

马学款,张碧辉,桂海林,等,2017. APEC 前后北京几次静稳天气边界层特征对比分析[J]. 气象,43(11):1364-1373.

APEC 前后北京几次静稳天气边界层特征对比分析^{*}

马学款¹ 张碧辉¹ 桂海林¹ 王亚强²

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象科学研究院,北京 100081

提 要: 对北京地区 2014 年 11 月 3—11 日 APEC 会议期间的大气扩散条件与 2014 年 10 月的 4 次雾-霾过程进行对比分析,表明 APEC 会议期间静稳天气指数略低于 10 月 4 次过程,具备一定的污染物积累潜势。数值模拟结果表明,对北京及周边地区污染排放的控制是 APEC 期间北京保持低水平气溶胶浓度的重要原因。周边地区污染物传输以及特殊地形条件下山谷风环流的日变化对北京地区污染物浓度的区域分布及演变有重要影响,夜间地形北风对近地面污染物有明显清除作用。相较于重污染天气,APEC 期间气溶胶浓度低,温度效应小,山谷风环流明显,同时白天混合层高度上升幅度大,有利于污染物扩散。减排使气溶胶浓度减小,而低浓度气溶胶又使污染扩散条件进一步好转的相互反馈作用,是“APEC 蓝”出现的主要原因。

关键词: 静稳指数,雾-霾,气温日较差,混合层高度,山谷风

中图分类号: P466,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.005

Comparative Analysis of Boundary Layer Characteristics During Stable Weather over Beijing Around APEC

MA Xuekuan¹ ZHANG Bihui¹ GUI Hailin¹ WANG Yaqiang²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Atmospheric dispersion conditions during the November Beijing Asia-Pacific Economic Cooperation (APEC) meeting are analyzed and compared with those in October when four fog haze processes occurred. Stable weather index (SWI) during APEC was slightly smaller than that during the four fog haze processes in October. Numerical simulations show that emission control of Beijing and its surrounding areas is the main reason for a low level of aerosol concentrations in Beijing during APEC. Both the pollution transmission from neighboring regions and the diurnal variations of mountain-valley breeze under special terrain conditions contributed to the space distribution and time variation of pollution over Beijing. The north wind at night caused by topographic distribution eliminated pollution near ground obviously. Compared to heavy pollution weather, during the APEC, because of the low aerosol concentration and the corresponding enlarged diurnal variations of surface air temperature, the valley wind circulation in the Beijing area was obvious and hence enhanced daytime mixing layer height, producing more conducive conditions to spread the pollutants. Emission reduction led to low aerosol concentration which improved dispersion condition further, forming a negative feedback for pollutants to accumulate, contributing to “APEC blue” as well.

Key words: stable weather index (SWI), fog haze, daily temperature range, mixing layer height, mountain-valley breeze

^{*} 国家重点研发计划课题(2016YFC0203301)资助

2017 年 7 月 30 日收稿; 2017 年 10 月 12 日收修定稿

第一作者:马学款,主要从事天气预报及灾害天气研究. Email:11431616@qq.com

引 言

2014 年 10 月北京及周边河北、天津等地相继出现 4 次雾-霾天气过程,造成一定的社会关注度,并引起公众对 11 月 5—11 日亚太经济合作组织(Asia-Pacific Economic Cooperation, APEC)会议期间空气质量的担忧。对于会议期间的天气条件,多家预报机构提前指出,APEC 期间影响北京地区的冷空气势力总体偏弱,地面风力小,浅层大气处于静稳状态的持续时间长,在不考虑减排影响的前提下,出现雾-霾天气的概率较高。但实际情况为 APEC 期间北京地区出现了“APEC 蓝”。APEC 期间北京虽然属于静稳天气,但仍具备一定的污染扩散条件,同时北京及周边地区采取的污染排放控制对“APEC 蓝”的出现功不可没。

雾-霾在一定气象条件下形成后,不可避免地会对气象场产生影响,比如近地面温度、湿度及边界层环流的变化。针对气溶胶的辐射强迫效应的研究表明,北半球主要工业区的硫酸盐气溶胶的辐射强迫绝对值接近温室气体(马晓燕等,2005);中国东部地区比美国大陆气溶胶浓度更高,因此气溶胶辐射效应及其导致的地表气温降低更加明显(廖礼等,2015;Zhang et al,2010),最大辐射强迫值主要位于华北、华南地区及四川盆地,也是雾-霾天气相对高发区(罗燕等,2006);同一地区在空气质量较好和较差期间的辐射强迫也会有明显不同(刘伟东等,2010)。雾-霾粒子通过直接辐射强迫效应改变边界层结构,进而影响大气污染物浓度。华北地区雾-霾天气期间,雾-霾粒子导致到达地面的太阳短波辐射减少 15%~25%,雾-霾粒子对边界层内的冷却作用加大了低层大气的热力稳定度,从而减弱湍流扩散,降低边界层高度,有利于边界层内污染物浓度的升高;另一方面,雾-霾粒子的辐射效应导致边界层内风速加大,有利于污染物浓度的降低。总体而言雾-霾粒子的辐射效应导致地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高(Wang et al, 2015)。

同时,气象场改变后反过来又可能对雾-霾的形成、发展及消散产生反馈作用。在不同的污染物扩散气象条件下,某一区域的环境承载能力是不同的,当本地源排放和外部输送的污染物总量不超过其环境承载量时,大气扩散能力不至于导致污染物的集聚效应,从而维持较好的空气质量。因此,雾-霾天

