杨显轲, 严家德, 郭建侠, 等. 2018. 百叶箱内部风场特征仿真分析 [J]. 气候与环境研究，23 (4): 493−503. Yang Xianke, Yan Jiade, Guo Jianxia, et al. 2018. Simulation analysis of wind field characteristics inside the reinforced plastics screen [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (4): 493−503, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17129.

百叶箱内部风场特征仿真分析

杨显轲[1, 2]　严家德[1]　郭建侠[3]　王巍巍[1, 2]　刘倩[1, 2]　姜枫[1, 2]

1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室，南京 210044
2 中国气象局气象综合观测培训实习基地（南京），南京 210044
3 中国气象局气象探测中心，北京 100081

摘　要　流经传感器的风速是决定百叶箱气温测量精度的主要因素之一。基于计算流体动力学 CFD 仿真，对我国地面气象观测中广泛应用的玻璃钢百叶箱内部风场特征进行了研究。结果表明，受长方体结构特征以及侧面叶片导流的影响，百叶箱内部风场具有明显的非均一性特征，在水平剖面和垂直剖面上分别出现明显的梭形流场和环形流场；百叶箱对环境空气的流动具有明显的阻挡作用，平均相对风速减小率在箱体中轴线上存在明显的垂直差异，最小值 53%出现在 0.08 m 附近，同时在 0.25 m 和 0.55 m 高度附近分别存在值为 85%和 88%的局部最大值。平均相对风速减小率随环境风向的改变而呈周期性变化，当环境风向与箱体侧面成 45°、135°、225°和 315°时，出现极小值 73%，当环境风向与箱体侧面成 0°、90°、180°和 270°时，出现极大值 93%。

关键词　风速风向　玻璃钢百叶箱　CFD 仿真　平均相对风速减小率

文章编号　1006-9585（2018）04-0493-11　　中图分类号　P461　　文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17129

Simulation Analysis of Wind Field Characteristics inside the Reinforced Plastics Screen

YANG Xianke[1, 2], YAN Jiade[1], GUO Jianxia[3], WANG Weiwei[1, 2], LIU Qian[1, 2], and JIANG Feng[1, 2]

1 *Key Laboratory for Aerosol–Cloud–Precipitation of China Meteorological Administration*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044
2 *Integrated Meteorological Observing Training and Practice Base of China Meteorological Administration* (*Nanjing*), *Nanjing* 210044
3 *Meteorological Exploration Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract　The wind flowing through the sensor is one of the main factors determining the accuracy of the temperature measurement of reinforced plastics screen. Based on the computational fluid dynamics (CFD) simulation, the relationship between the wind of reinforced plastics screen and the environmental wind which is widely used in surface meteorological observation is studied. The results show that due to the influence of the cuboid structure and the lateral vane diversion, the wind of reinforced plastics screen is obviously inhomogeneous. Obvious fusiform flow and annular flow fields appear on the horizontal and vertical profiles, respectively. Reinforced plastics screen has significant blocking effect on the flow of

收稿日期　2017-08-22；**网络预出版日期**　2018-04-19

作者简介　杨显轲，男，1997 年出生，本科，主要从事地面气象资料分析。E-mail: 1047071113@qq.com

通讯作者　严家德，E-mail: yanjd@nuist.edu.cn

资助项目　国家自然科学基金（NSFC41505136），公益性行业（气象）科研专项（GYHY201106049），南京信息工程大学本科生地球科学类实验课程创新项目(SYCX201627)

Funded by　National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grant 41505136), Special Fund for Meteorological Scientific Research in the Public Interest (Grant GYHY201106049), Innovative program of experimental course for undergraduates in Geosciences of Nanjing University of Information Science and Technology (Grant SYCX201627)

air. There is vertical difference in the average relative wind speed reduction ratio along the axis of reinforced plastics screen, and the minimum is 53% at around 0.08-m height. At the heights of around 0.25 m and 0.55 m, the local maximum values of average relative wind speed reduction ratio can reach up to 85% and 88%, respectively. The average relative wind speed reduction ratio varies periodically with changes in the environmental wind direction. When the wind directions are 45°, 135°, 225°, and 315°, the minimum value is 73%. When the wind direction is 0°, 90°, 180°, and 270°, the maximum value is 93%.

Keywords Wind speed and direction, Reinforced plastics screen, CFD simulation, Average relative wind speed reduction ratio

1 引言

气温是常规地面气象观测的基本要素，其观测方法和误差直接关系到预报精度和对大气过程的理解（Lin et al.，2001a；熊安元等，2006；Thomas and Smoot，2013；严家德等，2015；徐伟等，2015）。开展不同气温观测系统间的对比和分析，保证观测数据的准确性和可比较性，对大气科学以及天气气候的预测、预报研究具有重要意义（王晓蕾和林捷，2006；张爱丽等，2013；严家德等，2014a，2015；徐伟等，2015）。当前我国台站主要的测温仪器有两种，分别是温湿传感器和玻璃水银温度表；造成地面气温观测误差的主要原因有 3 种：仪器变化、太阳辐射和通风影响（Kurzeja，2010；严家德等，2014b），因此气温误差分析一直是国内外学者研究的重点。而风作为重要的气象要素，不仅能够反映出天气现象和大气环流的特征，还能促使百叶箱内部空气产生对流，影响百叶箱内外辐射传输，因此区域风速的变化对百叶箱内部流场有很大影响。

不少关于中国区域风速观测的研究表明，随着最近 30 年来的气候变化，环境平均风速的大小出现了不同程度的减小，并出现了一定的区域变化，这可能表明不同区域不同时期的风速对百叶箱内部流场有不同的影响。国外相关学者发现，在过去 30 年间，大多数地区近地面风速都在减弱，平均风速递减率为 0.009～0.010 m s^{-1} a^{-1}（Pirazzoli and Tomasin，2003；Pryor et al.，2007；Roderick et al.，2007）。国内的相关研究结果也表明过去几十年间，我国地区风速出现了减小的情况，年平均风速下降了 28%，1951～2002 年中国平均风速减小率在 0.010 m s^{-1} a^{-1} 以下，在 1969～2002 年期间则达到 0.020 m s^{-1} a^{-1}（任国玉等，2005；Xu et al.，2006）。熊敏诠（2015）的研究则表明近 30 年中国地面风速总体而言不仅减小，还存在了空间区域变化，通过对中国分区研究，得到我国西部、北部、东部地区的风速呈现减小的趋势，平均风速减小率在 0.020 m s^{-1} a^{-1} 以上；我国中部风速呈现递增的趋势，平均风速增加率为 0.011 m s^{-1} a^{-1}。这些研究表明近几十年中国风速存在时空变化的特征，而这些外部风场的时空变化特征又会直接影响到百叶箱内部流场，进而影响气温观测误差。Lin et al.（2001a）曾表明传感器附近的风速是决定百叶箱内外温差的主要因素之一。在观测方面，环境风速的大小会对通风防辐射装置的通风效率产生影响，良好的通风可以有效地减小仪器的气温观测误差（Nakamura and Mahrt，2005；任芝花等，2006；Kurzeja，2010；严家德等，2014b，2015）。因此对环境风场与百叶箱内部风场关系的研究是很有必要的，有助于我们了解外部风场对内部风场的影响，更加清楚地认识内部流场和风速大小与外部风场的联系。

