doi:10.11676/qxxb2015.032 气象学报

南京雾-霾天气个例湍流运动特征的对比研究*

李敏娜[1] 牛生杰[1,2] 张舒婷[1] 费冬冬[1]
LI Minna[1] NIU Shengjie[1,2] ZHANG Shuting[1] FEI Dongdong[1]

1. 南京信息工程大学大气物理学院,南京,210044
2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与协同创新中心,南京,210044
1. *School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*
2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *China*

2014-09-04 收稿,2015-01-07 改回.

李敏娜,牛生杰,张舒婷,费冬冬. 2015. 南京雾-霾天气个例湍流运动特征的对比研究. 气象学报, 73(3):593-608
Li Minna, Niu Shengjie, Zhang Shuting, Fei Dongdong. 2015. Comparative study of turbulent characteristics between the fog day and haze day in Nanjing. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3):593-608

Abstract Using the softwares such as Fortran, Matlab and Origin to deal with the turbulence and visibility data and draw figures the comparison of turbulent characteristics anong a haze process on 4 December 2013, a fog process from 7 to 9 December 2013 and a sunny day on 3 December 2013. The results show that the average speed of wind, the average kinetic energy, turbulence kinetic energy, turbulence intensity, friction velocity, momentum transfer, and heat transfer on both the haze day and sunny day illustrate an evident diurnal variation, while there was no obvious diurnal variation on the fog day. There were also differences among the value of the turbulence parameters on haze day, fog day and sunny day. The normalized variance of the three-dimensional (3D) winds (u, v and w) in the near-neutral stratification was almost constant on the haze day, fog day and sunny day; the normalized variance of 3D winds on the haze day is 3.15, 2.72 and 1.17 respectively; on the fog day it is 3.11, 2.45 and 1.25, respectively; on the sunny day it is 3.40, 3.45 and 1.50, respectively. The haze day and fog day's normalized variance of 3D winds, normalized turbulence kinetic energy and the ratio of horizontal moisture momentum vs. vertical moisture momentum meet the 1/3 law with the stability parameter in the unstable condition. The haze day, fog day and sunny day's normalized turbulence kinetic energy meet the 1/3 law with the stability parameter in both stable and unstable conditions. The haze day, fog day and sunny day's normalized variance of temperature and moisture meet the $-1/3$ law with the stability parameter in the unstable condition, and the haze day, fog day and sunny day's normalized variance of temperature meet the $-2/3$ law with the stability parameter in the stable condition. The fog day's normalized spectra of 3D winds fit better with the Kansas spectra than the haze day's and sunny day's. The haze day's peak frequency of 3D winds is about 0.01 Hz, the fog day's peak frequency of the u spectra is about 0.004 Hz, the fog day's peak frequency of the v/w spectra is about 0.1 Hz, and the sunny day's peak frequency of 3D winds is about 0.01 Hz. The conclusions are as follows: the boundary layer structure on the fog day is different from that on either the haze day or sunny day. The normalized variance of the wind, turbulence kinetic energy, temperature and humidity on the fog day, haze day and sunny day all meet the Monin-Obukhov similarity theory in the unstable condition. The fog day's normalized spectra of 3D winds accords better with the Monin-Obukhov isotropic theory than the haze day's and sunny day's. The haze day and sunny day include mainly the mechanical turbulence, while the fog day includes both the mechanical turbulence and thermal turbulence.

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41275151、41375138)。
作者简介:李敏娜,主要从事云雾降水物理学研究。E-mail:limn_nuist@163.com
通讯作者:牛生杰,主要从事云雾降水物理学研究。E-mail:niusj@nuist.edu.cn

Key words Fog, Haze, Turbulence, Statistical characteristic

摘 要 利用超声风速仪、能见度仪等探测资料,采用 Fortran、Matlab、Origin 等软件处理数据并绘图分析,对比了南京郊区 2013 年 12 月 4 日一次霾过程、2013 年 12 月 7—9 日一次雾过程和 2013 年 12 月 3 日一个晴天的湍流运动特征。结果表明,霾天和晴天平均水平风速、平均动能、湍流动能、湍流强度、摩擦速度、动量通量和热量通量都有明显的日变化,而这些参量在雾天没有明显的日变化,不同天气湍流参量大小有差异;霾、雾、晴天近中性层结下,u、v、w 三个方向风速归一化标准差近似为常数,霾天分别为 3.15、2.72、1.17,雾天分别为 3.11、2.45、1.25,晴天分别为 3.40、3.45、1.50;不稳定条件下霾、雾、晴天风速归一化标准差和湍流动能归一化标准差符合 1/3 幂次律,稳定条件下霾、雾、晴天无因次湍流动能均满足 1/3 幂次律;不稳定条件下霾、雾、晴天温度和湿度归一化标准差满足 −1/3 幂次律,稳定条件下霾、雾、晴天温度归一化标准差符合 −2/3 幂次律;雾天归一化 u、v、w 谱与 Kansas 谱吻合度比霾天和晴天高,霾天 u、v、w 谱峰值频率约为 0.01 Hz,雾天 u 谱峰值频率约为 0.004 Hz,v、w 谱峰值频率约为 0.1 Hz,晴天 u、v、w 谱峰值频率约为 0.01 Hz。得出结论:雾天的边界层结构与霾天和晴天有所不同;不稳定条件下霾、雾、晴天风速、湍流动能、温度、湿度归一化标准差均符合莫宁-奥布霍夫相似理论;雾天归一化 u、v、w 谱比霾天和晴天更加符合莫宁-奥布霍夫局地各向同性理论,且霾天和晴天以机械湍流为主,雾天既有机械湍流也有热力湍流。

关键词 雾,霾,湍流,统计特征

中图法分类号 P429

1 引 言

雾和霾是两种天气现象。根据气象学定义,雾是大量悬浮在近地面空气中的微小水滴或冰晶组成的气溶胶导致的低能见度现象(陆春松等,2011);霾是指大量极细微的干气溶胶粒子等均匀浮游在空中,造成能见度低于 10 km 的普遍浑浊现象(张小曳等,2013),霾不仅影响人类健康、污染大气,同时对全球能量平衡有着重要影响(Meng, et al, 2014; He, et al, 2014)。雾霾之间相互影响,当浓雾形成时,伴随逆温层的存在,大气稳定,霾粒子在逆温层下累积;霾粒子作为凝结核,为雾的形成提供了必要的物质条件(杨军等,2010)。同时,雾过程可增加气溶胶中的可溶性离子含量,增加大气中苯、甲苯、二甲苯、乙苯含量,对二次有机气溶胶形成有重要贡献,对气溶胶粒子的物理化学特征有重要影响(樊曙先等,2009,2010)。通过分析雾天、霾天的湍流运动特征有助于进一步分析雾天和霾天的形成机理。

一些学者讨论了雾天的湍流运动特征。吴彬贵等(2010,2013)针对天津城区的一次平流雾过程分析了平流雾湍流输送特征及湍流统计特征。Liu 等(2011)在对南京郊区一次辐射雾的研究中指出,在该次雾过程成熟阶段湍能明显增大,边界层呈近中性层结。吕晶晶等(2014)在对湛江一次海雾的分析中指出,雾成熟期湍流动能大幅度跃增主要是由雾顶辐射冷却产生的热力湍流和风切变引发的机械湍流增强所致。也有学者指出雾生消维持与湍流的影响有关。Zhou 等(2008)指出雾越浓,其所能承受的湍流强度越大。Rodhe(1962)分析了雾过程中热量和水汽的湍流输送以及平流雾和辐射雾的形成原因。Emmons 等(1947)指出,在雾形成时,热量和水汽的湍流输送有着相同的作用。赵丽娟(2012)分析了湍流强度对雾宏微观物理结构的影响,并结合临界湍流交换系数分析了湍流运动在雾生成、发展、成熟、消散过程中的作用,并发现湍流对雾宏微观结构的影响表现出明显的阈值特征,而雾宏微观物理结构的发展又会影响边界层中的湍流特征。

也有不少学者研究了沙尘天气的湍流特征。孙继明等(2002)比较分析了荒漠下垫面不同沙尘状况下的湍流动量通量、感热通量和潜热通量的日变化特征。彭珍等(2007)的研究表明,沙尘暴爆发时湍流动能、向下传输的动量及向上传输的感热也迅速增大。周悦等(2010)分析了半干旱地区的不同沙尘天气下近地层湍流通量的变化特征以及 PM_{10} 质量浓度与起沙之间的关系。刘辉志等(2002)针对北京 3 层湍流资料讨论了湍流宏观统计量等随稳定度的变化规律。周明煜等(2005)对比分析了北京城市大气边界层低层不同高度的风、温度和湿度梯度资料、大气湍流和大气化学观测系统资料,综合分析获取了无因次速度、温度湍流方差和湍流通量、湍能分布

特征。

另有一些学者分析了不同天气或不同下垫面的湍流运动特征。Niu 等(2012)针对南京北郊的不同天气,分析了不同稳定度条件下三维风速的湍流振荡情况,认为不同稳定度条件下无因次风速分量方差和无因次湍流动能都符合 1/3 幂次律;近中性层结下的水平无因次风速分量和无因次湍流动能是雾天>晴天>阴天>多云天,垂直无因次风速分量方差和无因次湍流动能的 4 种天气比较则与上述相反;温度归一化标准差在不稳定层结下与 z/L(z 为观测高度,L 为莫宁-奥布霍夫长度)的关系满足 -1/3幂次律,稳定层结下则满足 -2/3 幂次律。张宏升等(2004)利用戈壁、草原、郊区和城郊等不同下垫面的湍流观测资料,研究了不同下垫面的湍流统计特征,结果表明,三维风速归一化标准差与 z/L 成 1/3 幂次关系;水平方向速度归一化标准差随地面粗糙度的增大而降低,垂直方向的速度、温度和湿度没有明显差异。

然而,受观测资料所限,有关雾、霾天气湍流特征的对比研究尚少。近年来随着雾、霾天气增多,有必要加强雾、霾天气湍流特征的对比研究,以进一步揭示雾、霾天气的形成机理。本研究以 2013 年冬季中国南京郊区(南京信息工程大学观测场)雾、霾综合观测实验为例,利用超声风速仪、能见度仪等探测资料,对比分析南京霾、雾、晴天的湍流运动特征。

2 资料选取及处理

2.1 仪器介绍

观测采用 CSAT3 超声风速仪(Compbell,美国),可测量 u、v、w 三维风速分量和声速 c,并由此计算出声学虚温 T_v。水平方向和垂直方向风速分量的测量误差分别小于 ±0.04 和 ±0.02 m/s。仪器采样频率设置为 10 Hz。能见度采用英国 Biral 公司生产的 VPF-730 能见度仪观测,每隔 30 s 观测一个数据。

