陶昕宇, 黄建平, 谢晓金, 等. 2020. 气溶胶辐射效应对边界层结构及夹卷特征影响的观测分析 [J]. 大气科学, 44(6): 1213−1223. TAO Xinyu, HUANG Jianping, XIE Xiaojin, et al. 2020. Observational Analysis of the Influence of Aerosol Radiation Effect on Planetary Boundary Layer Structure and Entrainment Characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1213−1223. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19180

气溶胶辐射效应对边界层结构及夹卷特征影响的观测分析

陶昕宇[1, 2] 黄建平[2] 谢晓金[1, 3] 王咏薇[1, 4] 包云轩[1, 2]
刘诚[5] 张潇艳[1, 2] 徐家平[6]

1 南京信息工程大学气象灾害预报和评估协同创新中心，南京 210044
2 耶鲁大学—南京信息工程大学大气环境中心，南京 210044
3 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室，南京 210044
4 南京信息工程大学大气物理学院，南京 210044
5 东华理工大学江西省大气污染成因与控制重点实验室，江西南昌 330013
6 中国气象局交通气象重点开放实验室，南京 210009

摘 要 2017 年 12 月 22 日至 2018 年 1 月 18 日利用无人机携带温、湿和颗粒物浓度探测仪对南京地区灰霾污染条件下大气边界层垂直结构开展加密观测。通过比较不同灰霾污染条件下温度、湿度和 $PM_{2.5}$（直径小于 2.5 微米的颗粒物）浓度的垂直结构差异，结合地面热通量、2 米空气温度、相对湿度、风速、风向及主要大气污染物（如臭氧和 $PM_{2.5}$）浓度，定量评估了气溶胶辐射效应对边界层和夹卷过程的影响。分析表明，灰霾或气溶胶削弱到达地表太阳辐射，减小地表感热通量，延迟边界层发展，增加近地层大气稳定度，降低边界层高度，并加重灰霾污染。灰霾污染物在混合层顶处累积，导致 $PM_{2.5}$ 浓度最大变化出现在边界层顶部而不是近地层。气溶胶辐射效应对夹卷特征及其特征参数有重要影响。灰霾浓度升高时，夹卷区厚度增加；无量纲化夹卷速度随对流理查逊数的变化不再符合负 1 次方幂函数关系，与大涡模拟结果一致。本研究进一步指出，为提高重霾污染条件下天气和空气质量数值预报水平，必须考虑气溶胶辐射效应对边界层和夹卷参数化的影响。

关键词 气溶胶辐射效应 边界层 夹卷 无人机探测
文章编号 1006-9895(2020)06-1213-11 **中图分类号** P41 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19180

Observational Analysis of the Influence of Aerosol Radiation Effect on Planetary Boundary Layer Structure and Entrainment Characteristics

TAO Xinyu[1, 2], HUANG Jianping[2], XIE Xiaojin[1, 3], WANG Yongwei[1, 4], BAO Yunxuan[1, 2], LIU Cheng[5], ZHAGN Xiaoyan[1, 2], and XU Jiaping[6]

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of*

收稿日期 2019-06-26；**网络预出版日期** 2020-04-27
作者简介 陶昕宇，女，1995 年出生，硕士研究生，主要从事灰霾边界层相关研究。E-mail: xinyu.t@foxmail.com
通讯作者 黄建平，E-mail: jianping.huang@noaa.gov
资助项目 国家重点研究计划 2017YFC0210102，国家自然科学基金项目 41575009、41830965，国家自然科学基金青年科学基金项目 41805022，江苏省自然科学基金青年科学基金项目 BK20181100

Funded by National Key Research and Development Plan (Grant 2017YFC0210102), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575009, 41830965), Youth Science Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (Grant 41805022), Jiangsu Youth Science Fund Project of the Natural Science Foundation (Grant BK20181100)

Information Science and Technology, *Nanjing* 210044
2 *Yale–NUIST Center on Atmospheric Environment*, *Nanjing* 210044
3 *Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology*, *College of Applied Meteorology*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
4 *School of Atmospheric Physics*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
5 *Jiangxi Province Key Laboratory of the Causes and Control of Atmospheric Pollution*, *East China University of Technology*, *Nanchang* 330013
6 *Key Laboratory of Transportation Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Jiangsu Province*, *Nanjing* 210009

Abstract An unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with portable instruments was used to measure the vertical profiles of temperature, specific humidity, and particulate matter under different haze-polluted weather conditions in Nanjing from December 22, 2017 to January 18, 2018. The study aimed to assess the impact of the aerosol radiative effect on the atmospheric boundary layer (ABL) and the entrainment zone structures as well as their evolution on days with heavy haze pollution and other days with good air quality. The vertical profiles of the potential temperature, water vapor, and $PM_{2.5}$ concentrations were obtained through detailed analyses of the UAV-measured vertical profiles and surface observations, including the surface heat flux, 2-m air temperature, specific humidity, wind speed, wind direction, and major air pollutants concentration (e.g., O_3 and $PM_{2.5}$) under different air pollution conditions. The results indicate that aerosols reduce the amount of surface-reaching solar radiation and the surface sensible heat flux, postpone the development of the ABL, enhance the atmospheric stability near the surface, decrease the ABL height, and exacerbate air pollution. The maximum concentrations of $PM_{2.5}$ and the largest increase rate were observed at the top of the ABL rather than near the surface. Furthermore, the aerosol radiative effect was found to have an important impact on entrainment and its characteristic parameters. The depth of the entrainment zone increased with increasing surface $PM_{2.5}$ concentrations. The entrainment rate normalized with convective velocity did not follow a negative?1 power function with the convective Richardson number under heavy haze or $PM_{2.5}$ pollution conditions, which is consistent with the findings of large-eddy simulation studies. These results indicate that the aerosol radiative effect must be included in ABL and entrainment parameterization schemes to improve numerical predictions of weather and air quality under heavy pollution conditions.

Keywords Aerosol radiative effect, Planetary boundary layer, Entrainment, Unmanned aerial vehicle (UAV)

1 引言

大气边界层位于对流层底部，是地球与大气之间进行能量和物质交换，以及各种空气污染物形成和累积的场所。受太阳辐射、下垫面等影响，边界层内湍流运动活跃，气象要素呈明显日变化特征。夹卷层是大气混合层与自由大气之间的过渡层，夹卷过程是边界层和自由大气之间进行物质（如水汽、污染物）和能量交换的重要途径，是边界层发展的主要驱动力之一，并对边界层内各物理量和污染物浓度垂直分布起着重要作用（苗世光等, 2001; Huang et al., 2011）。过去几十年，随着我国城市化和工业化快速发展，人为污染源排放不断增加，各种大气污染事件频繁发生（吴兑, 2012; 吴丹等, 2014; 于超和张蕾, 2019; Zhao et al., 2019）。高浓度污染条件下，气溶胶辐射效应对边界层内热力、动力结构和夹卷过程产生重要影响（田文寿等, 1997; Yu et al., 2002; Barbaro et al., 2013）。受气溶胶辐射效应影响，一些传统边界层统计理论公式（如夹卷速度等）需进行适当修正，使之适合于重霾污染条件下边界层（含夹卷区）结构特征的定量描述（Liu et al., 2019）。因此，开展灰霾污染条件下边界层结构及夹卷特征观测研究对于丰富边界层理论和提高数值模拟预报水平都具有重要的理论和实际意义。