气的形成受污染排放和气象条件的共同控制。气候因子也会影响雾-霾的形成(Wang et al,2014)。 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直分布和边界层的温湿风结构显著相关(Sun et al, 2013)。北京地区北部和西部分别有燕山和太行山环绕,受山谷风环流控制(Liu et al,2009)。夏季山谷风在山区对污染物形成烟囱抽吸效应,在北京上空形成两个污染层(Chen et al,2009)。山谷风环流的强度对北京地区污染物的垂直传输和分布有很大影响(Miao et al,2015)。除了局地环流,天气尺度环流形势也对雾-霾形成有重要影响。珠三角地区受台风外围下沉气流控制会导致持续霾天气(夏冬等,2013)。冬季冷高压配合下沉气流有利于浙江地区形成霾天气(翁之梅等,2016)。槽后西北气流、垂直层结稳定及地面气压场较弱的条件有利于上海地区污染物积聚和维持(陈镭等,2016)。

APEC 期间虽然大气扩散条件总体较差,但由于人为采取了减排措施,使得北京地区维持了较低的气溶胶浓度,这给研究静稳天气条件下不同气溶胶浓度的边界层特征差异提供了一个很好的机会。研究 APEC 期间大气扩散条件及减排措施对污染物浓度的影响,并与 10 月的雾-霾过程进行对比,分析相似静稳条件下,有雾-霾和无雾-霾对北京复杂地形下的边界层过程有哪些不同的影响,而这些变化又对雾-霾分布产生什么样的反馈作用,进而探讨“APEC 蓝”形成的原因,对于研究北京地区在不同天气条件下的环境承载能力及雾-霾的精细化预报具有积极意义。

1 资料说明

文中所采用的资料包括常规或非常规地面自动站加密观测资料、探空观测资料、空气质量观测数据($\text{PM}_{2.5}$)、 $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP 再分析资料等。空气质量模式使用中国气象科学研究院开发的雾-霾数值预报模式 CUACE/Haze-fog(Zhou et al,2012),大气化学模块和 MM5 气象模式在线耦合,T639 模式预报结果提供模式驱动气象场。APEC 减排试验模式的空间分辨率为 9 km,覆盖整个华北地区,从地表至 30 hPa 垂直分为 30 层。减排试验主要依据 APEC 减排措施对排放源清单进行了调整。主要的减排措施包括:机动车单双号运行、冬季供暖推后一周、所有的燃煤工厂停产,以及所有的建筑工地关停等。减排涉及的区域包括北京整个区域,天津、河北、辽

宁、山西、山东和内蒙古部分地区。

2 APEC 期间与 2014 年 10 月大气扩散条件对比分析

2014 年 10 月北京及周边地区出现了 4 次雾-霾过程,分别出现在 10 月 7—11 日、17—20 日、22—25 日和 29—31 日。这 4 次过程与 APEC 后期(11 月 7—10 日)的气象条件相比,同属于静稳天气,但大气污染扩散条件有所不同,APEC 期间的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显小于 10 月 4 次过程。

图 1 给出了 2014 年 10 月 7 日至 11 月 11 日北京地区的平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及静稳指数(stable weather index, SWI)。SWI 主要依据风、温、湿、压及变温、变压等气象场要素,以及逆温强度、混合层高度、散度等反映大气热力动力条件的诊断物理量进行计算,可定量反映大气静稳程度及污染物水平、垂直扩散能力(张恒德等,2017)。可以看出 SWI 的大小与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有明显的正相关,对雾-霾 潜势具有较好的指示意义。对北京而言,根据使用经验,当 SWI 持续大于 10 就可能导致污染物的积累,SWI 越大雾-霾发展越快。

10 月 4 次过程 SWI 峰值一般在 15~20, APEC 期间 SWI 峰值维持在 12~15, 大气静稳程度略弱于前 4 次过程,即大气污染扩散气象条件略好于前期 4 次过程。10 月 4 次过程中北京 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度大于 $115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的持续时间均超过 60 h, 其中 10

月 7—10 日持续时间接近 100 h, 平均浓度的峰值达 $389 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 而 APEC 期间平均浓度大于 $115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的持续时间只有 8 h, 峰值 $135 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这种气溶胶浓度的明显差异显然与气象条件有一定关系。

在 10 月的 4 次重污染天气中,北京地区高空多为弱高度脊或平直西风气流控制(图略),而海平面平均气压场显示,10 月 7—10 日、17—20 日和 22—25 日 3 次过程均处于 850 hPa 反气旋及地面冷高压后部、低压区前部(图 2a、2b 和 2c), 此处为地面辐合区,盛行弱偏南风,容易造成污染物在山前的堆积及外部污染对北京地区的水平输送。10 月 29—31 日地面被均压场控制(图 2d), 此时地面水平风速小、大气层结稳定,也非常不利于污染物的扩散。

APEC 前期(11 月 1—3 日)北京地区高空处于东亚槽后,低空为西北气流控制(图 3a), 850 hPa 平均风速达 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 地面则位于冷高压东侧(图 3c), 盛行西北风, SWI 为 4~9, 利于污染物扩散,期间 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度均不超过 $30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。虽然 4 日随着扩散条件转差, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有所上升(图 1), 但 5 日即有一股冷空气影响北京, 使气溶胶浓度快速下降, 所以 11 月 3—6 日北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体维持在较低水平。前期良好的大气扩散条件及较低的污染物浓度, 为 APEC 期间的空气质量提供了良好的基础。

7—10 日北京地区无明显冷空气活动, 地面转为减弱的冷高压控制, 气压梯度小, 地面风力减弱, 大气扩散条件转差, SWI 迅速升至 12~15, $\text{PM}_{2.5}$ 浓

