

周悦, 岳岩裕, 李兰, 等. 2016. 秸秆焚烧导致湖北中东部一次严重霾天气过程的分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (2): 141–152. Zhou Yue, Yue Yanyu, Li Lan, et al. 2016. Analysis of a serious haze event resulting from crop residue burning in central eastern Hubei [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (2): 141–152, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15109.

秸秆焚烧导致湖北中东部一次严重霾天气过程的分析

周悦¹ 岳岩裕² 李兰¹ 刘敏¹ 周婷³

¹ 武汉区域气候中心, 武汉 430074

² 武汉中心气象台, 武汉 430074

³ 孝感市气象局, 孝感 432000

摘要 利用地面气象要素、火点信息及污染物资料, 研究了 2014 年 6 月 12~13 日湖北省中东部地区一次重度霾天气的成因及污染特征。结果表明: 导致此次霾天气的主要原因是安徽省北部大面积秸秆焚烧所形成污染气团受偏东北气流输送的影响, 12 日在湖北中东部形成了两条“带状”的能见度低值区, 最低能见度仅为 2.1 km。秸秆焚烧污染物输送气流由北向南影响湖北, 主要作用于孝感—武汉—咸宁一带, 3 个地区细颗粒物 (PM_{2.5}) 峰值浓度均超过了 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 且武汉和孝感的 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 质量浓度比值在 12 日增加到 0.76 和 0.77, 并出现了 0.96 和 0.93 的最大值, 随着污染气团的传输, 其中 PM_{2.5} 所占比例会出现明显下降。SO₂ 质量浓度的变化特征不显著, NO₂ 质量浓度在污染物质量浓度达到峰值前 1~3 h 达到峰值, 而 CO 是秸秆焚烧产生的主要污染气体, 其质量浓度变化与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 呈正相关关系, 相关系数分别为 0.66 和 0.67。风矢量和分析表明: 6 月 12 日湖北省中东部存在明显的东北来向气流输送, 污染物的输送是该时段霾天气发生的主要影响因子, 而 6 月 13 日湖北省东北边界处的输送气流已经明显减弱消失, 东南部风矢量和异常偏小导致的污染物堆积是该地区污染持续的主要原因。

关键词 秸秆焚烧 霾天气 污染物 风矢量和

文章编号 1006-9585 (2016) 02-0141-12

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15109

Analysis of a Serious Haze Event Resulting from Crop Residue Burning in Central Eastern Hubei

ZHOU Yue¹, YUE Yanyu², LI Lan¹, LIU Min¹, and ZHOU Ting³

¹ Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

² Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

³ Xiaogan Meteorological Office, Xiaogan 432000

Abstract Based on surface meteorological parameters, fire spot information, and air pollutant concentrations, a serious haze event that occurred in central eastern Hubei Province during 11–12 June 2014 was investigated. The dominant reason for this air pollution episode was pollutants being released from crop residue burning in the northern regions of Anhui, and then combining with favorable transport flows. Two zones with low visibility formed in eastern areas of Hubei, with the lowest value of daily average visibility being just 2.1 km. The pollutants released from crop residue burning influenced the air quality of Hubei from north to south, playing a major role in areas around Xiaogan, Wuhan,

收稿日期 2015-05-06; 网络预出版日期 2015-11-05

作者简介 周悦, 男, 1985 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事云雾降水物理和大气污染成因研究。E-mail: zhouyue8510@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41505121、41375138, 湖北省科技支撑计划项目 2013BCB020, 湖北省气象局科技发展基金面上项目 2014Y05

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41505121 and 41375138), Key Technology Research and Development Program of Hubei Province (Grant 2013BCB020), Science and Technology Foundation of Hubei Meteorological Bureau (Grant 2014Y05)

and Xianning, with peak values of PM_{2.5} concentration of more than 600 $\mu\text{g m}^{-3}$ in these three cities. The ratios of the mass concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ increased to 0.76 and 0.77 in Wuhan and Xiaogan on 12 June 2014, and reached maximum values of 0.96 and 0.93, respectively. With the transmission of polluted air mass, the proportion of PM_{2.5} decreased significantly. The variations of mass concentration of SO₂ were negligible, while the mass concentration of NO₂ reached its maximum value 1–3 hours before the PM_{2.5} or PM₁₀ reached their maximum values. CO was the main gas pollutant produced by crop residue burning, which was positively correlated with the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀, with correlation coefficients of 0.66 and 0.67, respectively. By analyzing the wind using the Vector Sum Technique (VST), it was found that the air flow in central eastern areas of Hubei transported from the heavily polluted regions (northeast to Hubei Province) was significant. The transportation of pollutants was the main factor causing the occurrence of the haze event on 12 June, while the transportation was weakened markedly on 13 June. The small VST value of wind speed in the southeast of Hubei caused pollutants to accumulate, promoting the continuation of the haze event.

Keywords Crop residue burning, Haze event, Pollution, Vector sum of wind

1 引言

霾是发生在大气近地层的一种灾害性天气现象,其表征为近地层大气气溶胶污染不断增加所导致的能见度恶化。随着近年来经济的快速发展和城市化的加剧,使得大量的污染物排放到大气中,且大气对污染物的稀释能力不断下降,我国近 20~30 年中东部地区霾问题的日益严重,主要受人为排放的大气气溶胶显著增加所致,而这些大气气溶胶存在着多种来源。以北京地区为例,其主要来自燃煤燃烧、机动车排放、居民日常活动和秸秆焚烧(张小曳等, 2013)。同时,由于不同地区经济结构不同,且地理位置也存在明显差异,使得影响这些地区霾天气过程的大气污染物来源也不尽相同。

近年来,随着我国能源结构的改变以及华东和华北地区农民经济水平的不断提高,农作物秸秆逐渐失去了作为能源原料和牲畜饲料的作用(朱佳雷等, 2012),而对秸秆的处理需要花费大量人力物力(Wu et al., 2008),因此很多地区出现了大范围秸秆焚烧的现象。露天焚烧的秸秆约占秸秆总产量的 23%(曹国良等, 2007),秸秆焚烧后所生成的不完全燃烧碳粒和微小灰尘颗粒随着热气团抬升到高空,并进一步输送到下风向地区,造成严重的霾天气。不同地区秸秆焚烧排放的污染物空间分布极不均衡,其中华东、东北和中南各省市的排放量较大(曹国良等, 2005),而时段则主要集中在夏收(6 月前)和秋收(10 月前)(王书肖和张楚莹, 2008),秸秆的集中焚烧成为该段时期大范围霾天气频发的主要原因之一。