夹卷层位于边界层顶部，鉴于其所处位置特殊且垂直尺度小，传统探测手段对夹卷区进行直接观测非常困难（徐强君等, 2008）。国内外对夹卷的研究一般是通过实验室水槽试验或利用块模式和高精度数值模式（如大涡模拟）对夹卷区及夹卷过程进行模拟及参数化处理（Deardorff et al., 1980; Sorbjan, 1996; Kim et al., 2003; Huang et al., 2008, 2009, 2013）。夹卷厚度、夹卷速度和夹卷通量比是描述夹卷过程的重要参数。归一化夹卷厚度和夹

卷速度通常取为对流理查逊数的某种函数。初期研究表明，归一化的夹卷速度与对流理查逊数呈负1次方（Deardorff et al., 1980；Boers and Eloranta, 1986）或是负1.5次方关系（Deardorff et al., 1980）。进一步研究发现，当理查森数 Ri<10 时，满足负1次方函数关系；而当理查森数 Ri>10 时，则符合负1.5次方幂函数（Fedorovich et al., 2004）。现有天气和空气质量数值模式中，夹卷通量比通常取为常值。如干净边界层数值模拟将其值一般设为0.2（Sullivan et al., 1998; Van Zanten et al., 1999; 苗世光等, 2001）或0.25（Deardorff et al., 1980），但实际观测值可达0.51±0.12（Angevine et al., 1998）。最近研究显示，重污染边界层条件下，夹卷通量比随地表感热通量增大而增加（Liu et al., 2019）。但这些研究都是基于水槽实验及数值模拟所得，实际灰霾污染条件下这些规律是否成立有待进一步验证。

气溶胶辐射效应对边界层结构和地气系统辐射平衡有着重要影响。气溶胶衰减到达地表太阳短波辐射，减小地表感热通量，不利于边界层发展（Yang et al., 2016; 李德平等, 2018; Zhang et al., 2020）。同时，气溶胶吸收太阳短波辐射，加热边界层，促进边界层发展，并削弱边界层顶逆温强度，进而影响边界层和夹卷结构（田文寿等, 1997; Yu et al., 2002）。Atwater（1971）利用辐射模型研究发现气溶胶辐射效应可以有效促进城市边界层顶逆温层的增长和进一步加强城市热岛效应。Jacobson and Kaufman（2006）发展了一个跨尺度全球模式GATOR-GCMOM，用于研究加利福尼亚南海岸气溶胶与风速之间的关系，结果表明气溶胶辐射效应可减小边界层低层风速，增大上层风速。气溶胶辐射效应对边界内风速垂直分布的影响在内陆城市如北京也观测到（Yang et al., 2016）。除此之外，Shen et al.（2019）通过对较长时间序列（21年）气象及遥感数据进行分析发现，白天气溶胶辐射效应能有效降低到达地表太阳辐射，减小海陆温差，减弱上海地区海陆风强度。Yu et al.（2002）利用大气—土壤—水（CAPS）模式，评估了不同辐射特性气溶胶对地表热通量、边界层水汽垂直分布、逆温层强度及夹卷过程的影响，指出吸收性气溶胶浓度升高使大气边界层变得更干燥，减少地面雾和云的形成，并加强夹卷过程。Liu et al.（2019）在零阶模式（ZOM）框架下推导了灰霾条件下的夹卷速度方程，发现归一化夹卷速度随对流理查逊数的变化不再满足负1次方函数，并利用大涡模式（LES）与辐射传输模型（SBDART）的计算结果，对所推导的零阶夹卷方程进行验证。同时发现气溶胶辐射效应对地表感热通量的影响大于对夹卷通量的影响；受气溶胶辐射效应影响，边界层内感热通量随高度不再呈线性变化，且夹卷厚度随气溶胶浓度升高而加厚。然而，这些模拟结果也未得到观测验证。

2017年12月22日至2018年1月18日期间，利用无人机携带温度、湿度、风、气压传感器和便携式颗粒物浓度探测器（PDR-1500）在南京市江北郊区对大气边界层垂直结构演变进行了连续观测。同步观测的还包括距离地面2米气温、湿度、10米风向和风速、涡度相关量及地面各辐射通量等。本文通过对无人机探测的 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、湿度和风的垂直廓线及其它各种观测资料进行系统分析，探讨灰霾污染条件下，大气边界层热力结构及污染物垂直廓线分布及演变特征；评估气溶胶辐射效应对灰霾污染条件下边界层结构和夹卷过程的影响；探讨灰霾条件下夹卷厚度随近地层 $PM_{2.5}$ 浓度的变化关系，并确定灰霾条件下无量纲化夹卷速度随理查逊数的变化是否仍满足负1次方函数关系。

2　观测资料与方法

2.1　数据来源

2017年12月22日至1月18日，在江苏省南京市浦口区永丰村（32°12'N，118°41'E）开展大气边界层观测，其中12月24日到1月8日由于仪器故障导致垂直廓线观测缺测。边界层内 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、湿度和气压，采用四旋翼无人机 [Four-rotor UAV（unmanned aerial vehicle）] 搭载 Thermo PDR-1500 小流量便携式气溶胶颗粒物检测仪和温度、湿度、气压传感器在垂直方向进行不等距观测，资料自动存储。为揭示边界层结构演变特征，白天每两小时及夜间每三小时观测一次，具体观测时次为02:00、05:00、08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00和23:00（北京时，下同）。

无人机上升过程中尽可能保持垂直匀速上升，速度2 m s^{-1}，一次观测持续约15 min。观测中，无人机尽可能上升到边界层顶以上的自由大气层，获取整个边界层及夹卷区内的污染物和各气象要素垂直分布特征。同时，搭载于无人机上的PDR-

1500 颗粒物测量仪与小气候测量系统（温湿传感器，气压传感器及 GPS 模块）采样时间间隔均为 1 s，最大程度保证观测资料的准确和连续。

如表 1 所示，测量 $PM_{2.5}$ 浓度、温度、湿度和气压的仪器均有很高精度。如 $PM_{2.5}$ 浓度和温度的测量精度分别达到 0.01 μg m^{-3} 和 0.01°C。但在实际外场观测中，无人机旋翼附近流场会影响仪器采样，对观测结果造成一定影响。为尽可能减小这种影响，在观测中确保传感器与无人机正向方离旋翼之间距离始终保持大于 20 cm（Villa et al., 2016）。根据风洞及仿真实验，及与探空气球观测结果对比，实际观测中无人机观测的温度误差小于 0.5°C，最大相对湿度误差不超过 10%。无人机每次观测前后，将探空仪器与地面标准气象观测仪器进行对比观测，进一步校准探空仪的仪器误差。

作为中国环境监测网的组成部分，南京地区共有 9 个标准大气污染物监测站。实时监测的大气污染物包括 SO_2、CO、NO_2、O_3、$PM_{2.5}$ 和 PM_{10}。地表感热通量、潜热通量、各辐射分量等由位于南京信息工程大学校园的中国气象局综合观测训练实习基地（32°12'N，118°41'E）的涡度相关系统观测得到。u、v、w 三维风速分量利用 CSAT3 超声风速仪观测，仪器采样频率 10 Hz，水平和垂直方向风速分量的测量误差范围分别为±0.04 和±0.02 m s^{-1}。对于涡度相关观测数据，本文采用了野点值剔除、坐标旋转（即将超声风速的笛卡尔坐标系转换为自然风坐标系；Wilczak et al., 2001）、超声虚温订正和空气密度效应修正（Webb et al., 1980; Lee and Massman, 2011; Foken et al., 2012）等方法进行严格质量控制。

