

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 [J]. 大气科学, 34 (2): 440-448. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun. 2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 440-448.

# 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征

吴彬贵<sup>1, 2</sup> 张宏升<sup>1</sup> 张长春<sup>2</sup> 朱好<sup>1</sup> 王兆宇<sup>2</sup> 解以扬<sup>2</sup>

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 天津市气象局, 天津 300074

**摘要** 利用 2006 年 2 月在天津市南部地区开展的大气湍流观测资料, 分析了平流雾生消过程中湍流输送及演变特征。结果表明: 平流雾生消过程中, 大气稳定度参数数值主要集中在弱不稳定到弱稳定范围内, 且多呈现弱不稳定状态。雾前, 大气呈弱不稳定状态, 热量的垂直和水平输送短时加强, 且水平输送较垂直输送更显著; 雾生成初期, 大气呈弱稳定层结, 湍流动量和热量的垂直及水平输送均很弱; 雾中, 大气多呈弱不稳定状态, 稳定度参数、动量、热量及水平与垂直热通量之比值随时间均呈多峰形振荡, 随着雾的消散, 大气由弱不稳定逐渐演变为稳定状态; 雾后, 低层大气再次呈现弱不稳定层结特征, 动量和热量输送呈单峰形日变化特征。平流雾生消过程中, 热量的水平输送随不稳定度增强而迅速减小; 大气呈稳定层结时, 热量的水平输送显著大于垂直输送, 其比值约为 2。同时, 摩擦速度、水平与垂直热通量之比值呈多峰形振荡, 振幅分别可达 1.2 m/s 及 50。

**关键词** 平流雾 稳定度参数 湍流量 华北地区

**文章编号** 1006-9895 (2010) 02-0440-09

**中图分类号** P425

**文献标识码** A

## Characteristics of Turbulent Transfer and Its Temporal Evolution during an Advection Fog Period in North China

WU Bingui<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hongsheng<sup>1</sup>, ZHANG Changchun<sup>2</sup>, ZHU Hao<sup>1</sup>,  
WANG Zhaoyu<sup>2</sup>, and XIE Yiyang<sup>2</sup>

1 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

2 Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

**Abstract** Based on the observational atmospheric turbulent data obtained in the south of Tianjin City in February 2006, the characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution have been analyzed during an advection fog process. The results show that the absolute value of stability parameter is mainly in the range less than one, and the unstable condition is dominant during the advection fog. Before the fog formation, the atmosphere is slightly unstable; heat transfer in horizontal and vertical directions intensifies in a short period; the horizontal heat transfer is much larger than the vertical transfer. In the stage of fog formation, it turns to be stable, with turbulent momentum and heat fluxes being weak in every direction. During the fog, the atmosphere is mainly unstable with the multi-peak

**收稿日期** 2009-03-31, 2009-09-18 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40775013, 天津市自然科学基金项目 08JCYBJC10300, 国家高技术研究发展计划项目 2006AA06A306, 财政部/科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806007, 北京区域气象中心科技创新基金 BRMC-CJ200705

**作者简介** 吴彬贵, 女, 1971 年出生, 高级工程师, 博士生, 主要从事天气分析、大气湍流与环境研究。E-mail: tjwbg@yahoo.com.cn

**通讯作者** 张宏升, E-mail: hsdq@pku.edu.cn

undulation characteristics for the temporal variations of stability parameter, turbulence momentum, heat fluxes, and the ratio of heat fluxes in horizontal and vertical directions. The slight instability gradually changes to slight stability as the fog dissipate. The lower atmosphere is unstable after fog with the momentum and heat fluxes showing a diurnal variation feature (large at noon and weak at night).

During the fog process, horizontal heat fluxes decrease quickly with the stability parameter increasing. The variations of the standard deviations of wind speed with the stability parameter satisfy the 1/3 power law. Under the stable condition, the ratio of heat fluxes in horizontal and vertical directions is approximately equal to 2, and the standard deviations of wind speed increase with stability while the standard deviation of potential temperature decreases with stability. Both the friction velocity and the ratio of heat fluxes in horizontal and vertical directions show multi-peak distributions during the fog, with their peaks reaching 1.2 m/s and 50, respectively.

**Key words** advection fog, stability parameter, turbulent fluxes, North China

## 1 引言

由于空气中悬浮的大量水滴或冰晶微粒使水平能见度距离降至 1000 m 以下的近地面天气现象称为“雾”。雾通常发生在有利于形成逆温的大尺度环流条件下,且与地气间水汽和热量交换息息相关。雾天气形成前,大气层结一般比较稳定,但雾形成后,由于雾中的水汽相变、滴谱数量及滴径大小等改变了低层大气的辐射特性,使低层大气的温度廓线重新配置,如:夜雾的存在加剧了雾顶的辐射降温,阻碍了地面长波辐射,导致近地面大气常常呈现不稳定层结特征(Nishikawa et al., 2004)。尽管雾的生消与雾粒半径、数量及水汽相变等微物理因素紧密联系在一起,研究难度较大,国内外仍取得了很多的进展。如西南地区 and 长江流域雾的微物理观测分析(李子华等, 1992),重庆城市雾的研究(李子华和吴君, 1995),西双版纳雾微观结构的分析(黄玉生等, 2000),南岭山地浓雾的研究(吴兑等, 2007),Brown (1980)对雾滴谱的模拟研究;Bott et al. (1990)对雾中水汽含量的振荡变化分析;Nishikawa et al. (2004)关于雾滴粒径对层结的影响等,让我们认识了不同地域间雾中液水含量、雾滴数密度、滴谱直径的变化特征,以及微观物理过程迅猛发展与宏观过程爆发发展之间的内在联系。考虑大气边界层相似理论的适用性,次网格的物理量处理存在着不确定性,数值模拟方法尚难以全面认识雾生消过程中气象要素的演变规律,如Duynerke (1999)曾提出需要有精确的湍流量观测研究以改进雾模式的模拟精度。由于受下垫面、仪器精度等条件的限制,雾过程的外场实验和快速响应资料质量控制难度较大。众多学者一方面改进