国内学者对受秸秆焚烧所导致的严重霾天气

研究主要集中在长三角地区,严文莲等(2014)对 2012 年 6 月初江苏一次持续性灰霾天气的污染情况、气象要素特征以及热力和动力条件进行了分析,指出沿江和苏南地区污染物浓度的上升受来自安徽地区秸秆焚烧污染物的输送影响显著。卫星火点监测和后向轨迹分析能够有效揭示秸秆焚烧对下风向地区严重霾天气过程的影响(朱彬等, 2010),而一定的气象条件和适宜的地理位置有利于秸秆焚烧所形成的大气污染物进行跨区域输送(张红等, 2008; 尹聪等, 2011)。秸秆焚烧排放及其二次反应形成的气溶胶颗粒(PM₁₀、细颗粒物 PM_{2.5}等)和污染气体(CO、SO₂、NO₂等)会对地区的能见度、空气质量甚至天气气候特征产生严重影响(吴兑等, 2007; 王静等, 2013; Wang et al., 2014),进而危害到人们的身体健康和日常生活(Niu et al., 2010; Ding and Liu, 2014)。因此,学者们对秸秆焚烧所导致的霾天气污染物特征进行了分析,朱佳雷等(2011)指出影响江苏的一次秸秆焚烧所致的重霾污染天气中 PM₁₀、CO、NO_x浓度明显偏高,并与霾过程的发生发展直接相关,而 SO₂的变化特征则能较好地反映能见度的变化规律(刘端阳等, 2014)。Wang et al. (2012)则认为秸秆焚烧会显著影响霾过程中 SO₂浓度的变化。不同农作物秸秆焚烧过程中所产生的污染物排放量也不尽相同(Cao et al., 2008),通过建立长三角地区 4 种农作物秸秆焚烧的排放清单,发现 PM₁₀、PM_{2.5}、CO 是焚烧过程中排放量最大的 3 种污染物,而焚烧区域则主要集中在江苏中北部和安徽北部(朱佳雷等, 2012)。然而,对我国南方秸秆焚烧主要集中在区域的下风向影响地区湖北省霾天气的研究较少,更缺乏对秸秆焚烧影响下该地区污染物变化规

律的探讨。

2014年6月12~13日湖北省中东部地区受上风向省市秸秆焚烧的影响发生了一次严重的霾天气过程,武汉中心气象台连续两天发布霾天气黄色预警。本文通过对霾天气过程污染物变化特征的分析,结合气象要素变化规律和近地层风场输送特征的探讨,研究秸秆焚烧对湖北省霾天气形成的作用及其污染物的传输规律,为湖北省夏收和秋收等霾天气频发时段污染物的监测和预报提供一定的参考和帮助。

2 资料和研究方法

本研究主要使用了武汉、孝感、咸宁、荆州、鄂州和黄石s的污染气体(SO₂、NO₂、CO)和污染颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)逐小时观测资料,其来自于湖北省环境监测中心站的环境质量自动监测实时发布系统([http://59.172.208.44:5558/views/home/airindex.aspx\[2015-04-01\]](http://59.172.208.44:5558/views/home/airindex.aspx[2015-04-01]))。气象数据来源于湖北省常规气象台站观测,主要包括能见度、气温、地表温度、相对湿度、风向和风速等。其中,武汉、荆州、孝感和黄石等21个台站能见度的时间分辨率为1 h,其余60个台站能见度的时间分辨率为3 h或6 h。火点资料来源于环境保护部网站([http://hjj.mep.gov.cn/stjc/\[2015-03-05\]](http://hjj.mep.gov.cn/stjc/[2015-03-05]))。

风矢量和是判断大气水平输送能力的指标,能够有效反映出—个区域在—段时间内空气流动的输送作用。本文对站点的风向、风速资料进行网格化[0.05°(纬度)×0.05°(经度)]处理,对各个格点及其周围4个格点的风矢量大小进行空间和时间的矢量叠加,得到某段时间内区域风矢量和的分布特征,具体方法见文献(吴兑等,2008;吴蒙等,2012)。

3 结果与讨论

3.1 霾天气过程概况

3.1.1 火点特征

2014年6月中旬,我国中东部地区受秸秆集中焚烧的影响,出现了一次持续时间短但强度大的严重霾天气过程,湖北省受此次过程影响的主要时段集中在6月12~13日,中东部大部分地区笼罩在“烟尘”中,武汉长江大桥几乎全部“隐身”。6月中旬是我国东部地区的夏收时节,大量作物秸秆的

产生和焚烧极易形成重污染气团,影响下风向地区。利用环境保护部公布的火点图(图1)可以发现,秸秆焚烧的火点主要集中在安徽省北部的亳州、阜阳、淮北、宿州和蚌埠等地,这一地区正是长三角地区秸秆焚烧总量最高的地区(朱佳雷等,2012),东北风的输送作用,使得位于下风向的湖北省中东部地区污染物迅速增加,出现了爆发性的重度霾天气过程。

3.1.2 能见度分布

图2给出了此次霾过程主要发生时段6月12~13日湖北省能见度日均值的空间分布特征,12日湖北省的能见度低值区主要位于中东部地区,并呈现两条“带状”的能见度低值区,分别位于襄阳、钟祥和荆州以及红安、武汉和洪湖—带,最低能见度仅有2.1 km,受东北路弱冷空气输送作用影响显著。13日,偏东部的能见度低值区仍然存在,低值中心主要位于武汉等地,但中部的低值区明显减弱。此时,湖北省西部出现了大范围的低能见度区,这是由于西部多地出现了少量降水的天气,13日相对湿度基本全天处于90%以上,导致大范围雾过程的出现。因此,主要研究12~13日湖北省中东部的霾天气过程。

3.1.3 天气背景

从2014年6月11~14日天气形势看,500 hPa和850 hPa的形势场均有所变化:500 hPa形势场,11~12日白天为西北气流,湖北省基本无雨,12日晚至14日为偏西气流,湖北省西部及北部地区逐渐出现弱降水天气,武汉及其以东地区无雨;850 hPa形势场,11~12日为东北或偏东气流(冷平流),13~14日由偏东气流逐渐转为东南气流(暖平流)。

