

覃军, 袁正旋, 曾向红, 等. 2018. 湖南岳阳一次重度霾过程近地层物理量场异常特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (5): 533–542. Qin Jun, Yuan Zhengxuan, Zeng Xianghong, et al. 2018. Analysis on characteristic variations of physical quantities in the near surface layer during a severe haze process in Yueyang Hunan Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (5): 533–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17050.

湖南岳阳一次重度霾过程近地层物理量场异常特征分析

覃军¹ 袁正旋¹ 曾向红² 吴浩²

¹ 中国地质大学, 武汉 430074

² 湖南省气候中心, 长沙 410118

摘要 利用杭瑞高速公路洞庭湖大桥北岸测风塔的梯度风观测资料、三维超声风温仪资料以及岳阳气象站提供的逐小时气溶胶浓度和能见度观测资料, 对湖南岳阳 2017 年 1 月 28 日的一次重度霾天气中的重污染过程的近地层物理量变化特征进行了分析, 结果表明: (1) 重污染来临前约 130 min 即 28 日 01:50 (北京时间, 下同), 水平风速、垂直风速、高低层风切变都出现零值, 大气处于静稳状态。重污染结束前 180 min 即 28 日 09:00, 上述物理量和高低层温度切变出现零值。(2) 湍流强度在重污染来临前有强烈异常信号, 其中水平纵向湍流强度异常信号最明显, 于重污染发生前 130 min 出现异常峰值 4.15, 重污染结束前 180 min 出现异常峰值 3.24。(3) 湍流动能和动量通量都在重污染来临前 130 min 接近 0.0 m²/s², 即湍流交换最弱, 有利于污染物在近地面的持续堆积和重污染过程的发生。近地层的平均物理量和湍流特征量的异常信号的出现时间有较好的一致性, 即出现在重污染来临前的 130 min 和结束前的 180 min。揭示了重度霾污染天气的近地层物理量时间变化规律, 着重分析了霾污染的生成、发展、消亡全过程的边界层湍流异常的前期信号, 为深入认识霾污染天气进行有益的探索并为这类天气的预测预警提供科学依据。

关键词 重度霾 近地层 湍流 物理量

文章编号 1006-9585 (2018) 05-0533-10

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17050

Analysis on Characteristic Variations of Physical Quantities in the Near Surface Layer during a Severe Haze Process in Yueyang Hunan Province

QIN Jun¹, YUAN Zhengxuan¹, ZENG Xianghong², and WU Hao²

¹ China University of Geosciences, Wuhan 430074

² Hunan Climate Center, Changsha 410118

Abstract Using 3D ultrasound anemometer data and aerosol data, several conclusions have been reached based on the analysis of wind field and turbulence variation characteristics in the near surface layer in Yueyang during a severe haze process on 28 January 2017. Major conclusions are as follows. (1) The horizontal wind speed, vertical wind speed, and wind shear all are zero at about 130 minutes ahead of the occurrence of the heavy pollution process (at 0150 LST 28 January), and the atmosphere remained in stable condition. (2) The turbulent intensity (I_v) exhibited an abnormal signal before the starting and ending of the heavy pollution. The

收稿日期 2017-03-23; 网络预出版日期 2017-08-02

作者简介 覃军, 男, 1964 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事气候变化与大气环境方面研究。E-mail: qinjun@cug.edu.cn

资助项目 国家重点科技专项 2016YFA0602002, 交通运输部建设科技项目 2013318798320, 湖南省交通科技项目 201219

Funded by the National Key Research and Development Programme of China (Grant 2016YFA0602002), Construction Science and Technology Project by Ministry of Communications (Grant 2013318798320), Project of Hunan Communication Science and Technology (Grant 201219)

abnormal value of I_t was 4.15 at 130 minutes ahead of the beginning of the heavy pollution and the value was 3.24 at 180 minutes ahead of the ending of the heavy pollution (at 0900 LST 28 January). (3) The turbulent kinetic energy and momentum flux decreased to $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ at 130 minutes ahead of the occurrence of the heavy pollution. There is a good agreement between the occurrence time of the anomalous signals of turbulence and average physical quantities. This paper is focused on the analysis of abnormal characteristics of boundary layer turbulence during the formation, development and dissipation of the severe haze. The abnormal signals of the occurrence and dissipation of the severe haze are detected through the above analysis. The aim of this paper is to get a better understanding of severe haze weather and provide scientific basis for its prediction.

Keywords Severe haze process, Near-surface layer, Turbulence, Physical quantities

1 引言

对桥梁建设和运营而言, 以前关注的灾害性天气主要有暴雨、强风等天气过程。刘俊丽(2007)的研究指出美国的塔科马海峡大桥钢梁曾经因大风灾害发生断裂, 最终导致整个大桥坍塌; 根据湖南岳阳民政局网站记录, 岳阳曾于 2016 年 7 月遭受大暴雨的袭击, 洞庭湖区域为重灾区, 多地房屋受损且有人员伤亡。一般而言较多研究是从天气气候角度分析大风, 也有研究针对大风个例的边界层物理量场异常特征开展分析。Xu and Zhan (2001) 分析了深圳帝王大厦附近在台风天气下近地层的湍流强度、阵风系数、功率谱等要素; Zhu et al. (2010) 对台风登陆时飓风的湍流特征进行了小波分析, 分析其湍流能谱、湍流动能等变化特征。这些研究工作分析了灾害性天气持续期间的近地层物理量变化规律, 为台风多发区的建筑桥梁抗风工程中的风参数取值提供依据, 但这些研究并不关注灾害性天气来临前或结束前的预测预警信号。有的研究对鄂东两次暴雨及一次暴雪过程前后的近地层湍流特征进行了分析, 发现暴雨、暴雪前后近地层湍流特征出现异常极大值或异常峰值, 并且这些异常的出现可能会对暴雨暴雪预报预警提供一定的依据, 但忽略了对灾害性天气结束前的异常信号的分析(王林等, 2010, 2011)。

近年来各地秋冬季节重度霾天气频发, 重度霾天气不会对桥梁建筑造成直接损害, 但会对人体健康造成威胁, 而且由其导致的低能见度也会对通过桥梁的行人及车辆驾驶员的视距造成阻碍, 引发交通事故。对重度霾天气的研究, 有分析气候变化对环境的影响(孙家仁等, 2011), 有对天气系统过程结合中尺度数值模拟等方面进行的分析研究(王继志等, 2007; 陈瑞敏等, 2014; 段云霞等, 2016; 何建军等, 2016), 也有分析雾霾天气的边界层特

