毛文茜，冷文楠，樊旭，等. 2019. 淮河流域风场垂直结构特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(3): 324−332. Mao Wenqian, Leng Wennan, Fan Xu, et al. 2019. Analysis of the vertical structure of wind fields in Huaihe River valley [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(3): 324−332. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18010

淮河流域风场垂直结构特征分析

毛文茜[1]　冷文楠[1]　樊旭[1]　肖霞[2]　郭燕玲[1]　赵艳茹[1]　张文煜[1]

1 兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室，兰州 730000
2 中国科学院大气物理研究所，北京 100029

摘　要　为进一步加深南北气候过渡带上山地丘陵地区的风场认识，利用淮南2015年3月至2016年2月ST（Stratosphere−Troposphere）风廓线雷达的探测资料，分析了该地区20 km高度内风场的变化特征及垂直结构。结果表明：淮河流域850 hPa、700 hPa、500 hPa、100 hPa等压面高度上，风场有明显的垂直变化，风速及其波动幅度随春、夏、秋、冬先减小后增大，且随高度增加，夏季最小、冬季最大的季节规律逐渐增强；风场的垂直分布存在差异，在中低层以下，以小于10 m/s的风为主，风向转换多，中低层以上10～25 m/s的偏西风居多；年平均风场结构为低层以5 m/s北风为主，到2 km左右向西偏转，风速小于10 m/s，在5 km高度处形成15 m/s的西风，且风速持续增大，10 km左右达到25 m/s后逐渐减小，到15 km左右风向顺时针向北偏转，直到20 km附近与低空风场相近。

关键词　淮河流域　风廓线雷达　风场垂直结构　特征分析
文章编号　1006-9585(2019)03-0333-08　　**中图分类号**　P425.1　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18010

Analysis of the Vertical Structure of Wind Fields in Huaihe River Valley

MAO Wenqian[1], LENG Wennan[1], FAN Xu[1], XIAO Xia[2], GUO Yanling[1], ZHAO Yanru[1], and ZHANG Wenyu[1]

1 *College of Atmospheric Sciences*, *Lanzhou University*, *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education*, *Lanzhou* 730000
2 *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029

Abstract　To further understand wind fields in mountains and hilly areas in the north−south climate transition zone, based on the March 2015 to February 2016 observational data of ST (stratosphere−troposphere) wind profiler radar, the variation characteristics, and vertical structure of 20-km high wind fields in Huainan were analyzed. The results show the following: In Huaihe River valley, the wind field exhibited significant vertical changes at 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, and 100 hPa; through the seasons, the wind speed and its amplitude first decreased and then increased; they were minimum in summer, followed by in autumn, and maximum in winter, whereby the seasonal variation amplified with increasing height. The vertical distribution of the wind field displayed a great difference; the speed was mainly less than 10 m/s, and the wind directions below the middle and lower levels shifted; western winds of 10−25 m/s dominated the region above these levels. As observed from the annual wind vertical structure, in the lower level, mainly about 5 m/s southern wind turned to the west with less than 10 m/s at 2 km height; 15 m/s western wind was developed at 5 km height; its speed

收稿日期　2018-01-10；**网络预出版日期**　2018-09-05
作者简介　毛文茜，女，1994年出生，硕士研究生，主要从事大气物理与大气环境方面的研究。E-mail: maowq16@lzu.edu.cn
资助项目　国家自然科学基金项目41875085，兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金lzujbky-2018-k03
Funded by　National Natural Science Foundation of China (Grant 41875085), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant lzujbky-2018-k03)

continued to increase and reached 25 m/s at 10 km height; when turning north from 15 km height , it gradually decreases to a level closer to that of the lower wind field until about 20 km.

Keywords Huaihe River valley, wind profile radar, vertical structure of wind field, characteristic analysis

1 引言

风场表征地球大气运动，是描述大气结构的要素之一，对整个大气系统的发展有着重要影响（盛裴轩等，2002）。对于局地风场，低层关系着大气气溶胶的扩散和稀释，高层联系着大气能量、水分的输送和交换，这种垂直结构在局地天气、气候的形成中有着重要作用（刘天齐，1982）。同时，风场的垂直精细结构对提高数值天气预报的准确性、分析灾害天气发展的趋势性有重要意义（周志敏等，2010；Mihalikova et al.，2012）。

传统的三维风场观测，主要依靠无线电探空系统，通过探空气球漂移的位置与所用时间，获得每天2～3次的探测数据（WMO，1996，2008）。近些年，随着遥感技术的发展，风廓线雷达作为一种新型的无球高空气象遥感探测设备（Frisch et al.，1986），通过接收大气湍流不均匀分布产生的散射回波及回波的多普勒频移信息，可以连续24 h提供高时间分辨率的风场数据（Benjamin et al.，2004）。目前，风廓线雷达布点日趋广泛，初步进入观测阶段，董保举等（2011）、邓闯等（2012）、李晨光等（2003）、吴志根等（2013）等学者分别研究了山地（陈添宇等，2011；董保举等，2011）、高原（孙旭映等，2008；赵兴炳和李跃清，2006）、盆地（邓闯等，2012）、丘陵（李晨光等，2003；王欣等，2005）、滨海（Luce et al，2001；吴志根等，2013；曲巧娜等，2016）等地区的探测资料，表明其在有效探测高度内，与探空资料一致性较好，可以作为常规探空观测的重要补充（董丽萍等，2014）。