综合现有的关于风向风速影响百叶箱的研究，大致可以归纳为两类：一是不同风速条件下百叶箱内外温度的差异变化分析（Lin et al.，2001b；余君等，2007；鞠晓慧等，2010；Kurzeja，2010；苑跃等，2011；严家德等，2014b），即通过传感器测量百叶箱内外温差，从而建立环境风速与温差之间的联系。结果表明环境风速较小时，百叶箱内外温差较大；环境风速较大时，百叶箱内外温差相对较小。二是不同通风类型装置的内外温差对比分析（Quayle et al.，1991；Sun et al.，2005；WMO，2008；严家德等，2015），即对比自然通风型和强制通风型装置气温观测系统的误差大小。结果表明，自然通风型防辐射装置和强制通风型防辐射装置的内外温差存在较大的差异，强制通风型防辐射装置间的内外温差较小；并且良好的通风可以有效地减小仪器的观测误差。可以发现，现有研究成果多集中在环境风速对百叶箱内外温差影响的分析及不同通风类型装置对内外温度误差大小的分析，对百叶箱内部风速与环境风场的关系研究偏少，特别是对

百叶箱内部环流变化及内部风速随环境风场的变化缺乏系统认识。不仅如此，因为百叶箱内部没有直接测量风速风向的仪器，因此很难获取数据从而了解环境风速风向对百叶箱温湿风压测量的影响。

为了研究环境风速风向对百叶箱内部环流、内部风速变化的影响，针对风速风向误差的具体问题，本文基于计算流体动力学 CFD 方法对风速风向进行数值模拟计算分析。CFD 方法是一种由计算机通过求解控制流体流动的偏微分方程组，从而模拟流体流动、传热及相关传递现象的系统分析方法和工具，凭借其适用性强和应用面广的特点被广泛应用到空气动力学领域，在气象分析方面也有较多的应用，该方法基于特定背景风场和温度场的模拟计算，对环境评价有一定的意义（闫敬华等，2006；刘清惓等，2013；孙帮成和李明高，2013；冒晓莉等，2014）。本文首先对百叶箱进行仿真，模拟出百叶箱内部的风场结构，然后结合环境风速风向变化分析其对百叶箱内部风速的影响，最后引入相对风速减小率来表征百叶箱内部风速随环境风速风向变化的情况。研究成果对于百叶箱内部仪器位置的参考放置以及数据误差的修订具有很大的参考意义。

2 建模与方法

本文仿真所用的玻璃钢百叶箱的主要材料为不饱和聚酯树脂和玻璃纤维布（QX/T 193-2013），四壁由两排薄的叶片构成，百叶板条分别向内向外倾斜于水平呈 45°角度。箱底由木隔板组成，每块宽 110 mm，中间一块比边上两块稍高一些。箱盖由两层玻璃钢制成，其间空气能够自由流通，下面一层玻璃钢是水平的，上面一层玻璃钢向后倾斜，覆盖箱顶，并稍稍向四面伸出，箱内部高 618 mm，宽 466 mm，深 462 mm。

2.1 三维实体建模

本文结合实际百叶箱的使用情况，建立百叶箱的仿真模型。在构建模型的空气域时，考虑到较大的空气域可以提高计算精度，但同时会增加计算量，本文选择空气域的大小为 1.2 m×1.2 m× 1.4 m，能够满足计算要求。建模时采用直角坐标系，定义 x、y、z 方向分别指向正北、天顶和正东方向，并定义正北方向风场的风向为 0°。根据行业标准（QX/T 193-2013），百叶箱的测温元件感应部分中心应该在离地 1.50 m 高度处，允许误差范围为±5 cm。百叶箱应水平地固定在一个特制的支架上，支架应牢固地埋入地下，顶端约高出地面 125 cm。因此，本文建模分析时重点分析距离百叶箱底部隔板高度为 0.25 m 处的风速大小。为了建模仿真的方便，忽略百叶箱门的设置，假设四壁都一样。

2.2 网格划分

对百叶箱模型进行划分时，采用三维网格划分的方法，考虑到计算量大小问题，对 x 和 z 方向划分网格数为 24，y 方向划分的网格数为 27。百叶箱固体与空气流体之间接触面的特征细化级别设置为 3 级，曲度细化标准为 0.318 rad，公差细化标准为 0.18 m，计算得到该模型的前视图的网格截面图如图 1 所示，可以清晰看到百叶箱边界的网格远小于外部和内部空气域的大小，进一步可以看到固体和流体接触面的精细化网格。

2.3 仿真参数的设置

进一步对建模后的百叶箱进行相关的参数设置，静压、重力和相对湿度是模拟百叶箱内部环境的常规参数，根据 QX/T 193-2013 行业标准的要求，我们选择固体材料为聚酯玻璃钢，粗糙度是描述固体材料表面凹凸的情况，是材料特征的反映，由于百叶箱具有表面平整光滑特点，我们设置为 0 μm。然后进一步设置流体特征参数，流体为空气，存在湍流运动，因此引入湍流强度和湍流长度来描述其影响，湍流强度反映的是波动速度与平均速度的相对大小，湍流长度反映的是湍流影响范围的几何长度，这里选择仿真软件 Solidworks 为空气流体所提供的参考值。

由于仿真实验主要目的是分析环境风速风向的变化对百叶箱内部风场的影响，为了消除其他环境因素，这里不考虑环境温度和太阳辐射强度等因素的作用，选择环境温度为常值 26 ℃，具体仿真参数的设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Settings of simulation parameters

仿真参数	设置值
静压	101325.00 Pa
重力设置	−9.81 m/s^2
相对湿度	50.00%
粗糙度	0 μm
湍流强度	0.10%
湍流长度	0.007 m

基于以上仿真参数，本文主要研究环境风场的改变对百叶箱内部环流和内部风速的变化影响，由于垂直风量级很小（朱乾根等，2007），因此计算仿真实验中均忽略垂直风的影响。

2.4 数据处理

为了定量地比较百叶箱对不同环境风场的阻挡情况以及百叶箱内部风速随着外部环境风场的变化情况，本文引入相对风速减小率，从而衡量环境风场对百叶箱内部风速的影响。以每次的环境风速值作为参考值，具体的计算公式如下：

$$\alpha=\frac{v-v_1}{v}\times 100\%, \qquad (1)$$

其中，α 表示相对风速减小率，v_1 表示百叶箱内部风速（单位：m/s），v 表示环境风速（单位：m/s）。本文设置了 5 种环境风速，这里考虑温湿度传感器所在高度 1.5 m 处的常规近地面风速变化范围和 CFD 仿真效率影响，并参考近地层测量风速廓线时仪器安装高度的方法，采用等比级数分布，v 的取值分别为 0.5 m/s、1 m/s、2 m/s、4 m/s 和 8 m/s，既考虑小风速情况的影响，也考虑到较大风速影响，具有一定的参考意义。