2.2 观测时间、地点及数据处理

本研究观测地点在南京信息工程大学(32°12′N,118°42′E),位于中国南京北郊,距离市区约20 km,观测点下垫面为草地,周围林木稀疏、建筑物较少,站点地理位置和下垫面特征反映郊区地表的典型特点,属于郊区下垫面。观测时间为 2013 年 12 月 1—31 日。选取一次霾过程(2013 年 12 月 4 日)、一次雾过程(2013 年 12 月 7 日 18 时 35 分—9 日 09 时)(北京时,下同)和一个晴天(2013 年 12 月 3 日)进行对比分析。

参考 Vickers 等(1997)的方法对湍流资料进行处理,主要包括剔除野点、质量控制、平面拟合、阻尼损失校正和 Webb 校正等步骤。湍流统计特征量主要有:

三维风速脉动量

$$\begin{cases} u' = u - \overline{u} \\ v' = v - \overline{v} \\ w' = w - \overline{w} \end{cases} \tag{1}$$

摩擦速度

$$u_*^2 = (\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2)^{1/2} \tag{2}$$

莫宁-奥布霍夫长度

$$L = \frac{-u_*^3}{\kappa \frac{g}{T} \overline{w'T'}} \tag{3}$$

风速脉动标准差

$$\begin{cases} \sigma_u = \sqrt{\overline{u'u'}} \\ \sigma_v = \sqrt{\overline{v'v'}} \\ \sigma_w = \sqrt{\overline{w'w'}} \end{cases} \tag{4}$$

温度脉动

$$\sigma_T = \sqrt{\overline{T'T'}} \tag{5}$$

湿度脉动

$$\sigma_q = \sqrt{\overline{q'q'}} \tag{6}$$

风速归一化标准差

$$\begin{cases} \varphi_u = \sigma_u / u_* \\ \varphi_v = \sigma_v / u_* \\ \varphi_w = \sigma_w / u_* \end{cases} \tag{7}$$

特征温度

$$T_* = -\overline{w'T'}/u_* \tag{8}$$

特征湿度

$$q_* = -\overline{w'q'}/u_* \tag{9}$$

温度归一化标准差

$$\varphi_T = \sigma_T / T_* \tag{10}$$

湿度归一化标准差

$$\varphi_q = \sigma_q / q_* \tag{11}$$

湍流强度

$$\begin{cases} I_u = \sigma_u / \overline{U} \\ I_v = \sigma_v / \overline{U} \\ I_w = \sigma_w / \overline{U} \end{cases} \tag{12}$$

湍流动能

$$E_{\mathrm{TK}} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2) \tag{13}$$

平均动能

$$\overline{E} = \frac{1}{2}(\overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2) \tag{14}$$

动量通量

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \tag{15}$$

感热通量

$$H = \rho c_p \overline{w'T'} \tag{16}$$

潜热通量

$$Q = L_v \rho \overline{w'q'} \tag{17}$$

鲍恩比

$$\beta = H/Q \tag{18}$$

式中，u、v、w 分别为三维风瞬时值(m/s)，$\overline{u}$、$\overline{v}$、$\overline{w}$ 分别为三维风平均值(m/s)，ρ 为空气密度(1.194 kg/m^3)，T 为温度(K，由超声风速仪测得的温度订正而成)，q 为比湿(g/g)，κ 为卡曼常数(0.4)；g 为重力加速度(9.8 m/s^2)；$\overline{U}$ 为平均水平风速(m/s)；c_p 为定压比热容(J/(kg·K))；L_V 为水汽的汽化热(J/kg)。

3 结果分析

3.1 雾、霾过程概述

2013 年 12 月 4 日霾过程期间(以下简称霾天)平均气温 8.58℃，平均相对湿度 75.14%，平均风速 0.34 m/s，平均能见度 0.90 km，风向以偏西北为主，观测点 500 hPa 上逐渐从槽底移至脊前，处于稳定的下沉运动区。2013 年 12 月 7 日 18 时 35 分—9 日 09 时雾过程(以下简称雾天)发生时平均相对湿度 94.98%，平均风速 1.05 m/s，平均气温 5.87℃，平均能见度为 0.33 km。7 日 08 时之后，500 hPa 上观测点南京受上游槽控制，风速增大至 8 级，暖平流明显。8 日 08 时—9 日 08 时，南京正处于槽的底前部，风向由西北转为西南，风速明显增大。2013 年 12 月 3 日为晴天(以下简称晴天)，没有出现雾、霾现象，平均气温 10.77 ℃，平均相对湿度 49.32%，平均风速 0.55 m/s，平均能见度 4.06 km，风向以偏北为主，500 hPa 上观测点南京处于逐渐增强的上升运动区。晴天用于与霾天和雾天的对比研究。

3.2 近地层湍流参量的演变特征

湍流是雾、霾生成和发展过程中不可忽视的因子之一，研究雾、霾过程中的湍流变化过程能有效揭示湍流运动对雾、霾形成的影响。

图 1、2、3 分别为霾、雾、晴天湍流参量随时间的演变。图 1a、2a、3a 分别为 3 种天气能见度的变化，可以看出，霾天除了 10—16 时能见度大于 1 km 外，其余时段能见度均小于 1 km；雾天能见度小于 1 km，且在 12 月 8 日 03—10 时和 12 月 8 日 18—9 日 02 时能见度小于 0.1 km，出现两次雾爆发性发展过程；晴天 00—16 时能见度大于 4 km，16 时以后能见度下降但仍大于 1 km。

图 1b、c，2b、c，3b、c 分别为 3 种天气水平平均风速($\overline{u}$)、平均动能($\overline{E}$)、湍流动能(E_{TK})的演变。3 种天气 $\overline{u}$ 与 $\overline{E}$ 的变化趋势一致，即 $\overline{u}$ 最大的时候也是湍流输送最强烈的时候。霾天 $\overline{u}$ 在正午达到峰值 1.2 m/s，雾天在雾消散阶段，由于天气系统的变化 $\overline{u}$ 达到峰值 3 m/s，晴天全天 $\overline{u}$ 波动较大，与其层结不稳定有关。E_{TK} 表征湍流扩散能力的强弱。雾、霾、晴天 E_{TK} 均小于 $\overline{E}$，两者变化趋势相似但不完全一致。霾天和晴天 E_{TK} 白天较大，夜间较小。雾天在雾发展成熟阶段(12 月 7 日 18 时—9 日 00 时)E_{TK} 和 $\overline{E}$ 的变化很小，与刘熙明等(2010)的研究结果类似。Liu 等(2011)也指出，E_{TK}、$\overline{E}$ 的减小有助于雾的加强。

图 1d、e，2d、e，3d、e 分别是霾、雾、晴天三维方向的湍流强度(I_u、I_v、I_w)和摩擦速度 u_* 的演变。霾、晴天湍流强度(I_u、I_v、I_w)和 u_* 的变化趋势一致；而雾天在发展和成熟阶段(12 月 7 日 18 时—9 日 0 时)湍流强度和摩擦速度的变化较一致，消散阶段(12 月 9 日 00 时—09 时)不一致。u_* 受风速、地表状况和粗糙度的影响，表示近地面雷诺应力大小，是表征空气运动性质的一个重要参量，u_* 越大，则机械湍流越强(缪启龙等，2010)。霾、晴天 I_u、I_v、I_w 和 u_* 具有日变化特征，湍流强度垂直方向比水平方

向明显,日出后湍流开始发展,日落后湍流发展受到抑制。白天大气近地层处于不稳定状态,对流比较旺盛,使得影响摩擦速度变化的因子 $u'w'$ 和 $v'w'$ 较大;夜间,近地层处于稳定状态,对流减弱,$u'w'$ 和 $v'w'$ 明显减小,故而摩擦速度减小。雾天没有明显的日变化,可能是因为雾天的近地层大气层结状态与晴天的层结特征有差异,雾的存在改变了大气原有的层结结构,这一点已被多次验证(张光智等,2005;吴彬贵等,2010),由此表现为雾天的湍流参量演变特征与霾、晴天的情况有所不同。E_{TK}、$\overline{E}$ 与 I_u、I_v、I_w 的发展趋势不完全一致;苏红兵等(1994)认为,这是因为 E_{TK} 只取决于速度的方差,而湍流强度取决于速度方差和平均风速,而往往平均风速变化幅度比速度方差大得多。雾天 $\overline{u}$、u_*、E_{TK}、$\overline{E}$ 从12月9日00时起明显增大,这是因为天气背景发生了变化,观测点由槽前转为槽后。

图1f、2f、3f分别为霾、雾、晴天稳定度参数 z/L 随时间的演变。霾天04—15时以近中性层结为主,其余时段有较大波动且以稳定层结为主;雾天 z/L 在形成初期(12月7日18时—8日02时)以弱不稳定层结为主,第1次爆发性增长时(12月8日02—12时)在稳定和不稳定层结间频繁转换,第2次爆