2.2 无人机探空资料校准

资料分析前对原始观测数据进行严格质量控制，具体订正措施包括：（1）剔除观测数据中的野点；（2）将探空仪器地面观测的各气象要素如温、湿风等与气象标准仪器观测数据对比，建立拟合回归方程,用于校准原始探空数据；（3）对 $PM_{2.5}$ 浓度观测数据进行湿度订正及仪器比对标校。如图 1 所示，PDR-1500 利用光散射原理测量颗粒物（如 $PM_{2.5}$）浓度，其结果受湿度影响大。因此需做湿度订正，其公式（柯钊跃，2011）为

$$C_{RH} = 0.601 \cdot C_{PDR} + 9.120, \quad (1)$$

其中，C_{PDR} 代表原始数据，C_{RH} 代表湿度订正后 PDR 所测颗粒物浓度。

将湿度订正后数据 C_{RH} 与地面数据比对拟合，得零点订正公式：

$$C = 0.97 \cdot C_{RH} + 0.98, \quad (2)$$

其中，C 代表校准后颗粒物浓度。

2.3 边界层高度及夹卷厚度的确定

边界层高度对于边界层气象学和空气质量数值预报具有重要意义。确定边界层高度的方法有很多，其中位温梯度法应用最为广泛。边界层高度通常取最大位温梯度所对应的高度（Wang and Wang, 2014）。但有时边界层顶附近位温梯度变化并不显著，利用位温梯度法确定边界层高度存在较大不确定性。鉴于 $PM_{2.5}$ 浓度在夹卷区迅速降低，与位温相比，颗粒物质量浓度垂直分布层次结构特征更加明显。利用 $PM_{2.5}$ 质量浓度的垂直梯度变化可以较为准确地确定边界层高度及夹卷区。同时，$PM_{2.5}$ 质量浓度变化最显著的底部和上部分别定为夹卷区的上下边界。

2.4 边界层参量计算方法

为定量评估气溶胶辐射效应对各夹卷参数的影响，分别计算了对流理查逊数 Ri_*、夹卷速度 w_e 以及对流速度尺度 w_*等。计算公式（苗世光等, 2001; 陈子赟等, 2004）如下所示:

$$Ri_* = \frac{g\Delta\theta h}{T_0 w_*^2}, \quad (3)$$

$$w_e = \mathrm{d}h/\mathrm{d}t, \quad (4)$$

$$w_*^3 = g\left(\overline{w'\theta'}\right)_s h/T_0, \quad (5)$$

其中，g 为重力加速，T_0 为 2 m 处气温，$\Delta\theta$为夹卷

表 1 大气边界层垂直探测所用仪器的主要技术指标

Table 1 Summary of key technical indicators of the instruments used for vertical detection of the atmospheric boundary layer

仪器名称	型号	探测要素	测量范围	探测精度	误差范围
小流量便携式气溶胶颗粒物检测仪	Thermo PDR-1500	$PM_{2.5}$浓度	0～400 mg m^{-3}	0.01 μg m^{-3}	±5%读数
温湿度传感器	sht75	温度 相对湿度	–40～123.8°C 0～100%	0.01°C 0.05%	±0.3°C ±1.8%
数字压力传感器	bmp085	大气压强	300～1100 hPa	0.03 hPa	±0.5 hPa

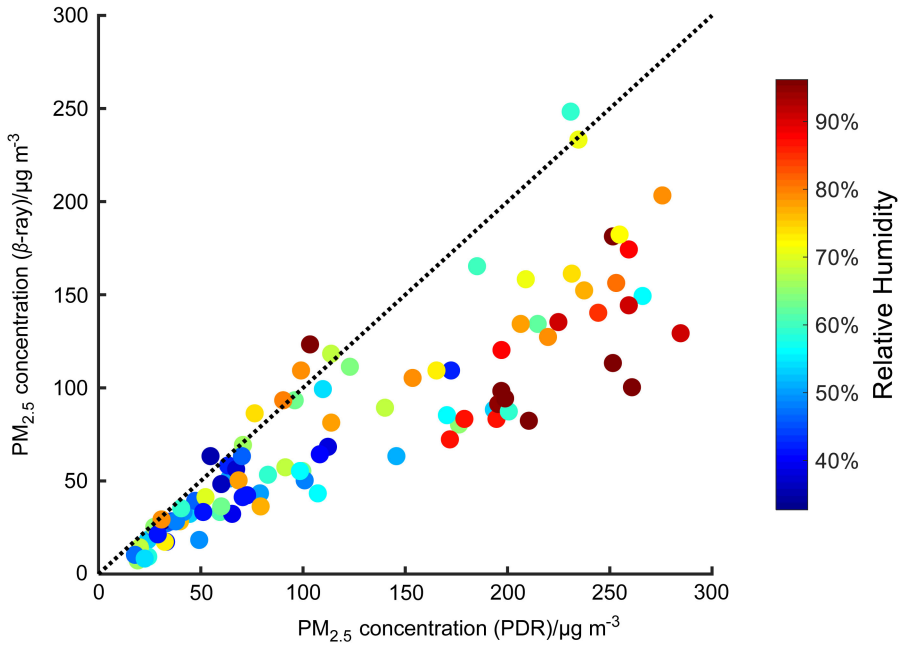

图 1　PDR-1500 无人机（PDR）与热电 β 射线颗粒物监测仪 FH62C14（β-ray）观测的 $PM_{2.5}$ 浓度在不同相对湿度（RH）条件下比较（虚线为 1∶1 线）

Fig. 1　A comparison of $PM_{2.5}$ concentrations measured by PDR-1500 unmanned aerial vehicle (PDR) with a thermo beta ray particle monitor FH62C14 (β-ray) under different relative humidity (RH) conditions (the dotted line is the 1∶1 line)

区位温差，$\left(\overline{w'\theta'}\right)_s$为地表湍流感热通量，$h$ 为边界层高度。

地表垂直热量涡动通量由三维超声风温仪所测的地表感热通量通过以下各式（李敏娜等, 2015; 李娟等, 2016; 贺园园等, 2019）反演得出：

$$\overline{w'\theta'} = \frac{H}{\rho c_p}, \tag{6}$$

其中，H 为地表感热通量（单位：W m^{-2}），ρ 为空气密度（单位：kg m^{-3}），c_p 为定压比热。

其它气象要素如位温和比湿等的计算可参照相关参考盛裴轩等（2013）。

3　结果与讨论

3.1　观测期间天气和大气污染概要

南京属亚热带季风气候，冬季受大陆性气团影响显著。观测期间主要受大陆冷高压及西南低涡影响，经历 3 次雨雪过程，其中 2018 年 1 月 2～4 日有一次主要的雨雪过程，另外在 2017 年 12 月 28 日和 2018 年 1 月 16 日分别有两次短期降水过程。$PM_{2.5}$ 为主要空气污染物，日平均浓度在 12.1～256.3 μg m^{-3}，观测期间有 7 天 $PM_{2.5}$ 浓度超过 2 级标准（24 h 平均浓度超过 75 μg m^{-3}），超标率达 54%。观测期间小时平均浓度最大达 342 μg m^{-3}。图 2 给出了观测期间近地层主要气象要素、臭氧和 $PM_{2.5}$ 浓度的时间演变。观测期间，气温日较差大（最大日较差达 18.0°C），盛行西北到偏北风，降水日为偏东风。1 月 3～4 日和 8～9 日风速约为 3～4 m s^{-1}, 观测日风速均小于 1～2 m s^{-1} 或为静风。12 月 23 日前后受高压天气系统影响，近地层大气污染物不断累积，导致重霾污染发生。其间白天相对湿度小于 74%。另一次重污染过程发生在 12 月 30 日至 1 月 2 日，其中 30 日 $PM_{2.5}$ 最高浓度达 342 μg m^{-3}, 相对湿度均大于 88%，属典型重“雾霾”污染事件。1 月 9～15 日之间空气质量良好，$PM_{2.5}$ 最大小时浓度小于 106 μg m^{-3}。