地面气压场上,霾天气出现前,湖北省先受到地面暖低压的影响,后从东北地区有一股弱冷空气南下,11~12日开始影响长江中下游地区,这股弱冷空气将污染物输送至湖北中东部地区,13~14日受均压场控制,湖北省风力较小,风速基本都小于2 m/s,近地层层结稳定,不利于污染物扩散。

对武汉站高空观测资料进行分析(图略),本次霾天气过程中,11日08:00(北京时间,下同)至14日08:00,700 hPa以下维持稳定层结,有对流抑制能量,与之对应,850 hPa附近及其以下存在逆温层结,这种中低层的稳定层结不利于污染物垂直扩散,为霾天气的出现提供了有利条件。

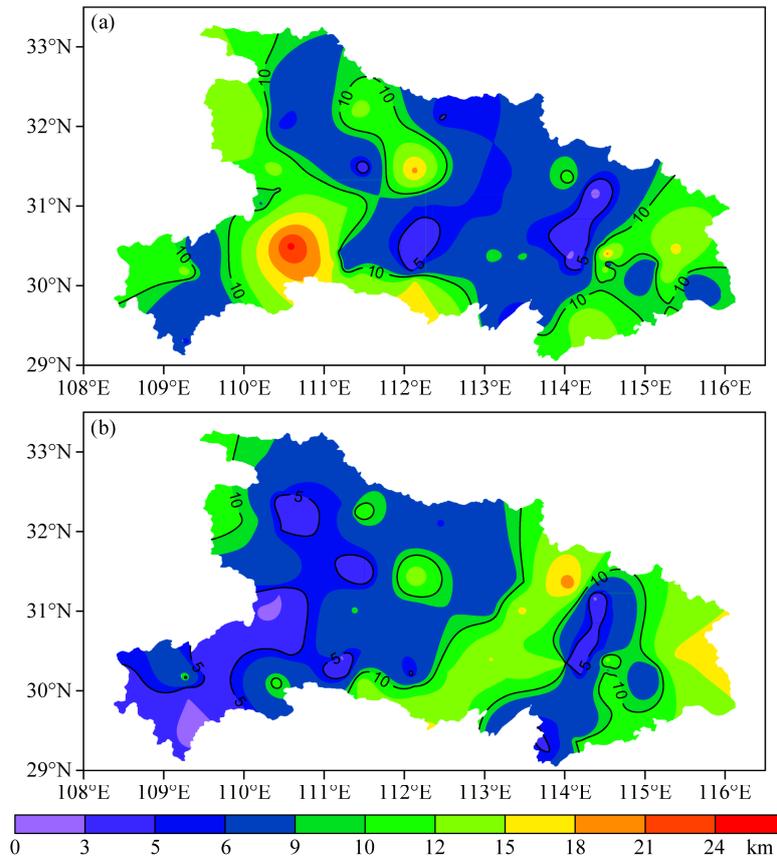


图2 2014年6月(a)12日和(b)13日湖北省能见度日均值分布特征

Fig. 2 Distributions of daily average visibility in Hubei Province on (a) 12 Jun and (b) 13 Jun 2014

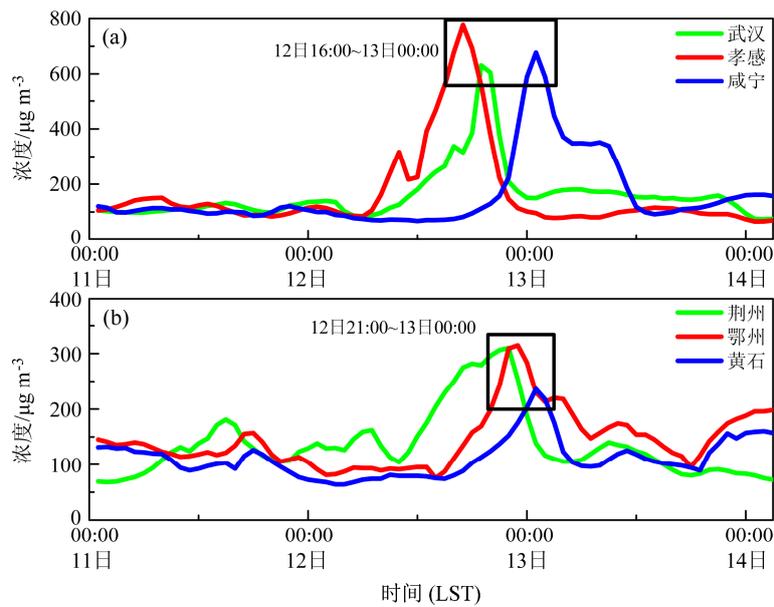


图3 2014年6月11~14日湖北省(a)武汉、孝感、咸宁、(b)荆州、鄂州、黄石PM2.5小时浓度均值的时间序列

Fig. 3 Observed hourly average concentrations of PM2.5 at (a) Wuhan, Xiaogan, and Xianning and (b) Jingzhou, Ezhou, and Huangshi in Hubei Province during 11–14 Jun 2014

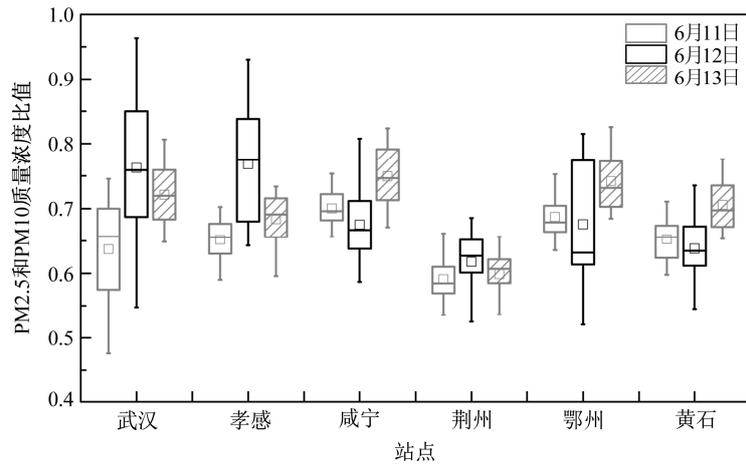


图4 2014年6月11~13日湖北省6个地区PM2.5和PM10质量浓度比值变化特征(盒状方框的上下横线分别包括总数据的75%和25%,上下竖线的顶端则分别包括总数据的95%和5%,小方框和横线代表了平均值和中值)