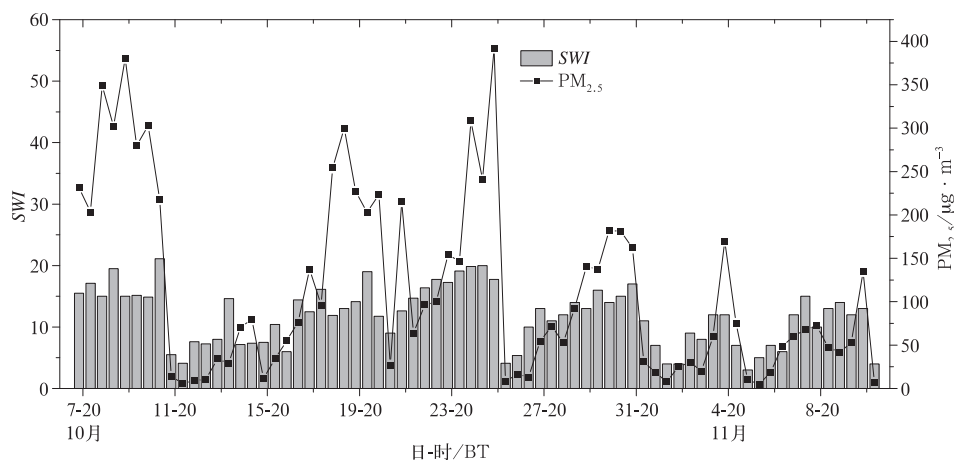


图 1 2014 年 10 月 7 日至 11 月 11 日北京地区逐 12 h 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及静稳指数(SWI)

Fig. 1 Time series of concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and SWI of Beijing from 7 October to 11 November 2014

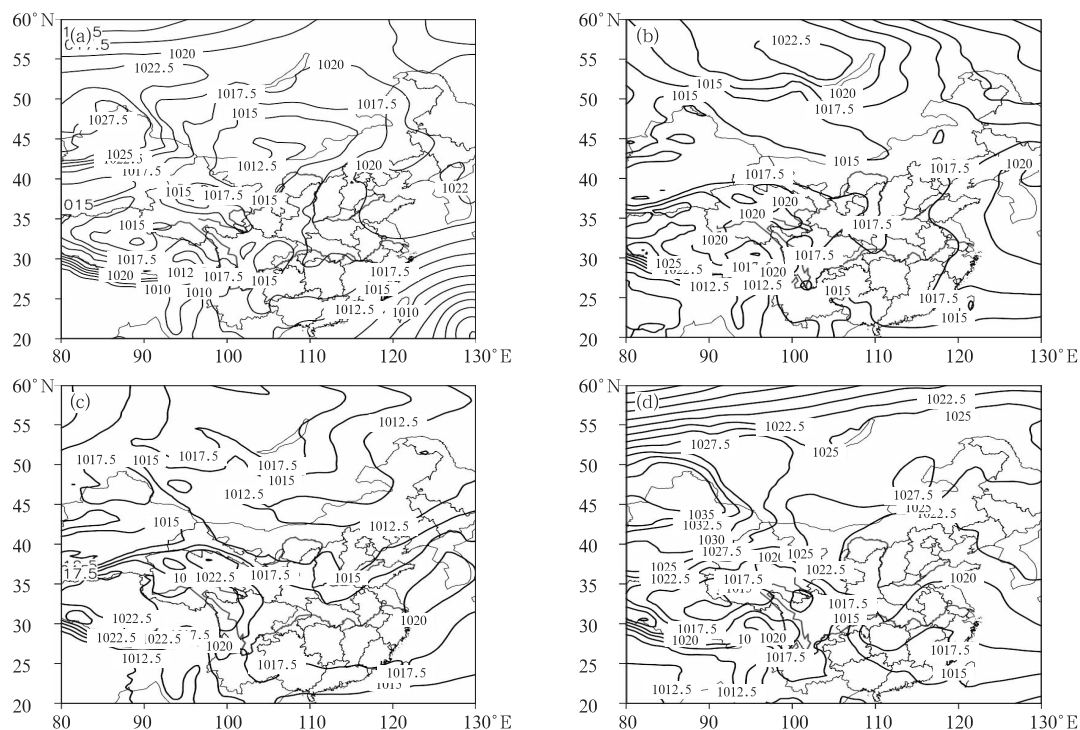


图 2 2014 年 10 月 7—10 日(a)、17—20 日(b)、22—25 日(c)和
29—31 日(d)海平面平均气压场(单位:hPa)

Fig. 2 Mean sea level pressure (unit: hPa) in 7—10 (a), 17—20 (b), 22—25 (c)
and 29—31 (d) October 2014, respectively