12 月 23 日为重霾污染，相对湿度较小，而 1 月 12 日污染轻，$PM_{2.5}$ 浓度小于 45 μg m^{-3}。通过对两天各种垂直廓线进行比较，定量评估气溶胶辐射效应对边界层结构演变的影响。

3.2　气溶胶辐射效应对白天对流边界层结构演变的影响

为定量评估气溶胶辐射效应对大气边界层结构演变的影响，图 3 比较了南京江北地区重灰霾污染日（即 2017 年 12 月 23 日，日最大 $PM_{2.5}$ 浓度为

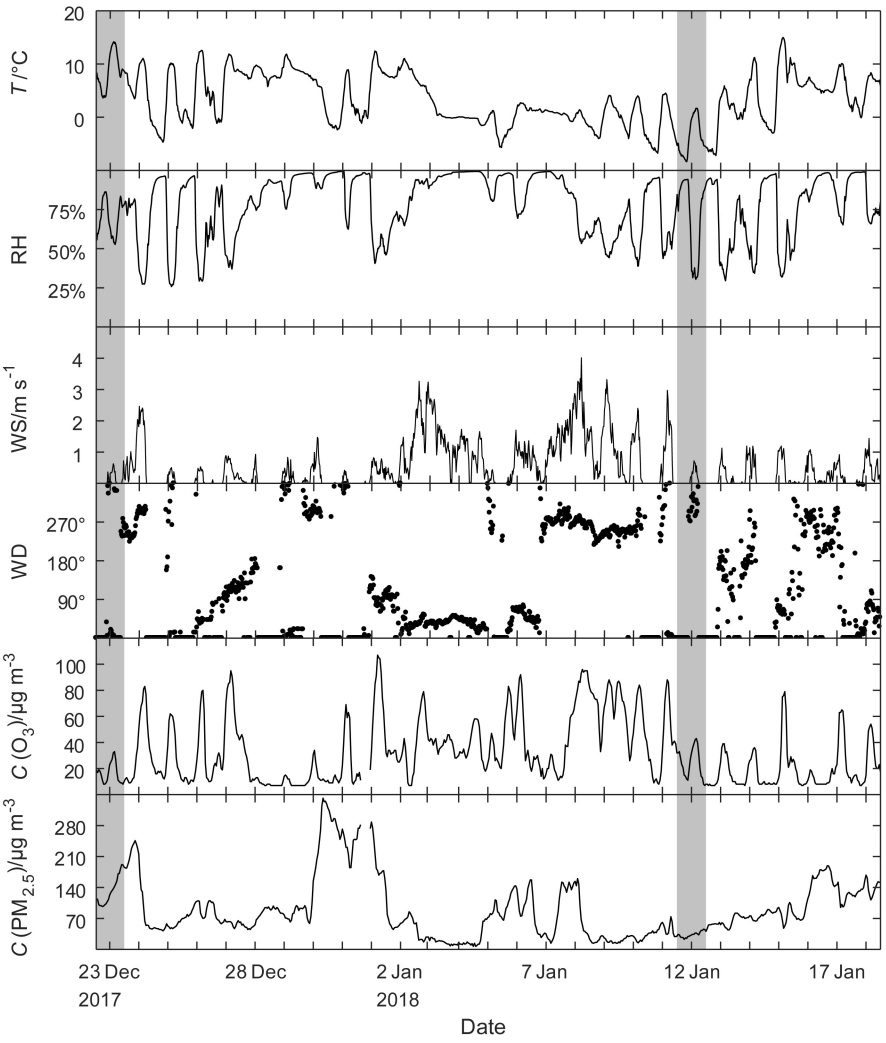

图 2 2017 年 12 月 23 日至 2018 年 1 月 18 日落桥试验站（32°30'N，118°37'E）观测的 2 m 温度、相对湿度（RH）、风速（WS）、风向（WD）及南京环监站（全市站点平均）臭氧、$PM_{2.5}$ 浓度（C）时间序列

Fig. 2 Time series of surface temperature, relative humidity (RH), wind speed (WS), wind direction (WD), O_3, and $PM_{2.5}$ concentration (C) observed at the Luoqiao Test Station (32°30'N, 118°37'E) and Nanjing environmental monitoring station (average of all sites in Nanjing) from December 23, 2017 to January 18, 2018

185 μg m^{-3}）和干净日（2018 年 1 月 12 日，日最大 $PM_{2.5}$ 浓度为 39 μg m^{-3}）$PM_{2.5}$ 浓度、温度和比湿垂直廓线日变化。12 月 23 日一个低压系统由东至西经过南京，风向偏北，地面最大风速为 0.6 m s^{-1}。早晨 08:00，近地层 200 m 存在一强逆温层（图 3c），位温梯度为 1.48 K (100 m)$^{-1}$。污染物和水汽主要积聚在近地层，地面 $PM_{2.5}$ 浓度为 125 μg m^{-3}。随着到达地表太阳短波辐射逐渐增强，近地层气温从 08:00～10:00、10:00～12:00 经历了两次快速升温，位温增温幅度分别达 3.1 K 和 3.5 K（图 3c）。与此同时，边界层内 $PM_{2.5}$ 不断累积，中午 12:00 前后浓度达到最大（163 μg m^{-3}）。受气溶胶辐射效应影响，当天边界层高度低于 490 m。从图 3a, c, e 可以看出，$PM_{2.5}$ 浓度和比湿（q）的垂直分布具有较大相似性，即边界层内浓度大于自由大气浓度；边界层顶部附近（即距离地面 400～500 m 处）$PM_{2.5}$ 浓度增加最为显著，即随着边界层不断发展，污染物主要积聚在边界层顶部。与此相反，位温变化最快处位于近地层，且位温随高度升高而增加但其变化值却随高度升高而逐渐变小；重霾天 $PM_{2.5}$ 垂直结构层次或分层比位温明显清楚得多。

2018 年 1 月 12 日受高压天气系统影响，天气晴好，地面最大风速为 0.72 m s^{-1}，最高气温为 1.7 °C，空气质量良好。与重霾日相比，当日 08:00 近地层