Fig. 4 Variations of ratios of the mass concentrations of PM2.5 to PM10 in six regions in Hubei Province during 11–13 Jun 2014 (The wide boxes represent the interquartile range from the 25th to 75th percentile. The “whiskers” extend upward to the 95th percentiles and downward to the 5th percentiles. The narrow small box and the lines represent the mean and median values, respectively)

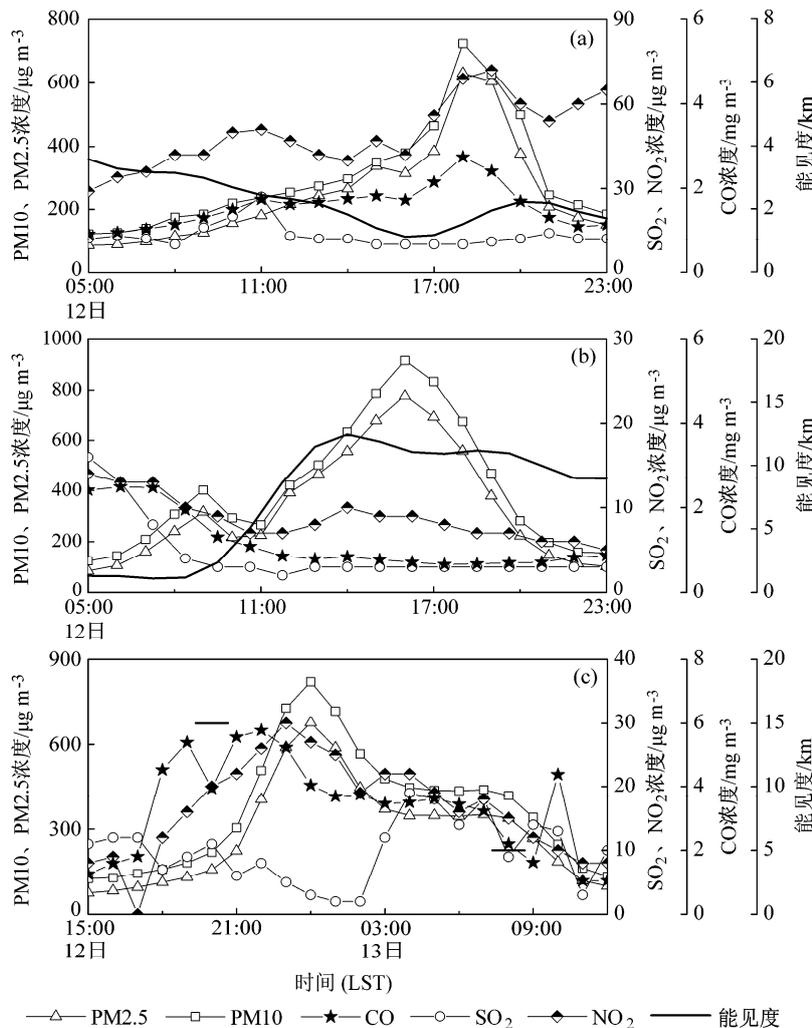


图5 湖北省(a)武汉、(b)孝感、(c)咸宁、(d)荆州、(e)鄂州、(f)黄石霾过程中污染物质量浓度及其能见度的变化特征
Fig. 5 Variations of the mass concentrations of air pollutants and visibility during the haze processes at (a) Wuhan, (b) Xiaogan, (c) Xianning, (d) Jingzhou, (e) Ezhou, and (f) Huangshi in Hubei Province

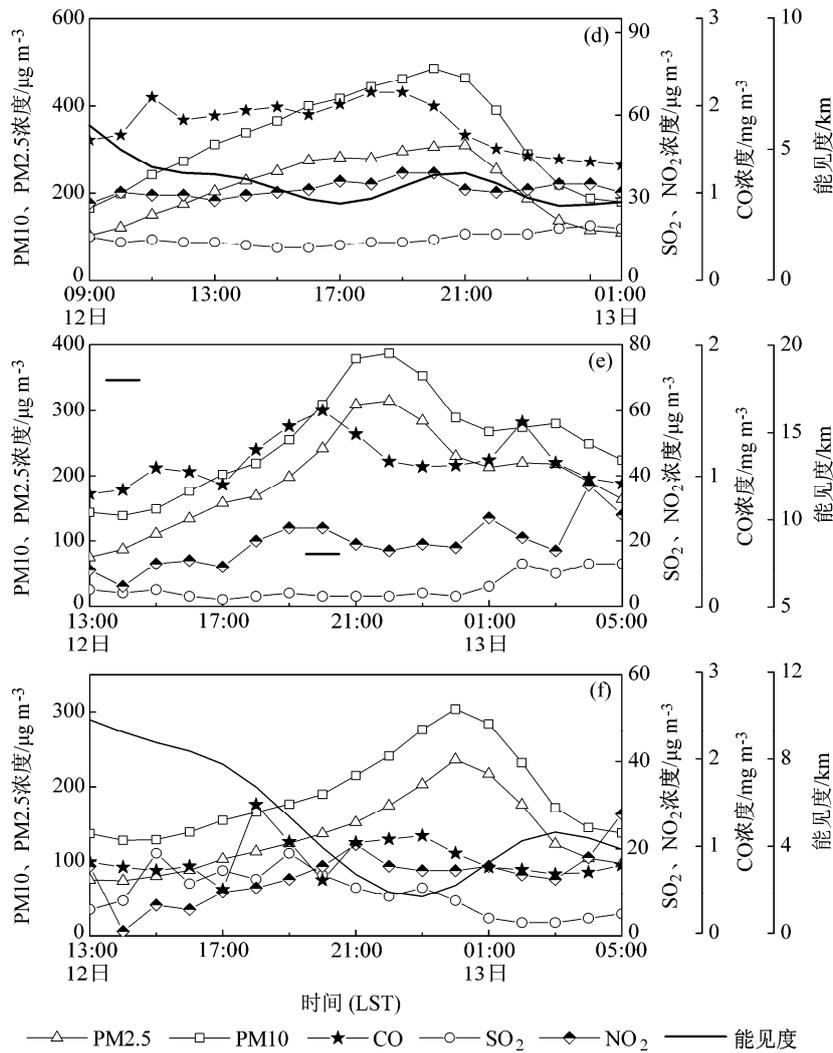


图5 (续)