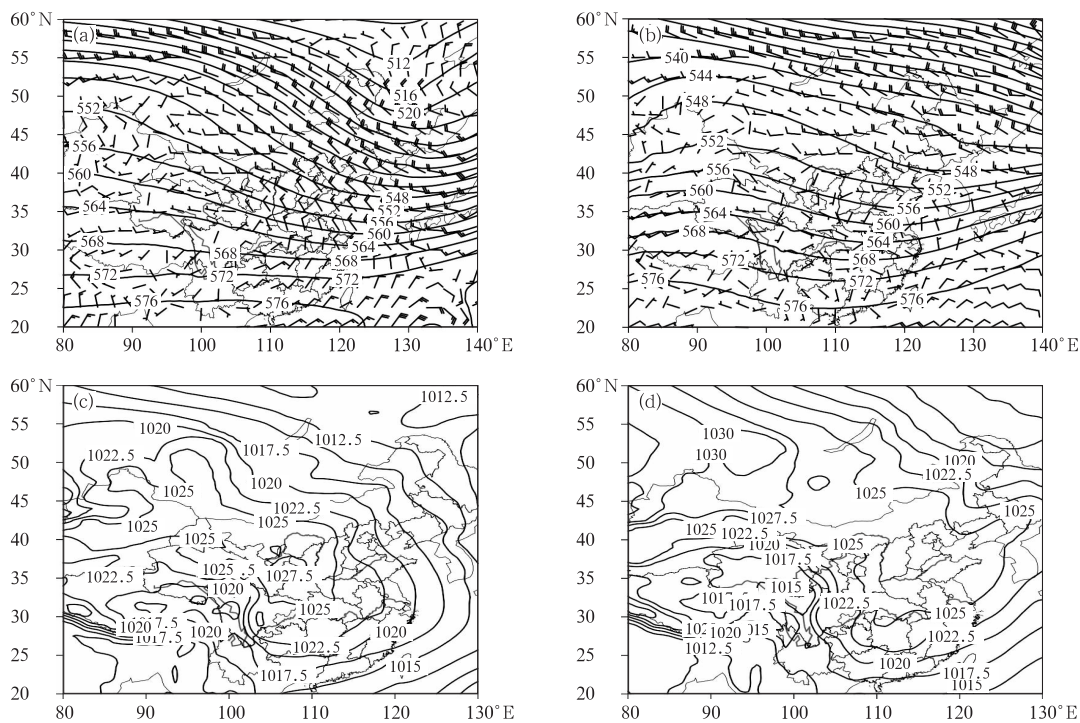


图 3 2014 年 11 月 1—3 日(a、c)、7—10 日(b、d)500 hPa 平均高度场(单位:dagpm)及
850 hPa 平均风场(a、b)和海平面平均气压场(c、d; 单位:hPa)

Fig. 3 Mean geopotential height at 500 hPa (unit: dagpm) and wind vector at 850 hPa (a, b),
mean sea level pressure (c, d, unit: hPa) in 1—3 (a, c) and 7—10 (b, d) November 2014

度逐渐升至 $50 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。7—10 日也是前期预测中认为最容易出现雾-霾天气的时段。由于地面处于高压控制区的弱辐散场中,且低空与地面有一定的垂直风切变,所以 11 月 7—10 日大气扩散气象条件要略好于 10 月的 4 次过程。虽然具备一定的污染扩散能力,但在正常的污染排放条件下,这种扩散能力显然不足以使空气质量维持在良好水平。

3 污染减排效果评估

仅从 SWI 分析可以发现,APEC 后期(11 月 7—10 日)大气污染扩散气象条件和 10 月 17—20 日、28—31 日的两次重污染过程比较接近,但 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度却有很大差别。APEC 后期 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右,而 10 月两次过程期间达到 $250 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。因此可以推论,如果 APEC 期间京津冀

及周边地区没有采取严格的大气污染减排措施,北京的污染将可能达到与 10 月过程相当的浓度水平。

APEC 减排之前(10 月 28—31 日)和 APEC 后期(11 月 7—10 日)污染气象条件类似,北京和周边城市的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 浓度及其变化如表 1 所示。由于地理位置的不同,污染减排措施不同程度地降低了各城市的污染浓度。以北京为例, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 浓度分别降低了 50%、48%、38%和 33%。在环境气象模式中利用减排后的污染源数据模拟发现 APEC 期间(11 月 3—11 日)京津冀及周边地区污染减排措施导致北京、天津、石家庄、保定和廊坊的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别降低 36%、28%、24%、30%和 31%。可见 APEC 污染防治取得非常好的效果,对 APEC 后期北京维持较低的气溶胶浓度起到了重要作用。

表 1 APEC 前期及期间相似气象条件下主要污染物浓度观测结果
Table 1 Observation results of major pollutants before and during APEC under the similar meteorological conditions

	PM_{10}			$\text{PM}_{2.5}$			SO_2			NO_2		
	10 月 28 —31 日	11 月 7 —10 日	降低	10 月 28 —31 日	11 月 7 —10 日	降低	10 月 28 —31 日	11 月 7 —10 日	降低	10 月 28 —31 日	11 月 7 —10 日	降低
BJ	167	83	50.3%	121	63	47.9%	16	10	37.5%	97	65	33.0%
BD	272	154	43.4%	146	102	30.1%	59	32	45.8%	100	55	45.0%
LF	228	135	40.8%	157	88	43.9%	35	23	34.3%	102	59	42.2%
SJZ	282	117	58.5%	166	80	51.8%	78	28	64.1%	85	50	41.2%
TJ	155	123	20.6%	107	99	7.5%	32	30	6.3%	77	61	20.8%

注:BJ: 北京, BD: 保定, LF: 廊坊, SJZ: 石家庄, TJ: 天津。

Note: BJ: Beijing, BD: Baoding, LF: Langfang, SJZ: Shijiazhuang, TJ: Tianjin.

4 山谷风环流对北京污染物浓度分布的影响

北京北侧及东北侧是燕山山脉,西侧是太行山脉,东南部为平原地带,三面环山,地形闭塞,俗称“碗底”。在静稳天气下,一是本地排放污染物不容易向外部扩散,二是当近地面受弱南风控制时容易受外部输入影响,造成污染物在山前一带的堆积,形成重污染天气。同时,在环境风场较弱的情况下,山区和平原地区热力性质的差异,也容易形成山谷风环流,即北部山区白天升温 and 夜间降温幅度均大于城区和平原地区,使平原地区白天盛行南风,夜间盛行北风。在受晴空状态下的均压场控制时,这种南

北风转换的昼夜变化就更加明显。

10 月 4 次雾-霾过程中,北京(观象台)地面风均以南风为主,平均风速一般不足 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风容易造成外部对北京的污染输送或大气层结稳定性加强,导致雾-霾加重。同时重污染期间的早间时段相对湿度峰值均超过 90%,能见度低。而 APEC 期间污染物浓度低、相对湿度小,地面风向的昼夜转换非常明显,即白天为北转南风,夜间为南转北风。这种南北风昼夜转换的现象主要是由晴空状态下的山谷风环流引起的。加密自动观测站地面辐合线昼夜间的南北摆动可清晰反映山谷风热力环流的日变化(图 4)。