风廓线雷达按风场探测高度，分为边界层、对流层、平流层雷达；其资料主要有水平风速、风向以及垂直气流等要素。利用风廓线雷达资料分析局地风场，能较为细致地刻画风场垂直结构的时空变化特征。藏东南雅鲁藏布江河谷（徐海等，2014）上空3 km内的风场，以1.8 km为界，分别受地形和环流影响，具有不同的日变化和季节变化特征。大理地区（董保举等，2016）冬季风速较大，夏季风速较小，风场在0.4 km以下盛行偏东风，在0.4～1.2 km为偏北风，往上到3 km，以偏西风为主。受季风影响，该地区（徐安伦等，2016）对流层高层由西风转为东风，且东风下传，带动中高层风速减小，风向向东偏转。塔克拉玛干沙漠（王柯等，2012）5 km高度内，风场在春秋季变化类似，1 km以下多为东风、风速较小，以上多为西风、风速较大。上海浦东机场（王海霞等，2013）边界层内，冬季出现风矢量变化大的频率较高，春季次之，夏季最少。深圳地区（范进进等，2015）1.2～1.4 km的风场过渡带中，风向明显转换，风速较小，在其以下为较强的东风，以上是较稳定的西南风。

不同地区垂直风场存在差异，现有研究多集中在8 km高度以下，对流层风场的垂直结构仍需完善。ST（Stratosphere-Troposphere）风廓线雷达，位于南北过渡带上淮南气候环境综合观测试验站（HCEO），探测高度可达20 km，能连续获取高时空分辨率的风场资料。文章利用该雷达资料，分析淮南地区大气风场的垂直特征和季节变化，进一步加深高空风场的认识，对其变化规律的探讨及潜在天气学意义上的理解提供一定依据。

2 站点与资料

淮南地区是中国南北气候过渡带，以南为亚热带季风区，以北为温带季风区。HCEO地处淮南市东北部的上窑国家森林公园西北侧平台上（32.74°N，117.14°E），海拔高度86 m，周围以山地丘陵为主，大小山峦较多，森林覆盖率较大。

ST风廓线雷达工作频率46.5 MHz；有源天线单元144个；实行5波束方式（1个垂直波束、4个倾斜波束与天顶夹角15°，方位相距90°），探测大气风场。雷达采用低模式窄脉冲、高模式宽脉冲组合，保证低空具有较高高度分辨率的同时能够达到较高的探测高度。

本文选取2015年3月至2016年2月的ST风廓线雷达探测资料进行统计分析。观测期间，雷达运行稳定，探测高度范围为150～21538 m，共有44层探测资料；探测时间分辨率为30 min，共有

85.6%的实际探测率；探测要素为风向和风速，精度分别是0.1°和0.1 m/s。由于风廓线雷达在高低模式交替运行中，发射的电磁波波形和功率不同，造成模式衔接的转换高度处（10～12 km）数据缺失，风速资料产生观测断层。

采用世界气象组织规定的高空探测标准等压面，对垂直风场选取850 hPa、700 hPa、500 hPa、100 hPa所在高度附近，进行统计。结合淮南地区的大气层结构特点，参照上述4个常用等压面，将20 km高度内的垂直大气划分为4个厚度层（张爱英等，2009）：低层（148 m～1.9 km）、中低层（1.9～4.5 km）、中高层（4.5～9.9 km）、高层（9.9～20 km）。

季节按照春季3～5月、夏季6～8月、秋季9～11月、冬季12月至次年2月划分。风场年平均为一年风速的算术平均和风向的矢量平均（吕明华等，2012）（360°风向以风速分量的不同方向进行判断）。设D为风向，V为风速，平均风速$\bar{V}$和平均风向$\bar{D}$分别为

$$\bar{V}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}V_i, \tag{1}$$

$$\bar{D}=\arctan\left(\sum_{i=1}^{n}V_i\sin D_i \Big/ \sum_{i=1}^{n}V_i\cos D_i\right)。 \tag{2}$$

3 结果分析

对探测资料选取常用等压面850 hPa、700 hPa、500 hPa、100 hPa，分析其所在高度风场的时间变化规律，见图1和图2。图1表示风向，可以看出不同高度上风向随时间的变化差异较大。850 hPa风向转换较多，春季北风偏多，没有主导风向；夏、秋季，以东北风居多且集中在7、8、9月；进入11月，逐渐逆时针向西偏转，12月和次年1月部分天数东北风较多。到700 hPa，风向转换减小，偏西风势力增强，整体以西风偏北为主，4月开始，偏南风略有增加，在6、9月频次较高，11月后减小。500 hPa上，受西风控制，风向维持在240°～300°，而夏季西南风较多，7、8月显著。相比来说，100 hPa上，风向向北偏转，主要集中在260°～330°，7月西南风增多，出现东北风，到8月初逐渐顺时针转为偏西风。这种7月前后，低层东北风偏多、高层西南风较多的现象，初步认为与江淮地区的锋面活动有关（周越和夏兰，2017）。