直接观测的实验方法(Malhi, 1995)和探求相关资料的可用性(Giannini et al., 1997),另一方面,加强边界层相似性理论适用性的验证和完善,开展了不同地区不同下垫面的湍流特征研究(Plelke and Panofsky, 1970; Roth, 1993; 刘熙明等, 2008; 涂钢等, 2009),促进和拓展了相似性理论的应用。针对湍流输送在雾生消过程中的作用,张光智等(2005)指出北京及周边地区雾天气过程中湍流动量的垂直输送占主要地位;Bott et al. (1990)、Duynerke (1999)和Nakanishi (2000)得到湍流输送对雾的形成和消散有重要影响;Argentini et al. (1999)论证了城市平流雾过程中,风、温廓线通量关系同样适用于水平均一条件下的相似性理论。由于针对雾过程的连续、精细的湍流观测较少,雾生消过程中,湍流特征及相似理论的可用性仍有待于加强认识。本文利用2006年2月12~14日天津地区一次平流雾过程的湍流观测实验,分析研究平流雾过程大气湍流输送及演变特征,目的为加强平流雾生消过程湍流统计规律的客观认识。

## 2 观测地点及资料

华北平原北依燕山,西有太行山,东临渤海、黄海,地势平坦。天津地处华北平原东部,东部紧邻渤海,255 m 大气边界层气象铁塔位于天津市城区南部,地理位置为(39.06°N, 117.1°E),海拔高度为3.3 m。测站周边为典型的城市郊区下垫面条件。

这次平流雾过程的湍流观测实验配合了塔层同步的风、温、湿梯度观测。风、温有15层观测资料,分别为5、10、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200、220、250 m;湿度有3层观测

资料,分别为 20、220、250 m。风、温梯度观测仪器分别采用长春气象仪器厂生产的风速风向仪和温度湿度仪,采样间隔为 20 s。平流雾过程的近地层气象要素分布及演变特征已在另文中分析(吴彬贵等,2008),此文不再赘述,只是直接引用其研究结果。

风速和温度快速涨落观测仪器采用美国 CAMPBELL 公司生产的 CSAT3 型超声风温仪,安装在气象铁塔 40 m 高度的南伸臂顶端,采样频率为 10 Hz。考虑大气湍流数据获取过程中,外界信号干扰、仪器系统漂移、数据记录误码等有可能导致湍流信号中混杂有各种噪声或干扰。为此,在资料的预处理中包括了剔除野点、趋势项去除、数字滤波和坐标旋转。对湍流资料进行剔除原则为:风向与水平面夹角大于  $\pm 7^\circ$  的数据组,风速小于 0.5 m/s 的数据组,以及明显存在错误的的数据组。湍流资料经过预处理后,取正点后 30 min 数据滑动进行湍流分析。

### 3 雾的宏观发展过程

2 月 12 日 20 时至 2 月 14 日 20 时(北京时,下同)期间,华北上空,对流层高层主要为偏西气流控制;对流层中低层,雾前由暖高压脊控制转为西风槽前西南暖湿气流影响(吴彬贵等,2008)。结合大尺度天气形势和风、温、湿廓线的演变综合分析得到,尽管雾前期兼有蒸发雾的特征,但总体来看,暖湿平流作用显著,归为一次锋前平流雾天气过程更为恰当。由于缺乏能见度的连续资料,铁塔测站夜间也无人值守,且雾形成后,雾层厚度已经超出塔层高度,难以分辨雾的初生阶段与发展阶段,只是依据相邻的气象站人工观测及铁塔站地面自动观测和塔层温、湿廓线资料判断出大雾于 2 月 13 日 04 时左右开始形成,2 月 14 日 08:25 消散,雾中能见度最低时,裸眼视程不足 50 m。故本文讨论雾过程中湍流宏观统计量的特征时,仍然依据吴彬贵等(2008)先前的划分方法,将雾过程分为雾前阶段、雾的生成与发展阶段、雾的消散阶段及雾消散后阶段分别开展讨论。考虑到 13 日白天,雾不仅没有减弱,反而有所加强,全天能见度低于 500 m,辐射的作用很小,故本文讨论雾中湍流特征时,忽略短波辐射对近地面湍流的影响。