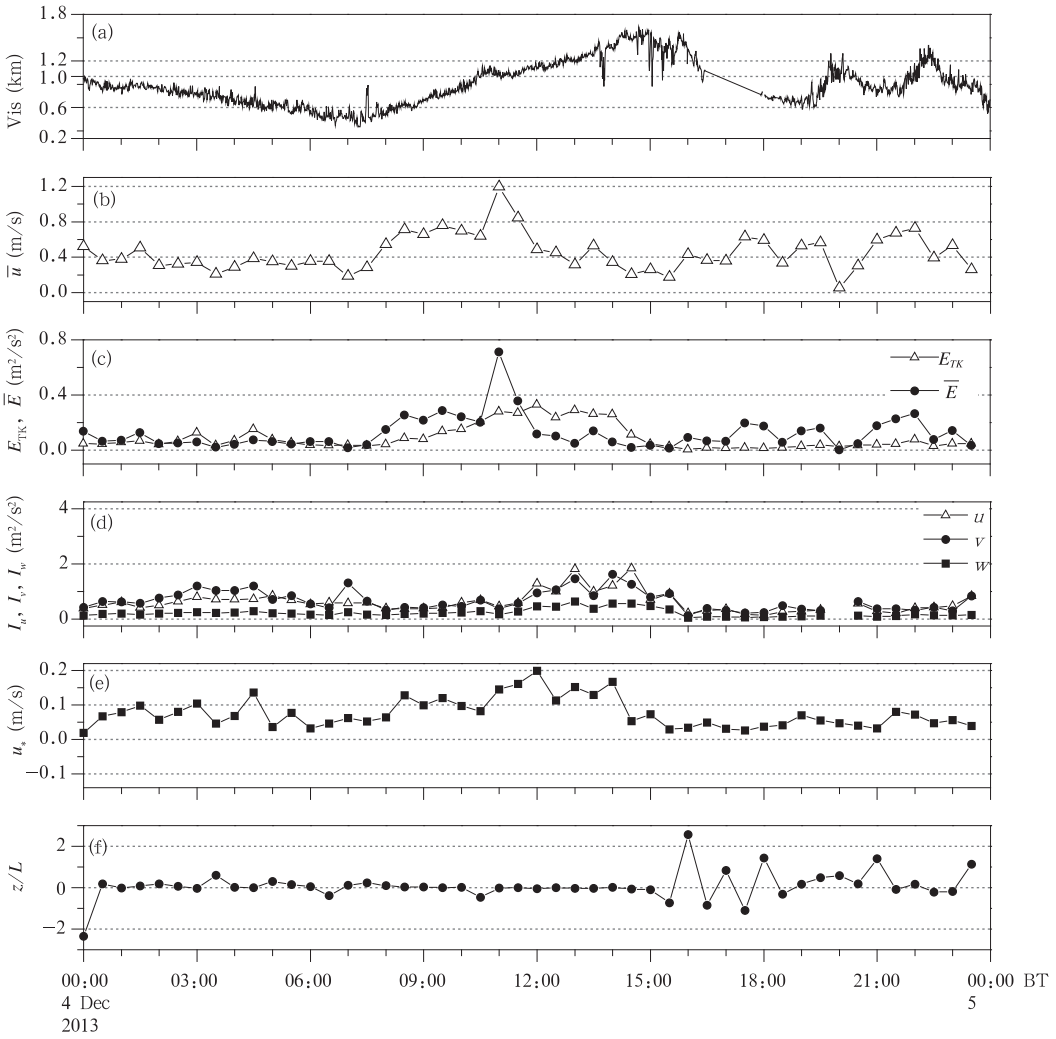


图1 2013年12月4日霾天的能见度(a)、水平平均风速(b)、湍流动能和动能(c)、湍流强度(d)、摩擦速度(e)和稳定度参数(f)随时间的演变

Fig. 1 Changes in the haze day turbulence parameters on 4 December 2013

(a. visibility, b. mean horizontal wind speed, c. turbulence kinetic energy and kinetic energy, d. turbulence intensity, e. friction velocity, f. stability parameter)

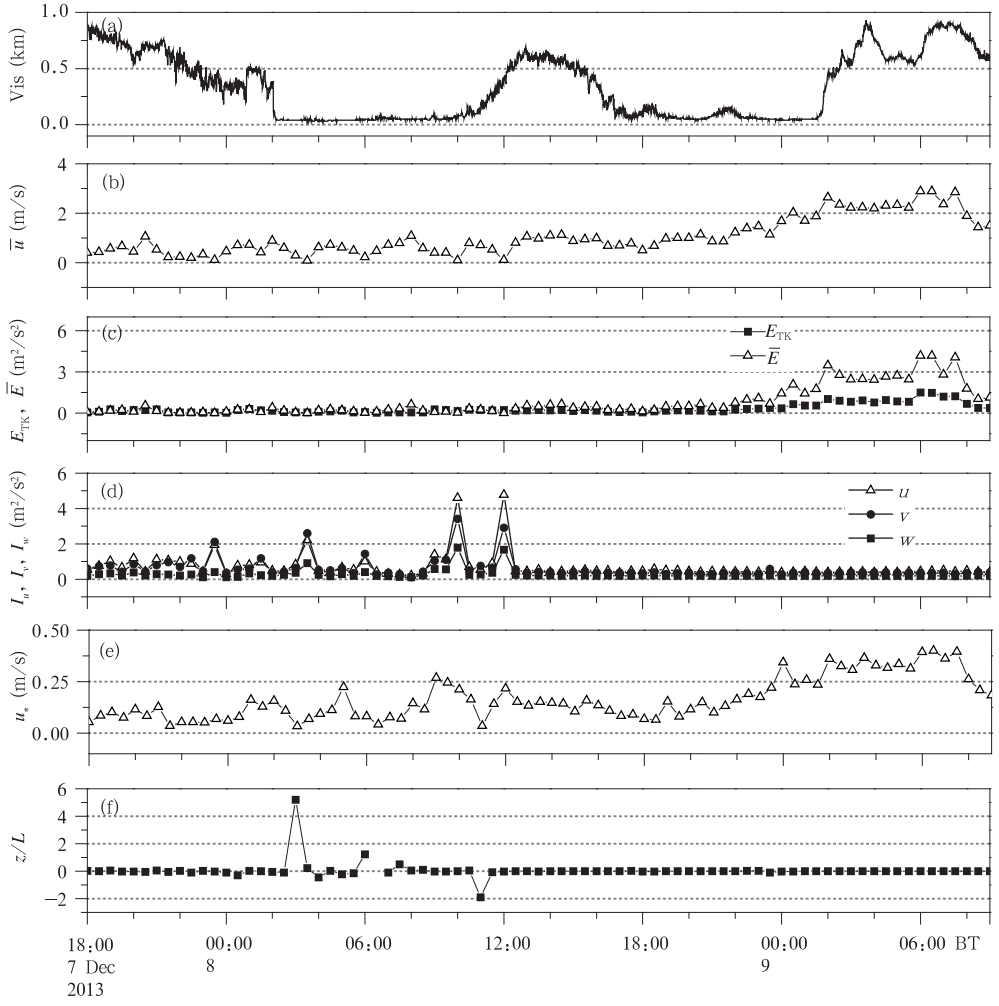


图 2 2013 年 12 月 7—9 日雾天的能见度(a)、水平平均风速(b)、湍流动能和动能(c)、湍流强度(d)、摩擦速度(e)和稳定度参数(f)随时间的演变

Fig. 2 Changes in the fog day turbulence parameters from 7 to 9 December 2013 (a. visibility, b. mean horizontal wind speed, c. turbulence kinetic energy and kinetic energy, d. turbulence intensity, e. friction velocity, f. stability parameter)

发性增长时(12 月 8 日 18 时—9 日 02 时)以弱不稳定层结为主,消散阶段以近中性层结为主;晴天 04—15 时以近中性层结为主,其余时段有波动且以不稳定层结为主。霾、雾、晴天边界层结构不同,与天气系统有关。

图 4 和 5 分别是霾天、晴天和雾天动量通量(τ)、感热通量(H)、潜热通量(Q)和鲍恩比(β)随时间的演变。可见,霾天动量以向上输送为主,而晴天以向下输送为主;两者均在白天(06—18 时)有较大波动。而雾天则没有明显的日变化,只在雾消散阶段明显增大且动量向下输送。H 是由于湍流运动从地面向大气传输的热量通量;霾、晴天均是正午较大,峰值分别为 17 和 50 W/m^2,霾天由于大量气溶胶的存在减少了地面净辐射,峰值较小。除了正午时段外,霾、晴天 H 均在 0 附近波动,这可能是由于日落后及日出前大气层结稳定及夜间逆温层的出现。Q 是由于水汽相变向大气传输的热量,大小取决于土壤含水量、植被覆盖率及近地层风温湿梯度(周悦等,2010)。霾天和晴天除能见度较高时段(07—15 时)Q 为正外,其余时段均接近于 0 W/m^2。也有学者发现感热和潜热通量的日变化较明显(胡非等,2006;缪启龙等,2008)。总体而言,霾天 Q 小于晴天,其原因可能是气溶胶粒子对太阳辐射具有散射和反射作用,入射短波辐射减少,导致近地面温

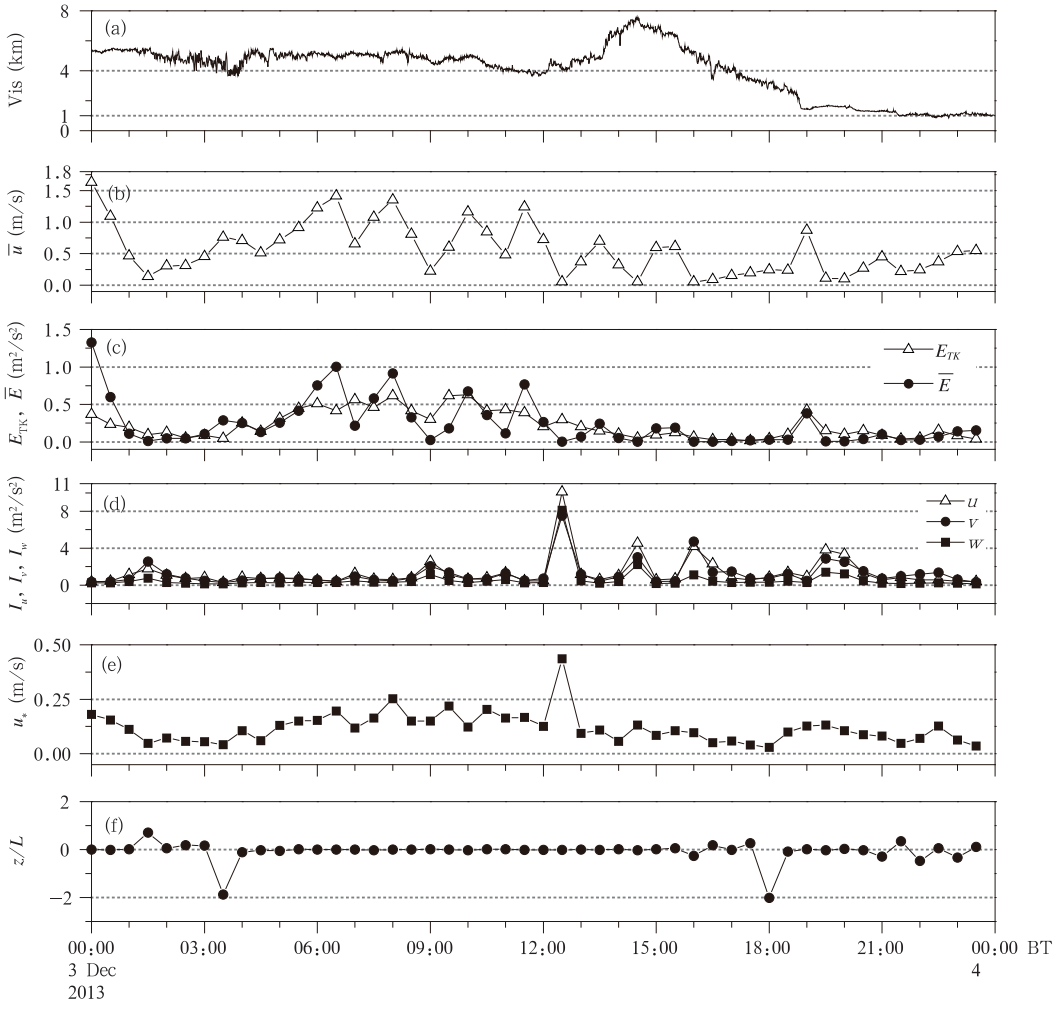


图 3　2013 年 12 月 3 日晴天的能见度(a)、水平平均风速(b)、湍流动能和动能(c)、湍流强度(d)、摩擦速度(e)和稳定度参数(f)随时间的演变

Fig. 3　As in Fig. 2 but for the sunny day turbulence parameters on 3 December 2013