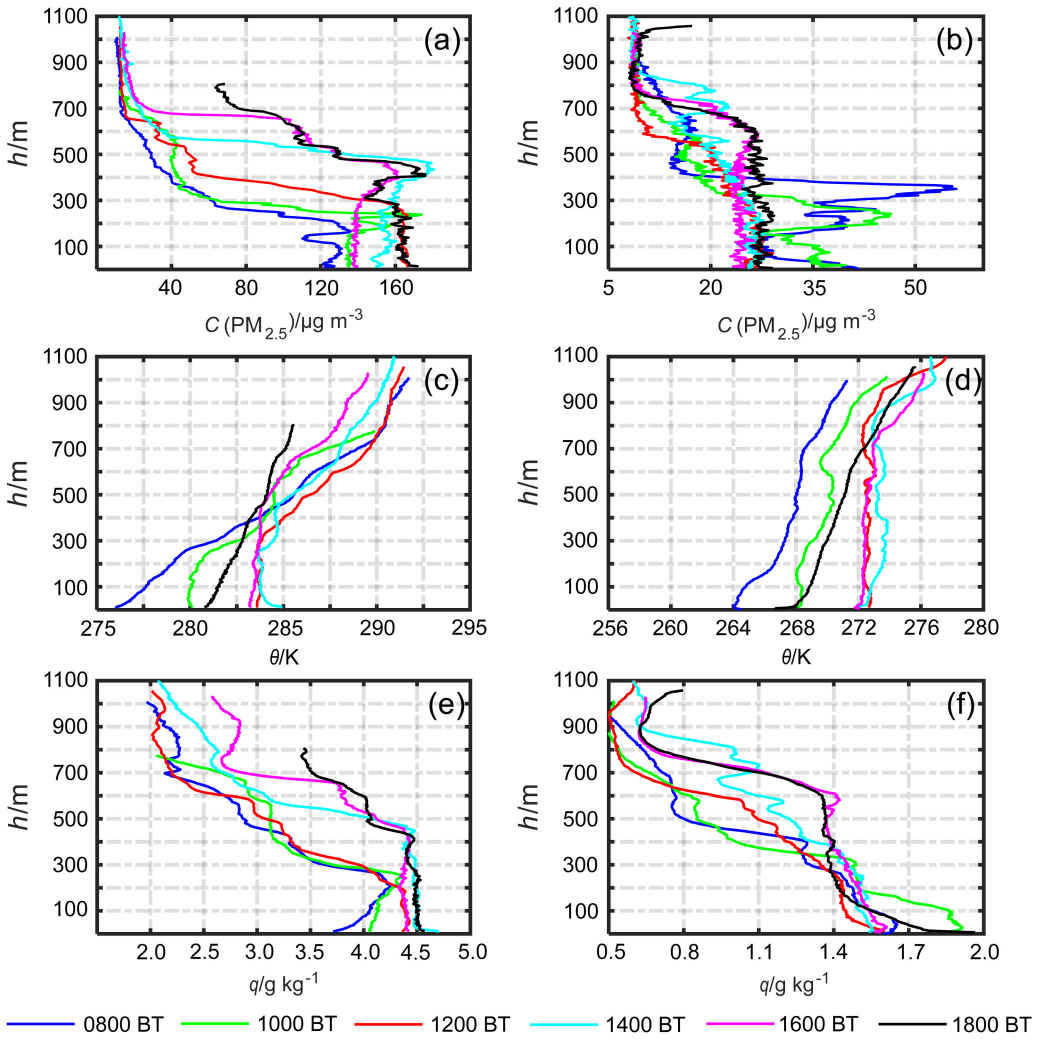

图 3　重霾日（2017 年 12 月 23 日；左列）和干净日（2018 年 1 月 12 日；右列）不同时次 $PM_{2.5}$ 浓度、位温和比湿垂直廓线比较

Fig. 3　Comparison of the vertical profiles of $PM_{2.5}$ concentration, potential temperature, and specific humidity on December 23, 2017 (Heavy haze day, left column) and January 12, 2018 (clear day, right column). BT means Beijing time

逆温强度明显弱得多 [约为 0.73 K $(100\ m)^{-1}$]。同时，当日 08:00～12:00 近地层位温增量（8.2 K）大于重霾日（6.6 K）。由于灰霾浓度较低，气溶胶对到达地表太阳辐射的衰减作用不显著，最大地表感热通量 150.8 W m^{-2}，是重霾日 3.1 倍，且边界层高度达 810 m，是重霾日（490 m）的 1.65 倍。可见，驱动边界层发展的关键因子是地表感热通量，而与地表温度高低关系不大。$PM_{2.5}$ 廓线显示，早晨 08:00 边界层顶部有一浓度达 56 μg m^{-3} 的灰霾累积层（图 3b）；随着地表太阳辐射增大，湍流加强，边界层顶部灰霾累积层消失；湍流发展旺盛时（12:00～16:00），灰霾在边界层内充分混合，其浓度垂直分布与位温相似；边界层顶部不存在灰霾累积现象，灰霾浓度增加不明显。

气溶胶辐射效应对边界层热力结构及其演变有着重要影响。高浓度灰霾衰减到达地表短波辐射，显著降低到达地表感热通量。同干净日（2018 年 1 月 12 日）相比，重霾日（2017 年 12 月 23 日）感热通量显著减少（图 4），日间平均地表感热通量降低了 67%（将感热通量为正值的时间段判定为白天），日最大感热通量减少了 102 W m^{-2}，与中尺度大气模式（MesoNH）模拟结果（100～150 W m^{-2}；Mallet et al., 2009）相近。又如，张晗宇等（2018）利用 WRF-Chem 模式对京津冀地区气溶胶直接反馈效应对各气象要素的影响进行模拟研究发现，气溶胶直接反馈效应导致京津冀地区整个时段太阳辐射量降低 39.8 W m^{-2}，气温下降 0.34°C，边界层高度降低 37 m。考虑到模式分析存在一定的理想性

且所选个例本身天气形势不同，导致最终结果存在一定差异。

如图 5 所示，随着 $PM_{2.5}$ 浓度增加，地表感热通量明显减小。如当 $PM_{2.5}$ 浓度从 20 μg m^{-3} 增加到 160 μg m^{-3} 时，地表感热通量减小了 72%。同时，气溶胶影响白天近地层温度递减率，加大近地层大气稳定度。比如，10:00～16:00，重霾日近地层温度递减率为 0.49～0.86 K (100 m)$^{-1}$，而干净日为 0.81～1.09 K (100 m)$^{-1}$。这与张敏等（2018）在天津观测的结果相一致。气溶胶辐射效应减弱边界层内湍流活动。如近地层摩擦速度，是描述动量垂直输送或湍流产生的关键参数之一，在重霾天，日间最大摩擦速度为 0.13 m s^{-1}，比干净日降低了 46%（0.24 m s^{-1}）；对流速度尺度，描述对流强弱的关键参数，日间最大对流速度尺度为 0.69 m s^{-1}，比干净天降低了 50%（1.37 m s^{-1}；见表 2）。高浓度灰霾导致边界层发展延迟，抑制边界层发展。比如重霾日（2017 年 12 月 23 日）最高边界层发展速度出现时间比干净日（2018 年 1 月 12 日）延迟了近 2 个小时，重霾天其值也明显低于干污染较轻的边界层天（54 m h^{-1} 相对于 112 m h^{-1}）；边界层最大高度也明显低于灰霾浓度较低的边界层。需要指出的，导致这些差异的因素较多。除了气溶胶浓度，其它因子会造成一定影响。比如两个个例之间因出现时间不同而存在一定太阳高度角差异，此外天气条件如云量和相对湿度等均可造成一定影响。但总体而言，这些观测结果与数值模拟研究结论相吻合（Yu et al., 2002, Barbaro et al., 2014）。