图2可以看出，随高度增加，季节差异逐渐增大。结合统计值表1分析，850 hPa上，风速平均值为5.4 m/s，各季节变化率小于10%；其波动较小，5、6月略有起伏，秋、冬季趋于稳定。往上到700 hPa，风速增大，平均为7.2 m/s，其中春、冬季增长率分别达21%和75%；整体波动增强，冬季起伏较大，夏、秋季较小。500 hPa上，季节变化鲜明，从春季开始，风速先减小后增大，夏季最小，冬季达到最大，是夏季的2倍以上；相应地，波动幅度夏季最小，冬季最大，且冬季极值大于25 m/s的较多。到100 hPa，季节变化规律类似，平均风速在春、冬季增大到23.9 m/s和31.0 m/s，较500 hPa增长率分别为61%和47%；其波动幅度持续增强，夏季增幅较大，春、冬季极大值超过45m/s，极小值低于10 m/s，变化剧烈。此外，风速在100 hPa上，日变化特征突出，大致有15天的周期性变化。

上述分析表明，淮河流域风场有明显的垂直变化特征，随高度增加，季节变化差异增大。850、700 hPa高度，风向不稳定，风速小且波动弱；500、100 hPa高度，受西风带影响，以偏西风为主，风速大且波动强。垂直风场的季节变化与西风带的强度和位置有关，冬季西风中心位于西太平洋

表1 2015年3月至2016年2月淮南地区各等压面风速的季节统计情况

Table 1 The seasonal statistical condition of wind speed at each isobaric surface from March 2015 to February 2016 in Huainan

	风速平均值/m s^{-1}				风速标准差/m s^{-1}			
	100 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa	100 hPa	500 hPa	700 hPa	850 hPa
春季	23.9	14.8	6.7	5.5	9.3	6.7	4.3	3.7
夏季	14.3	9.5	5.9	5.6	7.7	4.7	4.1	4.1
秋季	19.2	12.0	5.9	4.9	9.9	6.7	4.2	3.1
冬季	31.0	21.1	10.0	5.7	11.7	8.8	5.4	3.5
全年	21.3	14.5	7.2	5.4	11.0	8.1	4.8	3.6

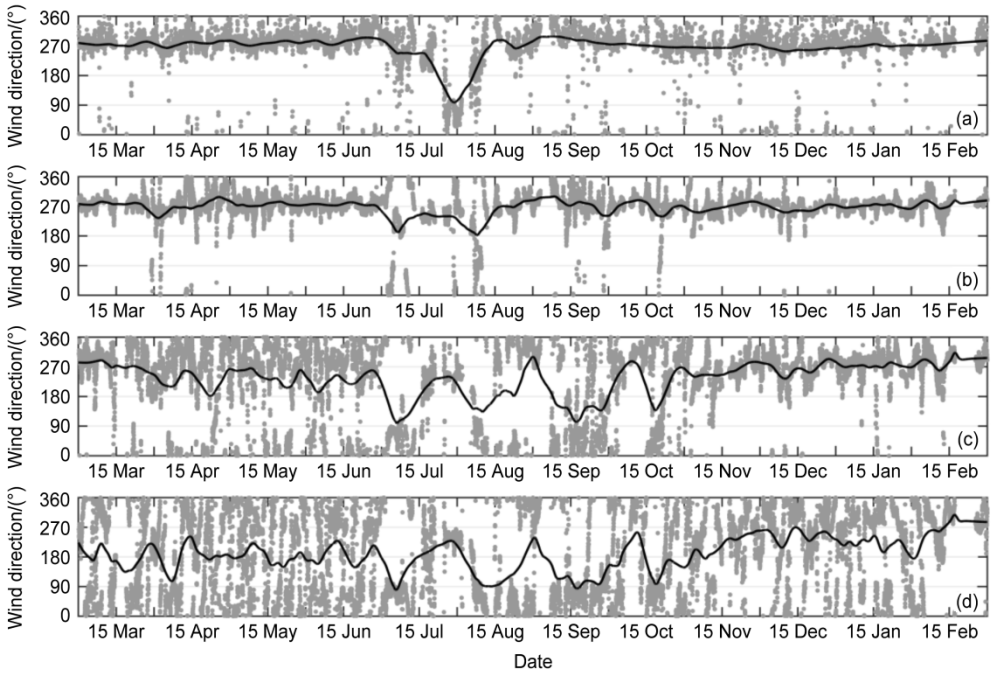

图1 2015年3月至2016年2月淮南地区（a）100 hPa、（b）500 hPa、（c）700 hPa、（d）850 hPa等压面风向变化规律（黑线为拟合，灰点为实测）

Fig. 1 Wind direction variation at (a) 100 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa from March 2015 to February 2016 in Huainan (black: fitting; gray: observations)