3 结果与讨论

3.1 百叶箱内部流场特征分析

3.1.1 百叶箱内部流场水平变化

不同的环境风场会对百叶箱内部流场产生不同的影响，为了具体研究百叶箱内部流场随着风向的水平变化，这里不考虑太阳辐射的影响并设置水平风速为 1 m/s。由于百叶箱在垂直切面上是近乎对称的箱体，所以只考虑 90°的风向变化，在分析中，选择 x 轴和 z 轴都为正的第一象限，分析从 180°至 270°（即从南风到西风）的变化情况。这里对上视图设置 7 组仿真实验，每组间隔 15°，仿真得到 y=0.20 m 截面处的结果如图 2 所示。图 2 描述了不同风向的情况下，百叶箱内部 y=0.20 m 截面处的水平风场变化，图 2a–g 分别表示风向为 180°、195°、210°、225°、240°、255°和 270°时的情况。从图中可以看到 3 个比较明显的特征：

（1）百叶箱内部水平方向上形成比较明显的梭形流场。原因在于百叶箱的叶片并没有在水平方向倾斜，因此百叶箱内部的风场基本上与环境风场一致，但由于内部风场运动时受到四壁的阻挡，所以在四壁附近，内部风场方向会有所偏移，从而形成梭形流场。

（2）百叶箱内部风向和水平风速的分布随环境风向而变化。这是由于环境风场直接为内部风场提供动力所致，当环境风向改变时，百叶箱对环境风场的阻挡作用不同，使得内部的气流发生变化，从而影响百叶箱内部风向和水平风速的变化。

（3）迎着风向方向的百叶箱壁面处风速均较高，背离风向处风速较低，截面中点处风速一般最小，其风速值在 0.20 m/s 左右，远低于周围区域 0.40 m/s 左右的风速。这主要归因于近乎正方形的截面，使得截面中点离百叶箱壁面距离基本一致，从而受不同环境风向的影响比较小。

3.1.2 百叶箱内部流场垂直变化

为了更加细致地了解百叶箱内部流场的三维变化，进一步分析环境风向变化对百叶箱内部流场的垂直影响，分别对前视图和右视图设置 3 组仿真实验，每组间隔 45°，得到仿真计算结果如图 3。图 3 描述了不同风向条件下，百叶箱内部流场的垂直变化情况，其中图 3a 为前视图，即从东往西方向的截面图，图 3b 为右视图，即从北往南方向的截面图。从中分析可以得到：

（1）百叶箱内部垂直方向存在环形流场并随环境风向而变化，当其与环境风向处于同一平面时环流最明显，如风向 180°的前视图（图 3a1）和风向 270°的右视图（图 3b3）。究其原因，这是由于百叶箱外层叶片向内倾斜，内层叶片向外倾斜所致，使得环境风场最初存在向下的运动速度，然后由于底板的封闭阻挡使得空气抬升，从而形成垂直环流。

（2）对于平行于风向的竖直截面，迎着风向的百叶箱壁面处，风速较大，为 0.50 m/s 左右，而百叶箱中轴线附近和远离风向的百叶箱壁面处风速较小，为 0.20 m/s 左右；对于垂直于风向的竖直截面，风速整体较小（图 3a3 和 3b1），截面的平均速度在 0.20 m/s 左右。这说明环境风场是导致百叶箱内部环流变化的主要原因之一，是内部风场的动力之一。

（3）百叶箱内部风速存在垂直差异，从底部到顶部，风速逐渐减小（图 3a1、3a3、3b1 和 3b3）。这是由于百叶箱底部的封闭性所致，使得内部气流在底部堆积，从而使得底部风速较大；而在百叶箱顶部，此时抬升到顶部的气流较少，使得风速也相应较小。但当风速为 225°时，内部风速整体偏大，