度较低。雾天 H、Q 没有明显的日变化特征,仅在第 1 次爆发性发展时(12 月 8 日 05—11 时)和消散阶段(12 月 9 日 00—04 时)出现较大波动,其余时段 H、Q 变化较小。雾滴凝结释放潜热使 H 趋于 0,强热力混合作用会使雾层的热力性质趋于一致,湍流活动减弱,其结果一方面使向下的动量输送减弱,风速减小,另一方面也使热量输送减弱,气温变化减小。

表 1 列出了霾、雾、晴天湍流参量的平均值对比情况。$\overline{u}$、E_{TK}、$\overline{E}$、u_* 均为雾天>晴天>霾天,这可能是因为雾天天气系统不稳定且风速较大,而霾天天气系统较稳定且风速较小。I_u、I_v、I_w 则是晴天较大,雾、霾天较小,因为湍流强度取决于速度方差和平均风速,且平均风速变化幅度大于速度方差,所以 3 种天气的湍流强度与湍流动能大小关系不一致。综观全天情况,霾天和晴天以近中性层结为主,而雾天以弱不稳定层结为主。霾、雾、晴天平均动量向下输送,且雾天平均动量输送比霾、晴天大一个量级,表明雾天动量交换更剧烈。雾、晴天感热向上输送,而霾天感热向下输送,这可能是因为晴天气溶胶粒子少,太阳可以直接加热地表,雾天天气系统不太稳定,霾天天气系统较稳定。晴天潜热输送最大,霾天次之,雾天最小,表明晴天水汽输送最强,雾天虽然水汽丰富但是输送较少。从鲍恩比(β)来看,3 种天气的感热输送均大于潜热输送。

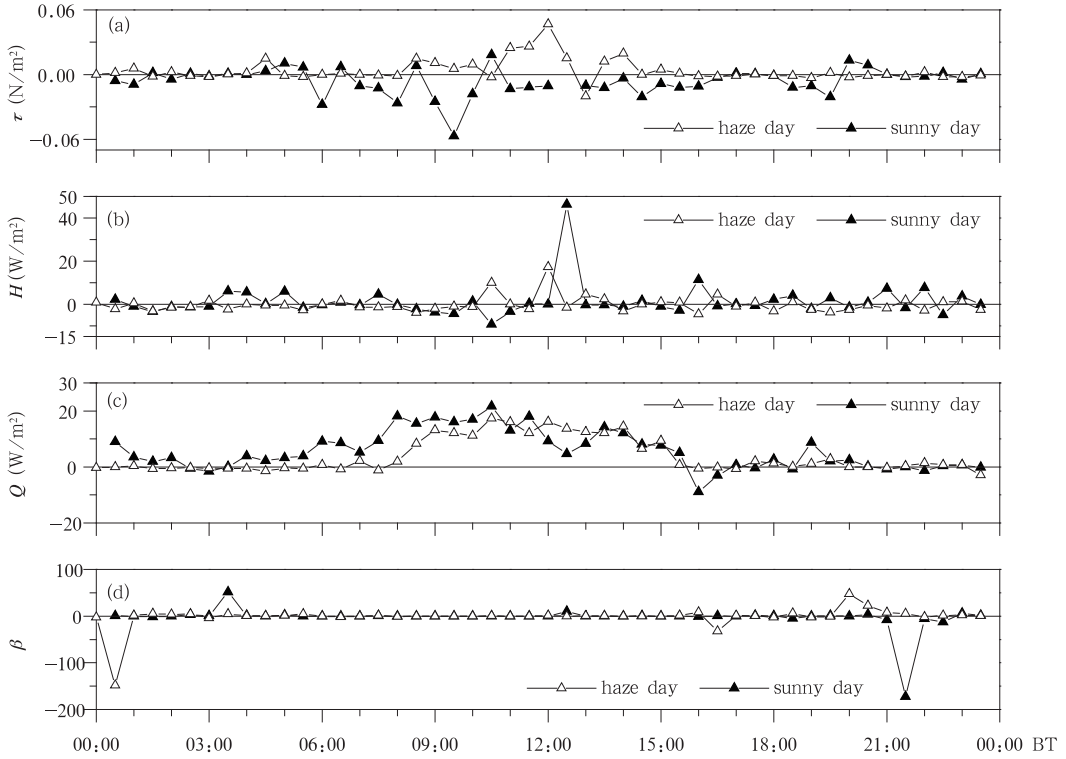


图 4 2013 年 12 月 4 日霾天和 2013 年 12 月 3 日晴天的动量通量(a)、感热通量(b)、潜热通量(c)和鲍恩比(d)随时间的演变

Fig. 4 Changes in the turbulence parameters in the haze day on 4 December 2013 and the sunny day on 3 December 2013 (a. momentum flux, b. sensible heat flux, c. latent heat flux, d. Bowen ratio)

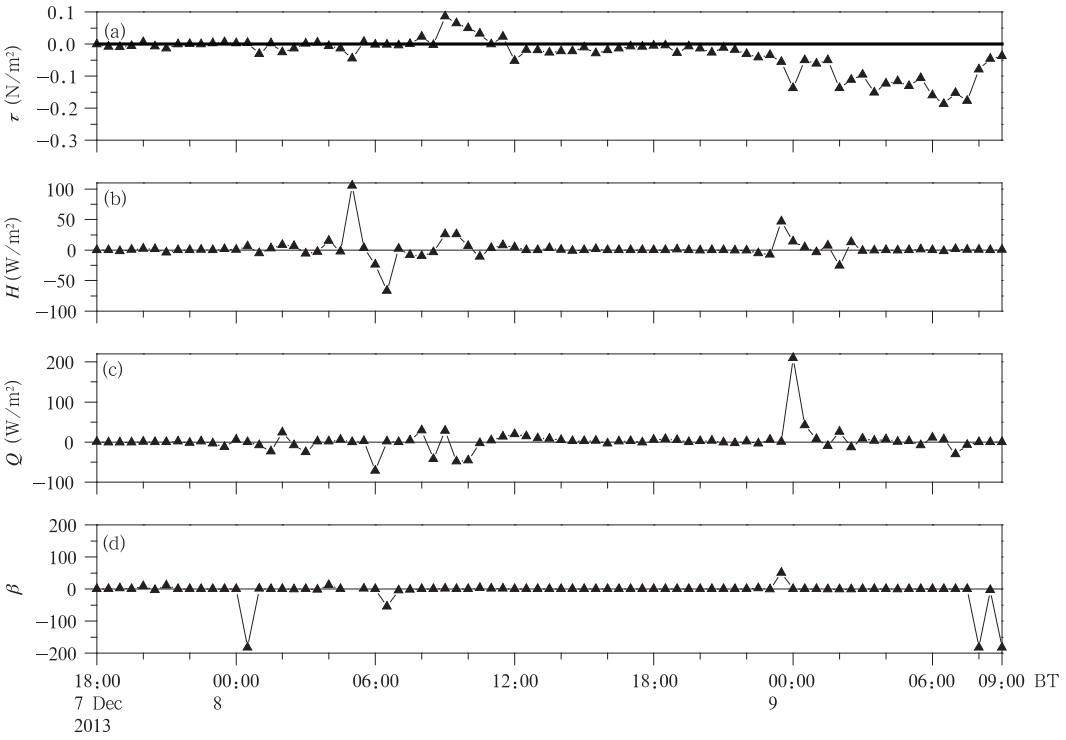


图 5 2013 年 12 月 7—9 日雾天的动量通量(a)、感热通量(b)、潜热通量(c)和鲍恩比(d)随时间的演变

Fig. 5 As in Fig. 4 but for the fog day turbulence parameters from 7 to 9 December 2013

表 1 霾天、雾天、晴天湍流参量的平均值对比
Table 1 Comparison of the mean turbulence parameters among haze day, fog day and sunny day

	霾天	雾天	晴天
$\overline{u}$(m/s)	0.45	1.04	0.57
E_{TK}(m^2/s^2)	0.09	0.32	0.23
E (m^2/s^2)	0.12	0.82	0.24
I_u	0.68	0.69	1.30
I_v	0.70	0.60	1.18
I_w	0.23	0.27	0.58
u_*(m/s)	0.076	0.16	0.12
z/L	0.086	0.31	−0.073
τ (N/m^2)	−0.0035	−0.0320	−0.0016
H (W/m^2)	−0.21	1.63	1.29
Q (W/m^2)	3.75	2.15	5.83
β	−1.40	−6.82	−2.67

3.3 湍流统计特征

下面具体分析湍流风速、湍流动能、温度、湿度的统计特征(霾、雾、晴天资料是根据能见度选取的)。

3.3.1 风速湍流统计特征

在中性情况下,近地层湍流主要由机械湍流生成,几乎没有热力作用,三维方向风速归一化标准差 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 在近中性层结条件下近似为常数(岳平等,2011)。表 2 对比了此次霾、雾、晴天以及其他文献中近中性条件下 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 的值。可见,晴天 σ_u/u_*、σ_v/u_* 最大,霾天次之,雾天最小;而 σ_w/u_* 则是晴天>雾天>霾天,这可能与近地层大气的非均匀性有关。相较于其他城市、不同下垫面的观测值,此次观测的 σ_u/u_*、σ_v/u_* 值偏大,σ_w/u_* 值与其他观测值相当。其原因主要在于水平方向上涡旋尺度较大,受复杂下垫面影响较大,适应水平方向下垫面的变化较慢,而垂直方向涡旋较小,受复杂下垫面的影响较小(陈继伟等,2014)。

表 2 不同测站近中性层结下 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 值的对比
Table 2 Comparison among σ_u/u_*, σ_v/u_* and σ_w/u_* under the near-neutral stratification at the different observation stations

测站	σ_u/u_*	σ_v/u_*	σ_w/u_*
南京郊区霾天(2 m)(本研究)	3.15	2.72	1.17
南京郊区雾天(2 m)(本研究)	3.11	2.45	1.25
南京郊区晴天(2 m)(本研究)	3.40	3.45	1.50
南京(郊区 2 m)(Niu,et al,2012)	3.73	3.49	1.62
南京城市(50 m)(陈铭夏等,2000)	2.16	1.62	1.28
广州城市(35 m)(徐玉貌等,1993)	2.32	1.89	1.47
北京铁塔(47 m)(周明煜等,2005)	1.73	1.50	1.40
Sublette,KS(平原)(Mahrt,1998)	2.45	1.90	1.25
Erie,CO(起伏地形)(Mahrt,1998)	2.65	2.00	1.20
Mountain(起伏地形)(Mahrt,1998)	3.50	3.80	1.24

当近地层不稳定达到对流状态时,浮力将成为控制湍流脉动及相应动量传输的主要因子(岳平等,2011)。根据莫宁-奥布霍夫相似理论,近地面大气层不稳定时,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 与 z/L 符合 1/3 幂次律。图 6 为稳定层结和不稳定层结下霾、雾、晴天 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 随 z/L 的变化情况。

霾天拟合曲线为

$$\begin{cases}\sigma_u/u_* = 3.15(1-4.73z/L)^{1/3}\\ \sigma_v/u_* = 2.72(1-10.35z/L)^{1/3}\\ \sigma_w/u_* = 1.17(1-3.37z/L)^{1/3}\end{cases} \quad (19)$$