征(谢真珍等, 2015), 作者分析了一次重度霾过程中的气象要素、PM_{2.5} (空气动力学当量直径小于等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 即细颗粒物) 浓度变化及大气边界层特征, 发现逆温不利于湍流发展及污染物垂直扩散, 混合层的高度低且上升弱为雾霾形成提供了动力条件。张南等(2016)根据实测数据, 探讨了气象因子对污染物浓度的影响, 发现湍流减弱、湿度增大、短时降水及短时大风等对污染物的扩散有重要影响。张光智等(2005)对北京及周边的一次大雾过程的边界层特征进行了探索, 发现逆温出现在大雾形成前期, 大雾形成前的 SO_2 与 NO_2 凝结度迅速增长, 且起雾前约 10 h 边界层低层有强扰动信号出现。这些研究对深入认识重度霾天气提供了基础。

以往研究雾霾天气往往是对个例进行中尺度模拟和天气系统过程的分析, 或者研究雾霾过程中的边界层湍流特征, 对重度霾生消过程的边界层湍流异常前期信号的研究明显不足。本文根据杭瑞高速公路洞庭湖大桥测风塔的梯度风观测资料、三维超声风温仪资料、岳阳气象站提供的逐小时气溶胶浓度和能见度观测资料, 对湖南岳阳 2017 年 1 月 28 日的一次严重霾污染天气的近地层物理量场进行了分析, 着重分析重度霾污染的生成、发展、消亡全过程的边界层湍流异常特征, 旨在找出重度霾污染发生和消亡的前期异常信号, 为此类灾害性天气的预测预警提供依据, 对深入认识重度霾天气进行有益的探索。

2 资料来源与方法

2.1 资料及来源

根据中国天气网数据, 2017 年 1 月 28 日岳阳为多云天气, 没有雨雪雾的发生。参考岳阳市环保局空气质量日报, 当天岳阳 6 个区的空气污染达到 6 级, 其中杭瑞高速公路洞庭湖大桥以及岳阳气象

站所在地君山区的空气污染指数为 417, 属于严重污染。本文选取该污染天气作为个例加以研究。

气象资料、污染物浓度及能见度观测资料由岳阳气象站提供, 选取了 2016 年 12 月至 2017 年 1 月 31 日的逐小时相对湿度、能见度、PM2.5 和 PM10 (空气动力学当量直径小于等于 10 μm 的颗粒物, 即可吸入颗粒物) 浓度观测资料。

梯度风观测铁塔位于杭瑞高速洞庭湖大桥北岸 (29.43°N, 113.12°E), 梯度风观测仪器分别位于铁塔上 10 m、30 m、50 m、60 m 和 70 m 高度处。Wind Master Pro 三维超声风温仪由江苏省无线电科学研究所有限公司提供, 设备安放于梯度风观测铁塔上距地面 30 m 高度处, 采用 10 Hz 采样频率进行三维瞬时风速和温度数据的采集。

2.2 研究方法

观测研究期间, 岳阳气象站提供的逐小时颗粒物浓度及能见度观测资料完整性较好, 不存在缺测数据。三维超声风温仪及梯度观测数据需要进行质量检查, 根据仪器输出的质量控制信息文本, 数据质量控制信息标识为“0”时说明观测数据“可靠”, 标识为“1~9”表示“存疑或者不可靠”, “9”和“255”表示缺失或缺测, 因此本文只采用质量控制信息文本中标识为“0”的三维超声风温仪观测数据。为了确保观测数据的质量, 本文还利用方差检验方法对观测研究期间的超声风温仪原始数据进行野点值检验 (郭建侠等, 2007), 其判断依据为 $|x_i - \bar{x}| \geq n \cdot \sigma_x$, 其中, x_i 是观测值, \bar{x} 是 30 min 的均值, σ_x 是样本标准差, n 取值为 4。统计分析表明, 经方差检验后的三维超声风温仪及梯度风观测数据中, 有效数据所占比例大于 99.9%, 可用于湍流参数的计算分析。

三维超声风温仪记录的每小时样本包含实测三维风速 $u(t)$ 、 $v(t)$ 、 $w(t)$ 与虚温 $p(t)$, 文中用虚温代替温度值。计算的基本时距取 1 min。水平平均风速 U 和风向角 φ 由下式计算 (庞加斌等, 2006):

$$U = \sqrt{\overline{u(t)^2} + \overline{v(t)^2}}, \quad (1)$$

$$\varphi = \arctan(\overline{v(t)} / \overline{u(t)}). \quad (2)$$

垂直方向与仪器坐标 z 轴相同, 因此垂直平均风速为

$$W = \overline{w(t)}, \quad (4)$$

平均温度为

$$T = \overline{p(t)}. \quad (5)$$

将仪器坐标旋转 φ 角, 使仪器所测 u 与主风向一致。所得坐标轴 x 、 y 、 z 分别代表主导风 $u(t)$ 、侧风 $v(t)$ 和垂直风向 $w(t)$ (与仪器坐标相同), 则 $u(t)$ 、 $v(t)$ 在 x 、 y 轴的投影 $u'(t)$ 即为纵向 (主风向) 脉动风速、 $v'(t)$ 为横向 (侧风向) 脉动风速, 由下式计算 (Zhao et al., 2013):

$$u'(t) = u(t) \cos \varphi + v(t) \sin \varphi - U, \quad (6)$$

$$v'(t) = -u(t) \sin \varphi + v(t) \cos \varphi, \quad (7)$$

垂直脉动风速 $w'(t)$:

$$w'(t) = w(t) - W, \quad (8)$$

气温扰动 $p'(t)$:

$$p'(t) = p(t) - T \quad (9)$$

$u'(t)$ 、 $v'(t)$ 、 $w'(t)$ 即为本文湍流统计分析的基础时间序列湍流数据。

本研究中, 湍流强度 I_i 如下:

$$I_i = \sigma_i / U_{3s}, \quad (10)$$

其中, 下标 i 取 u 、 v 、 w , I_u 、 I_v 、 I_w 分别表示 u 、 v 、 w 方向湍流强度, σ_u 、 σ_v 、 σ_w 分别表示 u 、 v 、 w 方向的脉动速度 u' 、 v' 、 w' 的标准差; p' 表示温度脉动值, U_{3s} 为时距为 3 s 的子样本中主导风向的平均风速。