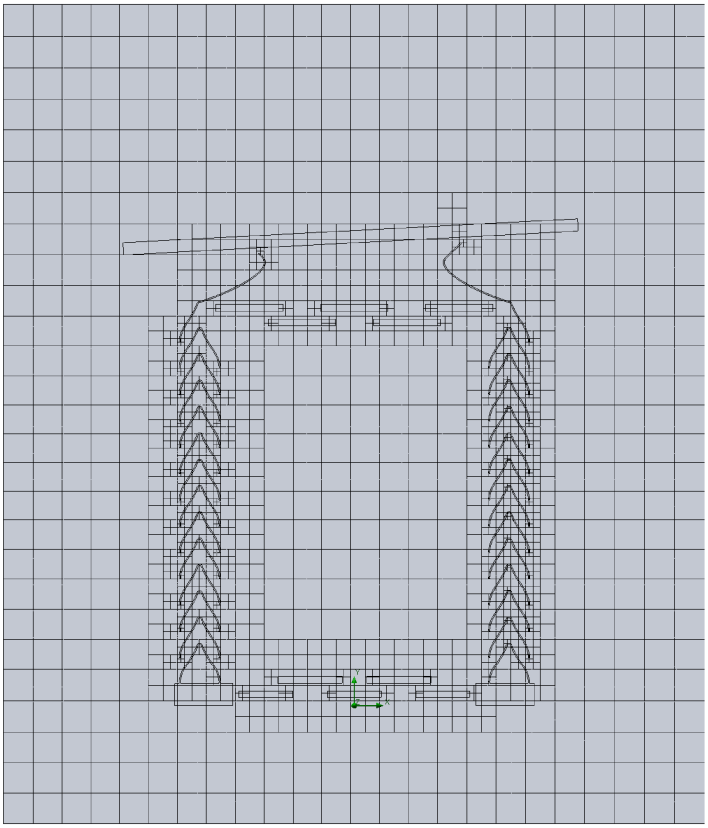

图 1 前视图的网格划分情况

Fig. 1 The front view of the grid division

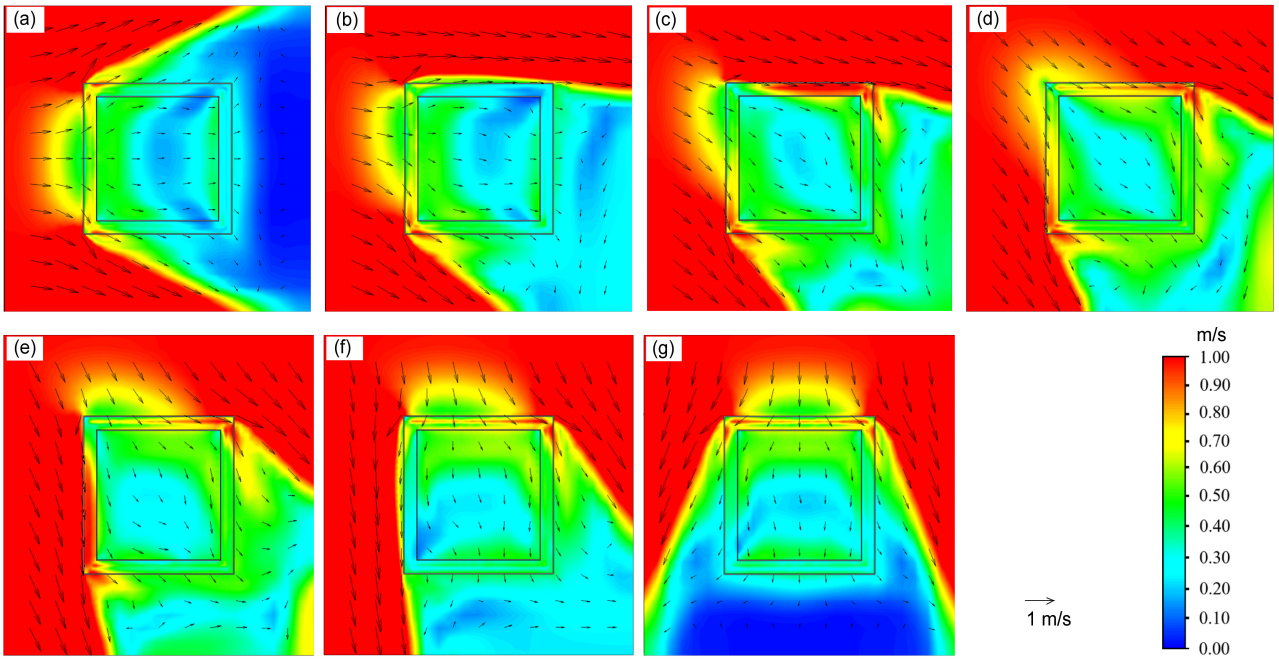

图 2 （a）风向 180°、（b）风向 195°、（c）风向 210°、（d）风向 225°、（e）风向 240°、（f）风向 255°、（g）风向 270°时 y=0.20 m 处上视图的仿真结果（箭头表示风矢量，阴影表示风速大小）

Fig. 2 Simulation results under wind directions (a) 180°, (b) 195°, (c) 210°, (d) 225°, (e) 240°, (f) 255°, and (g) 270° at y=0.20 m of the top view (arrows denote wind vectors and shadings denote wind speeds)

是由于此时相当于 x 轴和 z 轴两个方向的风场叠加，环境风场更易进入百叶箱内部，并且在中轴线附近堆积下沉，使得更多外部气流汇集，从而使其风速偏大。

综上所述，通过对百叶箱内部流场进行仿真分析得到以下结论：1）箱体内部风场随环境风向而改变，同时具有明显的非均一性，在水平剖面和垂直剖面上分别出现明显的梭形流场和环形流场；2）迎着风向的百叶箱壁面处，风速较大能达到 0.50 m/s 左右，在中轴线和远离风向的壁面处，风速较小，仅能达到 0.20 m/s 左右；3）百叶箱内部风速存在垂直差异，从底部到顶部，风速逐渐减小。

3.2 环境风场对百叶箱内部风速影响

3.2.1 百叶箱内部风速垂直差异分析

上面定性分析了百叶箱内部流场随着环境风向的变化特征，为了定量地反映百叶箱内部风速变化，图 4 具体给出不同环境风向下百叶箱内部中轴线不同高度的风速变化以及相应的平均值、均方差的变化曲线。

图 4a 给出的是不同风向情况下的中轴线不同高度的风速变化图。在不同的垂直高度上，百叶箱内部中轴线风速存在明显的差异，整体而言，在 0.25 m 以下，风速变化波动较大；而 0.25 m 以上，风速变化波动相对较小。同时可以发现不同环境风向下，风速的垂直差异情况不尽相同，特别是在 225°风向时百叶箱内部风速随着高度变化趋势相对于其他风向的情况差异较大并且整体风速偏大。产生这种结果的主要原因是在不同风向下，百叶箱壁面对环境风场的阻挡作用不同，使得百叶箱中轴线风速的垂直变化也不同；而当风向为 225°时，此时风场为 x 轴和 z 轴方向等量叠加，使得环境风场进入百叶箱内部效率更高，从而导致其垂直差异变化不同于其他风向情况并且风速整体偏大。

图 4b 给出的是不同风向引起百叶箱内部中轴线高度上风速平均值和均方差的变化图。当高度在 0～0.25 m 之间时，平均风速随着高度先增大后减小，在 0.08 m 左右处达到极大值 0.47 m/s，变化幅度很大，原因可能是由于底部隔板的阻挡，气流在这里不断堆积辐散，使得 0.08 m 处风速值达到极大值；当高度在 0.25 m 以上时，平均风速呈现先增大减小再增大的趋势，在 0.25 m 和 0.50 m 左右高度处风速分别达到极小值 0.15 m/s 和 0.12 m/s 左右，变化振幅很小。而当高度在 0～0.20 m 之间时均方差曲线先增加后减小，在 0.04 m 处达到最大值 0.18 m/s。当高度在 0.20 m 以上时，均方差变化幅度很小，在 0.20 m 处最小为 0.02 m/s，这说明在该高度上不同风向的差异最小，环境风场对该高度的整体影响最小；在高度 0.36 m 处达到局部最大 0.08 m/s，说明在这个高度上，百叶箱内部风速受环境风向的整体影响较大。

3.2.2 风向对百叶箱内部风速的影响

前面的分析，已经考虑了不同环境风向下百叶箱内部风速的垂直变化，为了定量的分析风向对风速的影响，这里设置 13 组仿真实验，每组间隔 15°，图 5 给出了中轴线不同高度处 x、y、z 三维的分速度随风向的变化情况。

从图 5 中可以看到任意分速度中不同高度风速随风向的变化都存在很大差异，产生的原因一方面是由于百叶箱的壁面对不同风向阻挡程度不同，从而使得同一高度风速会随风向变化；另一方面由于百叶箱内部存在垂直环流，使得不同高度处风速随风向的变化存在差异。图 5a 中 x 轴上的最大分速度达到 0.56 m/s，曲线变化趋势关于 270°反向对称；图 5b 中 y 轴上的最大分速度达到 0.25 m/s，曲线变化趋势关于 225°、270°和 315°对称；图 5c 中 z 轴上的最大分速度达到 0.56 m/s，曲线变化趋势关于 270°对称。产生的原因是当环境风向从 180°变化到 360°时，环境风速在 x 轴方向的分量由正变为负；在 z 轴方向的分量则由 0 先增大然后减小到 0，所以使得 x 轴和 z 轴风速的变化趋势与环境风速的变化趋势一致；而百叶箱近乎正方形的截面使得 y 轴方向分量关于 225°、270°和 315°对称。这说明两个显著特征：第一，环境风场为内部流场运动提供直接动力，直接影响内部流场运动；第二，环境风场会导致很强的垂直环流。同时由百叶箱截面的对称性可以判断 x 轴方向的速度分量关于 180°和 360°对称；y 轴方向的速度分量关于 45°、90°、135°和 180°同样对称；z 轴方向的速度分量关于 90°同样对称。

在图 5 中，分量的风速变化都呈不完全的反向对称、对称分布，这可以用前文分析中提到的百叶箱结构来解释：百叶箱截面不是完全的正方形，因此当风向变化时，反向对称和对称结构出现微小差异。此外，图 5a 中 180°到 270°的变化趋势与图 5b 中 270°到 360°的变化趋势几乎一致。这是因为当环境风向改变时，由于 x 轴和 z 轴在水平方向上相差