## 4 雾过程湍流特征分析

### 4.1 稳定度参数 $z/L$ 和特征摩擦速度 $u_*$

图 1 给出 2006 年 2 月雾过程前后稳定度参数  $z/L$  和摩擦速度  $u_*$  随时间的变化关系。结合塔层温、湿廓线资料的分析,可以看到:2 月 12 日入夜后,风力微弱,大气层结呈强稳定状态;12 日 23 时,西南暖湿气流侵入加强,40 m 高处风速突增到 5.6 m/s,大气层结向弱不稳定状态演变,并且随西南暖湿气流持续影响,大气不稳定程度有增强趋势, $u_*$  数值迅速增强到约 0.6 m/s;2 月 13 日 04 时左右,近地层西南气流减弱,毛毛雨生成,能见度急剧下降,不久出现雾雨共存天气现象,近地层大气层结再次调整呈稳定状态, $u_*$  减弱到约 0.2 m/s,相应层风速也同时减小到 1.0 m/s;2 月 13 日 10 时后,低层大气层结在稳定和不安稳定状态间不断调整,且不稳定状态存在的时间偏长, $u_*$  频繁振荡变化,有多个峰值出现,最大振幅超过 1.0 m/s,表明湍流剪切阵性较强;13 日 20 时后,冷空气加强,雾顶降低,进入消散阶段,大气层结呈近中性偏弱不稳定,雾消散末期由弱不稳定层结调整呈稳定层结, $u_*$  振幅变化减小,数值在 0.3~0.5 m/s 之间;2 月 14 日白天雾消散后,受高压系统控制,大气层结呈现明显日变化特征,白天为不稳定状态, $u_*$  数值增强至 0.5~0.8 m/s 左右,夜间呈稳定状态, $u_*$  再度减弱至 0.4 m/s 左右。雾天气过程中,近地层大气层结状态与高压微风晴朗天气的层结特征有差异,雾的存在改变了大气原有的层结结构,这一点已经被多次验证过(张光智等,2005)。雾生成至发展阶段,近地层大气层结在稳定和不安稳定之间频繁调整变化,垂直方向的动量湍流输送脉动变化最为剧烈,该观测事实与 Nakanishi (2000) 关于低层层结在成雾后振荡变化的大涡模拟结果相同。

综上所述,成雾前,由于低空西南气流影响,低层大气呈不稳定层结状态;雾形成初期,以稳定层结为主,随后,雾中很快以不稳定层结状态占绝对优势,层结稳定度变化范围小,但层结调整频繁,这一结果与西双版纳平流雾中微物理参量剧烈振荡的观测结果相一致(黄玉生等,2000)。

### 4.2 速度归一化标准差随稳定度参数 $z/L$ 的变化

M-O 相似性理论认为:近地面层风速归一化

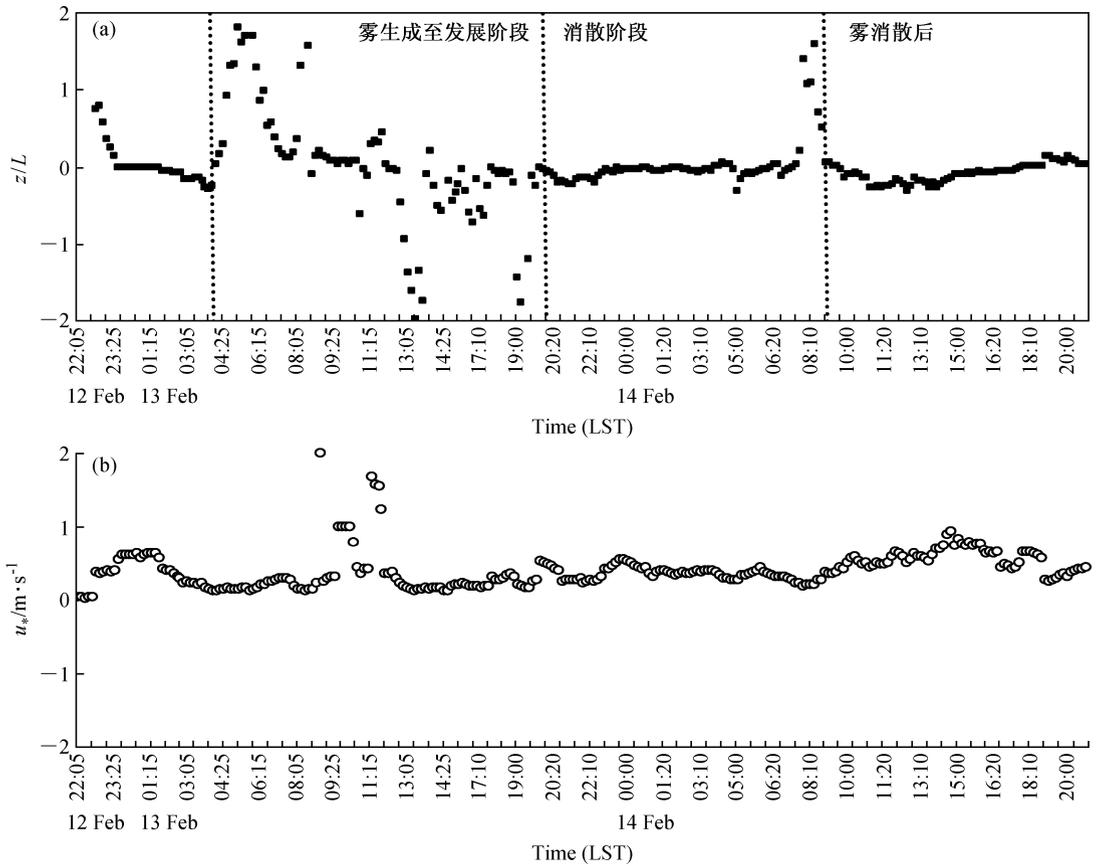


图1 平流雾过程中稳定度参数 (a)  $z/L$  和 (b)  $u_*$  随时间的变化

Fig. 1 Variations of (a) stability parameter and (b) friction velocity during the advection fog period