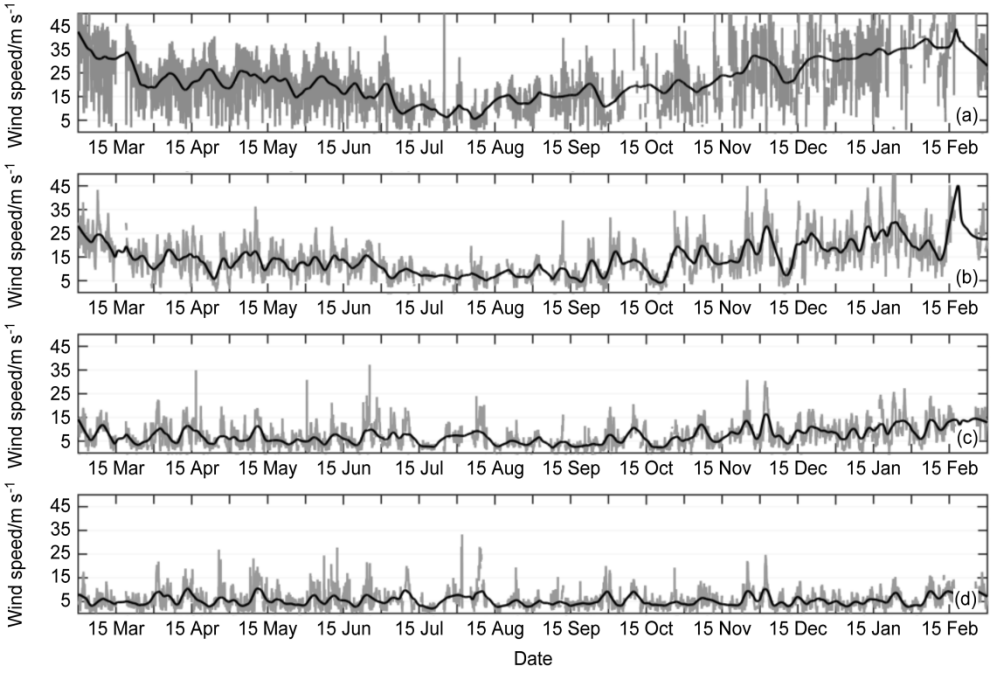

图2 2015年3月至2016年2月淮南地区（a）100 hPa、（b）500 hPa、（c）700 hPa、（d）850 hPa等压面风速变化规律（黑线为拟合，灰线为实测）

Fig. 2 Wind speed variation at (a) 100 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa from March 2015 to February 2016 in Huainan (black: fitting, gray: observations)

上空，强度在200 hPa高度达到最强；夏季西风中心位置北抬，强度最弱，风速减小，呈现夏季最小，秋季次之，冬季最大的时空特征。

全年风场时间剖面见图3。从图3a风向的垂直分布可以看出，3 km以下存在东风区，受季节变化影响，其范围夏季较大、冬季较小；3 km以上主要为西风区。从图3b风速的垂直分布可以看出，5 km以下存在小风区，范围随季节变化，波动幅度较大，夏季较大、冬季较小。同时，还存在多个环流过程，主要表现为较大风速在8 km左右形成偏北风后，随着高空动量下传，会带动低层向北偏转，风速增大。

为获得垂直风场的精细特征，进一步探讨不同高度其分布情况。图4是风向在各厚度层上的季节频率统计，可以看出，随高度升高，偏西风频率增多，偏南风减少，偏东、偏北风先减少后增多。具体在低层，各风向出现频率相近，偏南风略少，占13.8%，其中偏东风在夏、秋季频率较多，约有70%，偏西风在春、冬季较多，约有60%。中低层偏西风频率增多，占57.5%，其余风向开始减小，各风向的季节分布与低层相似。往上到中高层，偏西风频率增大到88.4%，偏南、偏北风频率约有10%，受较强西风控制，季节分布差异较小。相比于中高层，高层偏西风频率略有调整，偏北、偏东风增加，增幅夏季较大。

根据全年逐日风廓线，将风速归为5个区间，分别是[0, 5)、[5, 10)、[10, 25)、[25, 45) m/s以及大于或等于45 m/s。图5是风速在各厚度层上的季节频率统计，可以看出，随高度升高，较大风速增多、较小风速减少，各区间存在季节变化。处于低层的风速，有90%集中在[0, 10) m/s区间，有10%集中在[10, 25) m/s区间，其中[0, 5) m/s的风速出现频率平均高于60%；各区间季节变化差异较小，秋、冬季略有起伏。往上到中低层，风速大体均匀分布在[0, 25) m/s，仅有约1%处在[25, 45) m/s；各区间夏、秋季出现频率相近，冬季起伏较大。到中