3.3 灰霾对夹卷的影响及夹卷参数特征分析

夹卷区厚度和夹卷速度是描述夹卷过程的两个重要参数。利用大涡模式模拟研究边界层及夹卷过程时，夹卷区厚度的初值通常取边界层顶上下两个垂直网格点（Huang et al., 2008）。然而实际夹卷区厚度及该厚度如何随灰霾污染程度如何变化，尚不清楚。本文利用外场观测资料，计算灰霾污染不同程度条件下夹卷区厚度，并进一步评估气溶胶辐射效应对夹卷过程的影响。

图 6 给出了这次观测期间白天 08:00～16:00 夹

表 2 2017年12月23日与2018年1月12日气温（T）、地表$PM_{2.5}$浓度（C）、地表感热通量（H_s）、边界层高度（PBLH）、夹卷厚度（$\triangle h$）、摩擦速度（u^*）、夹卷速度（w_e）、对流速度尺度（w_*）的比较（表中所给值均为一天中最大值）

Table 2 A comparison of measured temperature (T), surface $PM_{2.5}$ concentrations (C), surface sensible heat flux (H_s), planetary boundary layer height (PBLH), entrainment thickness ($\triangle h$), friction velocity (u_*), the winding speed (w_e), the convection speed scale (w_*) between December 23, 2017 and January 12, 2018 (the values represent the maximum ones on each day)

	T/°C	C($PM_{2.5}$)/μg m^{-3}	H_s/W m^{-2}	PBLH/m	$\triangle h$/m	u_*/m s^{-1}	w_e/m s^{-1}	w_*/m s^{-1}
2017年12月23日	14.2	163.61	48.50	490	249	0.13	0.015	0.67
2018年1月12日	1.7	38.65	150.84	811	150	0.24	0.031	1.33

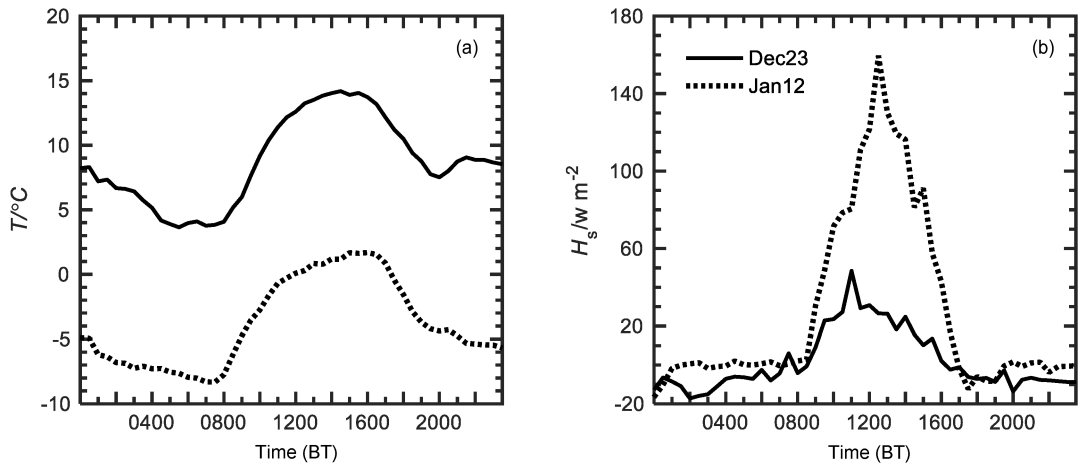

图 4 2017 年 12 月 23 日与 2018 年 1 月 12 日（a）气温、（b）感热通量（H_s）的日变化

Fig. 4 (a) Diurnal variation of 2-m air temperature and (b) surface sensible heat fluxes (H_s) on December 23, 2017 and January 12, 2018

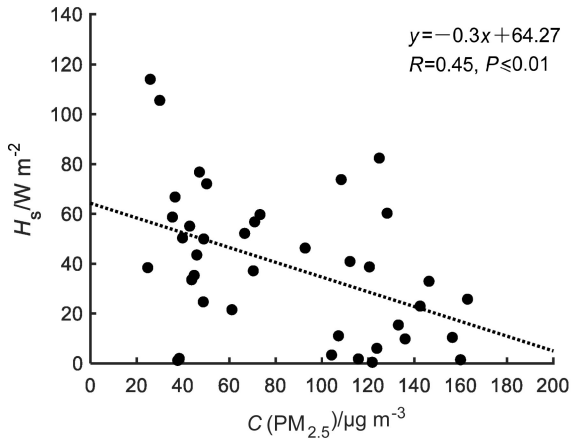

图 5　地表感热通量（H_s）随地面观测 $PM_{2.5}$ 浓度变化关系。

Fig. 5　The relationship between surface sensible heat fluxes (H_s) and $PM_{2.5}$ concentrations

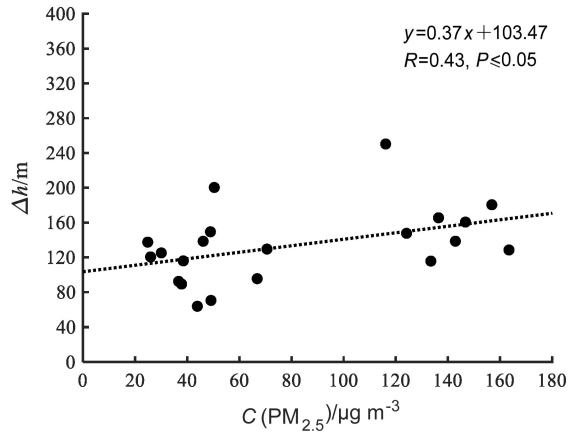

图 6　夹卷厚度随近地层 $PM_{2.5}$ 浓度的变化

Fig. 6　Change in entrainment thickness with $PM_{2.5}$ concentrations near surface

卷厚度随近地层 $PM_{2.5}$ 浓度变化。其中夹卷厚度是根据 $PM_{2.5}$ 浓度廓线梯度变化确定。观测显示，夹卷厚度在 60～250 m 之间变化，与大涡模拟（LES）初值的设定较为吻合，如 Huang et al.（2011）在 LES 研究中设置 80 m。当 $PM_{2.5}$ 浓度从 20 μg m^{-3} 增加到 160 μg m^{-3} 时，夹卷厚度增加了 47%，验证了 LES 模式关于气溶胶辐射效应对于夹卷厚度影响的结论。Liu et al.（2019）利用 LES 研究气溶胶对于夹卷厚度的影响，发现当大气气溶胶光学厚度从 0 增加到 1.5 时，夹卷厚度增加了 16%～28%。因此，利用 LES 研究灰霾条件下边界层和夹卷过程时，夹卷厚度初值的设定应随 $PM_{2.5}$ 浓度的升高而适当增加。

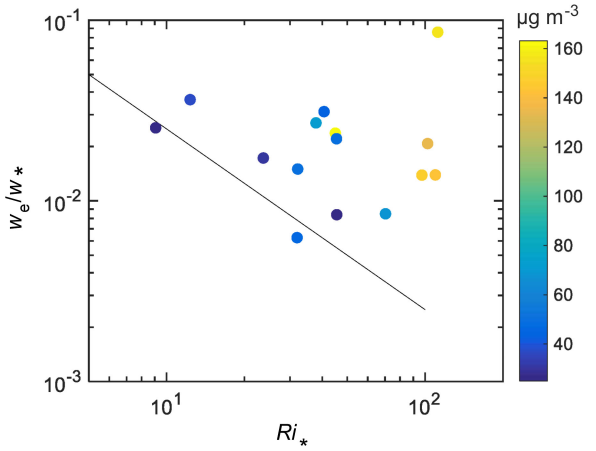

图 7　对数坐标系下无量纲化夹卷速度与对流理查逊数对应关系。填色代表 $PM_{2.5}$ 浓度，单位：μg m^{-3}，实线为干净天时两者函数关系（Deardorff et al., 1980），即$w_e/w_* = 0.25Ri_*^{-1}$

