

淮河流域农田近地层风速、温度和湿度廓线特征

段春锋^{1, 2, 3} 田红^{1, 2, 3} 黄勇^{2, 3} 刘俊杰^{1, 2, 3} 曹雯^{2, 3}

(1 安徽省气候中心, 合肥 230031; 2 安徽省气象科学研究所 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3 寿县国家气候观象台 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 寿县 232200)

摘要: 利用寿县国家气候观象台32 m气象观测塔梯度系统采集的风速、气温、湿度资料, 分析了寿县2007年7月—2019年12月农田近地层风速、温度和湿度日变化特征和廓线特征。结果表明: 气温和风速日变化为单峰型; 气温峰值在14时30分—16时, 谷值在05时30分—08时, 低层峰值时间早于高层; 风速峰值在11时30分—13时30分, 谷值在00时30分—03时。湿度日变化为双峰型, 主峰值在08时30分—11时, 主谷值低层在05—07时, 高层在15时—15时30分和07—08时。气温白天随高度递减, 晚上随高度递增, 早晨随高度先递减后递增, 傍晚随高度先递增后递减。白天气温垂直递减率最大值出现在12时—12时30分, 晚上逆温最大值出现在21时—03时, 早上过渡型出现在07时30分—09时, 傍晚过渡型出现在17时30分—19时。风速随高度递增, 风速梯度随高度递减, 风速垂直递增率白天明显小于夜间, 最大值出现在21时—01时。湿度随高度先减小后增大再减小; 10~20 m存在逆湿现象, 夜间比白天明显, 尤其后半夜。

关键词: 气象要素, 日变化, 廓线, 近地层, 淮河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.017

Surface Layer Profile Characteristics of Wind Velocity, Temperature and Humidity of Cropland in Huaihe River Basin

Duan Chunfeng^{1, 2, 3}, Tian Hong^{1, 2, 3}, Huang yong^{2, 3}, Liu Junjie^{1, 2, 3}, Cao Wen^{1, 2, 3}

(1 Anhui Climate Center, Hefei 230031 2 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031 3 Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200)

Abstract: Based on the data of wind velocity, temperature and humidity collected by the gradient system of the 32-meter meteorological observation tower of Shouxian National Climatology Observatory, the daily variation characteristics and profile characteristics of wind velocity, temperature and humidity in the surface layer of cropland in Shouxian from July 2007 to December 2019 were analyzed. The results show that the daily variation of temperature and wind velocity is unimodal. The peak value of temperature is from 14:30 BT to 16:00 BT, the valley value is from 05:30 BT to 08:00 BT, and the occurrence time of low layer is earlier than that of high layer. The peak value of wind velocity is from 11:30 BT to 13:30 BT, and the valley value is from 00:30 BT to 03:00 BT. The daily variation of humidity is bimodal. The main peak value is from 08:30 BT to 11:00 BT. The low level of the main valley value is from 05:00 BT to 07:00 BT. The high level is from 15:00 BT to 15:30 BT and 07:00 BT to 08:00 BT. The air temperature decreases with altitude in the daytime, increases with altitude in the evening, decreases first and then increases with altitude in the morning, and increases first and then decreases with altitude in the evening. The maximum value of vertical decline rate of white weather temperature appears from 12:00 BT to 12:30 BT, the maximum value of inversion appears from 21:00 BT to 03:00 BT in the evening, the morning transition type appears from 07:30 BT to 09:00 BT, and the evening transition type appears from 17:30 BT to 19:00 BT. The wind velocity increases with height, and the wind velocity gradient decreases with height. The vertical increasing rate of wind velocity in daytime is significantly lower than that in nighttime. The maximum value appears from 21:00 BT to 01:00 BT. Humidity decreases first, then increases and then decreases with height. There is reverse humidity phenomenon in 10—20 meters, and it is more obvious at night than in the daytime, especially in the latter half of the night.