Fig. 5 (Continued)

而其他 4 个站霾过程中 SO_2 浓度均小于 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，无明显起伏变化，这与朱佳雷等（2011）和刘端阳等（2014）对江苏重霾天气过程中 SO_2 质量浓度变化的分析基本一致。随着霾天气的不断加强， NO_2 质量浓度呈现不断增加的趋势，并在污染物质量浓度出现峰值前 1~3 h 达到峰值，但武汉地区与其他 5 个地区存在一定差别， NO_2 质量浓度峰值的出现时间与污染物的基本一致，并在短暂下降后又再次上升。近地层 NO_x 质量浓度与机动车尾气的排放密不可分(Zhang et al., 2009)，近年来武汉市汽车保有量大量增加， NO_2 的峰值浓度出现在下班高峰期的 18:00 左右，机动车在路面行驶的数量达到高峰，同时拥堵的路面使得机动车低速行驶，更易排放大量 NO_2 ，这也导致了武汉地区霾过程的 NO_2 质量浓度远高于其他 5 个地区。 CO 质量浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 和

PM_{10} 呈正相关关系（相关系数分别为 0.66 和 0.67），与能见度呈反相关关系（相关系数为 -0.55），这表明对于秸秆焚烧导致的霾天气过程 CO 与固态颗粒物（ $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ）质量浓度的变化特征相对一致，这与朱彬等（2010）和朱佳雷等（2011）对受秸秆焚烧影响所形成霾天气的污染特征分析一致，而 CO 也是秸秆焚烧过程中仅次于 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放物（Koppmann et al., 2005; Li et al., 2008; 朱佳雷等, 2012）。

3.3 霾过程的近地层输送特征

3.3.1 风速、风向的变化特征

图 6 给出了霾过程中武汉、孝感、咸宁、荆州、鄂州和黄石的风速、风向变化规律，结合图 3 可以看出，武汉地区在污染物质量浓度明显增加阶段，均存在着 2 m/s 左右的偏北风，随着 12 日

16:00 PM_{2.5} 质量浓度逐渐接近峰值, 风速逐渐减小, 并在 12 日 19:00 开始连续 6 h 出现了静风天气, 但值得注意的是, PM_{2.5} 质量浓度的明显增长长期出现在持续静风天气之前, 静风天气及其之后的十几个小时 PM_{2.5} 质量浓度维持在 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 这表明武汉的这次重度霾天气主要受污染物输送的影响。孝感地区的风速、风向特征则更好地反映了污染物的输送过程, 在 PM_{2.5} 质量浓度的持续增长期孝感地区长时间维持着东北气流的输送, 同时 PM_{2.5} 质量浓度达到峰值阶段 (12 日 12:00 至 13 日 00:00) 的风速也维持在 3 m/s 左右, 为 12~13 日风速最大的时期。咸宁地区在 PM_{2.5} 质量浓度开始增长时为偏北风, 风速为 2 m/s 左右, 此时主要为污染物的输送过程, 随后 PM_{2.5} 质量浓度达到峰值, 此时风向转为偏南风, 但风速很小, 加之近地层出现逆温 (图略), 此时主要为污染物的积累过程, 随着污染气团完全过境以及扩散条件转好 (风速增大), 咸宁地区 PM_{2.5} 质量浓度逐渐减少并维持低值。荆州地区的风速、风向特征与孝感类似, 其 PM_{2.5} 质量浓度的增长主要受到偏北输送气流的影响; 鄂州和黄石地区的风速、风向特征与咸宁类似, 其对 PM_{2.5} 质量浓度的影响也主要表现为先

输送后累积的过程, 随着污染气团完全过境, 这 3 个地区的 PM_{2.5} 质量浓度也明显减少并维持低值。

3.3.2 24 h 风矢量和的分布特征

通过上节的分析可以发现, 霾过程风速、风向特征能在一定程度上反映气团的走向, 但是其无法综合、有效地表现一个区域在一段时间内受周围地区空气流动的输送作用。图 7 分别给出 2014 年 6 月 12 日和 13 日湖北省霾天气过程的 24 h 风矢量和空间分布图, 6 月 12 日在湖北省的中东部存在着明显的东北方向气流输送 (图 7a), 可以清楚地看到, 武汉、孝感和咸宁正处于东北来向气团的主体输送通道上, 秸秆焚烧形成的污染气团被持续地输送到这 3 个地区, 形成污染强度大、持续时间短的霾天气过程, 这与明显气流停滞区所造成污染物的停滞和堆积, 进而形成的霾天气有所不同 (吴兑等, 2008; 吴蒙等, 2012)。荆州地区尽管也处于偏北气流的影响区域, 其仅受到东部污染物主体输送气流的分支影响, 且偏北气流的形成与其受“宜荆夹道”地形地势特征的影响也密切相关 (周悦等, 2013)。鄂州和黄石同样只受到污染物主体输送气流的分支影响, 值得注意的是这两个地区位于湖北省东南部的风矢量和异常偏小区, 初期污染物的输