雾天拟合曲线为

$$\begin{cases}\sigma_u/u_* = 3.11(1-8.90z/L)^{1/3}\\ \sigma_v/u_* = 2.45(1-31.02z/L)^{1/3}\\ \sigma_w/u_* = 1.25(1-11.51z/L)^{1/3}\end{cases} \quad (20)$$

晴天拟合曲线为

$$\begin{cases}\sigma_u/u_* = 3.40(1-1.62z/L)^{1/3}\\ \sigma_v/u_* = 3.45(1-1.46z/L)^{1/3}\\ \sigma_w/u_* = 1.50(1-0.64z/L)^{1/3}\end{cases} \quad (21)$$

图 6a、c、e 中黑线为 Panofsky 等(1977)给出的曲线

$$\begin{cases}\sigma_{u,v}/u_* = 2.30(1-0.22z/L)^{1/3}\\ \sigma_w/u_* = 1.25(1-3.0z/L)^{1/3}\end{cases} \quad (22)$$

由图 6a、c、e 可见,不稳定层结下,霾、雾、晴天 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 均表现为随不稳定度的增大而增大,尤其在 $-z/L>0.1$ 时。$-z/L<0.1$ 时,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 变化较小。即 $-z/L>0.1$ 时,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 基本满足 1/3 幂次律。Roth (1993)在加拿大温哥华的观测结果表明,当 $z/L<-0.6$ 时,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 基本满足 1/3 幂次

律;而在北京的 325 m 气象塔的 47 m 观测结果(周明煜等,2005)表明,在 $z/L<-1$ 时,σ_w/u_* 基本满足 1/3 幂次律。且 σ_w/u_* 与图中黑线的吻合情况比 σ_u/u_*、σ_v/u_* 好,这可能是因为垂直方向涡旋比水平方向涡旋小,受复杂下垫面的影响也小。雾、霾天拟合曲线的相关性最好,晴天最差。总之,3 种天气 σ_v/u_* 与 z/L 的相关性最好。晴天 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 比雾、霾天大,表明晴天风速脉动较大。Panofsky 等(1984)认为,稳定层结下,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 近似为常数。由图 6b、d、f 可见,稳定层结下,σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 随 z/L 的增大表现有增大趋势,但是增大趋势不明显,可能是由于稳定层结时湍流高频段受到抑制而间歇湍流、重力波等起主导作用所致。目前对稳定层结下湍流运动的认识还不十分充分,有待进一步研究(周明煜等,2000)。

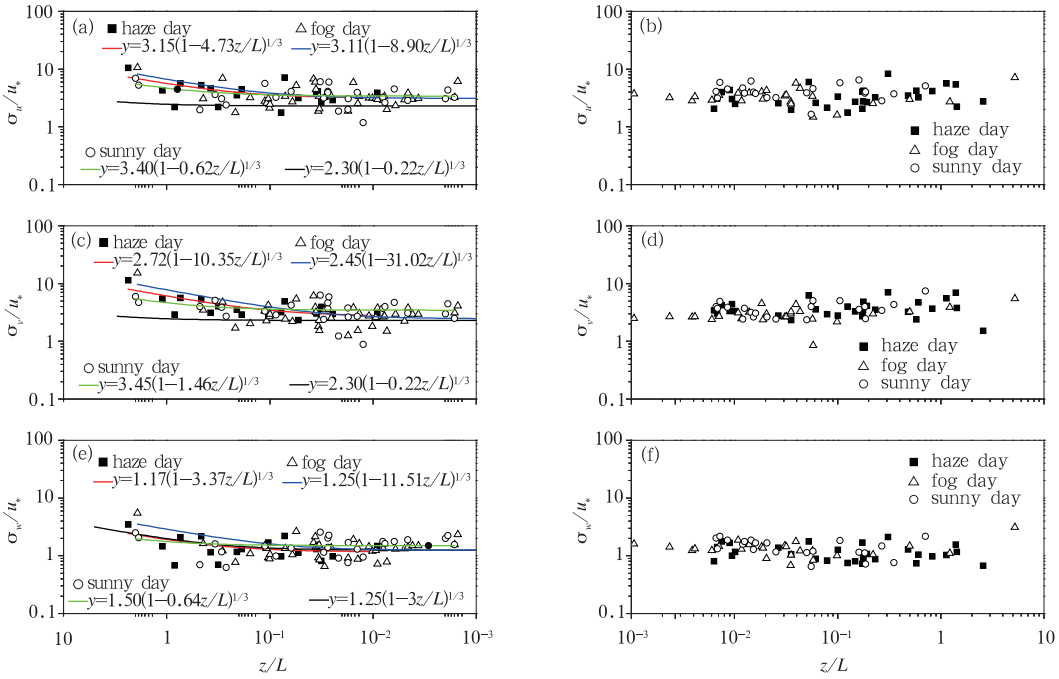


图 6 霾、雾、晴天中 u、v、w 方向的风速归一化标准差(σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_*)随 z/L 的变化

(a、c、e. 不稳定层结,b、d、f. 稳定层结)

Fig. 6 σ_u/u_*, σ_v/u_* and σ_w/u_* as a function of the stability (z/L) during the haze-day, fog-day and sunny day

(a, c, e. unstable stratification; b, d, f. stable stratification)

3.3.2 湍流动能归一化标准差

图 7 为霾、雾、晴天不同稳定度条件下湍流动能归一化标准差 E_{TK}/u_*^2 随 z/L 的变化。可见在不稳定条件下(图 7a),随着 $|z/L|$ 减小,霾、雾、晴天 E_{TK}/u_*^2 均有减小趋势,但三者拟合曲线差异较大。霾天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = -18.05(1+237.02z/L)^{1/3}$,雾天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = 18.17(1-713.09z/L)^{1/3}$,晴天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = 14.36(1-4.81z/L)^{1/3}$。雾、霾、晴天 E_{TK}/u_*^2 随着 $|z/L|$ 减小,雾天、霾天减小幅度较大,而晴天则减小幅度较小,尤其在 $|z/L|<0.1$ 时。雾天湍流动能大于霾天。而在稳定条件下(图 7b),随着稳定度的增大,霾、雾、晴天 E_{TK}/u_*^2 均有增大趋势。霾天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = 13.62(1+1.67z/L)^{1/3}$,雾天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = 10.43(1+1.25z/L)^{1/3}$,晴天拟合曲线为 $E_{TK}/u_*^2 = 17.61(1+4.17z/L)^{1/3}$。霾天拟合曲线介于晴天和雾天之间。不稳定层结下 3 种天气拟合曲线的相关性比稳定层结好,即不稳定层结下,E_{TK}/u_*^2 与 z/L 的关系更加符合 1/3 幂次律。这与 Niu 等(2012)的结论一致,即稳定和不稳定条件下,E_{TK}/u_*^2 基本满足 1/3 幂次律,但是拟合方程有所区别。

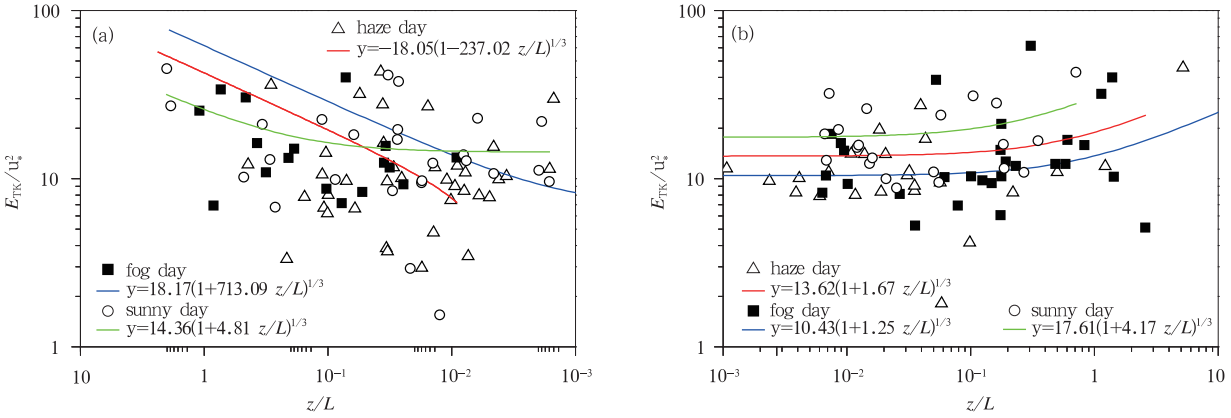


图 7 霾、雾、晴天中湍流动能归一化标准差(E_{TK}/u_*^2)随 z/L 的变化(a. 不稳定层结,b. 稳定层结)

Fig. 7 E_{TK}/u_*^2 as a function of the stability (z/L) during the haze day, fog day and sunny day (a. unstable stratification, b. stable stratification)

3.3.3 温度湍流统计特征

图 8 为霾、雾、晴天温度归一化标准差($|\sigma_T/T_*|$)及水平热量通量和垂直热量通量之比($|\overline{u'T'}/\overline{w'T'}|$)随 z/L 的变化。图 8a 中虚线表示 Wyngaard 等(1971)在自由对流($z/L>1$)条件下给出的表达式 $|\sigma_T/T_*|=C(-z/L)^{-1/3}$。在美国堪萨