图 5 给出 11 月 9 日白天至夜间北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的演变,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来自中

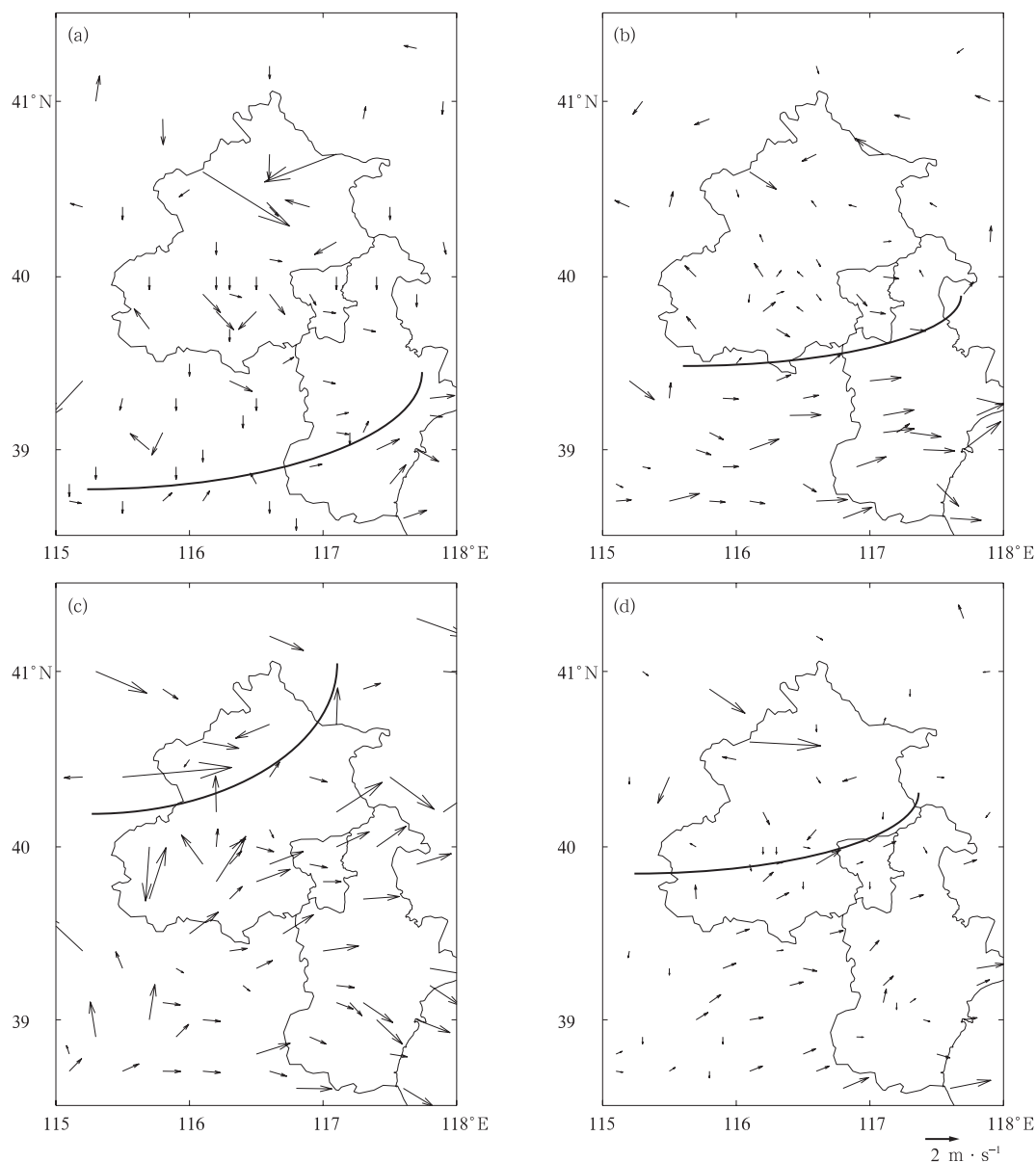


图 4 2014 年 11 月 8 日 05 时(a)、10 时(b)、14 时(c)及 23 时(d)北京地区地面风矢和辐合线

Fig. 4 Wind vector and the convergence line in Beijing at 05:00 BT (a), 10:00 BT (b), 14:00 BT (c), and 23:00 BT (d) 8 November 2014, respectively

国环境监测总站观测,10 m 风场为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数值模式零场或预报场。可以看出,9 日 11 时北京南部和东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 $80 \sim 120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,北京以南的河北中部地区为高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度区。至 14 时地面逐渐转为偏南风。虽然南风有可能引起外部污染对北京的输入作用,但北京地区污染物浓度不升反降,这主要是由于白天气温上升,混合层高度增大,污染物垂直扩散条件好转导致的。至 20 时,地面气温逐渐下降,混合层高度降低,南风的污染输送作用逐渐体现,北京南部地区

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高。入夜后由于晴空状态下北部山区迅速大幅降温,山谷风环流逆转,地面风转为西北风。而北京城区和平原地区也因辐射降温形成贴地逆温,使得夜间混合层高度下降,污染物被限制在贴地气层,此时山谷风形成的北风,对平原地区浅层的污染物有明显的稀释或清除作用, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度自西北向东南逐渐降低。

为直观体现 APEC 后期地形北风对污染物分布及浓度的影响,分别选取位置偏北的北京怀柔镇及位置偏南的天坛两个监测点,对 11 月 8—10 日

PM_{2.5} 浓度和 10 m 风场的时间序列进行分析(图 6)。可以看出两站的 PM_{2.5} 浓度均表现出明显的日变化,浓度上升的时间节点均是在 14 时之后,此