湍流动能 E 的计算公式如下 (王寅钧等, 2015):

$$E(t) = \frac{1}{2} [u'(t)^2 + v'(t)^2 + w'(t)^2]. \quad (11)$$

动量通量 $F_m(t)$ 和感热通量 $F_h(t)$, 采用如下计算方法 (盛裴轩等, 2013):

$$F_m(t) = \overline{u'(t)w'(t)}, \quad (12)$$

$$F_h(t) = \overline{p'(t)w'(t)}. \quad (13)$$

计算时取时间间隔为 10 min。由于可能产生谱隙影响, 根据王林等 (2010) 和王林等 (2011) 的研究, 以 30 min 为时间间隔对铁塔超声风速仪的观测数据做平均, 脉动值即为原始观测数据减去 30 min 平均值。

3 重度霾过程近地层物理量分析

根据中国气象局发布的“地面气象业务观测技术规定” (2016 版), 对视程障碍现象自动判识的台站, 雾霾的能见度判别阈值为 7.5 km。根据气象行业标准《霾的观测和预报等级》(QX/T 113-2010), 当能见度低于 10 km, 湿度低于 80% 时为霾。由图 1b 可知, 2017 年 1 月 27~28 日的湿度一般低于 80%, 且 28 日空气质量指数 (AQI) 为

417, 达到严重污染级别, 故本文将这次污染过程定义为一次重度霾污染过程。本文选取这次污染过程中能见度小于 1 km 的时段作为重污染时段, 重点分析该时段及其前后时段的颗粒物浓度、湿度、风及大气湍流异常特征。图 1 为根据岳阳气象站提供的观测资料绘制的 2017 年 1 月 27~28 日重度霾过程的颗粒物浓度、相对湿度、能见度随时间的变化曲线, 图 1a 为颗粒物浓度与能见度的时程曲线、图 1b 为相对湿度与能见度的时程曲线。

大气能见度与 PM_{2.5}、PM₁₀ 的浓度有较好的反相关, 能见度随相对湿度增大而明显降低, 其变化规律与宋明等 (2013) 研究一致。为方便后面的分析, 图 1 中的黑框表示重污染时段, 即 2017 年 1 月 28 日 04:00 (北京时间, 下同) 至 12:00, 是大气能见度低于 1 km 的时间范围。本文将分 3 个不同的时段加以研究, 即重污染前 (图中黑框标识时段前)、重污染期间 (黑框标识时段)、重污染结束后 (黑框标识时段后)。

图 2a、2b、2c 分别为 2017 年 1 月 27 日 20:15 (重污染前)、1 月 28 日 08:45 (重污染期间) 和 19:45 时 (重污染过程后) 的卫星云图。重污染前后岳阳地区能见度较高, 云雾稀疏, 地面遥感图像清晰 (图 2a、2c), 而重污染期间云雾较厚, 能见度较差 (图 2b)。

利用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2017 年 1 月 28 日 08:00 的 850 hPa 环流形势进行了分析, 图 3a、3b 分别表示 28 日 08:00 的 850 hPa 高度场及地面风场、850 hPa 位势高度距平。08:00 正处于重污染期间, 污染物浓度较高、大气能见度较低, 由图 3a 可知岳阳地处两个高压之间, 为典型的鞍形场结构, 附近的主导风为偏南风, 且风速较小, 这种环流形势不利于污染物的输送及扩散。由图 3b 可知, 当时的大尺度环流形势是蒙古高压偏强, 中国中东部地区气压偏低, 西太平洋上气压偏高, 青藏高原上的冷高压偏强。

3.1 平均风、温分析

图 4a、4b 分别为根据铁塔梯度风观测资料整理得到的 2017 年 1 月 27~28 日不同高度的 10 min 平均风速及气温随时间的变化。可见不同高度的风速变化趋势一致, 重污染前风速及风速垂直切变较大 (低层风速小, 高层风速大), 最大风速差接近 5 m/s。图 4a 中, 28 日 01:50 左右各层风速同时降至 0.0 m/s, 风速切变也迅速减小, 上下气层间的湍

流交换减弱, 随后于 28 日 04:00 能见度低于 1 km, 进入重污染时段。重污染期间风速及风速切变都较小, 大约在 28 日 09:00 附近风速切变接近零, 随后风速振荡增大, 约 3 h 后即 12:00 重污染结束, 风速及风速切变又迅速增大。图 4b 表明, 重污染前各高度的气温随时间快速下降, 27 日 18:40 左右逆温出现并持续至重污染期间的 28 日 09:00, 随后逆温消失温度上升, 大气层结逐渐变得不稳定, 重污染过程 3 h 后结束。可见重污染前风速减小风切变也减小, 温度下降并出现持续的逆温, 这种稳定的大气层结生成是重污染过程形成的前提和重要信号; 重污染期间当风速/温度振荡增大/增加, 但风速切变和温度切变接近零时, 可能是重污染过程结束前的信号, 当然还需要结合其它异常信号加以分析。

图 5a、5b 分别为根据铁塔 30 m 高度处三维超声风温仪观测资料计算的水平风速与风向、垂直风速及虚温。可见各时刻水平风速、温度大小及变化趋势与铁塔梯度观测得到的风速和温度变化基本一致, 说明三维超声风温仪的观测资料是可信的。重污染前、后主导风向为偏北风, 临近重污染及重污染期间, 风向在东南风和西南风之间快速转换。临近重污染及重污染期间, 水平风速迅速减小而垂直风速为正 (向上, 重污染前后垂直风速以向下为主), 气温降至最低, 说明这段时间大气层结稳定、湍流交换弱、近地层通风量小。重污染来临前即 28 日 01:50, 水平风速、垂直风速降至 0.0 m/s, 静稳天气形成, 这可能是重污染来临的前兆信号。重污染结束前主导风向重新变为偏北风, 水平风速和温度从 28 日 09:00 迅速增加, 垂直风速也迅速减小至接近零。

3.2 湍流特征量分析

冬季晴天的傍晚到清晨, 大气层结一般较稳定, 湍流交换较弱, 部分研究剔除了摩擦速度 $u^* < 0.1$ m/s 时的观测数据 (Högström, 1988)。本文通过计算重度霾过程中的摩擦速度, 发现极少有摩擦速度低于 0.1 m/s 的数据, 说明在这次重度霾过程中大气湍流活动仍较强。

3.2.1 湍流强度

湍流强度是风场脉动强度的体现, 风速剧烈变化的时候脉动较强, 湍流强度会异常偏大。图 6 为重度霾过程的 10 min 平均湍流强度随时间变化曲线。这次重度霾过程中, 湍流强度在 28 日前都保