Fig. 7　Correspondence between dimensionless entrainment rate and convective Richardson number in the logarithmic coordinate system. Colour filling represents $PM_{2.5}$ concentration, units: μg m^{-3}; the solid line is the function relationship on clean days (Deardorff et al., 1980), $w_e/w_* = 0.25Ri_*^{-1}$

图 7 进一步给出了不同灰霾污染（即 $PM_{2.5}$ 浓度）条件下无量纲化夹卷速度随对流理查逊数的变化关系。其中对流理查逊数代表夹卷区的稳定度（Barbaro et al., 2013; Liu et al., 2019），其大小与夹卷区位温差及地面感热通量有关，高浓度 $PM_{2.5}$ 对应着夹卷区高位温差及更大的对流理查逊数，无量纲化夹卷速度代表夹卷速度和对流速度的比值。从图 7 可以看出，灰霾浓度升高时，夹卷速度和对流速度尺度同时减小，但后者减少幅度大于地表感热通量，导致无量纲化夹卷速度增加；无量纲化夹卷速度与对流理查逊数关系不再符合负 1 次方幂函数关系。且当 $PM_{2.5}$ 浓度越大，越偏离负 1 次方函数曲线。

4　结论

利用无人机搭载 PDR-1500 颗粒物测量仪以及温、湿、气压传感器，在南京市江北浦口区永丰开展了为期 2 周的边界层探空观测。结合无人机探空廓线和其它地面观测资料，研究了灰霾污染条件下边界层内各要素垂直结构的变化，评估了灰霾污染条件下气溶胶辐射效应对边界层结构及夹卷过程的影响，结果表明：

灰霾削弱到达地表的太阳辐射，降低地表感热通量，削弱湍流强度，推迟对流边界层发展，并抑

制大气边界层高度发展。灰霾进一步降低近地层温度递减率，增加近地层大气稳定度，进而导致灰霾污染加重，存在一种正反馈机制。重霾污染条件下，大气边界层顶部存在灰霾累积区，且灰霾污染浓度增长最快的区域在边界层顶部而不是近地层。

夹卷厚度随气溶胶浓度升高而增大。受气溶胶辐射效应的影响，无量纲化夹卷速度与对流理查逊数关系不再符合负 1 次幂函数关系。

观测分析充分表明，气溶胶辐射效应对边界层及夹卷过程有着重要影响。为进一步提高重霾污染条件下天气和空气质量数值预报水平，在边界层和夹卷过程参数化方案中必须考虑气溶胶辐射效应的影响。

致谢 感谢南京信息工程大学大气观测场提供涡度相关数据，感谢南京信息工程大学大气环境中心落桥试验站提供基本气象要素数据。

参考文献（References）

Angevine W M, Grimsdell A W, McKeen S A. 1998. Entrainment results from the flatland boundary layer experiments [J]. J. Geophys. Res., 103(D12): 13689−13701. doi:10.1029/98JD01150

Atwater M A. 1971. The radiation budget for polluted layers of the urban environment [J]. J. Appl. Meteor., 10(2): 205−214. doi:10.1175/1520-0450(1971)010<0205:TRBFPL>2.0.CO;2

Barbaro E, De Arellano J V G, Krol M C, et al. 2013. Impacts of aerosol shortwave radiation absorption on the dynamics of an idealized convective atmospheric boundary layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 148(1): 31−49. doi:10.1007/s10546-013-9800-7

Barbaro E, De Arellano J V G, Ouwersloot H G, et al. 2014. Aerosols in the convective boundary layer: Shortwave radiation effects on the coupled land-atmosphere system [J]. J. Geophys. Res., 119(10): 5845−5863. doi:10.1002/2013JD021237

Boers R, Eloranta E W. 1986. Lidar measurements of the atmospheric entrainment zone and the potential temperature jump across the top of the mixed layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 34(4): 357−375. doi:10.1007/BF00120988

陈子赟, 孙鉴泞, 蒋维楣, 等. 2004. 对流边界层顶部夹卷速度参数化的分析研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 40(6): 692−700. Chen Ziyun, Sun Jianning, Jiang Weimei, et al. 2004. Comparison of parameterizations of the entrainment rate at the top of the convective boundary layer [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 40(6): 692−700. doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2004.06.005

Deardorff J W, Willis G E, Stockton B H. 1980. Laboratory studies of the entrainment zone of a convectively mixed layer [J]. J. Fluid Mech., 100(1): 41−64. doi:10.1017/S0022112080001000

Fedorovich E, Conzemius R, Mironov D. 2004. Convective entrainment into a shear-free, linearly stratified atmosphere: Bulk models reevaluated through large eddy [J]. J. Atmos. Sci., 61(3): 281−295. doi:10.1175/1520-0469(2004)061<0281:CEIASL>2.0.CO;2

Foken T, Leuning R, Oncley S R, et al. 2012. Corrections and data quality control [M]//Aubinet M, Vesala T, Papale D. Eddy Covariance. Dordrecht: Springer, 85-131. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057

贺园园, 胡非, 刘郁珏, 等. 2019. 北京地区一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程的边界层特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(1): 61−72. He Yuanyuan, Hu Fei, Liu Yujue, et al. 2019. Boundary layer characteristics during a heavy $PM_{2.5}$ pollution process in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(1): 61−72. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18057

Huang J P, Lee X, Patton E G. 2008. A modelling study of flux imbalance and the influence of entrainment in the convective boundary layer [J]. Bound.-Layer Meteor., 127(2): 273−292. doi:10.1007/s10546-007-9254-x

Huang J P, Lee X, Patton E G. 2009. Dissimilarity of scalar transport in the convective boundary layer in inhomogeneous landscapes [J]. Bound.-Layer Meteor., 130(3): 327−345. doi:10.1007/s10546-009-9356-8

Huang J P, Lee X, Patton E G. 2011. Entrainment and budgets of heat, water vapor, and carbon dioxide in a convective boundary layer driven by time-varying forcing [J]. J. Geophys. Res., 116(D6): D06308. doi:10.1029/2010JD014938

Huang J P, Zhou C H, Lee X, et al. 2013. The effects of rapid urbanization on the levels in tropospheric nitrogen dioxide and ozone over East China [J]. Atmos. Environ., 77: 558−567. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.05.030

Jacobson M Z, Kaufman Y J. 2006. Wind reduction by aerosol particles [J]. Geophys. Res. Lett., 33(24): L24814. doi:10.1029/2006GL027838

柯钊跃. 2011. 典型污染源或敏感点大气颗粒物的组分特征与健康暴露水平研究 [D]. 华南理工大学硕士学位论文, 24pp. Ke Zhaoyue. 2011. Research on compositional characteristics and health exposure levels of atmosphere particulate matter in typical pollution sources or sensitive spots [D]. M. S. thesis (in Chinese), South China University of Technology, 24pp.