Key words: meteorological elements, daily variation, profiles, surface layer, Huaihe River Basin

收稿日期: 2020年6月2日; 修回日期: 2020年8月20日
第一作者: 段春锋(1983—), Email: dcf118@126.com
资助信息: 中国气象局气候变化专项(CCSF201928); 安徽省气象局研究型业务科技攻关项目(201903); 淮河流域气象开放研究基金(HRM201804)

0 引言

近地层是与地球表面最为直接作用的气层, 人类活动、生态环境变化以及天气气候异常都与大气近地层的物理过程、化学过程和生态过程密切相关。因此近地层气象要素的结构特征和廓线特征一直是大气物理、大气化学和大气环境等科学研究的重点方向^[1]。特别

是近地层处于离地面在100 m以下的空间,大气直接受下垫面的影响,气象要素有着复杂的时空变化特征^[2]。

近年来,学者们高度重视并开展了大范围近地层大气特征研究。李英等^[3]研究了青藏高原东坡冬夏季近地层风、温、湿梯度特征。郭凤霞等^[4]利用铁塔观测研究了合肥郊区近地层风速廓线特征。李鹏等^[5]利用测风塔研究了风能丰富地区平原、山地和沿海三种地形近地层风速廓线特征。杨湘婧等^[6]对比分析了L波段探空廓线数据与铁塔梯度观测数据的近地层温、湿、压特征。解以杨等^[7]研究了天津气象塔温度和风速的日变化特征和廓线特征。龚玺等^[8]研究了内蒙古草原近地层风速廓线。李靖等^[9]研究了安徽吉阳核电厂址温度梯度和风廓线规律的适用性。陈胜东等^[10]研究了江西九江近地层温度梯度及风廓线规律的适用性。金莉莉等^[11]研究了乌鲁木齐市城区和郊区近地层风速廓线。何清团队^[12-16]对塔克拉玛干沙漠腹地塔中近地层气象要素廓线开展了一系列的研究。然而由于缺乏气象梯度观测,对淮河流域近地层大气廓线特征的研究甚少。

本文利用寿县国家气候观象台32 m气象观测塔梯度系统采集的风速、气温、湿度资料,分析了淮河流域2007年7月—2019年12月农田近地层风速、温度和湿度日变化特征和廓线特征,为淮河流域开展近地层大气观测试验和大气环境研究提供观测事实,对于认识淮河流域农田小气候规律、改进土壤—植被—大气系统的近地层模型以及提高农业气象服务科技水平等具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 观测场地概况

观测地点位于寿县国家气候观象台。近地层通量观测场在2007年7月—2013年4月期间位于九龙,在2013年5月至今位于窑口。九龙观测场面积17亩(1亩约为666.7 m²),东、南、西三面为大片农田,北面为居民区,位于城区中心以南9 km处,处于城南保障圩和瓦埠湖九里联圩之间,不在县城总体规划之内;观测塔立在场内西南角,周围2~5 km²范围内基本是同一类型均一平坦农田;观测场北部边缘分别有一高约2 m的水泥平台和数据采集室;观测场南部30 m处有一条水泥马路,路边有少量树木分布。窑口观测场面积300亩,周围有100亩保护控制土地,四面均为大片农田,位于城区中心以南12 km处;观测塔立在基准气候观测区东北侧,下垫面平坦开阔,周边植被类型为当地典型的稻麦轮作农田。两个观测场的观测环境30~50年不受破坏,下垫面均为平坦、开阔、一致

的农作物种植区,一年两熟,稻麦轮作,周边无污染源、无高层建筑。

1.2 资料来源

寿县国家气候观象台近地层通量观测系统由湍流观测分系统和梯度观测分系统组成,其中梯度观测中气象塔高32 m。湍流观测分系统包括三维超声风速仪和红外H₂O/CO₂分析仪。梯度观测分系统由安装在梯度塔上的5层温度、湿度、风速传感器,1层风向传感器,四分量长、短波(向上、向下)辐射传感器,光合有效辐射传感器,气压、红外地表温度传感器,5层铂电阻地温传感器,5层土壤水分观测传感器和1层3点土壤热通量传感器组成。基本观测项目包括:脉动温度,脉动湿度,脉动风速,5层风速,1层风向,5层温度、湿度,长波、短波(向上、向下)辐射,地表温度,5层地温,5层土壤水分,土壤热通量、气压。仪器布设如图1,观测项目和传感器信息见表1和表2。