标准差  $\sigma_{u,v,w}/u_*$  是大气稳定度参数  $z/L$  的函数, 在近中性条件下趋于常数。研究表明, 不同类型下垫面下, 该常数的值存在一定差异 (Roth, 1993)。图 2~4 分别给出浓雾天气过程中, 三方向风速分量的归一化标准差  $\sigma_u/u_*$ 、 $\sigma_v/u_*$  和  $\sigma_w/u_*$  与稳定度参数  $z/L$  的变化关系。为分辨雾与非雾期间湍流结构的差异, 本节只将雾过程分为雾前、雾中和雾后 3 个阶段讨论。由图 2~4 中可见,  $z/L < 0$  时, 雾过程中的  $z/L$  数值在  $0 \sim -2$  范围内; 雾形成前, 则集中在  $0 \sim -0.2$  较窄范围内; 雾持续期间, 在  $0 \sim -2$  范围内变化; 雾消散后, 集中在  $-0.02 \sim -0.2$  之间, 相对于雾形成前, 稳定度参数取值范围更窄。雾天气过程中, 雾前和雾消散后存在的不稳定层结趋近于中性, 而雾持续期间的不稳定层结趋向于近中性至弱不稳定。在中性至弱不稳定层结条件下, 风速归一化标准差  $\sigma_{u,v,w}/u_*$  随稳定度参数  $z/L$  的变化关系均满足  $1/3$  幂次特征, 拟合方程如下:

$$\sigma_u/u_* = 2.22(1 - 1.6z/L)^{1/3}, \tag{1}$$

$$\sigma_v/u_* = 1.61(1 - 1.6z/L)^{1/3}, \tag{2}$$

$$\sigma_w/u_* = 1.09(1 - 1.5z/L)^{1/3}. \tag{3}$$

方程 (1)~(3) 结果与前人的研究结论相近 (Plelke and Panofsky, 1970; Caughey and Readings, 1974; Roth, 1993), 系数存在一定差异, 说明平流雾天气过程中, 尽管各向同性假设不完全满足, 但不稳定层结条件下, M-O 相似性理论仍然近似可以使用, 与 Argentini et al. (1999) 的研究结论一致。成雾前, 水平纵向风速归一化标准差数值大于雾中和雾后阶段, 而雾持续中的水平横向风速数值没有明显差异, 表明平流雾形成前扰动动能大于其它时段。雾持续中, 垂直方向风速归一化标准差数值低于雾形成前, 表明平流雾形成前地气之间的能量交换大于雾形成后。由图 2~4 还可看到, 雾过程中, 近中性条件下的各方向风速归一化标准差趋于常值, 三方向数值分别为 2.33、1.61 和 1.15。

相对不稳定条件, 稳定条件下的 M-O 相似性

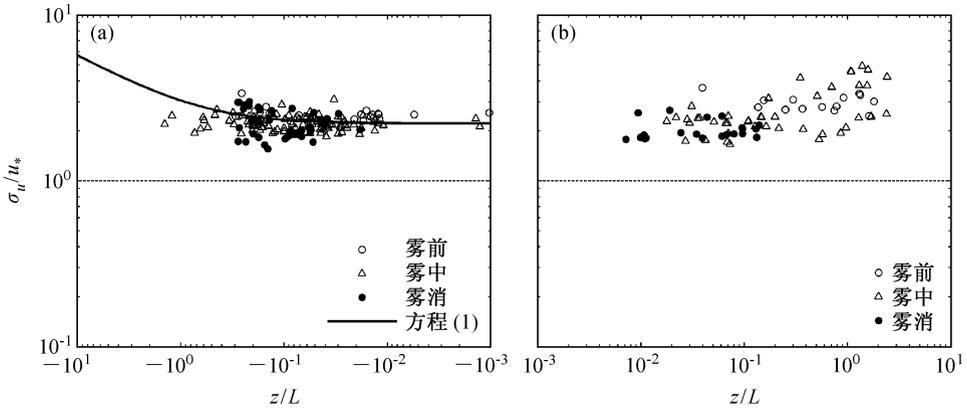


图 2 平流雾过程中  $u$  方向风速归一化标准差  $\sigma_u/u_*$  随稳定度参数  $z/L$  的变化  
Fig. 2 Variation of normalized standard deviation of  $u$  with  $z/L$  during the advection fog period