时混合层高度随气温下降而逐渐降低,污染物的南风输送作用凸显。而不同之处在于两站 PM_{2.5} 浓度开始下降的时间点,位置偏北的怀柔镇多在 21—22 时

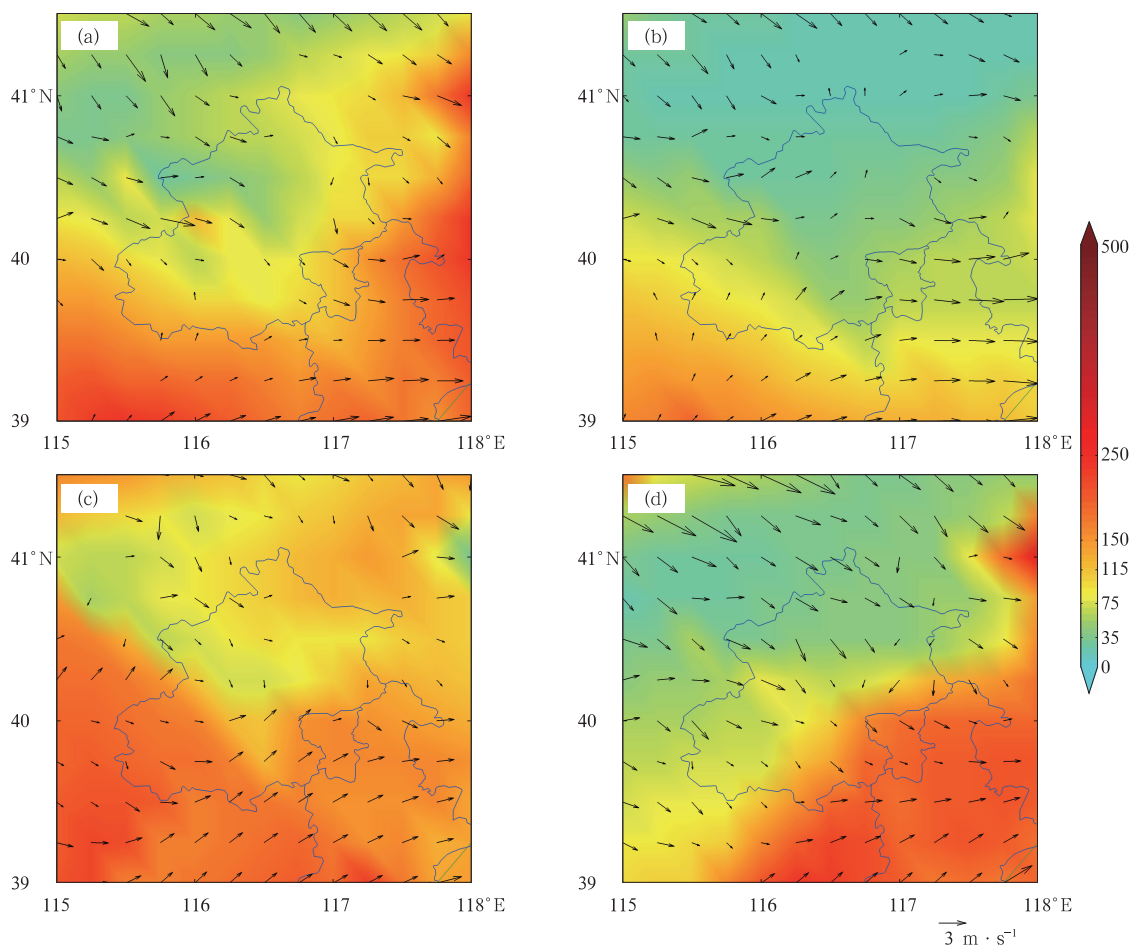


图 5 2014 年 11 月 9 日 11 时(a)、14 时(b)、20 时(c)和 10 日 02 时(d)北京地区地面风矢和 PM_{2.5} 浓度分布(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 5 Wind vector and the concentration of PM_{2.5} (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in Beijing at 11:00 BT (a), 14:00 BT (b), 20:00 BT (c) 9 November, and at 02:00 BT (d) 10 November 2014, respectively

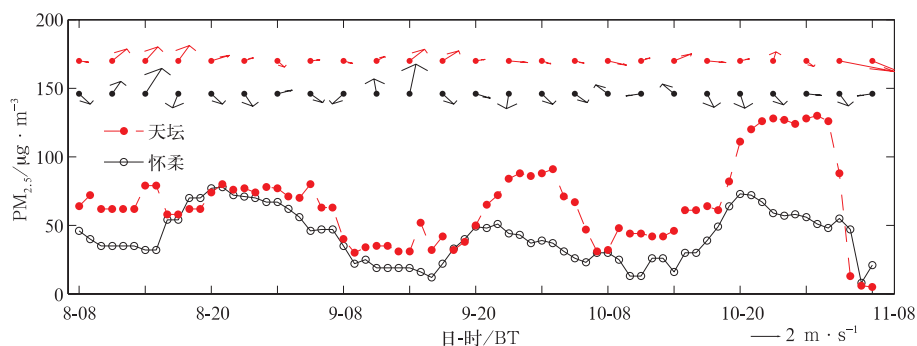


图 6 2014 年 11 月 8—10 日北京怀柔镇和天坛监测站 PM_{2.5} 浓度及地面风时间序列
Fig. 6 Time series of PM_{2.5} concentration monitoring and surface wind at Huairou Town and Tiantan Stations in Beijing from 8 to 10 November 2014

前后,而偏南的天坛常常在次日凌晨 03—05 时才开始下降,这与天坛受偏北的山风影响时间比怀柔镇大约延后 6 h 是一致的。这充分说明北京地区由于特殊地形导致的山谷风环流对污染物的浓度分布具有明显影响,即白天的地形南风对北京有一定的外部污染物输入及山前堆积的作用,而夜间的地形北风对污染物具有自北向南的稀释或清除作用。当然,北风的清除效果要视上游地区的污染物浓度而定。