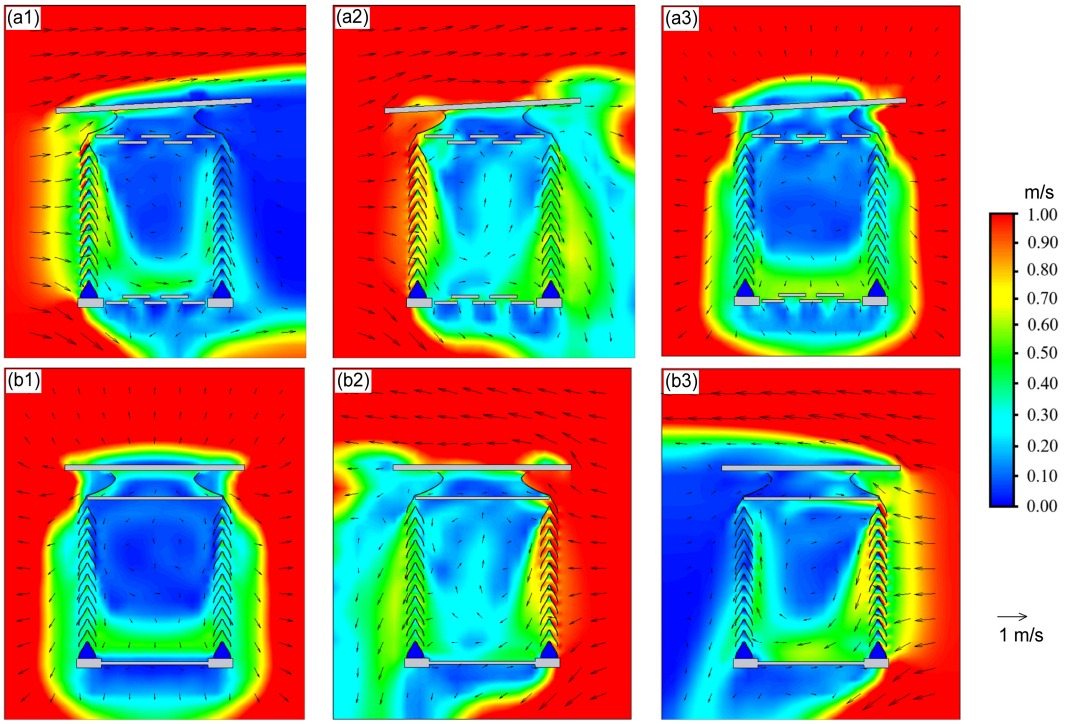

图 3 （a1、b1）风向 180°、（a2、b2）风向 225°、（a3、b3）风向 270°的 z=0 m 前视图（上排）和 x=0 m 右视图（下排）（箭头表示风矢量，阴影表示风速大小）

Fig. 3 Simulation results under different wind directions, (a) shows the front view z=0 m (a1 is 180°, a2 is 225°, a3 is 270°), (b) shows the right view at x=0 m (b1 is 180°, b2 is 225°, b3 is 270°) (arrows denote wind vectors and shadings denote wind speeds)

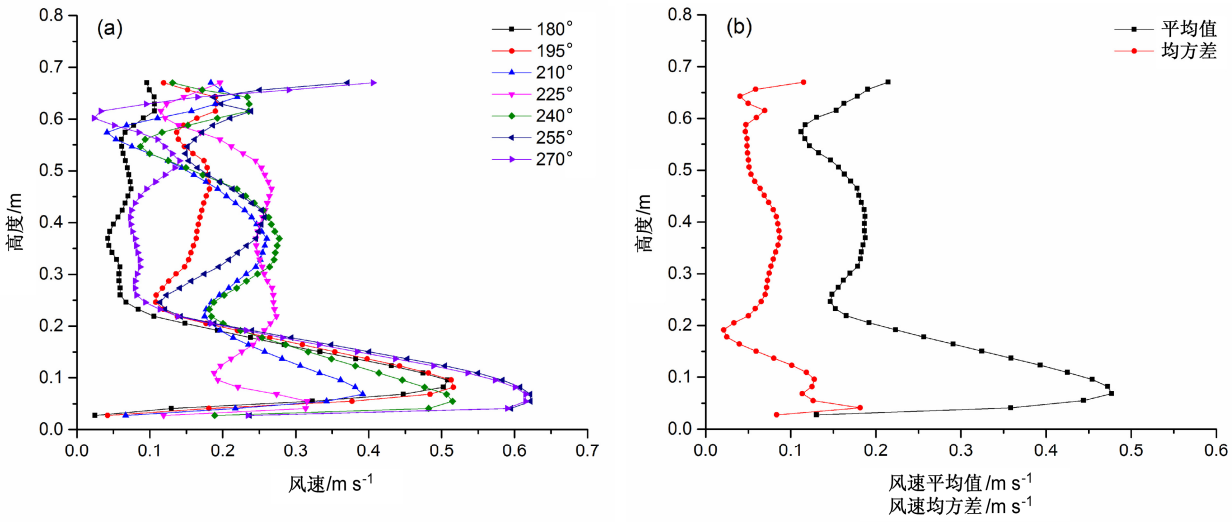

图 4 （a）不同风向情况下的中轴线不同高度的风速变化；（b）中轴线不同高度处风速在不同风向情况的平均值和均方差

Fig. 4 (a) Wind speed changes at different heights under different wind directions; (b) mean values and variances of wind speed at different heights along the central axis under different wind directions

90°，所以若对其产生相同的影响，环境风向会存在90°的位相差。

3.2.3 不同风速下相对风速减小率随高度变化

上面的分析详细阐述了环境风向对百叶箱内部风速的影响，初步认识到环境风向对不同高度影响的差异性以及百叶箱内部风速随高度的垂直差异。为了进一步了解不同环境风速对百叶箱内部风速的影响，下面将引入相对风速减小率进行分析，具体结果如图 6 所示。

图 6 描述的是不同环境风速下百叶箱内部中轴线高度处相对风速减小率的垂直变化，为了消除风向的影响，这里对不同风向的相对风速减小率取平

均。从图中可以发现：1）中轴线上相对风速减小率都在 50%以上，这说明百叶箱对环境风场具有明显的阻挡作用。2）不同环境风速情况下，百叶箱内相对风速减小率随高度存在相似的垂直变化，在 0.25 m 以下，相对风速减小率存在较大的波动，并呈现先减小后增大的趋势，而在 0.25 m 以上，相对风速减小率波动较小，呈现减小增大再减小的趋势；平均相对风速减小率也存在同样的垂直变化趋势，并在 0.08 m/s 左右处达到极小值 53%，在 0.25 m 和 0.55 m 左右高度处分别达到极大值 85%和 88%。3）在同一垂直高度上，不同环境风速的相对风速减小率存在一定差异，在 0.08 m 高度左右和 0.25～0.50 m 高度区间内差异最明显，但是不同环境风速的相对风速减小率与平均相对风速减小率之间的最大差值仅为 5%，这说明不同环境风速情况下，百叶箱相对风速减小率的差异并不大，可以用平均相对风速减小率来表征环境风场对百叶箱内部风速的整体影响。

根据公式（1）可以推出

$$v_1 = \frac{(100-\alpha)}{100} \times v, \qquad (2)$$

该公式表明可以根据相对风速减小率和环境风速来计算百叶箱内部风速，引入平均相对风速减小率进行分析可得到：1）在不同高度处，百叶箱内部风速与环境风速呈正相关，这说明环境风速可以直接影响百叶箱内部风速大小，内部风速会随着环境风速的增大而增大；2）百叶箱内部风速随环境风速增大的比例系数在不同高度差异明显，其中 y=0.08 m 处的内部风速变化率最大，比例系数为 0.47；y=0.25 m 和 y=0.55 m 处的内部风速变化率相对较小，比例系数分别为 0.15 和 0.12，该比例系数实际上为

$$\lambda=(100-\alpha)/100. \qquad (3)$$

不同高度比例系数的差异与百叶箱内部垂直环流有关，再加上底板的阻挡作用，所以当环境风速增大时，气流在低层的堆积辐散作用加强，内部风速增大幅度更大，使得 0.08 m 左右高度处风速变化率最大；而通过垂直环流到达百叶箱高层气流的增量较少，使得高层风速增大的幅度也相应较小，从而 y=0.25 m 和 y=0.55 m 风速变化率偏小。