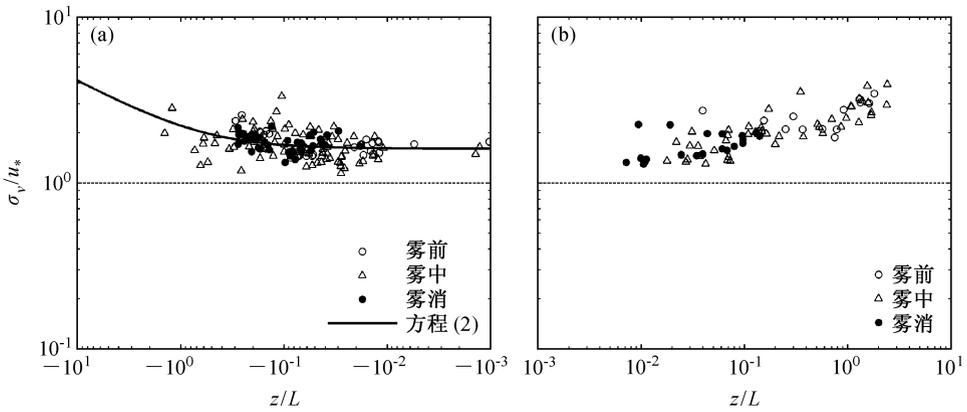


图 3 同图 2, 但为  $v$  方向  
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for  $\sigma_v/u_*$

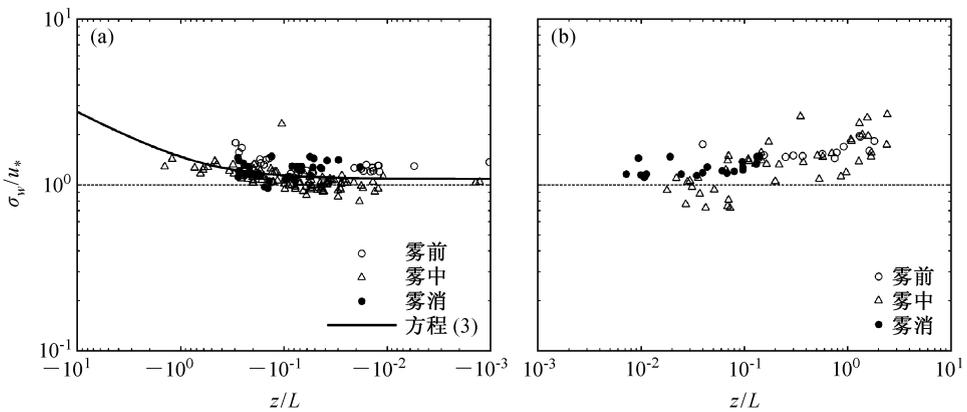


图 4 同图 2, 但为  $w$  方向  
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for  $\sigma_w/u_*$

条件不易满足, 但弱稳定条件下, 一致认为  $\sigma_{u,v,w}/u_*$  数值接近常数。对于弱稳定区的界定, 不同研究者的取值有差异。如: Derbyshire (1990)、Malhi

(1995) 取  $0.0 < z/L < 0.06$ ; 周明煜 (2005) 取  $0.0 < z/L < 0.1$ 。由图 2~4 可见, 当  $z/L > 0$  时,  $z/L$  数值集中在  $0 \sim 2$  范围内, 其中, 雾维持期间,  $z/L$  值

在 0.02~2 较宽范围内变化; 雾消散后,  $z/L$  数值集中在 0.007~0.2 的较窄范围内。雾过程中, 当  $0.0 < z/L < 0.1$  时, 各方向风速的归一化标准差随稳定度参数变化保持不变, 与周明煜 (2005) 的实验结论一致。浓雾生消阶段,  $\sigma_{u,v,w}/u_*$  数值随  $z/L$  增大而增大, 类似于前人的结果 (Caughey and Readings, 1974)。

#### 4.3 温度归一化标准差随稳定度参数 $z/L$ 的变化

图 5 给出浓雾过程温度归一化标准差  $\sigma_\theta/\theta_*$  随稳定度参数  $z/L$  的变化。可以看出: 不稳定层结条件下,  $\sigma_\theta/\theta_*$  随不稳定度增强而减弱。成雾前和雾消散后, 当  $-z/L > 0.1$  时,  $\sigma_\theta/\theta_*$  随不稳定度增强下降趋缓, 逐渐趋近为常数, 而雾持续阶段数据离散现象增大, 没有呈现出这种明显的降率趋缓倾向。稳定层结条件下, 随  $z/L$  值增大,  $\sigma_\theta/\theta_*$  减小, 当  $z/L > 0.1$  时,  $\sigma_\theta/\theta_*$  趋为常数。对比不稳定层结情形, 雾前稳定层结的  $\sigma_\theta/\theta_*$  数值最大, 雾后最小; 而不稳定层结的数值在雾前和雾中相近, 雾后最小。近中性条件下, 平流雾生消过程温度涨落幅度较小, 测量误差相对增大, 可能导致  $\sigma_\theta/\theta_*$  离散性较大。另外, 雾生消过程中, 层结状态转换非常频繁, 定常假设条件不完全满足也是可能的原因之一。