5 雾-霾与扩散条件之间的相互作用

山谷风环流除了受环境风场影响外,由于其是因辐射效应引起的热力环流,因此在一定程度上还受天空状况的影响。静稳天气形成后不仅不利于气溶胶的扩散,也不利于地面蒸发水汽的扩散,在气溶胶浓度增大的同时相对湿度也逐渐增大,在这个过程中部分气溶胶粒子会活化成云雾滴,业务预报中习惯将这种状态称之为“雾霾混合物”,简称“雾-霾”。很多研究表明雾-霾粒子的辐射效应对边界层气象要素有明显影响,比如在夜间对大气低层起保温作用,可削弱贴地逆温强度并使大气低层稳定度减小。而在白天可阻碍近地层升温,从而使稳定度增大。

对 10 月 19 日和 11 月 8 日的 08 时探空秒数据温度层结进行对比(图 7)。可以看出,10 月 19 日 08 时贴地逆温层顶高度 130 m,逆温强度约 $2^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,11 月 8 日 08 时逆温层顶高度 60 m,逆温强度达 $4^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 。即有雾-霾覆

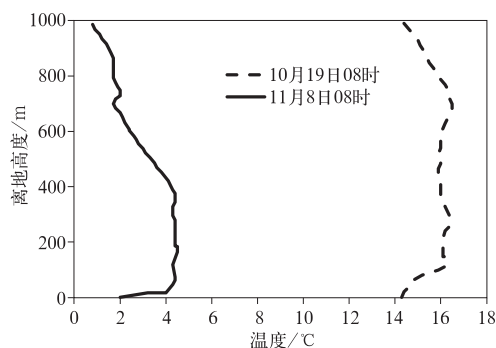


图 7 2014 年 10 月 19 日和 11 月 8 日的 08 时探空秒数据温度层结

Fig. 7 Temperature stratification of seconds radiosonde data at 08:00 BT 19 October and at 08:00 BT 8 November 2014

盖时的贴地逆温强度明显减弱,稳定度减小。这说明雾-霾对近地面夜间辐射降温有明显阻滞作用。

为排除云的影响,选取基本无云的 10 月 20 日及 11 月 9 日北京太阳总辐射小时曝辐量进行对比(图 8),10 月 20 日最大总辐射量约 $1.2\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,而 11 月 9 日达 $2\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,说明雾-霾可以有效减少抵达地面的太阳短波辐射,阻碍地面升温,从而使低层大气稳定度上升。

对比 2014 年 10 月 17—20 日、29—31 日及 11 月 7—10 日北京的混合层高度、气温和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时间演变可以看出(图 9),10 月两次过程由于气溶胶浓度高,相对湿度大,浅层大气由含有大量云雾滴及干气溶胶粒子的雾-霾覆盖,白天升温幅度小,混合层高度白天多在 800~1000 m,夜间则低于 300 m。APEC 期间由于气溶胶浓度低,相对湿度小,导致气温昼夜变化幅度大,白天气温快速上升,混合层高度也急剧升高至 1200~1800 m,相比重污染天气,混合层高度的快速上升有利于污染物垂直扩散;而夜间由于强烈的贴地逆温导致混合层高度不足 100 m。

由于雾-霾的辐射效应,导致气温昼夜变化幅度减小,这一点从图 9 可以直观地看出。10 月 18—20 日及 29—31 日北京平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度普遍超过 $115\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,19 日平均浓度最高达 $260\text{ }\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,期间气温日较差在 $3\sim 9^{\circ}\text{C}$ 。而在气溶胶浓度较低的 APEC 期间,气温日较差在 $8\sim 15^{\circ}\text{C}$,差异非常明显。

多数情况下,雾-霾多集中于平原地区近地层,但山区浓度较低,此时山区昼夜仍维持较大的气温

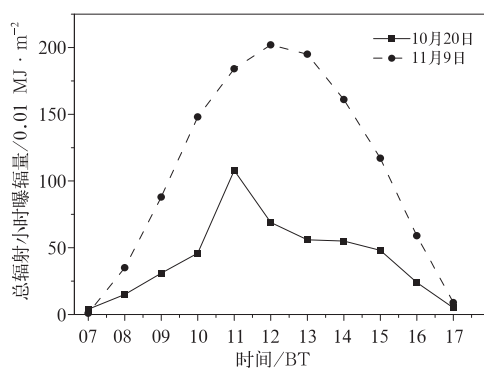


图 8 2014 年 10 月 20 日与 11 月 9 日北京总辐射小时曝辐量

Fig. 8 The comparison of the total hours of radiation exposure in Beijing on 20 October and 9 November 2014

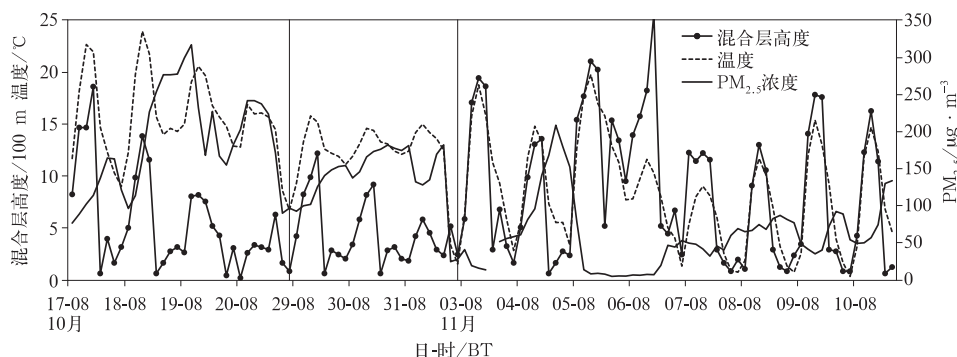


图 9 北京 2014 年 10 月 17—20 日、29—31 日、11 月 3—10 日
混合层高度、气温及平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐 3 h 演变