1.3 数据处理

根据中国气象局《近地层通量观测规范》^[17]和气象行业标准《地面气象观测资料质量控制》^[18],对原始数据进行了完整性检验、数据合理性检验、数据一致性检验,异常值剔除检查。使用的数据是经数据采集器处理后的半小时平均数据。数据时段为2007年7月—2019年12月共149个月,其中2010年11月、2012年12月、2013年5月—2014年12月、2016年2月观测数据缺测。经数据质量控制后,气温、风速、水汽压、气压的有效观测数据分别为79.22%、77.32%、78.43%、79.24%,数据缺测率分别为20.77%、20.71%、20.74%、20.71%,数据异常率分别为0.01%、1.97%、0.84%、0.05%。半小时气温、风速、水汽压、气压数据最大值为39.9℃、14.1 m/s、48.3 hPa、1045 hPa,最小值为-12.3℃、0.1 m/s、0.5 hPa、988 hPa。

湿度分析采用的是比湿,首先根据比湿定义和气体状态方程利用水汽压和气压将水汽压转换为比湿。计算公式为:

$$q = 622 \frac{e}{p - 0.378e} \quad (1)$$

其中: q 为比湿,单位g/kg, e 为实际水汽压, p 为大气压,单位为hPa。

2 结果分析

2.1 近地层风速、温度、湿度日变化特征

2.1.1 风速日变化特征

年平均风速日变化呈单峰型(图2a),2~30 m

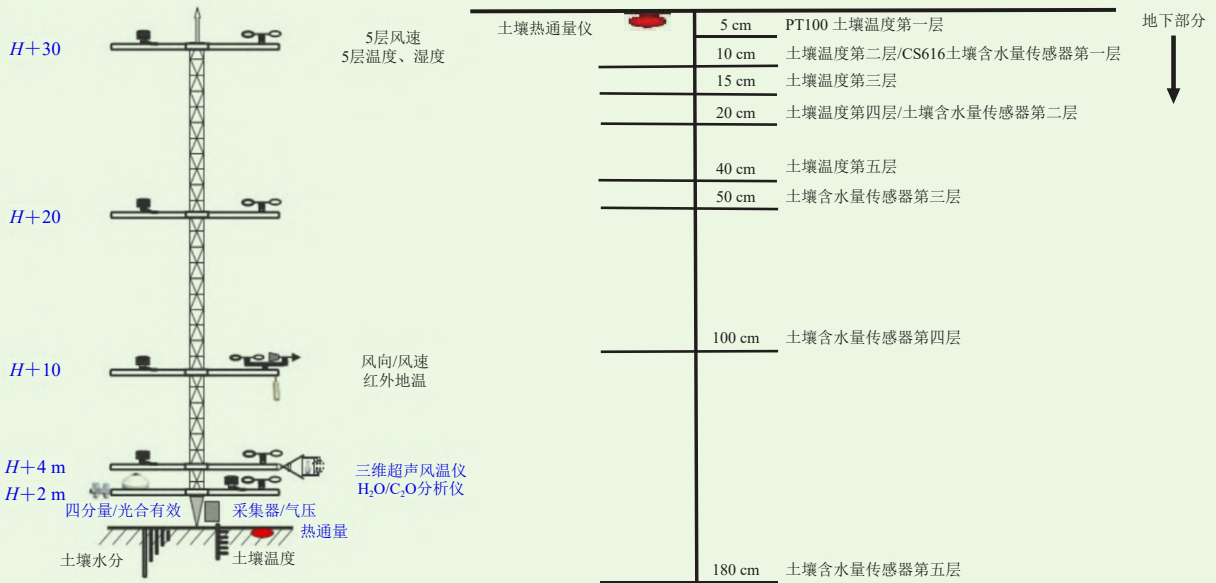


图1 近地层通量观测系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of flux observation system in the surface layer

表1 地面仪器分布和观测项目

Table 1 Ground instrument distribution and observation items

层数	高度	传感器	测量参数
第五层	30 m	010风速传感器、HMP45C空气温湿度、PT1000	风速、空气温度、相对湿度
第四层	20 m	010风速传感器、HMP45C空气温湿度、PT1000	风速、空气温度、相对湿度
第三层	10 m	010风速传感器、020C风向传感器、HMP45C空气温湿度、PT1000	风速、风向、空气温度、相对湿度
第二层	4 m	010风速传感器、020C风向传感器、HMP45C空气温湿度、PT1000、CAST3超声风速仪、LI7500水汽分析仪	风速、空气温度、相对湿度、开路涡动数据
第一层	2 m	010风速传感器、HMP45C空气温湿度、PT1000、CNR1净辐射传感器、190SB光合有效辐射传感器、IRR-P红外温度计	风速、空气温度、相对湿度、光合有效辐射、红外地表温度、太阳短波辐射、向上反射短波辐射、地球长波辐射、大气长波辐射、净辐射
	1.5 m	PTB210大气压传感器	大气压力