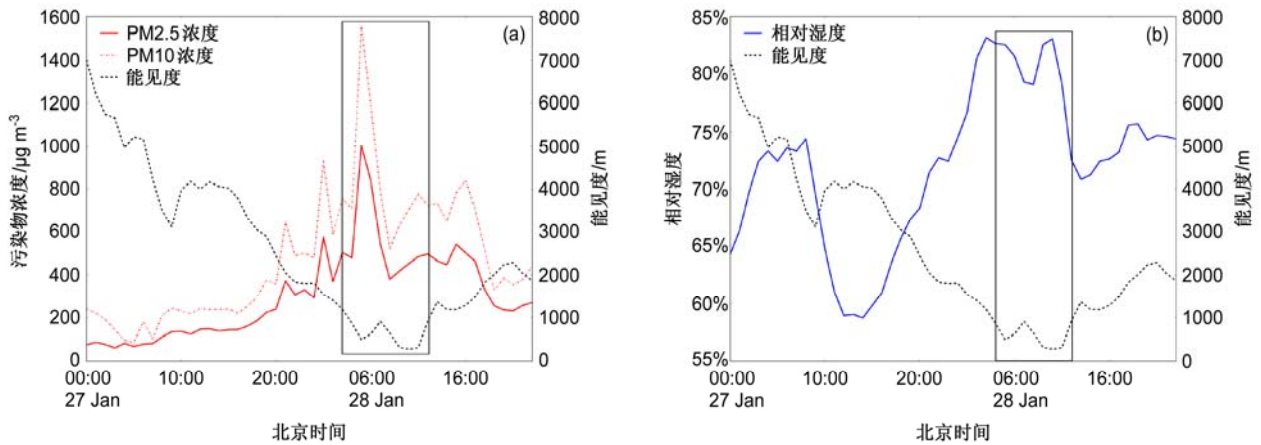


图1 2017年1月27~28日重度霾污染过程的(a)逐小时颗粒物浓度与能见度、(b)湿度与能见度。黑框表示重污染时段
 Fig. 1 Hourly (a) particles concentration and visibility, (b) humidity and visibility during the severe haze process from 27–28 January 2017. The black frame indicates heavy pollution period

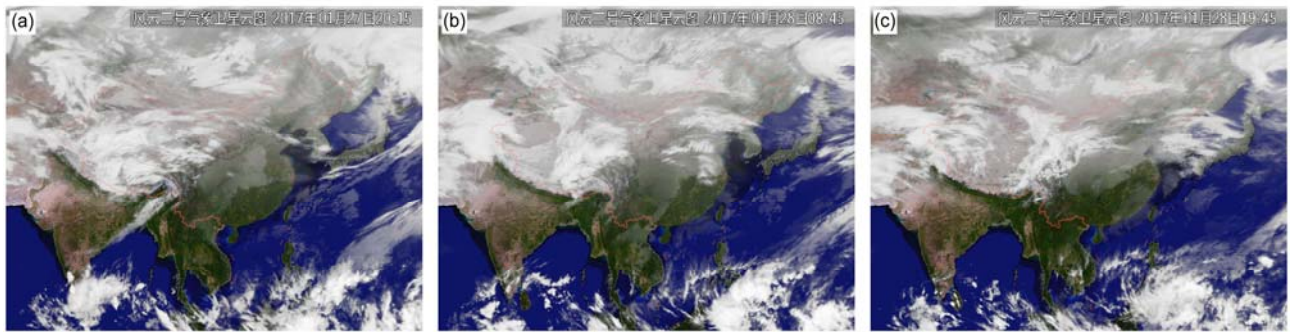


图2 2017年1月(a)27日20:15、(b)28日08:45、(c)28日19:45卫星云图
 Fig. 2 Satellite cloud images at (a) 2015 LST 27, (b) 0845 LST 28, and (c) 1945 LST 28 January 2017

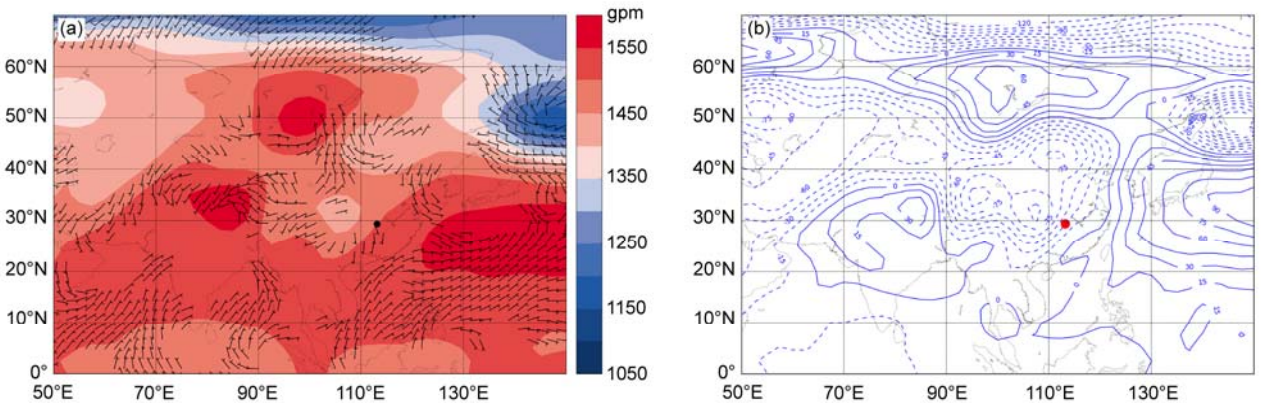


图3 2017年1月28日08:00 (a)850 hPa位势高度及地面10 m高度风场、(b)850 hPa位势高度距平。图3a中的黑点及图3b中的红点为岳阳地区
 Fig. 3 (a) Geopotential height at 850 hPa and wind field at 10-m height (a), and (b) geopotential height anomaly at 850 hPa at 0800 LST 28 January 2017

持低值，但在重污染时段（28日04:00至12:00）来临前和结束前均有较强的异常信号出现。第一个异常信号出现在重污染来临前130 min即28日01:50，3个方向的湍流强度变化中，水平纵向湍流强度 I_u 峰值达到3.99，水平横向湍流强度 I_v 为4.15。

第二个异常信号出现在重污染期间，水平横向湍流强度 I_v 于重污染结束前180 min即28日09:00出现峰值达3.24，而 I_u 为1.99小于 I_v ，此后湍流强度降低，直到重污染过程结束湍流强度一直保持低值。结合前面对风向、风速和温度变化的分析，我们认