#### 4.4 雾过程热量输送特征

平流雾过程中的热量输送是不能忽视的 (Argentini et al., 1999)。图 6 分别给出雾过程中热量水平方向输送  $\overline{u'\theta'}$ 、垂直方向输送  $\overline{w'\theta'}$  及其比值  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  随时间变化。低空西南气流侵入前, 垂直方向的热通量向下传输, 垂直和水平方向热通量输送均很弱; 12 日 22 时西南气流侵入后, 水平和垂直热量输送先增强后减弱: 雾前西南气流加强初

期, 水平热通量约为垂直热通量的 3~4 倍, 最高可达 30 倍, 垂直热量向下输送; 西南气流维持的中、后期, 水平及垂直热通量稳定少变, 且均很弱, 垂直热量输送转而向上,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  比值减弱至 2~3 倍。雾形成时, 热通量垂直方向向下, 水平和垂直热通量再次加强, 且振荡幅度加大至 2~9 倍。13 日 10 时左右, 水平和垂直热通量剧增, 且垂直输送方向振荡不定,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  比值的振幅增强, 极大值达 50 倍, 极小值仅为 0.5 倍。16 时后, 垂直热量输送转而向上, 尽管水平和垂直热输送仍然比较活跃, 但比 10 时左右已大幅减小。雾消散阶段, 垂直热通量逐渐转为向上输送, 垂直和水平热输送均随雾顶下降而再次减弱, 仍以水平输送为主。冷空气开始侵入至近地面后, 雾完全消散, 水平和垂直热量输送显著同步加强, 14 日下午达到最强, 呈现明显的单峰型日变化特征, 水平方向约为垂直热量输送的 2 倍。可看出, 平流雾过程中, 热量输送呈现出多峰型特征, 热量水平输送的作用非常显著, 雾过程中以热量水平输送为主。

雾生消前后, 水平和垂直方向热通量的比值  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  随稳定度参数  $z/L$  的变化如图 7 所示, 图 7 中拟合曲线是方程 (4) (Wyngaard et al., 1971) 的计算结果, 即

$$\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'} = -\alpha\phi_m\phi_h. \quad (4)$$

方程 (4) 中,  $\phi_m = (1 - 15z/L)^{-1/4}$ ,  $\phi_h = 0.74(1 - 9z/L)^{-1/2}$ ,  $\alpha = 5$ 。雾生消过程中,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  随  $-z/L$  增大而减弱, 即层结越不稳定, 热量水平输送相对于垂直输送越弱,  $-z/L > 1$  时,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  迅速趋于 0。稳定层结条件下,  $z/L > 0.2$  时,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  比

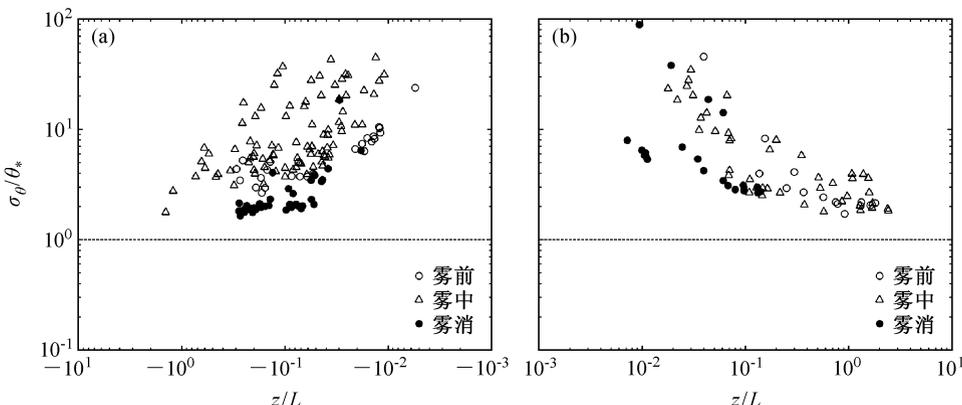


图 5 平流雾过程中温度归一化标准差  $\sigma_\theta/\theta_*$  随  $z/L$  的变化

Fig. 5 Variation of normalized standard deviation of potential temperature  $\sigma_\theta/\theta_*$  with  $z/L$