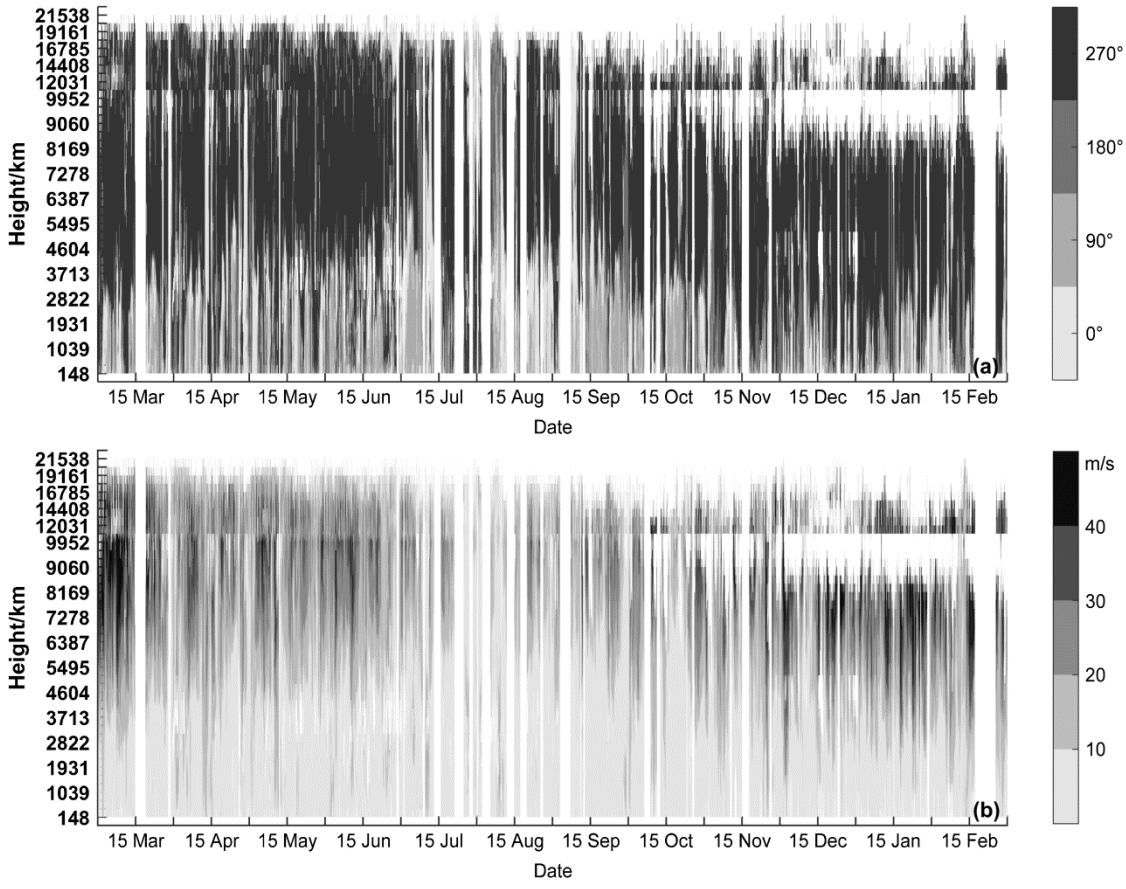

图3　2015年3月至2016年2月淮南地区风场高度—时间剖面：（a）风向；（b）风速

Fig. 3　Time-hight profile of the wind field from March 2015 to February 2016 in Huainan: (a) Wind direction; (b) wind speed

高层，风速分布有明显变化，[0, 10) m/s的风速出现频率迅速减少，不足20%；[10, 25) m/s的风速出现频率大幅增加，占50%以上，[25, 45) m/s的风速出现频率约有30%，大于或等于45 m/s的约有1%；各区间季节变化差异较大，[0, 10) m/s风速出现频率夏、秋季较多，春、冬季较少，与大于25 m/s的风速出现频率季节变化相反。高层与中高层分布相似，较大或较小风速的出现频率略有调整。

整体来看，风场的垂直分布在中低层以下，以小于10 m/s的风为主，风速近似服从指数分布；以上受偏西风影响，10～25 m/s的居多，风速近似服从对数分布。同时，随高度升高，较大风速在春、冬季所占比重逐渐增大，且春、冬季风场频率分布先于夏、秋季，在中低层表现出变化的趋势；较小风速在夏、秋季出现频率较高，与偏东风的季节分布相似。

对探测资料进行全年统计，得到垂直风场的变

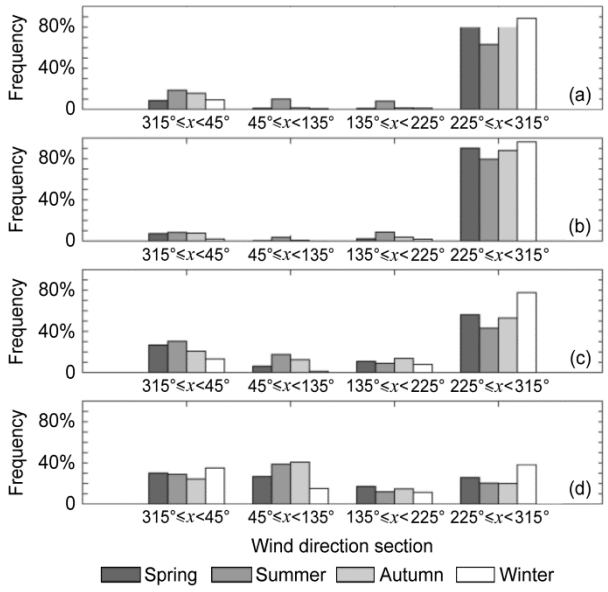

图4 2015年3月至2016年2月淮南地区各层上风向季节频率统计分布：（a）高层；（b）中高层；（c）中低层；（d）低层

Fig. 4 Seasonal frequency of wind direction at each layer from March 2015 to February 2016 in Huainan: (a) High layer; (b) high-middle layer; (c) lower-middle layer; (d) lower layer