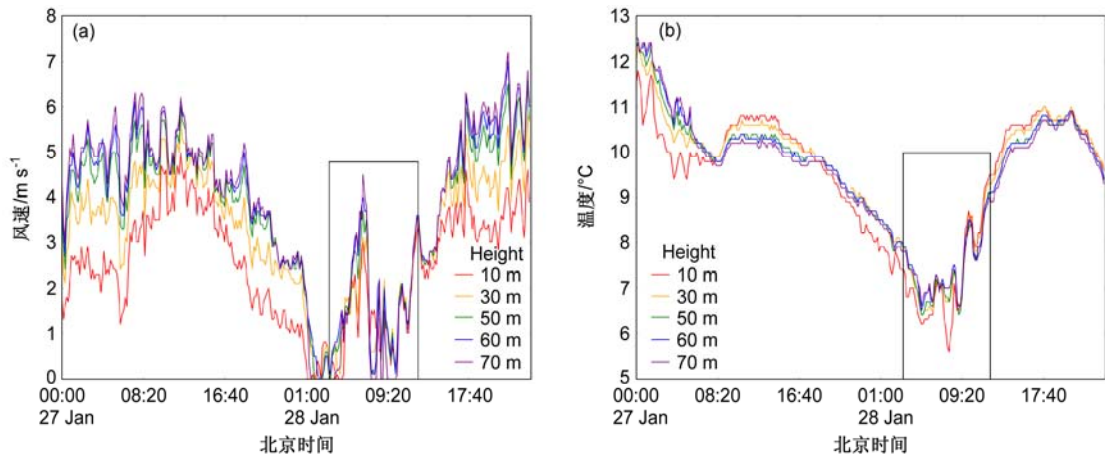


图4 重度霾污染过程各高度 10 min 平均 (a) 风速与 (b) 温度。图中黑框表示重污染时段

Fig. 4 10-min-averaged (a) wind speed and (b) temperature during the severe haze process. The black frame indicates heavy pollution period

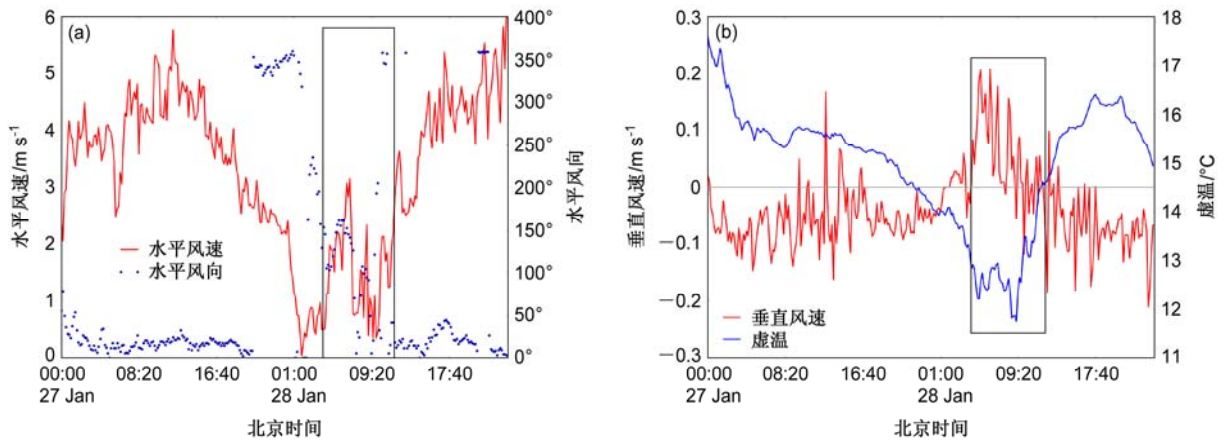


图5 重度霾污染过程的 10 min 平均 (a) 水平风速和风向、(b) 垂直风速和虚温。黑框表示重污染时段

Fig. 5 10-min-averaged (a) wind speed and wind direction, (b) vertical velocity and virtual temperature during the severe haze process. The black frame indicates heavy pollution period.

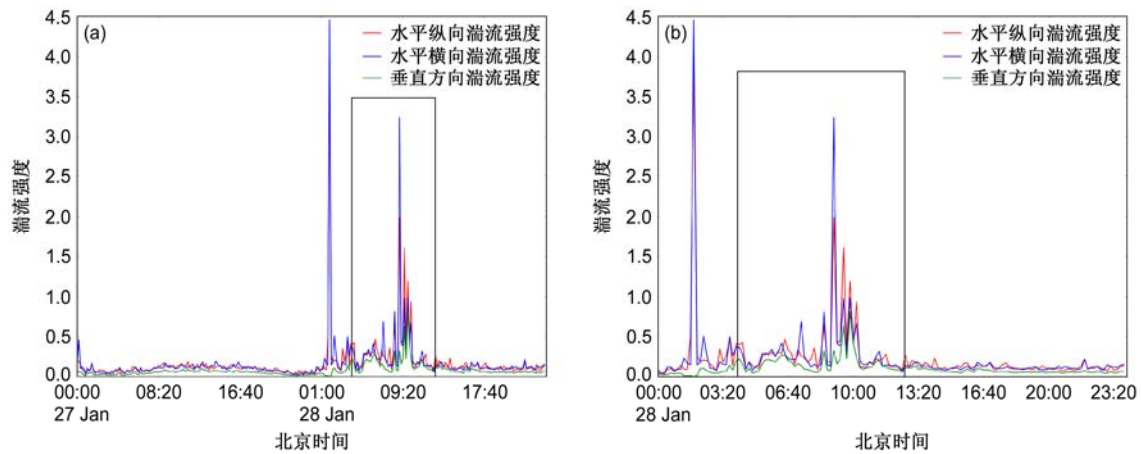


图6 重度霾污染过程 10 min 平均湍流强度的时程曲线 (黑框表示重污染时段): (a) 2017 年 1 月 27~28 日的时程曲线; (b) 重度霾污染日即 2017 年 1 月 28 日的时程曲线

Fig. 6 10-min-averaged turbulence intensity during the severe haze process: (a) The result during 27-28 January 2017; (b) the result on 28 January when the pollution is most severe. The black frame indicates heavy pollution period.