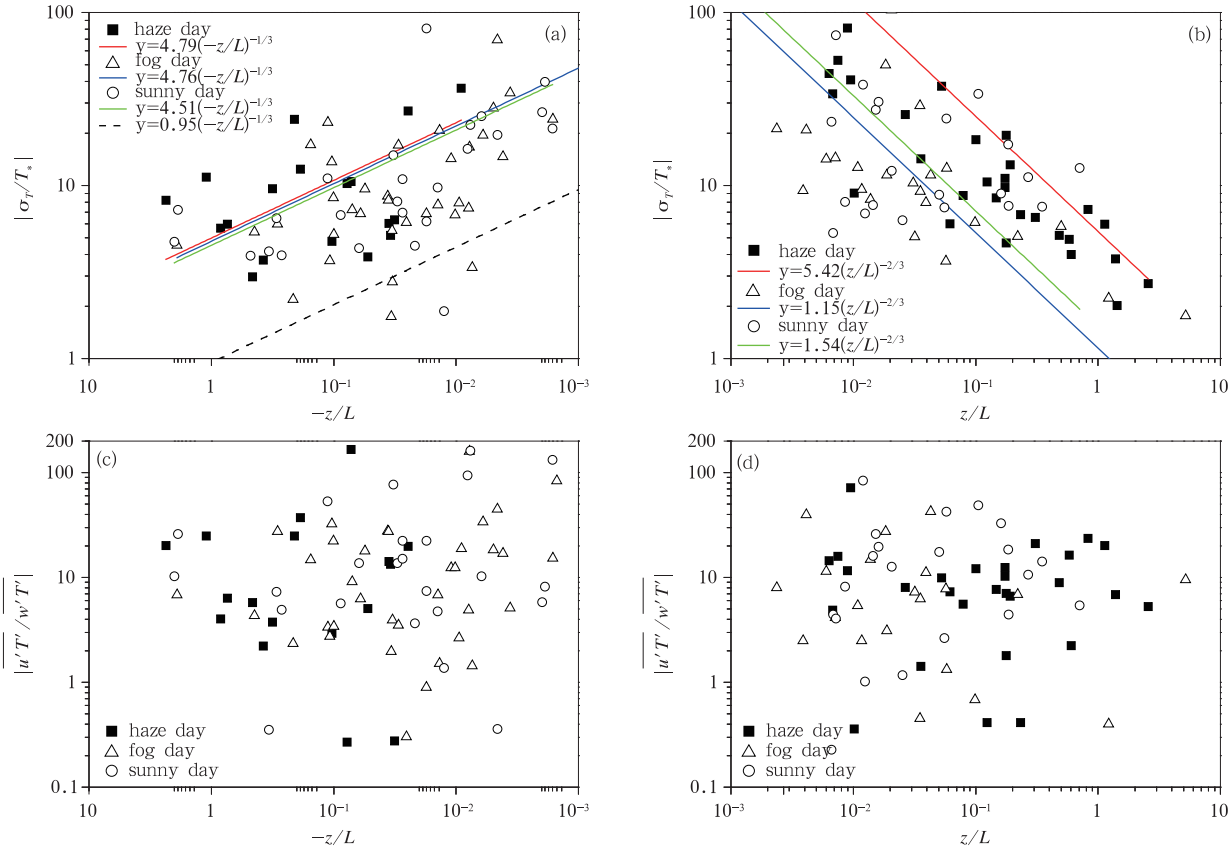


图 8 霾、雾、晴天温度归一化标准差($|\sigma_T/T_*|$)(a、b)及水平热量通量与垂直热量通量之比($|\overline{u'T'}/\overline{w'T'}|$)(c、d)随 z/L 的变化(a、c. 不稳定层结,b、d. 稳定层结)

Fig. 8 $|\sigma_T/T_*|$ (a, b) and $|\overline{u'T'}/\overline{w'T'}|$ (c, d) as a function of the stability (z/L) during the haze day, fog day and sunny day (a,c. unstable stratification; b,d. stable stratification)

斯草原下垫面条件下 $C=0.95$。霾、雾、晴天 $|\sigma_T/T_*|$ 基本大于该曲线。因为本研究观测点位于郊区,下垫面不同,所以,拟合曲线差异较大。霾、雾、晴天 $|\sigma_T/T_*|$ 随 z/L 变化的拟合曲线分别为

$$\begin{cases} |\sigma_T/T_*| = 4.97(-z/L)^{-1/3} \\ |\sigma_T/T_*| = 4.76(-z/L)^{-1/3} \\ |\sigma_T/T_*| = 4.51(-z/L)^{-1/3} \end{cases} \quad (23)$$

3 条拟合曲线差异不大,说明在不稳定层结下,霾、雾、晴天 $|\sigma_T/T_*|$ 随 z/L 的变化类似,随 $|z/L|$ 增大,$|\sigma_T/T_*|$ 减小;但是霾天拟合曲线的相关性比雾天、晴天强,表明霾天 $|\sigma_T/T_*|$ 随 z/L 的变化更加符合 1/3 幂次律。图 8b 为稳定层结下霾、雾、晴天 $|\sigma_T/T_*|$ 随 z/L 的变化。霾、雾、晴天 $|\sigma_T/T_*|$ 均按 $-2/3$ 幂次律变化,拟合曲线分别为 $|\sigma_T/T_*| = 5.42(-z/L)^{-2/3}$,$|\sigma_T/T_*| = 1.15(-z/L)^{-2/3}$,$|\sigma_T/T_*| = 1.54(-z/L)^{-2/3}$。晴天的拟合曲线介于霾天、雾天之间。稳定层结下,3 种天气拟合曲线的相关性比不稳定层结强。随着 z/L 增大,$|\sigma_T/T_*|$ 减小。表明在近中性层结下,3 种天气的热量湍流比稳定或不稳定层结下更大,其原因在于稳定层结时湍流发展受到抑制,不稳定层结时上下层空气混合导致垂直温度分布趋近于各向同性。综合图 8a、b 可见,霾天 $|\sigma_T/T_*|$ 较大,即霾天温度脉动较大,雾、晴天次之。

图 8c、8d 为 $|\overline{u'T'}/\overline{w'T'}|$ 随 z/L 的变化。3 种天气的 $|\overline{u'T'}/\overline{w'T'}|$ 分布较离散,没有明显规律。可见霾、雾、晴天热量水平输送基本大于垂直输送。这表明 3 种天气的热量输送以水平输送为主。

3.3.4 湿度湍流统计特征

图 9 为霾、雾、晴天湿度归一化标准差($|\sigma_q/q_*|$)及水平水汽通量与垂直水汽通量之比($|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$)随 z/L 的变化。图 9a 为不稳定条件下 $|\sigma_q/q_*|$ 随

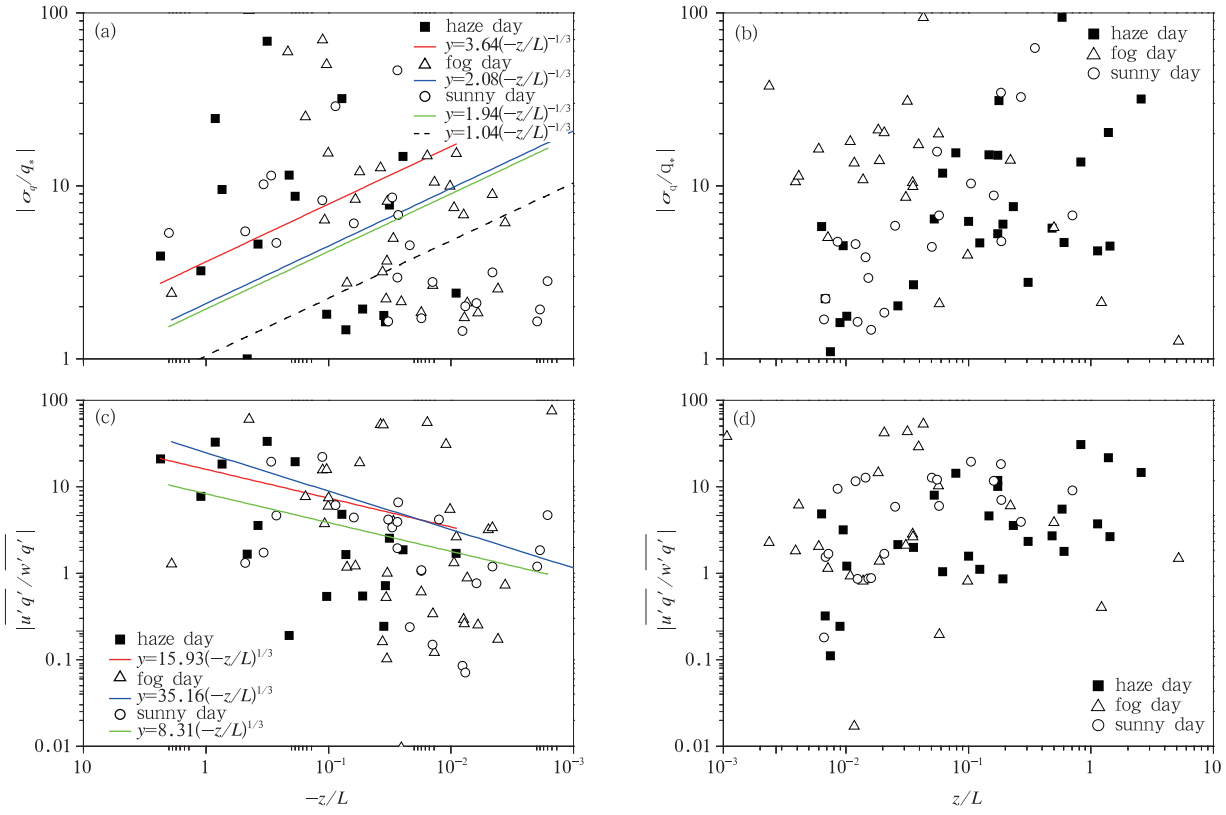


图 9 霾、雾、晴天湿度归一化标准差($|\sigma_q/q_*|$)(a、b)及水平水汽通量与垂直水汽通量之比($|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$)(c、d)随 z/L 的变化(a、c. 不稳定层结,b、d. 稳定层结)

Fig. 9 $|\sigma_q/q_*|$ and $|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$ as a function of the stability (z/L) during the haze-day, fog-day and sunny day (a, c. unstable stratification; b, d. stable stratification)

z/L 的变化。其中,虚线为根据 Högström(1974)的公式 $|\sigma_q/q_*|=1.04(-z/L)^{-1/3}$ 计算的农田下垫面自由对流条件下 $|\sigma_q/q_*|$ 随 z/L 的变化。在不稳定条件下,霾、雾、晴天的 $|\sigma_q/q_*|$ 基本在该曲线上方,其原因在于下垫面不同。霾、雾、晴天 $|\sigma_q/q_*|$ 随 z/L 的拟合曲线分别为 $|\sigma_q/q_*|=3.64(-z/L)^{-1/3}$,$|\sigma_q/q_*|=2.08(-z/L)^{-1/3}$,$|\sigma_q/q_*|=1.94(-z/L)^{-1/3}$。雾天拟合曲线介于霾天、晴天之间,表明不稳定层结下,霾天湿度脉动大于雾天、晴天。3 种天气下基本符合 -1/3 幂次律,但是拟合曲线相关性较小,这可能与观测点较低(2 m)导致下垫面不均匀性有关。图 9b 为稳定条件下 $|\sigma_q/q_*|$ 随 z/L 的变化。霾、晴天 $|\sigma_q/q_*|$ 随稳定度增加有增大趋势;雾天在 $z/L<0.1$ 时,$|\sigma_q/q_*|$ 有增大趋势,在 $z/L>0.1$ 时,$|\sigma_q/q_*|$ 有减小趋势。

图 9c 是不稳定条件下 $|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$ 随 z/L 的变化。可见,雾、霾、晴天 $|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$ 随 z/L 的变化均符合 -1/3 幂次律,霾、雾、晴天拟合曲线分别为 $|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|=15.93(-z/L)^{-1/3}$,$|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|=35.16(-z/L)^{-1/3}$,$|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|=8.31(-z/L)^{-1/3}$,且霾天拟合曲线的相关性比雾、晴天好。霾天拟合曲线介于雾天、晴天之间,表明雾天水汽水平输送相对于垂直输送最强,霾天次之,晴天最弱。图 9d 为稳定条件下 $|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$ 随 z/L 的变化,可见数据点较离散,没有明显的变化趋势。由图 9c、d 可见,不稳定层结下水汽输送既有水平输送也有垂直输送,而稳定层结下以水平输送为主。