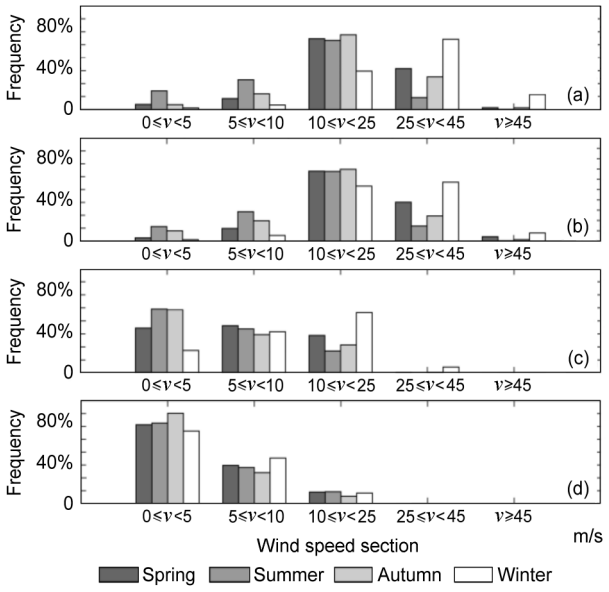

图5 2015年3月至2016年2月淮南地区各层上风速季节频率统计分布：（a）高层；（b）中高层；（c）中低层；（d）低层

Fig. 5 Seasonal frequency of wind speed at each layer from March 2015 to February 2016 in Huainan: (a) High layer; (b) high-middle layer; (c) lower-middle layer; (d) lower layer

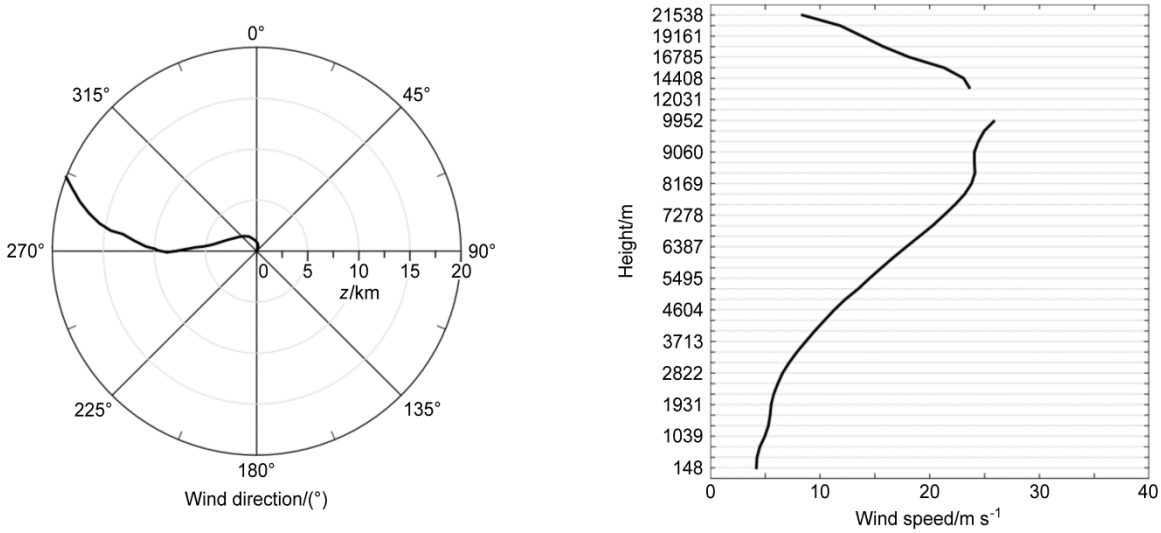

图6 2015年3月至2016年2月淮南地区风场年平均垂直廓线：（a）风向；（b）风速

Fig. 6 Average wind field vertical profile from March 2015 to February 2016 in Huainan: (a) Wind direction; (b) wind speed

化廓线，如图6所示。淮河流域以偏西风为主，高、低空变化显著。2 km高度内，主要是北风，随高度上升，到5 km左右逆时针逐渐转为西风。西风控制范围较大，持续上升到15 km左右后，在高空环流的调整中，西风顺时针逐渐转为西北风。往上到20 km左右，风向保持向北偏转的趋势。风速在2 km高度内，受辐射传输、地形摩擦等作用，基本维持在5 m/s左右，速度变化较小，之后随高度升高逐渐增大，5 km左右处平均风速为15 m/s。5 km以上，风速继续增大，速度变化较快，到10km高度处，接近西风带最大值位置，极大风速值超过25 m/s。从10 km开始，风速急剧减小，到20 km左右约为10 m/s，再往上进入平流层，风速继续减小，接近低层的情况。