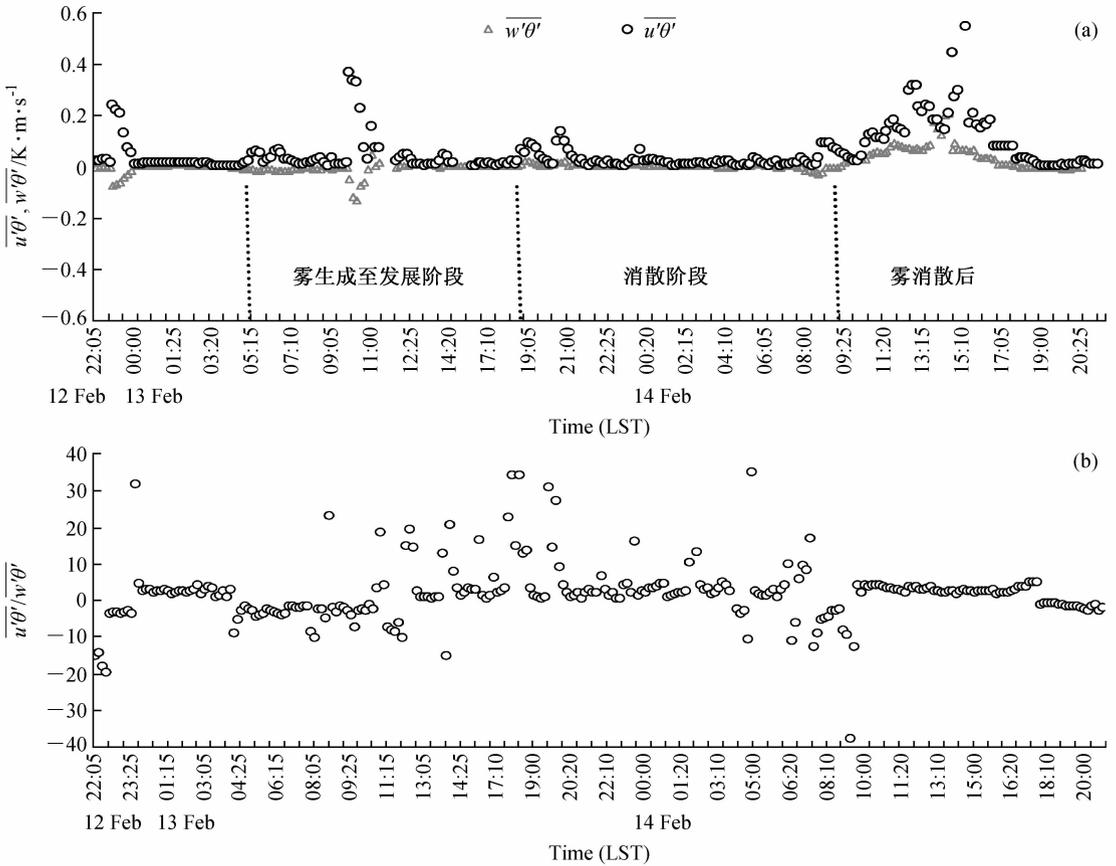


图 6 雾过程中热量输送特征: (a) 水平热通量 $\overline{u'\theta'}$ 、垂直热通量 $\overline{w'\theta'}$ ; (b)  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$   
Fig. 6 The characteristics of heat transfer during the fog period: (a) Horizontal heat flux  $\overline{u'\theta'}$  and vertical heat flux  $\overline{w'\theta'}$ ; (b) the ratio of horizontal and vertical heat fluxes  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$

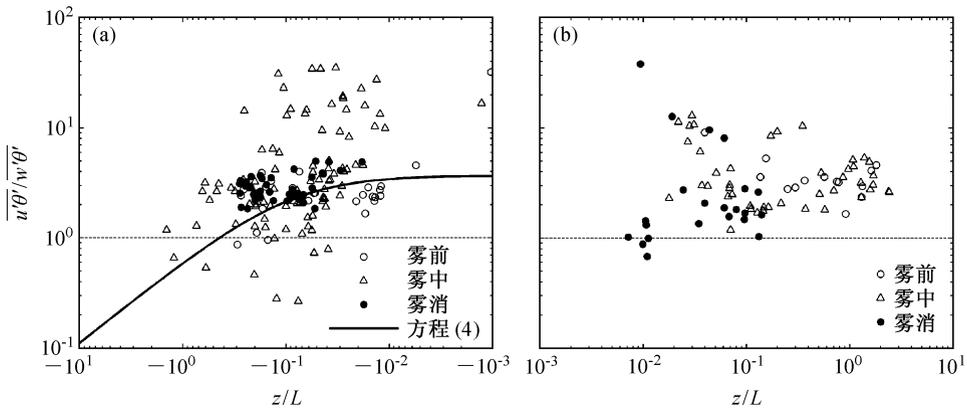


图 7 雾过程中水平和垂直感热输送之比值随  $z/L$  的变化  
Fig. 7 Variation of the ratio of horizontal and vertical heat fluxes  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  with  $z/L$  during the fog

值在常数 2 附近变化。近中性层结条件下,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  比值随  $z/L$  趋近于 0 而迅速增大。雾持续期间,  $\overline{u'\theta'}/\overline{w'\theta'}$  平均比值比雾前和雾消散后偏大, 再次印证了平流雾过程中的热量水平湍流输送非常显

著的观测事实 (Argentini et al., 1999)。

### 5 结论

本文利用 2006 年 2 月天津南部地区开展的大

气边界层实验观测资料, 分析研究了一次平流雾过程湍流输送与演变特征, 得到:

(1) 平流雾过程中, 大气主要呈弱不稳定层结, 低层大气稳定度参数数值主要集中在 $|z/L| < 1$ 范围内, 近地层摩擦速度 $u_*$ 数值集中在 $0.2 \sim 0.5$  m/s 区间, 西南气流侵入前和雾生成初始阶段, 大气层结呈弱稳定状态; 西南气流侵入的成雾前和雾消散阶段, 呈近中性和偏弱不稳定层结; 成雾后至发展阶段, 稳定与不稳定层结频繁振荡调整, 不稳定层结状态存在时间占优,  $u_*$ 振荡变化幅度和频率最大, 数值在 $0.2 \sim 1.2$  m/s 间; 雾后, 低层大气仍呈弱不稳定层结, 不稳定度数值略有增强。