表2 地下仪器分布和观测项目

Table 2 Underground instrument distribution and observation items

土壤温度			
层数	深度	传感器	测量参数
第一层	5 cm	PT100	土壤温度
第二层	10 cm	PT100	土壤温度
第三层	15 cm	PT100	土壤温度
第四层	20 cm	PT100	土壤温度
第五层	40 cm	PT100	土壤温度
土壤含水量			
层数	深度	传感器	测量参数
第一层	10 cm	CS616	土壤湿度
第二层	20 cm	CS616	土壤湿度
第三层	50 cm	CS616	土壤湿度
第四层	100 cm	CS616	土壤湿度
第五层	180 cm	CS616	土壤湿度
土壤热通量			
层数	深度	传感器	测量参数
一层	5 cm	HFP01	土壤热通量

风速峰值均出现在12时30分，分别为2.68、3.01、3.45、3.81、4.01 m/s；2 m和4 m风速谷值出现在01时30分，10 m、20 m和30 m出现在03时，分别为1.50、1.80、2.27、2.85、3.32 m/s；峰值是谷值的1.79、1.68、1.52、1.34、1.21倍。白天风速变化幅度大，夜间较为平稳，变化幅度小。从2 m风速来看，白天为1.61~2.68 m/s，夜间仅为1.50~1.78 m/s。风速随高度增加逐渐增大，2 m均在2.7 m/s以下，而30 m则在3.3 m/s以上。

06时以后，太阳辐射开始增强，近地面气温升高，大气逐渐形成不稳定层结，上下层空气的湍流交换加强，上层空气的动量下传，近地层空气获得动量，风速快速增大，09时增速最大，2 m风速每小时增加0.32 m/s；随后增速逐渐减慢，风速缓慢增加，到12时30分达到峰值；午后，随着太阳辐射减弱，湍流交换减弱，风速缓慢减小；傍晚，地面辐射平衡快速下降，湍流交换进一步减弱，风速迅速减小，17时