3.4 雾、霾天谱分布特征

图 10 为霾天、雾天和晴天不同时次的归一化 u、v、w 谱。图中实线为近中性条件下的Kansas谱

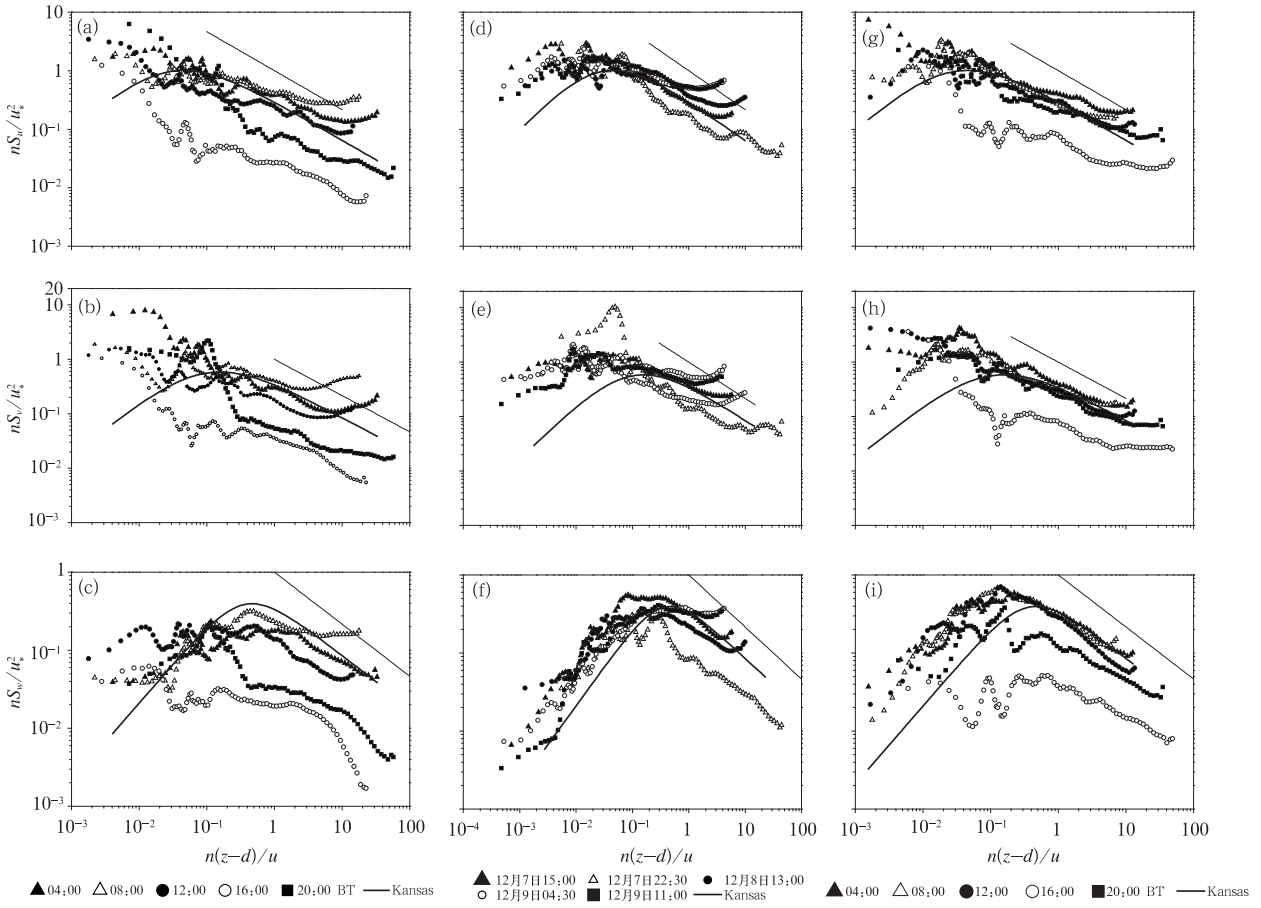


图 10 霾天(a、b、c)、雾天(d、e、f)、晴天(g、h、i)湍流能谱密度随无因次频率的变化

(a、d、g/b、e、h/c、f、i. $u/v/w$ 能谱密度)

Fig. 10 Turbulence energy spectral densities as a function of the normalized frequency during the haze day (a,b,c), fog day (d,e,f) and sunny day (g,h,i)

(a,d,g/b,e,h/c,f,i. $u/v/w$ energy spectral densities)

(Kaimal,et al, 1994);斜线斜率为 -2/3。根据科尔莫哥罗夫理论,湍流的热力和动力生成主要发生在靠近谱峰的低频区域,低频湍流所含能量逐级向较高频率的涡旋传递,直至最后完全被分子热耗散。高频部分存在一段惯性副区,其中能量在逐级传递中不发生耗散损失(王介民等,1990)。S_u、S_v、S_w 表示 u、v、w 方向速度功率谱密度,n 为频率,d 为零平面位移(等于 0.02 m),横坐标 $n(z-d)/u$ 表示无量纲频率。当雷诺数足够大,涡旋的级数很多,且外界能不断提供能量时,在某一级涡旋后能量是平衡的,运动是各向同性的,形成局部均匀的各向同性湍涡。反映在频谱分析上,高频区存在这样一个惯性区,其谱密度满足 $nS_u \propto n^{-2/3}$、$nS_v \propto n^{-2/3}$、$nS_w \propto n^{-2/3}$(陶立英等,1996)。关于湍谱的 -2/3 次方规律的具体推导过程可参考徐玉貌等(1993)。由图 10 可见,3 种天气不同时次的惯性副区均符合 -2/3 次方规律,即满足各向同性定律。

与 Kansas 谱比较可知,霾天 u、v、w 谱均在含能涡区明显偏高;雾天 u、v 谱在含能涡区偏高,而晴天仅 v 谱在含能涡区偏高。3 种天气在过渡区和惯性副区与 Kansas 谱基本吻合。

对比这 3 种天气不同时次的能谱密度可以发现,霾天和晴天各时次能谱密度差异比雾天明显,且均为 04 时>08 时>12 时>20 时>16 时,表明在一天的不同时次,霾天与晴天能谱密度的变化是相似的。雾天各发展阶段的能谱密度差异不大,湍流能量较稳定。对比 3 种天气的能谱密度大小可发现,雾天>晴天>霾天,其原因可能是雾天风速较大,且处于近中性层结,扰动较大,而霾天风速最小,层结较稳定,因而扰动较小。

3 种天气的峰值频率也有差异。霾天 u、v、w 谱峰值频率约为 0.01 Hz,平均风速约为 0.4 m/s,根据泰勒假设可求得对应的湍涡尺度为 40 m,时间尺度为 1 min。雾天 u 谱峰值频率约为 0.004 Hz,平均风速为 1.2 m/s,对应的湍涡尺度为 300 m,时间尺度为 4 min。v、w 谱峰值频率约为 0.01 Hz,对应的湍涡尺度为 120 m,时间尺度为 1 min。晴天 u、v、w 谱峰值频率约为 0.1 Hz,平均风速约为 0.5 m/s,湍涡尺度为 5 m,时间尺度为 10 s。根据典型的湍流时间尺度,风切变产生的机械湍流时间尺度为 1 s—1 min,雾或层积云热力湍流的时间尺度为1 min—1 h(Stull,1988)。可知,霾天和晴天以机械湍流为主,雾天既有机械湍流也有热力湍流。

4 结 论

利用南京 2013 年超声风速仪等资料对比分析了南京一个霾天、一次雾过程和一个晴天的湍流运动特征,得到以下结论:

(1)霾天和晴天的水平平均风速、湍流动能、平均动能、湍流强度、摩擦风速、动量和感热通量均有明显的日变化;而雾天的上述参量没有明显的日变化,这是由于雾过程的特殊性造成的。霾天和晴天白天以近中性层结为主,夜间分别以稳定层结和不稳定层结为主,雾天在爆发性发展阶段以不稳定层结为主。雾、晴天感热向上输送,而霾天感热向下输送。霾、雾、晴天感热通量大于潜热通量。

(2)近中性层结下,霾天 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 近似为常数,为 3.15、2.72、1.17,雾天为 3.11、2.45、1.25,晴天为 3.40、3.45、1.50。不稳定层结条件下,霾、雾、晴天 σ_u/u_*、σ_v/u_*、σ_w/u_* 随稳定度参数 z/L 的变化基本符合 1/3 幂次律,即莫宁-奥布霍夫相似性理论,且霾、雾天比晴天更加符合 1/3 幂次律。晴天风速脉动较大,稳定层结下湍流发展受到抑制。

(3)不稳定层结和稳定层结下,霾、雾、晴天湍流动能归一化标准差 E_{TK}/u_*^2 随 z/L 的变化基本满足 1/3 幂次律,不稳定层结下 3 种天气更加符合 1/3 幂次律;不稳定层结和稳定层结下,霾、雾、晴天温度归一化标准差($|\sigma_T/T_*|$)随 z/L 的变化分别满足 -1/3和 -2/3 幂次律,且不稳定层结下拟合曲线的相关性比稳定层结下好,霾天温度脉动较大,霾、雾、晴天热量均以水平输送为主;不稳定层结下霾、雾、晴天湿度归一化标准差($|\sigma_q/q_*|$)和$|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$随 z/L 的变化满足 -1/3 幂次律,霾天湿度脉动最大,雾天$|\overline{u'q'}/\overline{w'q'}|$最大,不稳定层结下水汽既有垂直输送也有水平输送,稳定层结下水汽以水平输送为主。

(4)雾天归一化 u、v、w 谱与 Kansas 谱吻合度比霾天和晴天高,离散度较小。霾、雾、晴天均符合莫宁-奥布霍夫局地各向同性理论。不同天气下不同时次的能谱密度有差异。霾天和晴天以机械湍流为主,雾天既有机械湍流也有热力湍流。

得出的结论为研究雾、霾天的湍流特征提供了一定依据。然而,由于本研究仅对 2013 年 12 月初南京郊区雾、霾过程个例进行分析,且地理环境特

定,所得出结论的普适性还有待验证。

参考文献

陈继伟,左洪超,马凯明. 2014. 城市冠层上下大气湍流特征分析. 高原气象,33(4):967-976. Chen J W, Zuo H C, Ma K M. 2014. Analysis of atmospheric turbulence characteristics on the upper and lower levels in urban canopy layer. Plateau Meteor, 33(4): 967-976 (in Chinese)

陈铭夏,李宗恺,王庆安. 2000. 南京市近地层湍流结构及输送特征研究. 气象科学,20(2):111-119. Chen M X, Li Z K, Wang Q A. 2000. A study of turbulence structure and turbulence transfer characteristic in the surface-layer at Nanjing city. Sci Meteor Sinica, 20(2): 111-119 (in Chinese)