Kim S W, Park S U, Moeng C H. 2003. Entrainment process in the convective boundary layer with varying wind shear [J]. Boundary Layer Meteorology, 108: 221−245. doi:10.1023/A:1024170229293

Lee X, Massman W J. 2011. A perspective on thirty years of the Webb, Pearman and Leuning density corrections [J]. Bound.-Layer Meteor., 139(1): 37−59. doi:10.1007/s10546-010-9575-z

李敏娜, 牛生杰, 张舒婷, 等. 2015. 南京雾霾天气个例湍流运动特征的对比研究 [J]. 气象学报, 73(3): 593−608. Li Minna, Niu Shengjie, Zhang Shuting, et al. 2015. Comparative study of turbulent characteristics between the fog day and haze day in Nanjing [J]. Acta Meleorologica Sinica (in Chinese), 73(3): 593−608. doi:10.11676/qxxb2015.032

李娟, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. 青藏高原东南部复杂地形区不同天气状况下陆气能量交换特征分析 [J]. 大气科学, 40(4): 777−791. Li Juan, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Characteristics of land-atmosphere energy exchanges over complex terrain area of Southeastern Tibetan Plateau under different synoptic conditions [J].

Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(4): 777−791. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15197

李德平, 程兴宏, 孙治安, 等. 2018. 北京不同区域气溶胶辐射效应 [J]. 应用气象学报, 29(5): 609−618.　Li Deping, Cheng Xinghong, Sun Zhian, et al. 2018. Radiative effects of aerosols in different areas of Beijing [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 29(5): 609−618. doi:10.11898/1001-7313.20180509

Liu C, Fedorovich E, Huang J P, et al. 2019. Impact of aerosol shortwave radiative heating on entrainment in the atmospheric convective boundary layer: A large-eddy simulation study [J]. J. Atmos. Sci., 76(3): 785−799. doi:10.1175/JAS-D-18-0107.1

Mallet M, Tulet P, Serça D, et al. 2009. Impact of dust aerosols on the radiative budget, surface heat fluxes, heating rate profiles and convective activity over West Africa during March 2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(18): 7143−7160. doi:10.5194/acp-9-7143-2009

苗世光, 蒋维楣, 李昕, 等. 2001. 对流边界层大涡模式的改进及对夹卷速度的研究 [J]. 大气科学, 25(1): 25−37.　Miao Shiguang, Jiang Weimei, Li Xin, et al. 2001. Improvements of the large eddy simulation models and a study of the entrainment rate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(1): 25−37. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.01.03

Shen L X, Zhao C F, Ma Z S, et al. 2019. Observed decrease of summer sea-land breeze in Shanghai from 1994 to 2014 and its association with urbanization [J]. Atmospheric Research, 227: 198−209. doi:10.1016/j.atmosres.2019.05.007

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, 19-134.　Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2013. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 19-134.

Sorbjan Z. 1996. Effects caused by varying the strength of the capping inversion based on a large eddy simulation model of the shear-free convective boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 53(14): 2015−2024. doi:10.1175/1520-0469(1996)053<2015:ECBVTS>2.0.CO;2

Sullivan P P, Moeng C H, Stevens B, et al. 1998. Structure of the entrainment zone capping the convective atmospheric boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 55(19): 3042−3064. doi:10.1175/1520-0469(1998)055<3042:SOTEZC>2.0.CO;2

田文寿, 陈长和, 黄建国, 等. 1997. 兰州冬季气溶胶的短波加热效应及其对混合层发展的影响 [J]. 应用气象学报, 8(3): 292−301.　Tian Wenshou, Chen Changhe, Huang Jianguo, et al. 1997. The solar heating effect of the winter aerosol in Lanzhou and its influence on evolution of the mixed layer [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorlolgy (in Chinese), 8(3): 292−301.

Van Zanten M C, Duynkerke P G, Cuijpers J W M. 1999. Entrainment parameterization in convective boundary layers [J]. J. Atmos. Sci., 56(6): 813−828. doi:10.1175/1520-0469(1999)056<0813:EPICBL>2.0.CO;2

Villa T, Salimi F, Morton K, et al. 2016. Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements [J]. Sensors, 16(12): 2202. doi:10.3390/s16122202

Wang X Y, Wang K C. 2014. Estimation of atmospheric mixing layer height from radiosonde data [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 7(6): 1701−1709. doi:10.5194/amt-7-1701-2014

Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106(447): 85−100. doi:10.1002/qj.49710644707

Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. Bound.-Layer Meteor., 99(1): 127−150. doi:10.1023/A:1018966204465

吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 32(2): 257−269.　Wu Dui. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 32(2): 257−269. doi:10.13671/j.hjkxxb.2012.02.011

吴丹, 于亚鑫, 夏俊荣, 等. 2014. 我国灰霾污染的研究综述 [J]. 环境科学与技术, 37(S2): 295−304.　Wu Dan, Yu Yaxin, Xia Junrong, et al. 2014. Hazy pollution research of China: A review [J]. Environ. Sci. Technol. (in Chinese), 37(S2): 295−304.

徐强君, 孙鉴泞, 刘罡, 等. 2008. 夹卷层厚度定义对其参数化的影响 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 44(2): 219−226.　Xu Qiangjun, Sun Jianning, Liu Gang, et al. 2008. On the definition and parameterization of the entrainment zone depth at the top of convective boundary layer [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 44(2): 219−226. doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2008.02.015

Yang X, Zhao C F, Guo J P, et al. 2016. Intensification of aerosol pollution associated with its feedback with surface solar radiation and winds in Beijing [J]. J. Geophys. Res., 121(8): 4093−4099. doi:10.1002/2015JD024645

于超, 张蕾. 2019. 南京北郊大气能见度影响因子研究 [J]. 三峡生态环境监测, 4(1): 56−60.　Yu Chao, Zhang Lei. 2019. The influence factors of atmospheric visibility in Nanjing's Northern Suburb [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges (in Chinese), 4(1): 56−60. doi:10.19478/j.cnki.2096-2347.2019.01.08

Yu H B, Liu S C, Dickinson R E. 2002. Radiative effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer [J]. J. Geophys. Res., 107(D12): 4142. doi:10.1029/2001JD000754

Zhang K Y, Zhao C F, Fan H, et al. 2020. Toward understanding the differences of $PM_{2.5}$ characteristics among five China urban cities [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 56: 493−502. doi:10.1007/s13143-019-00125-w

张敏, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 2018. 天津污染天气边界层温度层结变化特征及预报阈值确定 [J]. 环境科学学报, 38(6): 2270−2278.　Zhang Min, Cai Ziying, Han Suqin, et al. 2018. The research on threshold and regularity of temperature stratification in heavy pollution weather in Tianjin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 38(6): 2270−2278. doi:10.13671/j.hjkxxb.2018.0066

张晗宇, 温维, 程水源, 等. 2018. 京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究 [J]. 中国环境科学, 38(4): 1209−1220.　Zhang Hanyu, Wen Wei, Cheng Shuiyuan, et al. 2018. Study on typical heavy pollution process and feedback effect in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science (in Chinese), 38(4): 1209−1220. doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0144

Zhao C F, Wang Y, Shi X Q, et al. 2019. Estimating the contribution of local primary emissions to particulate pollution using high-density station observations [J]. J. Geophys. Res., 124(3): 1648−1661. doi:10.1029/2018jd028888