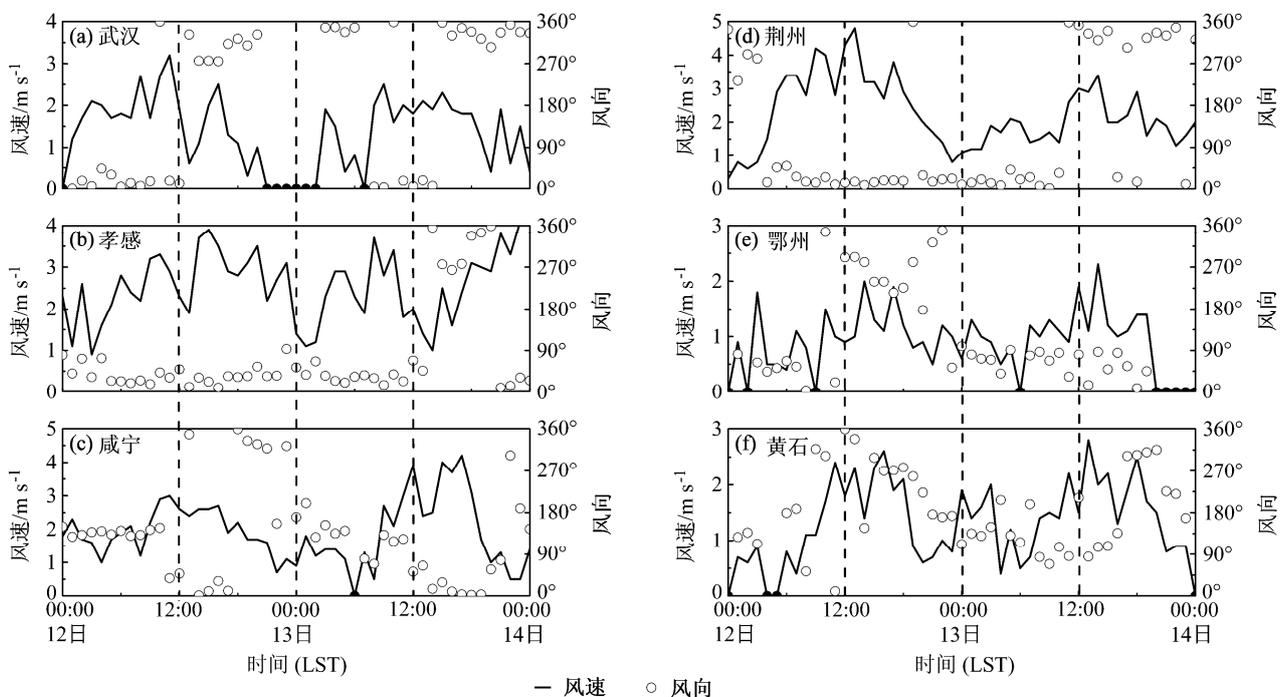


图 6 霾过程中湖北省 (a) 武汉、(b) 孝感、(c) 咸宁、(d) 荆州、(e) 鄂州、(f) 黄石风速、风向的变化特征

Fig. 6 Variations of wind speeds and wind directions during haze processes at (a) Wuhan, (b) Xiaogan, (c) Xianning, (d) Jingzhou, (e) Ezhou, and (f) Huangshi in Hubei Province

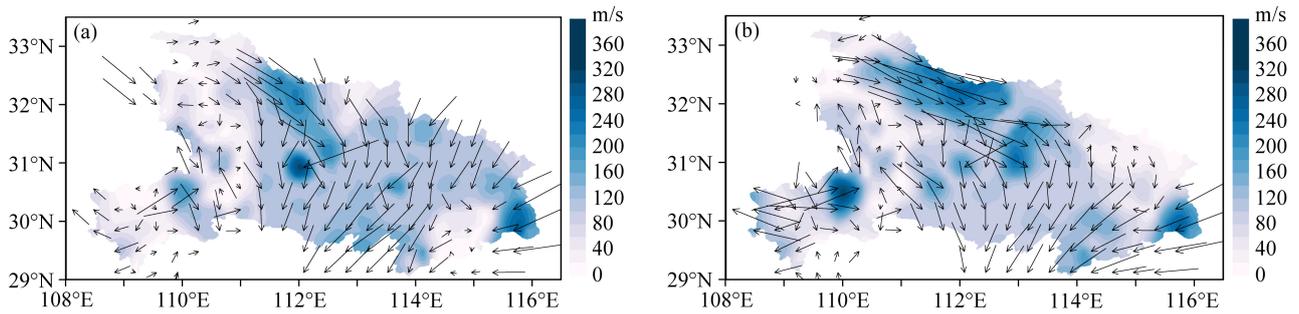


图7 湖北省2014年6月(a)12日、(b)13日霾天气过程24h风矢量和的分布特征

Fig. 7 Distributions of 24-h vector sum of wind speed in Hubei Province during the haze processes on (a) 12 Jun and (b) 13 Jun 2014

送是其霾天气出现的辅因，而气流停滞导致的污染物堆积是其霾天气出现的主因。6月13日湖北省东北边界处的东北气流输送已经明显减弱消失，表明秸秆焚烧地区污染物的输送已经结束，西部的输送气流开始逐渐影响中东部地区，6个地区的霾过程均开始明显减弱，咸宁地区依旧受到湖北省内部分污染物由北向南的输送，而东南部依旧存在一个风矢量和异常偏小区，使得咸宁、鄂州和黄石地区污染物(PM_{2.5})质量浓度减少的速度相对较慢。

3.3.3 污染物来源分析

通过对风矢量和分布特征的分析，能有效得到湖北省境内污染物的输送规律，本节应用轨迹模型HYSPLIT4.9对此次霾过程6个地区污染物输送特征进行后向轨迹的模拟，进一步揭示导致湖北出现严重霾天气的污染物输送来源。图8给出了武汉、孝感、咸宁、荆州、鄂州和黄石地区霾过程中污染物浓度最高时刻的72h后向轨迹模拟。

由图8可以看出，影响这6个地区霾过程的污染气团均来自于东北方向的江苏省和安徽省中北部地区，而这正是长三角秸秆焚烧最严重的两个区域(朱佳雷等, 2012)，气团在6月12日经过秸秆焚烧最严重的安徽省中北部(图1)，由此可以清晰地得出湖北省中东部这次严重的霾天气正是由于秸秆焚烧所形成的污染气团输送导致。同时，可以发现气团进入湖北省境内后存在着一定的下沉运动，形成的下沉逆温有利于污染物的堆积，这为霾过程的加重提供了适宜的层结条件，尤其是鄂州和黄石地区50m高度处的气团(红色轨迹)均是由500m高度下沉而来，稳定层结下污染物的累积过程对这两地区霾天气过程的发展影响较强。

4 结论

(1) 安徽省北部地区大范围秸秆的焚烧和东北风的输送作用是2014年6月12~13日湖北省中东部重度霾天气发生的主因，而低风速甚至静风条件导致的污染物累积是重度霾天气发生的辅因，导致中东部地区出现了两条“带状”的能见度低值区，日均能见度最小值仅有2.1 km。

(2) PM_{2.5}质量浓度峰值由北向南存在1~4h的滞后变化特征，污染物输送气流的主体位于孝感—武汉—咸宁一带，3个地区PM_{2.5}峰值浓度均超过了600 μg/m³，而荆州、鄂州和黄石地区的PM_{2.5}峰值浓度仅为300 μg/m³左右。