为重污染来临前和结束前的湍流强度异常峰值的出现可能是重要的前兆信号。

3.2.2 湍流动能

湍流动能是湍流活动能量的度量,其变化与风速较一致,图 7 为重度霾过程的 10 min 平均湍流动能时程曲线。与风速变化类似,湍流动能在重污染来临前迅速减小并于 28 日 01:50 左右降至 $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$,此时距离重污染到来即 04:00 约 130 min,湍流活动非常微弱,上下气层交换也微弱,导致污染物在近地面堆积,污染浓度迅速增加。重污染期间,湍流动能总体上仍较小,近地面空气的湍流活动仍然弱。28 日 09:00 后湍流动能逐渐增大,近地面空气的湍流交换缓慢增强,污染物的扩散也逐渐

加快,重污染过程持续 3 h 后在 12:00 结束。

3.2.3 湍流通量

湍流通量表示上下气层的动量传递或热量交换,标志着上下气层之间湍流交换的强弱。图 8 为重度霾过程的 10 min 平均动量通量及感热通量的时程曲线。可见感热通量在 28 日日出前达到最低值,07:40 由负转正,这是由于太阳辐射加热地表引起感热通量向上层大气输送。动量通量的变化较活跃,重污染来临前即 28 日 01:50 动量通量降至 $0.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$,直至重污染期间的 28 日 05:00 才出现明显的向上输送,并持续至 09:00,这一时段内垂直风速向上且逐渐增大,水平风速也在增大。动量通量在 09:00 之后重新开始上下震荡变化,此时的垂

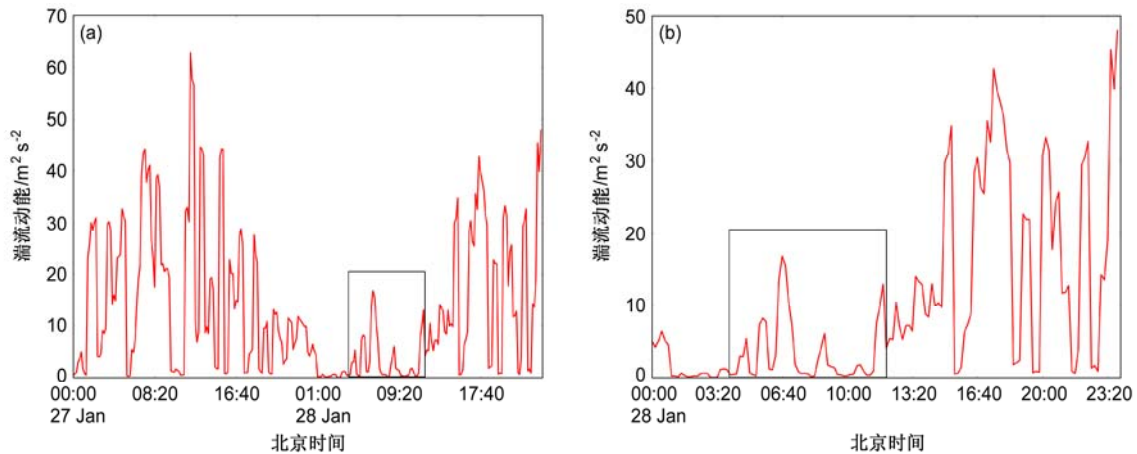


图 7 重度霾污染过程 10 min 平均湍流动能 (单位: m^2/s^2) (黑框表示重污染时段): (a) 2017 年 1 月 27~28 日的时程曲线; (b) 重度霾污染日即 2017 年 1 月 28 日的时程曲线

Fig. 7 10-min-averaged turbulent kinetic energy (m^2/s^2) during the severe haze process: (a) The result during 27~28 January 2017; (b) the result on 28 January when the pollution is most severe. The black frame indicates heavy pollution period

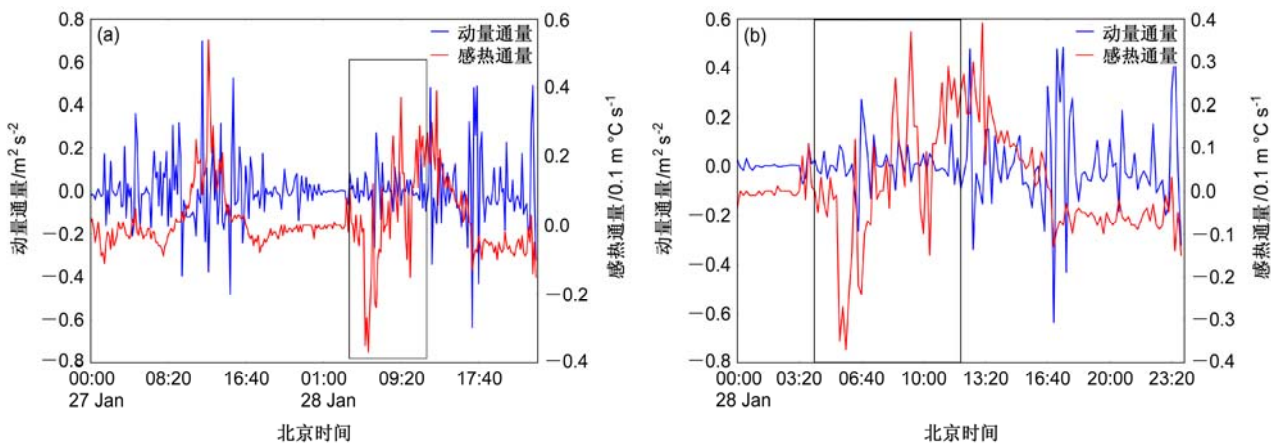


图 8 重度霾污染过程 10 min 平均动量通量 (单位: m^2/s^2) 和感热通量 (单位: $0.1 \text{ }^\circ\text{C m s}^{-1}$) (黑框表示重污染时段): (a) 2017 年 1 月 27~28 日的时程曲线 (b) 重度霾污染日即 2017 年 1 月 28 日的时程曲线

Fig. 8 10-min-averaged momentum flux (m^2/s^2) and sensible heat flux ($0.1 \text{ }^\circ\text{C m s}^{-1}$) during the severe haze process: (a) Result during 27~28 January 2017; (b) result on 28 January when the pollution is most severe. The black frame indicates heavy pollution period.