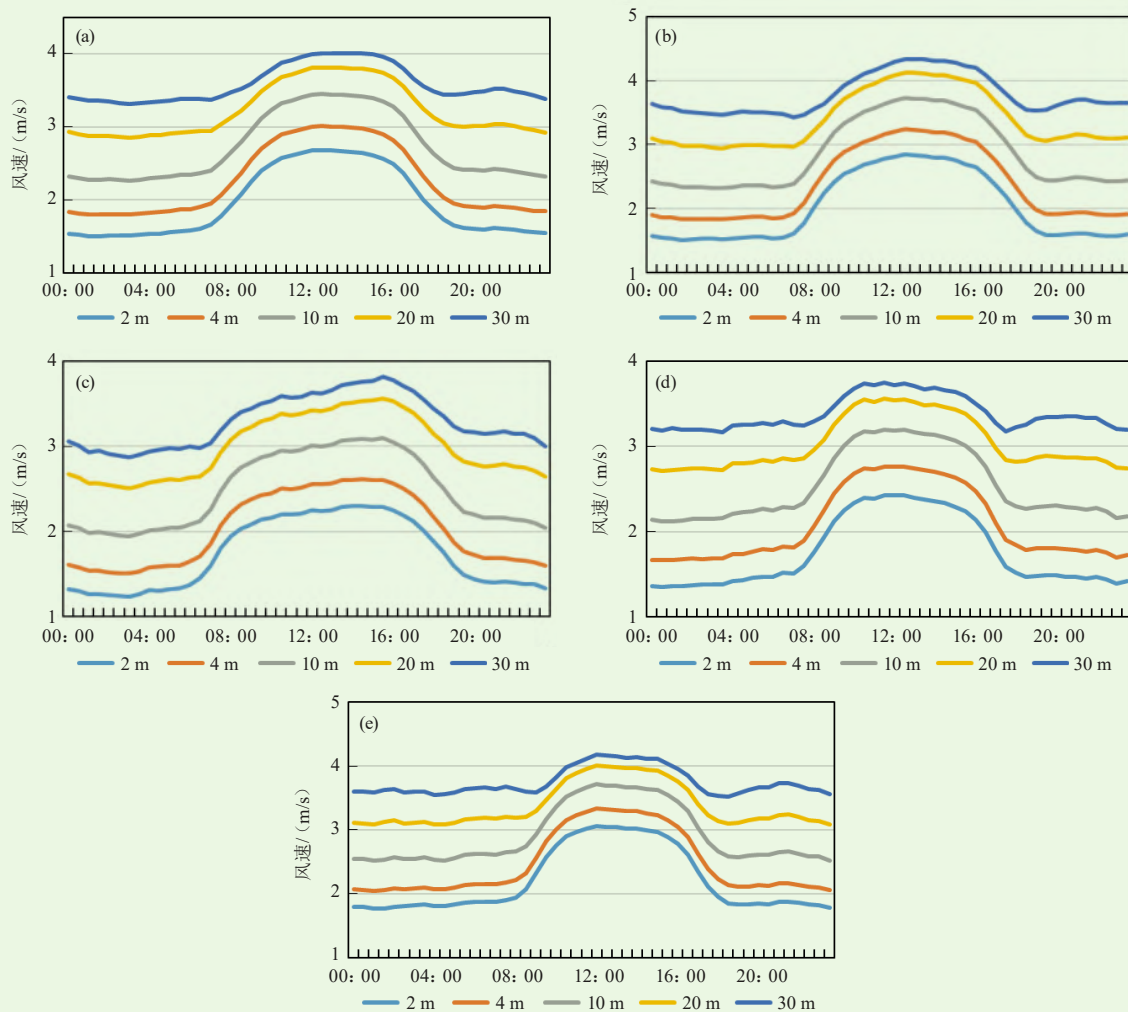


图2 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 风速日变化
Fig. 2 Daily variation of wind velocity in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e)

风速减速最大, 2 m 风速每小时降低 0.36 m/s; 夜间, 随着近地层逆温逐渐形成, 湍流交换继续减弱, 风速持续减小, 01—03 时达到谷值。

按照春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—11 月)、冬季 (12—2 月) 划分四季。四季风速日变化特征 (图 2b—2e) 与年平均风速相似, 呈单峰型: 正午最大, 午夜最小; 高层大, 低层小; 变幅白天大, 晚上小。但各季节风速大小、风速日变化的峰值和谷值出现时间存在明显差异。冬季风速最大, 春季其次, 夏季最小, 2 m 风速冬季为 1.76~3.06 m/s, 夏季为 1.23~2.29 m/s, 前者是后者的 1.33~1.43 倍。四季风速峰值出现在 11 时 30 分—13 时 30 分, 谷值主要出现在 00 时 30 分—03 时。2~30 m 风速峰值和 2~4 m 风速谷值出现时间秋季均最早, 冬季其次, 夏季最晚。夏季风速峰值出现时间高层晚于低层, 2 m 和 4 m 出现在 14 时 30 分, 10~30 m 出现在 15 时 30 分; 春季、秋季

和冬季峰值出现时间高低层一致, 分别为 12 时 30 分、11 时 30 分、12 时。春季风速谷值出现时间低层早于高层, 2~4 m 在 01 时 30 分, 10~20 m 在 03 时 30 分, 30 m 在 07 时。夏季高低层一致, 2~30 m 均出现在 03 时。秋冬季低层晚于高层, 秋季 2~10 m 在 00 时 30 分, 20 m 在 23 时 30 分, 30 m 在 18 时 30 分; 冬季 2~10 m 在 01 时, 20 m 在 23 时 30 分, 30 m 在 18 时 30 分。

2.1.2 温度日变化特征

年平均气温日变化呈单峰型 (图 3a), 峰值 2~10 m 出现在 15 时, 20~30 m 出现在 15 时 30 分, 分别为 20.7、20.4、20.3、20.3、20.1 m/s; 谷值 2 m 和 4 m 出现在 06 时, 10~30 m 出现在 06 时 30 分, 分别为 13.5、13.6、14.1、14.5、14.6 m/s; 峰值是谷值的 1.54、1.50、1.44、1.40、1.38 倍。气温日变化幅度随着高度升高而降低。气温白天下午比上午高, 夜间前半夜比后半夜高。早晨和傍晚均有一个不同高度气温

