万裕,等,2016. 浙江省冬季不同霾过程的后向气流轨迹及环流特征[J]. 气象,42(2):183-191.
- 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等,2008. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究[J]. 应用气象学报,19(1):1-9.
- 于庚康,王博妮,陈鹏,等,2015. 2013 年初江苏连续性雾-霾天气的特性分析[J]. 气象,41(5):622-629.
- 夏冬,吴志权,莫伟强,等,2013. 一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区连续灰霾天气过程分析[J]. 气象,39(6):759-767.
- 杨元琴,王继志,侯青,等,2009. 北京夏季空气质量的气象指数预报[J]. 应用气象学报,20(6):649-655.
- 朱蓉,徐大海,孟燕君,等,2001. 城市空气污染数值预报系统 CAPPS 及其应用[J]. 应用气象学报,12(3):267-278.
- Dawson J P, Adams P J, Pandis S N, 2007. Sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate in the Eastern US: a modeling case study[J]. Atmos Chem Phys, 7(16):4295-4309.
- Horton D E, Harshvardhan, Diffenbaugh N S, 2012. Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing[J]. Environ Res Lett, 7(4):044034.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Am Meteor Soc, 77(3):437-471.
- Kleeman M J, 2008. A preliminary assessment of the sensitivity of air quality in California to global change[J]. Climatic Change, 87(S1):273-292.
- Nozaki K Y, 1973. Mixing depth model using hourly surface observations[R]. Report 7053. USAF Environmental Technical Applications Center.
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J, 2010. Correlations between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change[J]. Atmos Environ, 44(32):3976-3984.
- Wang J X L, Angell J K. 1999. Air stagnation climatology for the United States (1948-1998)[R]. NOAA/Air Resources Laboratory ATLAS No. 1. Silver Spring, MD: Air Resources Laboratory, Environmental Research Laboratories, Office of Oceanic and Atmospheric Research.