该地区风场的年平均结构表现为，在低空北风偏多，风速较小，在中高空西风较强，风速较大，形成最大风层，到高空后转为西北风，风速减小。这一风场特征，与徐安伦等（2016）、韦志刚等（2010）等学者分别对大理和敦煌地区的风速研究结果类似，由于两者研究地区所处的地理环境与实验时长不同，具体在垂直结构的高度变换及风向的分布中存在差异。

4 总结

（1）淮河流域，850 hPa、700 hPa、500 hPa、100 hPa等压面高度上，风场有明显的垂直变化，且随高度增加，风速及其波动幅度先减小后增大，夏季最小，秋季次之，冬季最大的季节变化逐渐增大。

（2）淮河流域，风场的垂直分布存在差异，在对流层中低层以下，以小于10 m/s的风为主；以10～25 m/s的居多。其中较大风速在春、冬季所占比重增大，而较小风速分布规律与偏东风的相似，在夏、秋季出现频率高。

（3）淮河流域，年平均风场有垂直结构特征。从低层开始，以5 m/s北风为主，维持到2km左右，向西偏转，风速小于10 m/s；到5 km高度处，形成15 m/s的西风；受西风影响，风速持续增大，10 km左右达到25 m/s后，逐渐减小；在15 km左右，风向顺时针向北偏转，到20 km附近，与低空风场相近。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所淮南气候环境综合观测试验站为本文提供风廓线雷达观测资料。

参考文献（References）

Benjamin S G, Schwartz B E, Szoke E J, et al. 2004. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85: 1871−1886. doi:10.1175/BAMS-85-12-Benjamin

陈添宇, 陈跃, 陈乾. 2011. 风廓线雷达资料的误差及对祁连山地形云风场监测的初步分析 [J]. 干旱气象, 29: 416−422. Chen Tianyu, Chen Yue, Chen Qian. 2011. Error analysis of wind profiler radar data and the primary results from the Qilian Mountain orographic cloud and wind field observation [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 29: 416−422. doi: 10.3969/j. issn. 1006-7639.2011.04.004

邓闯, 阮征, 魏鸣, 等. 2012. 风廓线雷达测风精度评估 [J]. 应用气象学报, 23: 523−533. Deng Chuang, Ruan Zheng, Wei Ming, et al. 2012. The evaluation of wind measurement accuracy by wnd profile radar [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23: 523−533.

董保举, 李建, 孙绩华, 等. 2016. 青藏高原东南缘低层风场垂直结构与变化特征 [J]. 高原气象, 35: 597−607. Dong Baoju, Li Jian, Sun Jihua, et al. 2016. Vertical structure and variation characteristics of wind field in low-level atmosphere in the southeastern margin of Qinghai−Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35: 597−607. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00041

董保举, 张晔, 徐安伦, 等. 2011. 风廓线雷达测风和气球测风资料对比分析 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 33(S1): 18−25. Dong Baoju, Zhang Ye, Xu Anlun, et al. 2011. Comparative analysis on wind data from wind profiler radar and balloon sounding [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences) (in Chinese), 33(S1): 18−25.

董丽萍, 吴蕾, 王令, 等. 2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析 [J]. 气象, 40: 1145−1151. Dong Liping, Wu Lei, Wang Ling, et al. 2014. Preliminary comparison research of the wind profile radar network data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 40: 1145−1151. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.012

范进进, 张坚, 张立明, 等. 2015. 基于风廓线雷达资料的深圳地区冬季海陆风特征分析 [C]//第32届中国气象学会年会S16地基遥感观测技术与应用. 天津:

中国气象学会, 8pp. Fan Jingjing, Zhang Jian, Zhang Liming, et al. 2015. Analysis of winter sea−land breeze characteristics in Shenzhen with Wind Profiler Radar [C]//The 32th Chinese Meteorological Society (in Chinese). Tianjin: Chinese Meteorological Society, 8pp.

Frisch A S, Weber B L, Strauch R G, et al. 1986. The altitude coverage of the Colorado wind profilers at 50, 405 and 915 MHz [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 3: 680−692. doi: 10.1175/1520-0426(1986)003<0680:TACOTC>2.0.CO;2

李晨光, 刘淑媛, 陶祖钰. 2003. 华南暴雨试验期间香港风廓线雷达资料的评估 [J]. 热带气象学报, 19: 269−276. Li Chenguang, Liu Shuyuan, Tao Zuyu. 2003. Review of wind profiler data of Hongkong during IOP of Huamex and Scsmex [J]. Journal of

Tropical Meteorology (in Chinese), 19: 269−276. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2003.03.006

刘天齐. 1982. 环境保护概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 97−98. Liu Tianqi. 1982. Summarization of Environmental Protection (in Chinese)[M]. Beijing: Higher Education Press, 97−98.