的交点，即等温层结，气温不随高度变化，等温时刻大约出现在08时和17时30分。白天气温随高度降低，为气温递减层结；晚上气温随高度升高，为逆温层结。

06时以后，太阳辐射逐渐增强，地面辐射平衡由负转为正，地面温度急剧上升，热量由地面输向大气，气温快速上升。气温上升速度低层快于高层，08时前后不同高度气温基本接近。09时气温上升速度最大，2 m为每小时升高1.39 °C，30 m为0.99 °C。15时左右气温达到峰值，比太阳辐射峰值时间滞后2.5 h。随后，太阳辐射逐渐减弱，气温快速下降。气温下降速度低层快于高层，17时30分前后不同高度气温基本接近。18时气温下降速度最快，2 m为每小时下降1.17 °C，30 m仅为0.54 °C。夜间，地面辐射平衡由正转为负，地面迅速冷却，气温持续下降，直到06时达到谷值。

四季气温日变化特征（图3b—3e）与年平均气

温相似，为单峰型，午后最大，早晨最小；白天上午大，下午小；前半夜大，后半夜小；气温变幅低层大，高层小；白天气温随高度降低，晚上随高度升高，早晨和傍晚存在等温现象，气温不随高度变化。但四季气温高低、气温日变化的峰值和谷值出现时间明显不同。夏季气温最高，秋季其次，冬季最低。2 m气温夏季为24.7~30.7 °C，冬季为1.2~8.0 °C，前者是后者的3.8~19.9倍。气温峰值出现在14时30分—16时，夏秋季早于冬春季，前者在14时30分—15时30分，后者在15—16时。气温谷值出现在05时30分—08时，夏季最早，在05时30分—06时，春季其次，冬季最晚，在07时30分—08时。四季气温峰值和谷值出现时间低层均早于高层，如春季2 m、4~10 m、20~30 m气温峰值分别出现在15时、15时30分和16时。早晨等温夏季出现最早，大约在07时，冬季最晚，大约在09时；傍晚等温冬季出现最早，大约在17时，夏季最晚，大约在18时30分。