(2) 华北平流雾过程中, 不稳定层结条件下的风速归一化标准差随稳定度参数的变化满足 $1/3$ 幂次律。平流雾形成前, 水平方向风速归一化标准差数值大于雾中和雾后, 雾中垂直方向风速归一化标准差没有呈现明显数值差异。

(3) 温度归一化标准差随大气稳定度的绝对数值增强而减小, 稳定度 $z/L$ 数值位于 $-0.1 \sim 0.1$ 区间时, 温度归一化标准差的离散性迅速增大。

(4) 平流雾生消过程中, 水平方向热量输送大于垂直方向; 雾持续期间, 水平方向的热量输送及垂直输送比值的振荡变化明显偏大。暖湿气流侵入时, 热量的水平输送和垂直输送均有短时加强的现象, 且水平输送的加强更加明显; 雾生成初期, 热量输送相对较弱, 但水平和垂直热量输送变化很快达到最强, 其比值呈多峰值振荡变化; 雾消散阶段, 垂直输送有所增强; 雾消后, 水平和垂直方向热量输送稳定维持较强。

### 参考文献 (References)

Argentini S, Mastrantonio G, Lena F. 1999. Case studies of the wintertime convective boundary-layer structure in the urban area of Milan, Italy [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 93: 253-267.

Bott A, Sievers U, Zdunkowski W. 1990. A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47: 2153-2166.

Brown R. 1980. A numerical study of radiation fog with an explicit formulation of the microphysics [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 781-802.

Caughey S J, Readings C J. 1974. Vertical components of turbulence in convective conditions [J]. *Adv. Geophys.*, 18A: 125-130.

Derbyshire H. 1990. Nieuwstadt's stable boundary layer revisited [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 116: 127-158.

Duynkerke P G. 1999. Turbulence, radiation and fog in Dutch stable boundary layers [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 90: 447-477.

Giannini L, Argentini S, Mastrantonio G, et al. 1997. Estimation of flux parameters from sodar wind profiles [J]. *Atmos. Environ.*, 31: 1307-1313.

黄玉生, 黄玉仁, 李子华, 等. 2000. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程 [J]. *气象学报*, 58 (6): 715-725. Huang Yusheng, Huang Yuren, Li Zihua, et al. 2000. The microphysical structure and evolution of winter fog in Xishuangbanna [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58 (6): 715-725.

李子华, 仲良喜, 俞香仁. 1992. 西南地区和长江下游雾的时空分布和微物理结构 [J]. *地理学报*, 47 (3): 242-251. Li Zihua, Zhong Liangxi, Yu Xiangren. 1992. The spatial and temporal distribution and physical structure of fog over Southwest China and the lower reach of the Yangtze River [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 47 (3): 242-251.

李子华, 吴君. 1995. 重庆市冬季雾滴谱特征 [J]. *南京气象学院学报*. 18 (1): 46-51. Li Zihua, Wu Jun. 1995. Winter fog droplet spectrum features in urban area of Chongqing [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 18 (1): 46-51.

刘熙明, 胡非, 姜金华, 等. 2008. 白洋淀水陆不均匀地区能量平衡特征分析 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1411-1418. Liu Ximing, Hu Fei, Jiang Jinhua, et al. 2008. Energy budget over the water-land heterogeneous surface in Baiyangdian region [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1411-1418.

Malhi Y S. 1995. The significance of the dual solutions for heat fluxes measured by the temperature fluctuation method in stable conditions [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 74: 389-396.

Nakanishi M. 2000. Large-eddy simulation of radiation fog [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 94: 461-493.

Nishikawa T, Maruyama S, Sakai S. 2004. Radiative heat transfer and hydrostatic stability in nocturnal fog [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 113: 273-286.

Pelke R A, Panofsky H A. 1970. Turbulence characteristics along several towers [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 1: 115-130.

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

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

吴兑, 邓雪娇, 毛节泰, 等. 2007. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏观结构与能见度研究 [J]. *气象学报*, 65 (3): 406-415. Wu Dui, Deng Xuejiao, Mao Jietai, et al. 2007. A study on macro-and micro-structures of heavy fog and visibility at freeway in the Nanling Dayaoshan Mountain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (3): 406-415.

- 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 2008. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 44 (5): 39-45. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Zhang Changchun, et al. 2008. Analysis of the micro-meteorologic element during the advection fog period in the south of Tianjin city [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 44 (5): 39-45.
- 涂钢, 刘辉志, 董文杰. 2009. 半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析 [J]. 大气科学, 33 (4): 719-725. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie. 2009. Characteristics of the surface turbulent fluxes over degraded grassland and cropland in the semi-arid area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 719-725.
- 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 [J]. 中国科学 (D 辑), 35 (增刊 1): 20-30. Zhou Mingyu, Yao Wenqing, Xu Xiangde, et al. 2005. Vertical dynamic and thermodynamic characteristics of urban lower boundary layer and its relationship with aerosol concentration over Beijing [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 35 (Suppl. 1): 20-30.
- 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), 35 (增刊 1): 73-83. Zhang Guangzhi, Bian Lin'gen, Wang Jizhi, et al. 2005. The boundary layer characteristics in the fog formation process over Beijing and its surrounding areas [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 35 (Suppl. 1): 73-83.