Luce H, Fukao S, Yamamoto M. 2001. Validation of winds measured by MU Radar with GPS Radiosondes during the MUTSI campaign [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 18: 817−829. doi: 10.1175 / 1520-0426(2001)018<0817:VOWMBM>2.0.CO;2

吕明华, 闫江雨, 姚仁太, 等. 2012. 风向的统计方法研究 [J]. 气象与环境学报, 28(3): 83−89. Lv Huaming, Yan Jiangyu, Yao Rentai,et al. 2012. Study on the statistical method of wind direction [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(3): 83−89. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2012.03.015

Mihalikova M, Kirkwood S, Arnault J, et al. 2012. Observation of a tropopause fold by MARA VHF wind-profiler radar and ozonesonde at Wasa, Antarctica: Comparison with ECMWF analysis and a WRF model simulation [J]. Ann. Geophys., 30: 1411−1421.

曲巧娜, 盛春岩, 孙青, 等. 2016. 风廓线雷达与L波段探空雷达测风资料的对比 [J]. 干旱气象, 34: 1078−1086. Qu Qiaona, Sheng Chunyan, Sun Qing, et al. 2016. Comparison of horizontal wind between wind profile radar and L band sounding radar [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 34: 1078−1086.

盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2002. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 240−241.Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2002. Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Peking University Press, 240−241.

孙旭映, 韩晖, 段海霞, 等. 2008. 风廓线仪与气球测风资料的对比分析 [J]. 干旱气象, 26(3): 48−52. Sun Xuying, Han Hui, Duan Haixia, et al. 2008. Comparative analysis on wind data from atmospheric wind profiler and balloon sounding [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26(3): 48−52. doi: 10.3969 / j. issn. 1006-7639.2008.03.009

王海霞, 张宏升, 李云峰, 等. 2013. 上海浦东国际机场低层大气垂直风场特征研究 [J]. 气象, 39: 1500−1506. Wang Haixia, Zhang Hongsheng, Li Yunfeng, et al. 2013. Study on characteristics of vertical wind field in lower atmosphere over Shanghai Pudong international airport [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39: 1500−1506. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.014

王柯, 何清, 王敏仲, 等. 2012. 塔克拉玛干沙漠腹地边界层风场特征 [J]. 中国沙漠, 32: 1029−1034. Wang Ke, He Qing, Wang Minzhong,et al. 2012. Wind field at boundary layer in hinterland of the Taklimakan Desert [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 32: 1029−1034.

王欣, 卞林根, 彭浩, 等. 2005. 风廓线仪系统探测试验与应用 [J]. 应用气象学报, 16: 693−698. Wang Xin, Bian Lingen, Peng Hao,et al. 2005. The atmospheric Wind Profiler and radio acoustic sounding system with its applications [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16: 693−698. doi: 10.3969 / j. issn. 1001-7313. 2005.05.017

韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征 [J]. 大气科学, 34(5): 905−913. Wei Zhigang, Chen Wen, Huang Ronghui. 2010. Vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 905−913. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.06

WMO. 1996. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation[M]. 7th ed. Genena: WMO, 222−239.

WMO. 2008. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation[M]. 7th ed. Genena: WMO, 1−19.

吴志根, 徐同, 丁若洋, 等. 2013. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析 [J]. 气象, 39: 370−376. Wu Zhigen, Xu Tong, Ding Ruoyang, et al. 2013. Comparison of wind data measured by Shanghai network wind profilers and Baoshan GFE(L)-1 sounding radar [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39: 370−376. doi: 10.7519 / j. issn. 1000 - 0526.2013.03.012 气象: 2013, 39(3): 370-376.

徐安伦, 钟爱华, 孙绩华, 等. 2016. 大理地区对流层至低平流层大气垂直结构的特征分析 [J]. 高原气象, 35: 77−85. Xu Anlun, Zhong Aihua, Sun Jihua, et al. 2016. Vertical structure characteristic from troposphere to low stratosphere in Dali region over the southeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35: 77−85. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00136

徐海, 邹捍, 李鹏, 等. 2014. 藏东南林芝机场低层风场垂直结构与变化特征 [J]. 高原气象, 33: 355−360. Xu Hai, Zou Han, Li Peng,et al. 2014. Vertical structure and variation of wind field over Nyingchi airport southeast Tibet [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33: 335−360. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00009

张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 2009. 近30年我国高空风速变化趋势分析 [J]. 高原气象, 28: 680−687. Zhang Aiying, Ren Guoyu, Guo Jun,et al. 2009. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28: 680−687.

赵兴炳, 李跃清. 2006. 风廓线雷达原理及其在高原地区探测结果初析 [J]. 四川气象, 26(2): 24−26. Zhao Xingbing, Li Yueqing. 2006. Principle of wind-profile radar and prime analysis of detected results in the plateau region [J]. Journal of Sichuan Meteorology (in Chinese), 26(2): 24−26. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2006.02.010

周越, 夏兰. 2017. 江淮气旋气候学特征的统计研究 [J]. 气象与环境科学, 40(3): 79−85. Zhou Yue, Xia Lan. 2017. Statistical research on climatic characteristics of Jianghuai cyclones [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 40(3): 79−85. doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.03.013

周志敏, 万蓉, 崔春光, 等. 2010. 风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用 [J]. 暴雨灾害, 29: 251−256. Zhou Zhimin, Wan Rong, Cui Chunguang,et al. 2010. Application of wind profiler radar data in a Hailfall Process [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 29: 251−256. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2010.03.008