(3) 秸秆焚烧所形成的污染气团中PM_{2.5}质量浓度含量较高，随着气团的传输，其中PM_{2.5}所占比例会出现明显下降。武汉和孝感地区PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度比日均值的增幅均为0.12，并出现了0.96和0.93的小时极大值，而咸宁地区比值的增幅仅有0.05。

(4) PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度与能见度呈反相关关系，相关系数分别为-0.53和-0.47；SO₂质量浓度仅在武汉和孝感地区霾过程初期出现接近30 μg/m³的峰值浓度，其他时间和其余站点均无明显起伏变化；NO₂质量浓度呈现不断增加的趋势，并在PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度达到峰值前1~3h达到峰值；CO是秸秆焚烧产生的主要污染气体之一，其质量浓度仅低于PM_{2.5}和PM₁₀，且与PM_{2.5}和PM₁₀呈正相关关系，相关系数分别为0.66和0.67。

(5) 后向轨迹分析表明，此次霾天气的污染气团来自江苏省和安徽省中北部地区；风矢量和分布特征则进一步揭示了污染气团进入湖北后的输送

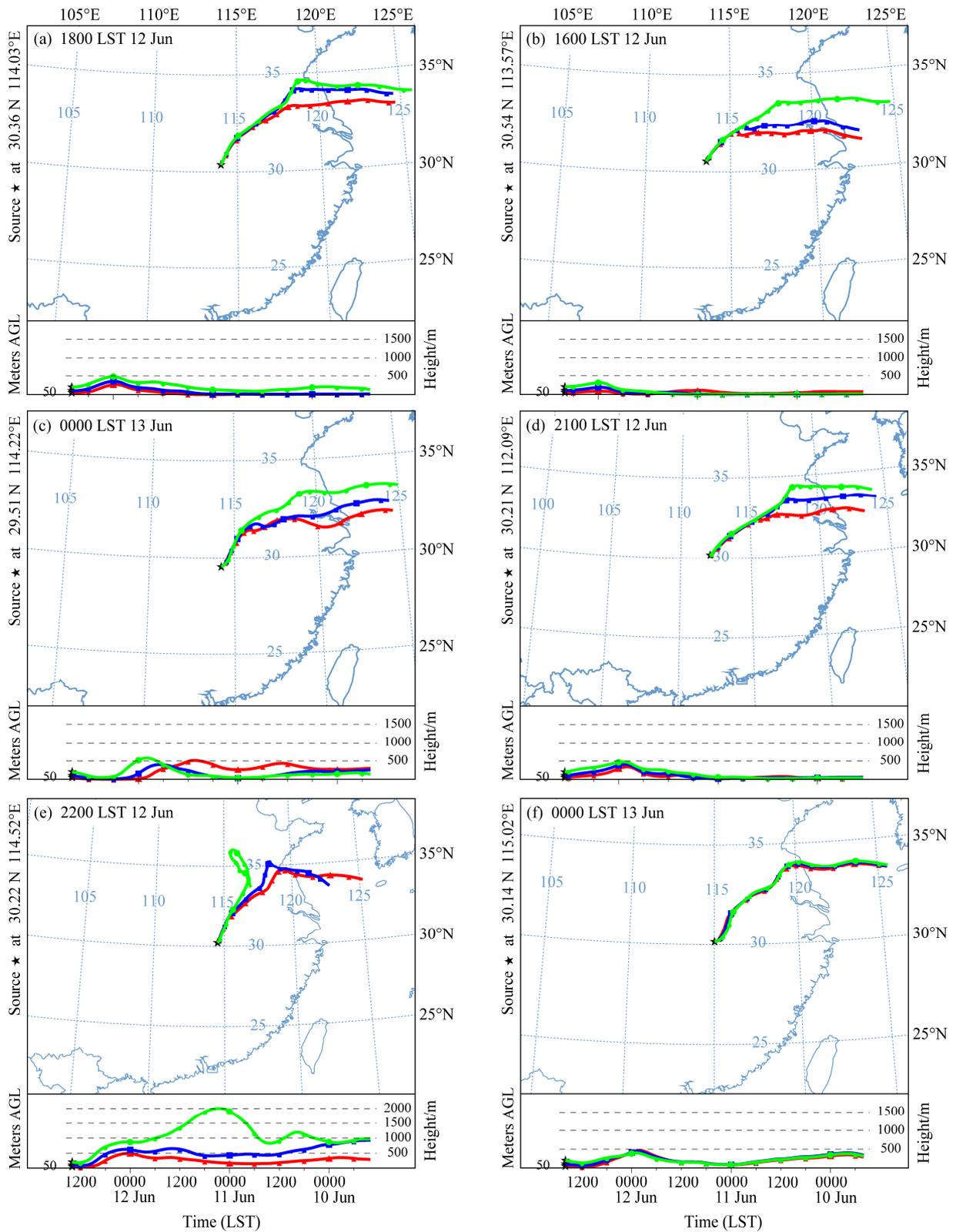


图8 湖北省 (a) 武汉、(b) 孝感、(c) 咸宁、(d) 荆州、(e) 鄂州、(f) 黄石霾过程中污染物浓度最高时刻的72 h后向轨迹模拟 (红色、蓝色和绿色轨迹分别为 50 m、100 m 和 200 m 高度空气团轨迹)

Fig. 8 Distributions of 72-h backward trajectories at the time of maximum pollutants concentration during the haze processes at (a) Wuhan, (b) Xiaogan, (c) Xianning, (d) Jingzhou, (e) Ezhou, and (f) Huangshi in Hubei Province (red, blue, and green lines are the backward trajectories at the height of 60 m, 100 m, and 200 m, respectively)

特征, 6月12日湖北省中东部存在明显的东北来向输送气流, 武汉、孝感和咸宁处于主体输送通道上, 而6月13日湖北省东北边界处的输送气流已经明显减弱消失, 东南部风矢量和异常偏小导致的污染物堆积是该地区污染持续的主要原因。

参考文献 (References)