进一步，为了验证比例系数的可靠性，本文选取不同高度点处的内部风速值与环境风速值做拟合，共选取了 6 个高度点，分别为 y=0.10 m、y=0.20 m、y=0.30 m、y=0.40 m、y=0.50 m 和 y=0.60 m。拟合结果中 6 个高度点的判别系数 R^2 都在 0.99 以上，最大值出现在 0.10 m 高度处，为 0.9997，最小出现在 0.60 m 处，为 0.9974，并且都通过了 95%的显著性检验。这说明比例系数具有很高的可靠性，能够很好地表征百叶箱内部风速与环境风速之间的关系，同样也反映出平均相对风速减小率的可靠性。

3.2.4 不同风向环境风速与相对风速减小率的关系

百叶箱的测温元件感应部分在百叶箱底部隔板高度为 0.25 m 左右（QX/T 193-2013），因此，本文以中轴线上 y=0.25 m 为分析对象，得到不同环境风速情况下百叶箱内部相对风速减小率随环境风向的变化趋势（如图 7 所示）。

从图 7 中可以看到：1）y=0.25 m 高度上相对风速减小率在 70%以上，进一步说明百叶箱对环境风场具有很强的阻挡作用；2）不同风速情况下，相对风速减小率随着环境风向的变化趋势基本一致，关于 225°风向基本对称并达到极小值。主要原因是百叶箱截面近乎正方形，使得百叶箱结构关于 225°呈现轴对称，从而使得内部风速关于 225°对称，而当风向为 225°时，环境风速为 x 轴和 z 轴方向等量叠加，使得环境风场进入百叶箱内部效率更高，从而导致风速整体偏大，因此相对风速减小率偏小。同理，平均相对风速减小率也存在相似的趋势，并在 225°和 180°分别达到极小值 73%和极大值 93%。由对称性可以判断，在 45°、135°和 315°处内部风速也会同样达到极小值，在 0°、90°和 270°同样会达到极大值；3）在同一风向处，不同环境风速的相对风速减小率存在一定的差异，但差异并不大，不同环境风速的相对风速减小率与平均相对风速减小率之间的最大差值为 4%，这说明仍然可以用平均相对风速减小率来表征环境风场对百叶箱内部风速的整体影响。

同样根据公式（2）分析可知：1）不同风向处，箱体内部风速与环境风速同样呈现正相关，环境风速越大，则百叶箱内部风速越大，这说明环境风速的大小对不同风向下百叶箱内部的风速大小有很大影响；2）百叶箱内部风速与环境风速的比例系数在不同风向下差异明显，当环境风向与箱体侧面成 225°和 180°时，比例系数分别出现最大值 0.27 与最小值 0.07。不仅如此，百叶箱截面的近似正方形也会对比例系数产生影响。在 0°至 360°风向范围内，由于百叶箱在垂直切面上是近乎对称，箱体内

平均相对风速减小率随环境风向的改变基本上呈90°周期性变化。

同理为了进一步验证比例系数的可靠性，选取图中 7 个风向的内部风速与环境风速拟合，拟合结果中 7 个风向的判别系数 R^2 同样都在 0.99 以上，并且通过 95%的信性检验。这说明不同风向下，内部风速与环境风速存在很好的线性关系，该系数可靠且稳定，同样也反映出平均相对风速减小率能够很好表征整体影响情况。

综上所述，通过定量分析环境风场对内部风场的影响得到：1）百叶箱内部的风速随着中轴线有垂直差异的变化，在高度为 0.08 m 左右处各风向的平均风速达到最大 0.47 m/s 左右，在 0.25 m 和 0.50 m 左右高度处风速分别达到极小值 0.15 m/s 和 0.12 m/s 左右，同时各风向的均方差值在 0.20 m 处达到最小值 0.02 m/s，受环境风场整体影响最小。2）x、y、z 轴分量中不同高度箱体内部风速随风向的变化都存在很大差异，其中 x 轴与 z 轴上不同高度箱体内部风速随风向的变化曲线存在近似 90°相位差，y

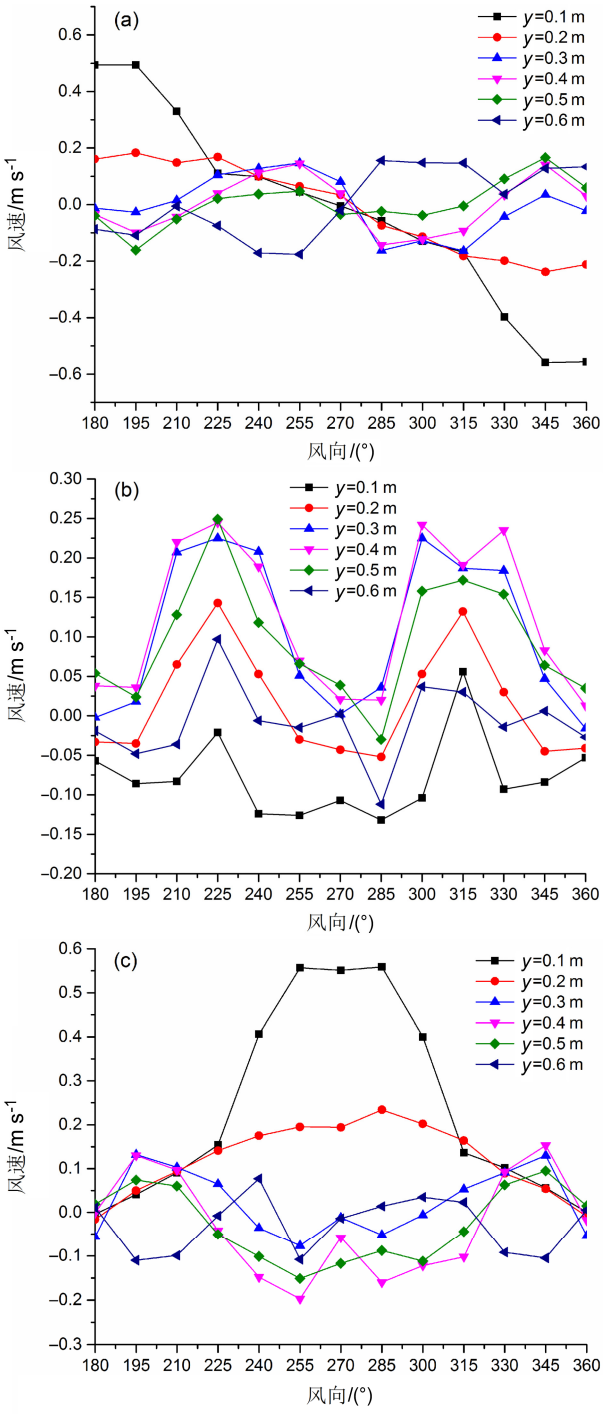

图 5　（a）x、（b）y、（c）z 方向中轴线不同高度处的分速度随风向的变化

Fig. 5　Velocity changes with wind directions at different heights, (a), (b), and (c) indicate directions of x, y, and z