Fig. 9 Time series of mixed layer height, temperature and concentration of $\text{PM}_{2.5}$ every three hour of Beijing in 17—20, 29—31 October and 3—10 November 2014

日较差,而平原地区因雾-霾粒子的辐射效应,白天升温幅度和夜间降温幅度都比较小,使山区和平原地区的热力差异增强,在环境风场较弱的情况下,将导致山谷风环流加强。若不考虑相对湿度日变化的影响,此时白天南风的增强容易造成输入性影响,使污染物浓度快速上升,而夜间北风的加强,又会对近地面污染物有一定稀释作用。因此,在气溶胶浓度较高的情况下,山谷风环流的增强将导致昼夜间气溶胶浓度出现明显日变化特征,山谷风对气溶胶日平均浓度的影响需考虑南北风两个因素的综合效应。当气溶胶浓度较低的时候,夜间的山地北风具有清除作用,白天混合层上升也有利于垂直扩散。也就是说相对于重污染天气,低浓度气溶胶状态下的边界层过程更有利于污染物扩散。只要本地排放及外部输入不超出大气扩散能力,就可以维持较低的气溶胶浓度。

混合层顶高度的大小决定了气溶胶垂直方向的逸散范围,混合层顶高度升高利于气溶胶浓度的降低,反之容易造成气溶胶浓度上升。在雾-霾较重的情况下,白天升温幅度小,混合层顶高度低,大气层结更趋于稳定,不利于污染物及地面蒸发水汽向外扩散,气溶胶浓度及相对湿度持续增大,从而使雾-霾进一步发展,即重污染天气下的边界层过程更不利于污染物扩散。这与 Wang et al(2015)的研究结果是一致的。

因此,雾-霾形成后对边界层温度、湿度的影响,会导致雾-霾进一步加重,而雾-霾加重后又会使静稳程度增大,雾-霾与扩散条件之间存在阶段性相互作用。减排使 APEC 期间气溶胶浓度减小,而低浓

度气溶胶又使污染扩散条件进一步好转的相互反馈作用,是“APEC 蓝”出现的主要原因。

6 结 论

(1) 2014 年 10 月的 4 次雾-霾过程和 APEC 后期北京地区均属静稳天气,但 APEC 期间垂直扩散条件略好。减排措施使北京及周边地区气溶胶浓度维持在较低水平,此时夜间的山谷风环流及白天较高的混合层高度有利于污染物扩散。一定的大气扩散能力和强有力的减排措施,是形成“APEC 蓝”的主要原因。

(2) 弱环境风场条件下,北京特殊地形下的山谷风环流对污染物的浓度及其分布有重要影响。白天的地形南风容易造成污染物的输入性影响,使气溶胶浓度升高,而夜间的地形北风对近地面污染物有明显稀释或清除作用,使之具有明显日变化特征。

(3) 静稳天气导致雾-霾发展,雾-霾形成后的辐射效应增强边界层大气热力稳定度,减弱湍流扩散,降低边界层高度,有利于边界层内污染物浓度的升高及相对湿度的增大,导致雾-霾加重。雾-霾加重后又进一步增加大气静稳程度,雾-霾与大气扩散条件之间存在相互作用。

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.
- 廖礼,漏嗣佳,符瑜,等,2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响[J]. 大气科学,39(1):68-82.
- 刘伟东,江玉华,李炬,等,2010. 北京地区一次重污染天气气溶胶分

- 布与传输特征研究[J]. 气候与环境研究, 15(2):152-160.
- 罗燕, 吴润, 王卫国, 2006. 利用 MODIS-GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫[J]. 热带气象学报, 22(6): 638-647.
- 马晓燕, 石广玉, 郭裕福, 等, 2005. 温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用[J]. 气象学报, 63(1): 41-48.
- 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.
- 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.
- 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. 气象, 43(8): 998-1004.
- Chen Ying, Zhao Chunsheng, Zhang Qiang, et al, 2009. Aircraft study of mountain chimney effect of Beijing, China[J]. J Geophys Res, 114(D8): D08306. DOI: 10.1029/2008JD010610.
- Liu Shuhua, Liu Zhenxin, Li Ju, et al, 2009. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province[J]. Sci China Ser D Earth Sci, 52(3): 382-392.
- Miao Yucong, Liu Shuhua, Zheng Yijia, et al, 2015. Numerical study of the effects of local atmospheric circulations on a pollution event over Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. J Environ Sci, 30: 9-20.
- Sun Yang, Song Tao, Tang Guiqin, et al, 2013. The vertical distribution of $PM_{2.5}$ and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. Atmos Environ, 74: 413-421.
- Wang H, Shi G Y, Zhang X Y, et al, 2015. Mesoscale modelling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region-Part 2: Aerosols' radiative feedback effects[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 15(6): 3277-3287.
- Wang Lili, Zhang Nan, Liu Zirui, et al, 2014. The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region during January 2013 [J]. Adv Meteor, 2014: 685971. DOI: 10.1155/2014/685971.
- Zhang Yang, Wen X Y, Jang C J, 2010. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U. S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem) [J]. Atmos Environ, 44 (29): 3568-3582.
- Zhou Chunhong, Gong Sunling, Zhang Xiaoye, et al, 2012. Towards the improvements of simulating the chemical and optical properties of Chinese aerosols using an online coupled model-CUACE/Aero[J]. Tellus B, 64(1): 18965.