樊曙先,黄红丽,樊韬等. 2009. 南京北郊雾天 PM10 中多环芳烃粒径分布特征. 环境科学,30(9):2707-2714. Fan S X, Huang H L, Fan T, et al. 2009. Size distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons of PM10 in foggy days in the north suburb of Nanjing. Environ Sci, 30(9): 2707-2714 (in Chinese)

樊曙先,黄红丽,顾凯华等. 2010. 雾过程对大气气溶胶 PM10 中多环芳烃粒径分布的影响. 高等学校化学学报,31(12):2375-2382. Fan S X, Huang H L, Gu K H, et al. 2010. Effect of fog process on the size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric aerosol PM10. Chem J Chin Univ, 31(12): 2375-2382 (in Chinese)

胡非,洪钟祥,陈家宜等. 2006. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析. 大气科学,30(5):883-893. Hu F, Hong Z X, Chen J Y, et al. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area: Introduction and preliminary data analysis. Chin J Atmos Sci, 30(5): 883-893 (in Chinese)

刘辉志,洪钟祥. 2002. 北京城市下垫面边界层湍流统计特征. 大气科学,26(2):241-248. Liu H Z, Hong Z X. 2002. Turbulent statistical characteristics over the urban surface. Chin J Atmos Sci, 26(2): 241-248 (in Chinese)

刘熙明,胡非,邹海波等. 2010. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析. 高原气象,29(5):1174-1182. Liu X M, Hu F, Zou H B, et al. 2010. Analysis on characteristic of atmospheric boundary layer during a typical heavy fog process in Beijing area. Plateau Meteor, 29(5): 1174-1182 (in Chinese)

陆春松,牛生杰,岳平等. 2011. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析. 大气科学学报,34(1):58-65. Lu C S, Niu S J, Yue P, et al. 2011. Observational research on boundary layer structure during high incidence period of winter fog in Nanjing. Trans Atmos Sci, 34(1): 58-65 (in Chinese)

吕晶晶,牛生杰,张羽等. 2014. 湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征. 气象学报,72(2):350-365. Lü J J, Niu S J, Zhang Y, et al. 2014. Evolution characteristics of the macro-/micro- structure and the boundary layer during a spring heavy sea fog episode in Donghai Island in Zhanjiang. Acta Meteor Sinica, 72(2): 350-365 (in Chinese)

缪启龙,李兰兰,何清等. 2008. 南疆沙漠腹地大气边界层湍流通量特征的观测研究. 气象与减灾研究,31(3):15-21. Miao Q L, Li L L, He Q, et al. 2008. Observational research of the turbulent fluxes in the atmosphere boundary layer in desert Hinterland of South Xinjiang. Meteor Dis Red Res, 31(3): 15-21 (in Chinese)

缪启龙,温雅婷,何清等. 2010. 沙漠腹地春夏季近地层大气湍流特征观测分析. 中国沙漠,30(1):167-174. Miao Q L, Wen Y T, He Q, et al. 2010. Turbulence characteristics of surface layer over Hinterland of Taklimakan Desert in spring and summer. J Desert Res, 30(1): 167-174 (in Chinese)

彭珍,刘熙明,洪钟祥等. 2007. 北京地区一次强沙尘暴过程的大气边界层结构和湍流通量输送特征. 气候与环境研究,12(3):267-276. Peng Z, Liu X M, Hong Z X, et al. 2007. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area. Climatic Environ Res, 12(3): 267-276 (in Chinese)

苏红兵,洪钟祥. 1994. 北京城郊近地层湍流实验观测. 大气科学,18(3):739-750. Su H B, Hong Z X. 1994. An experimental study of turbulence in northern suburban surface layer of Beijing. Chin J Atmos Sci, 18(3): 739-750 (in Chinese)

孙继明,肖稳安,牛生杰等. 2002. 沙漠地区沙尘天气近地层湍流输送特征分析. 南京气象学院学报,25(4):489-495. Sun J M, Xiao W A, Niu S J, et al. 2002. Turbulent transfer features of the surface layer over desert area in a dust and sand weather. J Nanjing Inst Meteor, 25(4): 489-495 (in Chinese)

陶立英,曹文俊. 1996. 不同天气条件下城郊近地层湍流谱的研究. 南京气象学院学报,19(1):125-129. Tao L Y, Cao W J. 1996. Turbulence spectral characteristics in the near-surface layer of Tianjin suburbs in different weathers. J Nanjing Inst Meteor, 19(1): 125-129 (in Chinese)

王介民,刘晓虎,祁永强. 1990. 应用涡旋相关方法对戈壁地区湍流输送特征的初步研究. 高原气象,9(2):120-129. Wang J M, Liu X H, Qi Y Q. 1990. A preliminary study of turbulence transfer characteristics in gobi area with an eddy correlation technique. Plateau Meteor, 9(2): 120-129 (in Chinese)

吴彬贵,张宏升,张长春等. 2010. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征. 大气科学,34(2):440-448. Wu B G, Zhang H S, Zhang C C, et al. 2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China. Chin J Atmos Sci, 34(2): 440-448 (in Chinese)

吴彬贵,王兆宇,解以扬等. 2013. 秋季天津城区雾中风速、温度和湿度的湍流统计特征. 高原气象,32(5):1360-1367. Wu B G, Wang Z Y, Xie Y Y, et al. 2013. Turbulent statistic characteristics of wind, temperature and humidity during autumn fog in urban area of Tianjin. Plateau Meteor, 32(5): 1360-1367 (in Chinese)

徐玉貌，周朝辅，李振华等. 1993. 广州市近地层大气的湍流微结构和谱特征. 大气科学，17(3)：338-348. Xu Y M，Zhou C F，Li Z H，et al. 1993. Microstructure and spectral characteristics of turbulence in the surface-layer atmosphere over Guangzhou. Chin J Atmos Sci，17(3)：338-348 (in Chinese)

杨军，牛忠清，石春娥等. 2010. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征. 环境科学，31(7)：1425-1431. Yang J，Niu Z Q，Shi C E，et al. 2010. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing. J Environ Sci，31(7)：1425-1431 (in Chinese)

岳平，张强，牛生杰等. 2011. 春季内蒙古草原典型晴天与沙尘条件下湍流速度统计特征对比分析. 高原气象，30(5)：1180-1188. Yue P，Zhang Q，Niu S J，et al. 2011. Statistical characteristic of atmospheric turbulence in clear and dust weather conditions in inner Mongolian grassland during spring. Plateau Meteor，30(5)：1180-1188 (in Chinese)

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. 中国科学D辑：地球科学，35(增刊Ⅰ)：73-83. Zhang G Z，Bian L G，Wang J Z，et al. 2005. Characteristic of atmospheric boundary layer during a fog process in Beijing and nearby areas. Sci China Ser D：Earth Sci，35(SⅠ)：73-83 (in Chinese)

张宏升，李富余，陈家宜. 2004. 不同下垫面湍流统计特征研究. 高原气象，23(5)：598-604. Zhang H S，Li F Y，Chen J Y. 2004. Statistical characteristics of atmospheric turbulence in different underlying surface conditions. Plateau Meteor，23(5)：598-604 (in Chinese)

张小曳，孙俊英，王亚强等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报，58(13)：1178-1187. Zhang X Y，Sun J Y，Wang Y Q，et al. 2013. Factors contributing to haze and fog in China. Chin Sci Bull，58(13)：1178-1187 (in Chinese)

赵丽娟. 2012. 雾宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用[D]. 南京：南京信息工程大学. Zhao L J. 2012. Interaction among macro-and microphysical characteristics of fog，turbulence，radiation and aerosol[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese)

周明煜，徐祥德，卞林根等. 2000. 青藏高原大气边界层观测分析与动力研究. 北京：气象出版社：38-46. Zhou M Y，Xu X D，Bian L G，et al. 2000. Analysis of Observation and Dynamic Characteristics in Tibetan Plateau. Beijing：China Meteorological Press：38-46 (in Chinese)

周明煜，姚文清，徐祥德等. 2005. 北京城市大气边界层低层垂直动力和热力特征及其与污染物浓度关系的研究. 中国科学D辑：地球科学，35(增刊Ⅰ)：20-30. Zhou M Y，Yao W Q，Xu X D，et al. 2005. The vertical dynamic and thermal characteristics and their relationship with the pollutant concentration in atmospheric boundary layer in Beijing. Sci China Ser D：Earth Sci，35(SⅠ)：20-30 (in Chinese)

周悦，牛生杰，邱玉珺. 2010. 半干旱区沙尘天气近地层湍流通量及起沙研究. 中国沙漠，30(5)：1194-1199. Zhou Y，Niu S J，Qiu Y J. 2010. Research of turbulent flux and dust emission during sand-dust events in surface boundary layer over semiarid area. J Desert Res，30(5)：1194-1199 (in Chinese)

Emmons G，Montgomery R B. 1947. Note on the physics of fog formation. J Meteor，4(6)：206

He J B，Fan S X，Meng Q Z，et al. 2014. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing，China：Distributions，sources and meteorological influences. Atmos Environ，89：207-215

Högström U. 1974. A field study of the turbulent fluxes of heat，water vapour and momentum at a ′typical′ agricultural site. Quart J Roy Meteor Soc，100(426)：624-639

Kaimal J C，Finnigan J J. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows：Their Structure and Measurements. New York and Oxford：Oxford University Press，289pp

Liu D Y，Yang J，Niu S J，et al. 2011. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing. Adv Atmos Sci，28(1)：223-237

Mahrt L. 1998. Nocturnal boundary-layer regimes. Bound Layer Meteor，88(2)：255-278

Meng Q Z，Fan S X，He J B，et al. 2015. Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing，China. Particuology，doi：10.1016/j.partic.2014.03.010.

Niu S J，Zhao L J，Lu C S，et al. 2012. Observational evidence for the Monin-Obukhov similarity under all stability conditions. Adv Atmos Sci，29(2)：285-294

Panofsky H A，Tennekes H，Lenschow D H，et al. 1977. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. Bound Layer Meteor，11(3)：355-361

Panofsky H A，Dutton J A. 1984. Atmospheric Turbulence-Models and Methods for Engineering Applications. New York：John Wiley and Sons，397pp

Rodhe B. 1962. The effect of turbulence on fog formation. Tellus，14(1)：49-86

Roth M. 1993. Turbulent transfer relationships over an urban surface. Ⅱ：Integral statistics. Quart J Roy Meteor Soc，119(513)：1105-1120

Stull R B. 1988. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht：Kluwer Academic Publishers，670pp

Vickers D，Mahrt L. 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. J Atmos Oceanic Technol，14(3)：512-526

Wyngaard J C，Coté O R，Izumi Y. 1971. Local free convection，similarity，and the budgets of shear stress and heat flux. J Atmos Sci，28(7)：1171-1182

Zhou B B，Ferrier B S. 2008. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog. J Appl Meteor Climatol，47(6)：1704-1722