直风速由向上逐渐转变成向下。重污染前动量通量的显著减小可能标志着重污染的来临，因为上下气层的湍流交换减弱，容易引起近地面污染物的堆积。重污染结束后，动量通量逐渐增强。

表 1 统计了各项近地层物理量的异常值及其超前于重污染过程(即能见度小于 1 km 的 28 日 04:00 至 12:00) 开始和结束的时间。近地层平均物理量中，水平风速、垂直风速、高低层风切变和温度切变，在重污染来临和结束前都出现零值。重污染来临前 130 min (即 28 日 01:50 左右) 水平风速、垂直风速为 0.0 m/s，温度下降并在重污染前 560 min (即 27 日 18:40 左右) 开始出现持续的逆温，风速减小风切变也减小，这种静稳天气形势下近地层稳定层结的生成是重污染过程形成和发展的前提条件和重要信号。重污染期间当风速切变和温度切变接近零但风速和温度振荡增加时(28 日 09:00 开始)，主导风向从重污染期间的西南风重新变为东南风，垂直风速也迅速减小至零附近，这些可能是重污染过程结束前的信号。

表 1 重度霾污染过程中的边界层物理量异常值及超前时间统计

Table 1 Statistics on the occurrence of abnormal signals of physical quantities in the near-surface layer during the severe haze process

	重污染来临前		重污染结束前	
	异常值	超前时间/min	异常值	超前时间/min
水平风速	0.0 m/s	130	0.0 m/s	180
垂直风速	0.0 m/s	130	0.0 m/s	180
风切变	0.0 m/s	130	0.0 m/s	180
温度切变	0.0 °C	—	0.0 °C	180
水平纵向湍流强度 I_u	3.99	130	1.99	180
水平横向湍流强度 I_v	4.15	130	3.24	180
湍流动能	0.0 m ² /s ²	130	—	—
动量通量	0.0 m ² /s ²	130	—	—

近地层湍流特征量中湍流强度的异常信号最明显，重污染来临前与结束前都出现了显著的峰值，湍流动能和动量通量均在重污染来临前出现较为明显的特征值(减小至约为 0.0 m²/s²)，并且近地层湍流特征量异常值与平均物理量异常值在超前时间上有较好的一致性，即都出现在重污染来临前约 130 min 和结束前约 180 min。张光智等(2005)发现大雾出现前约 10 h，边界层低层有扰动信号出现，本文的异常信号出现在重污染来临前约 130 min 和重污染结束前约 180 min，时效长度低于张光智

等(2005)的研究结果。

4 结果与讨论

本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料分析了岳阳地区 2017 年 1 月 28 日的一次重度霾污染过程的环流背景场，发现重污染期间的环流形势是典型的鞍形场结构。利用杭瑞高速洞庭湖大桥北岸铁塔 30 m 高度处的三维超声风温仪观测资料以及台站污染物浓度监测资料，分析了这次重度霾污染过程中的近地层物理量异常特征，得出如下结论：

(1) 在重污染来临和结束前，水平风速、垂直风速、高低层风切变和温度切变，都出现零值。重污染来临前近地层有逆温，风速于重污染前 130 min，即 28 日 01:50 降至 0.0 m/s，大气处于静稳状态，容易造成污染物堆积。重污染期间风速较小，垂直风速向上，风向变化大，近地层有逆温，相对湿度在 80%左右。重污染结束前 180 min 这些物理量又出现零值。

(2) 湍流强度在重污染来临前有强烈异常信号，其中水平横向湍流强度 I_v 异常信号最明显，于重污染前 130 min 即 28 日 01:50 出现异常峰值 4.15。重污染结束前 180 min 即 28 日 09:00 出现异常峰值 3.24。

(3) 湍流动能和动量通量都在重污染来临前 130 min 降至 0.0 m²/s²，即在 28 日 01:50 左右湍流交换最弱，有利于污染物在近地面的持续堆积和重污染过程的发生。

(4) 近地层的平均物理量和湍流特征量的异常信号的出现有较好的一致性，即都出现在重污染来临前的 130 min 和结束前的 180 min。

本文的研究揭示了重污染天气全过程的湍流异常物理量时间变化规律，着重分析重度霾污染的生成、发展、消亡全过程的边界层湍流异常特征，找出重度霾污染发生和消亡的前期异常信号，为深入认识重度霾污染天气的生消过程进行有益的探索。

与霾污染直接相关的问题有两个，其一是污染排放，其二是气象条件。近年来各地严控大气污染排放，总的来说污染排放有减少的趋势，但是重污染天气过程却有增加趋势，这显然与气候变化引起的大气扩散条件的改变有关，因此气候变化与雾霾之间的关系研究越来越得到重视。研究表明，近年

来全球变暖引起大气环流异常导致不利于大气扩散的天气有增多趋势, 全球变暖会增加有利于霾污染事件发生的天气条件, 增加未来冬季严重霾事件的发生频次 (Cai et al., 2017)。气候变化引起静稳天气增加, 静稳天气易出现在大气环流稳定的秋冬季节。2013 年 12 月至 2014 年 2 月, 北半球西风指数较常年明显偏强, 高空环流比较平直, 西风分量较大, 而蒙古高压异常偏弱, 纬向型环流弱, 不利于引导极地冷空气侵入我国; 中东部大部地区的海平面气压值较常年偏小且处于弱气压梯度区, 地面静风和小风天气多, 不利于大气污染物的扩散。在这种天气条件下, 大气的水平输送能力和垂直扩散能力都较弱, 低空中的水汽和颗粒物不易扩散或移除, 从而形成雾霾天气。

另一方面, 雾霾的气候效应研究表明, 雾霾过程使边界层大气趋于稳定, 反而有利于雾霾的形成和发展, 雾霾与边界层的相互作用加重了大城市雾霾的污染程度 (Ding et al., 2016)。大气中污染物气溶胶作为凝结核可促进水汽凝结, 形成更多的雾滴, 而雾滴和气溶胶的增加会使到达地面的太阳辐射减少, 地面气温下降, 大气层结趋于稳定, 小风和静风频率增加, 从而不利于污染物的扩散和移除, 使得污染物更易于在近地面堆积。因此雾霾的形成通过改变近地面层大气动力和热力结构, 反过来又有助于严重雾霾过程的形成和发展。

由于观测资料有限, 本文仅从个例分析角度研究岳阳地区重度霾天气过程中的近地层物理量的异常特征, 后期随着观测工作的深入进行, 我们将选取更多个例对本文研究结论加以证实, 我们也将更多地关注局地气候条件改变与重污染过程的相互作用和影响研究, 以期进一步认识重度霾污染过程的气候效应及其近地层物理量异常特征, 为揭示重度霾天气形成、发展与消亡全过程的规律及其预测预警提供科学依据。

致谢 湖南省气象局、湖南省气候中心、岳阳市气象局为本文提供相关资料, 谨致谢忱!

参考文献 (References)

Cai W J, Li K, Liao H, et al. 2017. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 7 (4): 257–262, doi:10.1038/nclimate3249.

陈瑞敏, 吴雁, 康文英, 等. 2014. 连续雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 19 (2): 209–218. Chen Ruimin,

Wu Yan, Kang Wenying, et al. 2014. Analysis of pollutant concentrations and characteristics of continuous smoggy weather [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 19 (2): 209–218, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13156.