- 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 2005. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单 [J]. 中国环境科学, 25 (4): 389–393. Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. 2005. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. China Environmental Science (in Chinese), 25 (4): 389–393.
- 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 2007. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算 [J]. 科学通报, 52 (15): 1826–1831. Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang, et al. 2007. The estimation on the emissions from farmland crop residue burning in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (15): 1826–1831.
- Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. 2008. Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning [J]. Journal of Environmental Sciences, 20 (1): 50–55, doi: 10.1016/S1001-0742(08)60007-8.
- Chang D, Song Y, Liu B. 2009. Visibility trends in six megacities in China 1973–2007 [J]. Atmospheric Research, 94 (2): 161–167, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.05.006.
- Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. Science China (Earth Sciences), 57: 36–46, doi: 10.1007/s11430-013-4792-1.
- Koppmann R, Von Czapiewski K, Reid J S. 2005. A review of biomass burning emissions, Part 1: Gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds and nitrogen containing compounds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 5 (5): 10455–10516, doi: 10.5194/acpd-5-10455-2005.
- Li L J, Wang Y, Zhang Q, et al. 2008. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 51 (3): 403–414, doi: 10.1007/s11430-008-0021-8.
- 刘端阳, 濮梅娟, 严文莲, 等. 2014. 淮河流域连续雾—霾及转换成因分析 [J]. 中国环境科学, 34 (7): 1673–1683. Liu Duanyang, Pu Meijuan, Yan Wenlian, et al. 2014. Study on the formation and the cause of the fog-haze transformation in the lower reaches of Huaihe River [J]. China Environmental Science (in Chinese), 21 (7): 1673–1683.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (3): 639–662, doi:10.1007/s00376-009-8174-8.
- Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, et al. 2006. City clusters in China: Air and surface water pollution [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 4 (7): 353–361, doi: 10.1890/1540-9295(2006)004[0353:CCICAA]2.0.CO;2.
- Wang H L, Zhu B, Shen L J, et al. 2012. Size distributions of aerosol and water-soluble ions in Nanjing during a crop residual burning event [J]. Journal of Environmental Sciences, 24 (8): 1457–1465, doi: 10.1016/S1001-0742(11)60968-6.
- 王静, 牛生杰, 许丹, 等. 2013. 南京一次典型雾霾天气气溶胶光学特性 [J]. 中国环境科学, 33 (2): 201–208. Wang Jing, Niu Shengjie, Xu Dan, et al. 2013. Aerosol optical properties during the typical haze/fog event in Nanjing [J]. China Environmental Science (in Chinese), 33 (2): 201–208.
- 王书肖, 张楚莹. 2008. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布 [J]. 中国科技论文在线, 3 (5): 329–333. Wang Shuxiao, Zhang Chuying. 2008. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. Sciencepaper Online (in Chinese), 3 (5): 329–333.
- Wang Z F, Li J, Wang Z, et al. 2014. Modeling study of regional severe hazes over Mid-Eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science China (Earth Sciences), 57: 3–13, doi: 10.1007/s11430-013-4793-0.
- 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 64 (4): 510–517. Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River Delta [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (4): 510–517.
- 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 2007. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 23 (1): 1–6. Wu Dui, Deng Xuejiao, Bi Xueyan, et al. 2007. Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (1): 1–6.
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 珠江三角洲天气的近地层输送条件研究 [J]. 应用气象学报, 19 (1): 1–9. Wu Dui, Liao Guolian, Deng Xuejiao, et al. 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (1): 1–9.
- 吴兑, 吴晟, 李菲, 等. 2011. 粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析 [J]. 中国环境科学, 31 (4): 540–545. Wu Dui, Wu Cheng, Li Fei, et al. 2011. Air pollution episode in southern China due to the long range transport of coarse particle aerosol [J]. China Environmental Science (in Chinese), 31 (4): 540–545.
- Wu D X, Wei Q N, Wei J L, et al. 2008. Observational study of black carbon aerosol during straw-burning period [J]. Environmental Science, 29 (12): 3304–3309.
- 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 2012. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 32 (8): 1409–1415. Wu Meng, Fan Shaojia, Wu Dui, et al. 2012. Characteristics and influence factors study of haze and cleaning weather over Guangzhou area [J]. China Environmental Science (in Chinese), 32 (8): 1409–1415.
- 严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等. 2014. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 237–247. Yan Wenlian, Liu Duanyang, Sun Yan, et al. 2014. Analysis of the sustained fog and haze event resulting from crop-burning residue in Jiangsu Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 237–247, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13209.
- 尹聪, 朱彬, 曹云昌, 等. 2011. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨 [J]. 中国环境科学, 31 (2): 207–213. Yin Cong, Zhu Bin, Cao Yunchang, et al. 2011. The origin of crop residue burning impact on air quality of

- Nanjing [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (2): 207–213.
- 张红, 邱明燕, 黄勇. 2008. 一次由秸秆焚烧引起的霾天气分析 [J]. *气象*, 34 (11): 96–100. Zhang Hong, Qiu Mingyan, Huang Yong. 2008. Analysis on the case of smoke haze [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (11): 96–100.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Lin W L, et al. 2009. Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing-2008 Olympic Monitoring Campaign [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (11): 1633–1651, doi: 10.1175/2009BAMS2804.1.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾—霾成因及其治理的思考 [J]. *科学通报*, 58 (13): 1178–1187. Zhang Xiaoye, Sun Junying, Wang Yaqiang, et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 58 (13): 1178–1187.
- 周悦, 高正旭, 周月华, 等. 2013. 湖北省电线积冰特征及其冰区划分 [J]. *自然灾害学报*, 22 (6): 169–177. Zhou Yue, Gao Zhengxu, Zhou Yuehua, et al. 2013. Characteristics of wire icing and icing zoning in Hubei Province [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 22 (6): 169–177.
- 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 2010. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析 [J]. *中国环境科学*, 30 (5): 585–592. Zhu Bin, Su Jifeng, Chao Zhiwei, et al. 2010. Analysis of a serious air pollution event resulting from crop residue burning over Nanjing and surrounding regions [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 30 (5): 585–592.
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析 [J]. *中国环境科学*, 31 (12): 1943–1950. Zhu Jialei, Wang Tijian, Xing Li, et al. 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (12): 1943–1950.
- 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 2012. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用 [J]. *环境科学学报*, 32 (12): 3045–3055. Zhu Jialei, Wang Tijian, Deng Junjun, et al. 2012. An emission inventory of air pollutants from crop residue burning in Yangtze River Delta region and its application in simulation of a heavy haze weather process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 32 (12): 3045–3055.