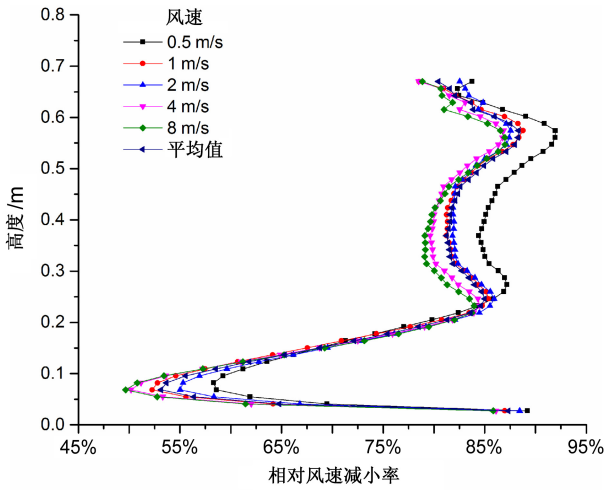

图 6　不同风速中轴线上各个高度处的相对风速减小率

Fig. 6　Relative wind velocity reduction ratios at different heights with different wind speeds

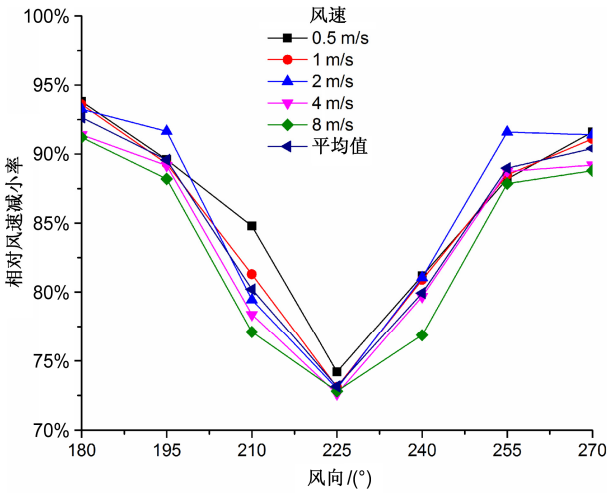

图 7　不同风速情况下相对风速减小率随风向的变化

Fig.7　Changes in relative wind velocity reduction ratio with wind directions under different wind speeds

轴上变化曲线关于 225°、270°和 315°对称。3）箱体内平均相对风速减小率在箱体中轴线上存在明显的垂直差异，最小值 53%出现在 0.08 m 附近，同时在 0.25 m 和 0.55 m 高度附近分别存在值为 85%和 88%的局部最大值，同时箱体内部风速随环境风速的增大而增大，具有较强的线性关系，比例系数与平均相对风速减小率之和为 1；箱体内部平均相对风速减小率随环境风速的改变呈 90°周期性变化，当环境风向与箱体侧面成 45°、135°、225°和 315°时，平均相对风速减小率出现极小值 73%，当环境风向与箱体侧面成 0°、90°、180°和 270°时，平均相对风速减小率出现极大值 93%，同样箱体内部风速与环境风速也存在较强的线性关系。

4 结论

本文主要是基于 CFD 对百叶箱进行仿真，来研究环境风速和风向对百叶箱内部的影响，通过设置不同风向和不同风速的仿真实验，分析百叶箱内部的环流结构以及百叶箱内部风速变化情况，得到的结论如下：

（1）受长方体结构特征以及侧面叶片导流的影响，箱体内部风场具有明显的非均一性，在水平剖面和垂直剖面上分别出现明显的梭形流场和环形流场。水平方向上风场和环境风场方向基本一致，百叶箱内部风向和风速分布会随着环境风向改变而改变，百叶箱中轴线上点的风速受风向变化的影响较小；从底部到顶部，风速是逐渐减小的，但在 225°风向处风速整体偏大。

（2）百叶箱内部风速随着中轴线有垂直差异的变化，在高度为 0.08 m 左右处平均风速最大，在高度为 0.25 m 和 0.55 m 左右处平均风速有极小值，不同风向的均方差值在 0.20 m 处达到最小值，受环境风场整体影响最小。箱体内平均相对风速减小率在箱体中轴线上同样存在明显的垂直差异，最小值 53%出现在 0.08 m 附近，同时在 0.25 m 和 0.55 m 高度附近分别存在值为 85%和 88%的局部最大值。同时箱体内部风速随环境风速的增大而增大，具有较强的线性关系，比例系数与平均相对风速减小率之和为 1。

（3）x、y、z 轴分量中不同高度箱体内部风速随风向的变化都存在很大差异，其中 x 轴与 z 轴上不同高度箱体内部风速随风向的变化曲线存在 90°位相差，y 轴上变化曲线关于 225°、270°和 315°对称。箱体内部平均相对风速减小率随环境风速的改变呈 90°周期性变化，当环境风向与箱体侧面成 45°、135°、225°和 315°时，平均相对风速减小率出现极小值 73%，当环境风向与箱体侧面成 0°、90°、180°和 270°时，平均相对风速减小率出现极大值 93%。

本文主要展示了环境风场对百叶箱内部环流结构的影响，以及研究百叶箱内部风速随环境风速的变化情况。该研究能够通过平均相对风速减小率将外部风速定量转换为直接与百叶箱内部测温仪器接触的内部风速，对于百叶箱内部仪器位置的参考放置以及数据误差的修订具有很大的参考意义，因为内部风速是百叶箱内部通风情况的直接体现并与测温仪器接触，不受箱体阻挡和外部其他因素影响。

本文研究的模型相对比较简单，没有考虑百叶箱门的影响，在仿真过程中也没有考虑太阳辐射的影响，但在实际大气环境中，百叶箱气温观测误差受风向风速与太阳辐射误差的综合影响，因此在后续的研究中将会进一步考虑太阳辐射的影响，从而进一步为百叶箱温度订正提供指导，使之能更好地修正和提高百叶箱测量的准确度。

参考文献（References）

鞠晓慧, 任芝花, 曹丽娟, 等. 2010. 自动与人工观测气压的差异及原因分析 [J]. 气象, 36 (1): 104–110. Ju Xiaohui, Ren Zhihua, Cao Lijuan, et al. 2010. Difference analysis between automatic and manual atmospheric pressure measurements [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (1): 104–110.

Kurzeja R. 2010. Accurate temperature measurements in a naturally-aspirated radiation shield [J]. Bound.-Layer Meteor., 134 (1): 181–193, doi:10.1007/s10546-009-9430-2.

Lin X, Hubbard K G, Walter-Shea E A. 2001a. Radiation loading model for evaluating air temperature errors with a non–aspirated radiation shield [J]. Transactions of the ASAE, 44 (5): 1299–1306, doi:10.13031/2013.6435.

Lin X, Hubbard K G, Meyer G E. 2001b. Airflow characteristics of commonly used temperature radiation shields [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18 (3): 329–339, doi:10.1175/1520-0426(2001)018<0329: ACOCUT>2.0.CO;2.