Ding A J, Huang X, Nie W, et al. 2016. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (6): 2873–2879, doi:10.1002/2016GL067745.

段云霞, 李得勤, 田莉, 等. 2016. 沈阳市一次持续性重污染天气过程特征分析 [J]. *干旱气象*, 34 (5): 803–810. Duan Yunxia, Li Deqin, Tian Li, et al. 2016. Characteristic analysis of a continuous and serious pollution weather process in Shenyang [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 34 (5): 803–810, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-05-0803.

郭建侠, 卞林根, 戴永久. 2007. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO₂ 浓度及通量特征 [J]. *大气科学*, 31 (4): 695–707. Guo Jianxia, Bian Lingen, Dai Yongjiu. 2007. Measured CO₂ concentration and flux at 16 m height during corn growing period on the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (4): 695–707, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.14.

何建军, 吴琳, 毛洪钧, 等. 2016. 气象条件对河北廊坊城市空气质量的影响 [J]. *环境科学研究*, 29 (6): 791–799. He Jianjun, Wu Lin, Mao Hongjun, et al. 2016. Impacts of meteorological conditions on air quality in urban Langfang, Hebei Province [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 29 (6): 791–799, doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2016.06.02.

Högström U. 1988. Non-dimensional wind and temperature profiles in the atmospheric surface layer: A re-evaluation [J]. *Bound.-Layer Meteorol.*, 42 (1–2): 55–78, doi:10.1007/BF00119875.

刘俊丽. 2007. 塔科马 (Tacoma) 桥风振致毁 [J]. *力学与实践*, (1): 13. Liu Junli. 2007. The ruin of Tacoma by wind vibration [J]. *Mechanics in Engineering (in Chinese)*, (1): 13.

庞加斌, 宋丽莉, 林志兴, 等. 2006. 风的湍流特性两种分析方法的比较及其应用 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 34 (1): 27–32. Pang Jiabin, Song Lili, Lin Zhixing, et al. 2006. Comparison and application of two methods for analyzing the turbulence characteristics of wind [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 34 (1): 27–32, doi:10.3321/j.issn:0253-374X.2006.01.006.

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2013. 大气物理学 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社. 236–237. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2013. *Atmospheric Physics (in Chinese) [M]*. 2nd ed. Beijing: Peking University Press. 236–237

宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 2013. 天津大气能见度与相对湿度和 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 的关系 [J]. *气象与环境学报*, 29 (2): 34–41. Song Ming, Han Suqin, Zhang Min, et al. 2013. Relationship between visibility and relative humidity, PM₁₀, PM_{2.5} in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 29 (2): 34–41, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.02.006.

孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 2011. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 16 (6): 805–814. Sun Jiaren, Xu Zhencheng, Liu Yu, et al. 2011. Advances in the effect of climate change on air quality [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (6): 805–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.06.15.

王继志, 杨元琴, 周春红, 等. 2007. 雾霾低能见度天气分析与预测方法

- 研究 [C]/2007 年中国气象学会年会论文集. 广州: 中国气象学会.
- Wang Jizhi, Yang Yuanqin, Zhou Chunhong, et al. 2007. Research on analysis and prediction method of the fog and low visibility weather [C]/Annual Meeting of Chinese Meteorological Society (in Chinese). Guangzhou: Chinese Meteorological Society.
- 王林, 覃军, 陈正洪. 2011. 一次暴雪过程前后近地层物理量场特征分析 [J]. 大气科学学报, 34 (3): 305–311. Wang Lin, Qin Jun, Chen Zhenghong. 2011. A case study on the characteristics of the physical quantity fields on the near-surface layer during a snowstorm process[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 305–311, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.03.006.
- 王林, 覃军, 陈正洪, 等. 2010. 鄂东两次暴雨前后近地层物理量场异常特征分析 [J]. 气象, 36 (12): 28–34. Wang Lin, Qin Jun, Chen Zhenghong, et al. 2010. Study on the abnormal characteristics of physical quantity fields at the near surface layer for two rainstorm processes in Huangshi of eastern Hubei [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (12): 28–34, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.12.004.
- 王寅钧, 徐祥德, 赵天良, 等. 2015. 青藏高原东南缘边界层对流与湍能结构特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 45 (6): 843–855. Wang Yanjun, Xu Xiangde, Zhao Tianliang, et al. 2015. Structures of convection and turbulent kinetic energy in boundary layer over the southeastern edge of the Tibetan Plateau [J]. Science China: Earth Sciences, 58 (7): 1198–1209, doi:10.1007/s11430-015-5054-1.
- 谢真珍, 范秀莲, 王月林, 等. 2015. 淮安地区一次持续性雾霾过程阶段性特征及影响因子分析 [J]. 气象与环境学报, 31 (5): 79–85. Xie Zhenzhen, Fan Xiulian, Wang Yuelin, et al. 2015. Phase characteristics of a persistent fog and haze process and its influencing factors in Huaian area [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 31 (5): 79–85, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2015.05.011.
- Xu Y L, Zhan S. 2001. Field measurements of Di Wang Tower during Typhoon York [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89 (1): 73–93, doi:10.1016/S0167-6105(00)00029-5.
- 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 2005. 北京及周边地区雾形成的边界层特征 [J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 35 (S1): 73–83. Zhang Guangzhi, Bian Lingen, Wang Jizhi, et al. 2005. Boundary layer characteristics of fog formation in Beijing and its surrounding areas [J]. Science in china Ser. D Earth Science, 35 (S1): 73–83, doi:10.3969/j.issn.1674-7240.2005.z1.007.
- 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 等. 2016. 北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM2.5 变化特征对气象因素的响应 [J]. 环境科学, 37 (7): 2419–2427. Zhang Nan, Xiong Heigang, Ge Xiuxiu, et al. 2016. Response of human respiratory height PM2.5 variation characteristics to meteorological factors during winter haze days in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 37 (7): 2419–2427, doi:10.13227/j.hjcx.2016.07.002.
- Zhao D L, Ma X, Liu B, et al. 2013. Rainfall effect on wind waves and the turbulence beneath air–sea interface [J]. Acta Oceanologica Sinica, 32 (11): 10–20, doi:10.1007/s13131-013-0372-7.
- Zhu P, Zhang J A, Masters F J. 2010. Wavelet analyses of turbulence in the hurricane surface layer during landfalls [J]. J. Atmos. Sci., 67 (12): 3793–3805, doi:10.1175/2010JAS3437.1.