刘清惓, 戴伟, 杨荣康, 等. 2013. 探空温度测量太阳辐射误差的流体动力学分析 [J]. 高原气象, 32 (4): 1157–1164. Liu Qingquan, Dai Wei, Yang Rongkang, et al. 2013. Fluid dynamics analysis on solar radiation error of radiosonde temperature measurement [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (4): 1157–1164.

冒晓莉, 肖韶荣, 刘清惓, 等. 2014. 探空湿度测量太阳辐射误差修正流体动力学研究 [J]. 物理学报, 63 (14): 144701. Mao Xiaoli, Xiao Shaorong, Liu Qingquan, et al. 2014. Fluid dynamic analysis on solar heating error of radiosonde humidity measurement [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 63 (14): 144701, doi:10.7498/aps.63.144701.

Nakamura R, Mahrt L. 2005. Air temperature measurement errors in naturally ventilated radiation shields [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22

(7): 1046–1058, doi:10.1175/JTECH1762.1.

Pirazzoli P A, Tomasin A. 2003. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas [J]. International Journal of Climatology, 23 (8): 963–973, doi:10.1002/joc.925.

Pryor S C, Barthelmie R J, Riley E S. 2007. Historical evolution of wind climates in the USA [J]. Journal of Physics: Conference Series, 75 (1): 012065, doi:10.1088/1742-6596/75/1/012065.

Quayle R G, Easterline D R, Karl T R, et al. 1991. Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72 (11): 1718–1724, doi:10.1175/1520-0477(1991)072<1718:EORTCI>2.0.CO;2.

任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63 (6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 942–956, doi:10.11676/qxxb2005.090.

任芝花, 涂满红, 陈永清, 等. 2006. 玻璃钢百叶箱与木制百叶箱内温湿度测量的对比分析 [J]. 气象, 32 (5): 35–40. Ren Zhihua, Tu Manhong, Chen Yongqing, et al. 2006. An comparison of air temperature and relative humidity measured inside thermometer screen of glass fiber reinforced plastic and timber [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (5): 35–40, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.05.006.

Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D, et al. 2007. On the attribution of changing pan evaporation [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (17): L17403, doi:10.1029/2007GL031166.

Sun Bomin, Baker C B, Karl T R, et al. 2005. A comparative study of ASOS and USCRN temperature measurements [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 22 (6): 679–686, doi:10.1175/JTECH1752.1.

孙帮成, 李明高. 2013. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 4–5. Sun Bangcheng, Li Minggao. 2013. ANSYS FLUENT 14.0 Simulation Analysis and Optimization Design (in Chinese) [M]. Beijing: China Machine Press, 4–5.

Thomas C K, Smoot A R. 2013. An effective, economic, aspirated radiation shield for air temperature observations and its spatial gradients [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30 (3): 526–537, doi:10.1175/JTECH-D-12-00044.1.

王晓蕾, 林捷. 2006. 自动气象站温度传感器的辐射误差 [J]. 解放军理工大学学报 (自然科学版), 7 (4): 405–408. Wang Xiaolei, Lin Jie. 2006. Radiant error of temperature sensor at auto weather stations [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese), 7 (4): 405–408, doi:10.3969/j.issn.1009-3443.2006.04.020.

WMO. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (7th ed) [M]. Switzerland: World Meteorological Organization, 716pp.

熊安元, 朱燕君, 任芝花, 等. 2006. 观测仪器和百叶箱的变化对地面气温观测值的影响及其原因分析 [J]. 气象学报, 64 (3): 377–384. Xiong Anyuan, Zhu Yanjun, Ren Zhihua, et al. 2006. Differences of surface temperature observations recorded by different sensors in different screens and its causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (3): 377–384, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.03.012.

熊敏诠. 2015. 近 30 年中国地面风速分区及气候特征 [J]. 高原气象, 34 (1): 39–49. Xiong Minquan. 2015. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (1): 39–49, doi:10.7522/j.issn.1000-0534. 2013.00159.

Xu Ming, Chang C P, Fu Congbin, et al. 2006. Steady decline of east Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. J. Geophys. Res., 111 (D24): D24111, doi:10.1029/2006JD007337.

徐伟, 胡振勤, 夏立, 等. 2015. 轻型百叶箱和玻璃钢百叶箱气温对比研究 [J]. 气象, 41 (2): 240–246. Xu Wei, Hu Zhenqin, Xia Li, et al. 2015. Comparative study on temperature of light louvred screen and reinforced plastics screen [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41 (2): 240–246, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.02.013.

严家德, 金莲姬, 王巍巍, 等. 2014a. 百叶箱与通风辐射罩的气温日最值差异 [J]. 应用气象学报, 25 (2): 185–192. Yan Jiade, Jin Lianji, Wang Weiwei, et al. 2014. Comparative analysis of maximum and minimum temperatures of LTS and ASPTS [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 25 (2): 185–192, doi:10.3969/j.issn.1001-7313. 2014.02.008.

严家德, 金莲姬, 王巍巍, 等. 2014b. 第二代自动气象站不同气温观测系统数据对比分析 [J]. 气象科学, 34 (1): 60–65. Yan Jiade, Jin Lianji, Wang Weiwei, et al. 2014. Comparisons of the different temperature observing systems of second generation AWS [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 34 (1): 60–65, doi:10.3969/ 2013jms.0029.

严家德, 王成刚, 金莲姬, 等. 2015. 百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统的数据对比与订正 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 533–543. Yan Jiade, Wang Chenggang, Jin Lianji, et al. 2015. A comparative and modification study of louvred and aspirated shield temperature systems [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 533–543, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14187.

闫敬华, 戴光丰, 袁卓建. 2006. CFD 方法在街巷气象场模拟和预测中的应用 [J]. 气象, 32 (11): 12–18. Yan Jinghua, Dai Guangfeng, Yuan Zhuojian. 2006. Application of CFD method to simulation and prediction of meteorological fields for street lane [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (11): 12–18, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.11.002.

余君, 胡玉峰, 刘均. 2007. 我国中部地区自动站与人工站气温的差异及原因分析 [J]. 气象, 33 (5): 94–99. Yu Jun, Hu Yufeng, Liu Jun. 2007. Causality of temperature differences between AWS- and manual observations in central part of China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (5): 94–99, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.05.014.

苑跃, 赵晓莉, 王英, 等. 2011. 自动与人工观测风速和风向的差异分析 [J]. 气象, 37 (4): 490–496. Yuan Yue, Zhao Xiaoli, Wang Ying, et al. 2011. Comparative analysis on wind direction and wind speed difference of AWS and man-observed station [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (4): 490–496.

张爱丽, 苏锋, 孙智辉. 2013. 百叶箱结构对气温观测值的影响 [J]. 气象科技, 41 (2): 270–273. Zhang Aili, Su Feng, Sun Zhihui. 2013. Influence of large and small louvered screens on temperature measurements [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 41 (2): 270–273, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2013.02.012.

QX/T 193-2013, 玻璃箱百叶箱 [S]. 北京: 气象出版社, 8pp. QX/T 193-2013, Glass fiber reinforced plastic thermometer screen (in Chinese) [S]. Beijing: China Meteorological Press, 8pp.

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法(第 4 版)[M]. 北京: 气象出版社, 57–58. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. Synoptic Principles and Methods (4th ed) (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 57–58.