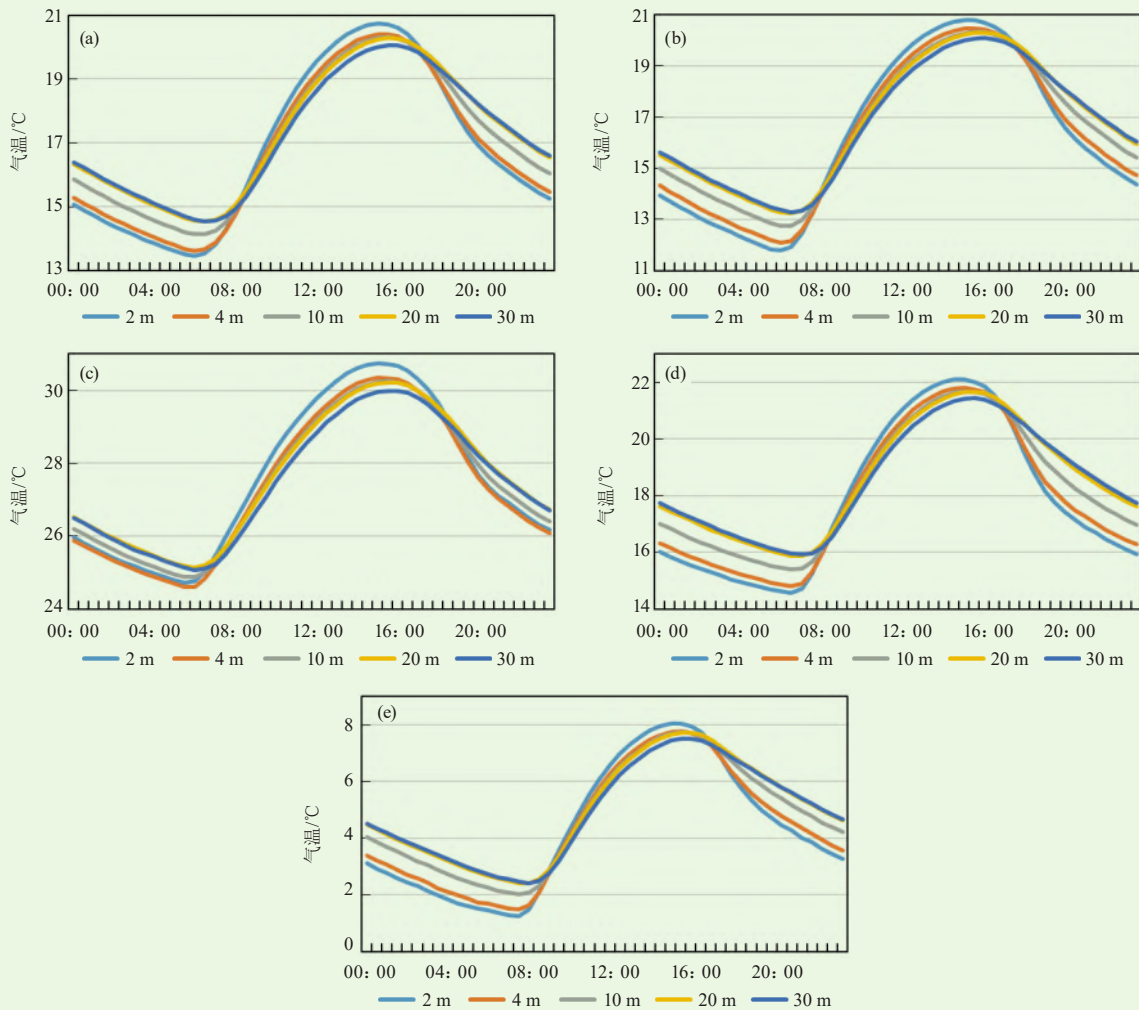


图3 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 温度日变化
Fig. 3 Daily variation of temperature in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e)

2.1.3 湿度日变化特征

年平均比湿日变化呈双峰型（图4a），主峰值出现在09时—09时30分，次峰值出现在19时30分—22时30分，两个谷值出现在05时—05时30分和15时—15时30分，2~4 m主谷值出现在05时30分，20~30 m出现在15时30分。主峰值分别为10.8、10.4、10.1、10.2、9.6 g/kg，主谷值分别为9.9、9.7、9.5、9.5、9.0 g/kg，两者差异较小。比湿随高度先降低后上升再降低，4~20 m存在逆湿现象，除14—16时外多数时间20 m比湿大于10 m；03—06时20 m比湿大于4 m。早晨4 m和20 m比湿、午后10 m和20 m的比湿均存在交点，即等湿现象。

06时以后，太阳辐射缓慢增强，地面温度逐渐上升，比湿急剧上升，09时30分达到峰值。比湿增幅随高度增加而减小，06—09时2 m比湿增大了0.97 g/kg，而30 m增幅较小，只有0.36 g/kg。随着太阳辐射增强，地面温度快速升高，比湿以每小时约0.1 g/kg的

幅度缓慢下降，15时30分达到次谷值。之后，随着太阳辐射的下降，比湿又开始上升，直到19时30分达到次峰值。夜间，地面冷却降温，比湿持续下降，直到06时达到谷值；比湿降幅随高度增加而越小，19时30分—06时2 m比湿降幅0.65 g/kg，而30 m仅有0.07 g/kg。

四季比湿日变化特征（图4b—4e）与年平均比湿相似，呈双峰型，上午大于午后，傍晚大于早晨，比湿随高度存在逆湿现象。但四季比湿大小、比湿日变化的峰值和谷值出现时间明显不同。夏季比湿最大，为16.8~19.5 g/kg，秋季其次，冬季最小，仅为3.3~3.9 g/kg。比湿主峰值出现在08时30分—11时，春季最早，在08时30分—09时，夏季其次，冬季最晚，在10时30分—11时；次峰值主要出现在18时30分—22时，高层晚于低层，如春季2 m、4 m、10 m、20 m和30 m分别出现在18时30分、19时30分、20时、22时和22时。主谷值低层出现在05—07时，春夏季早

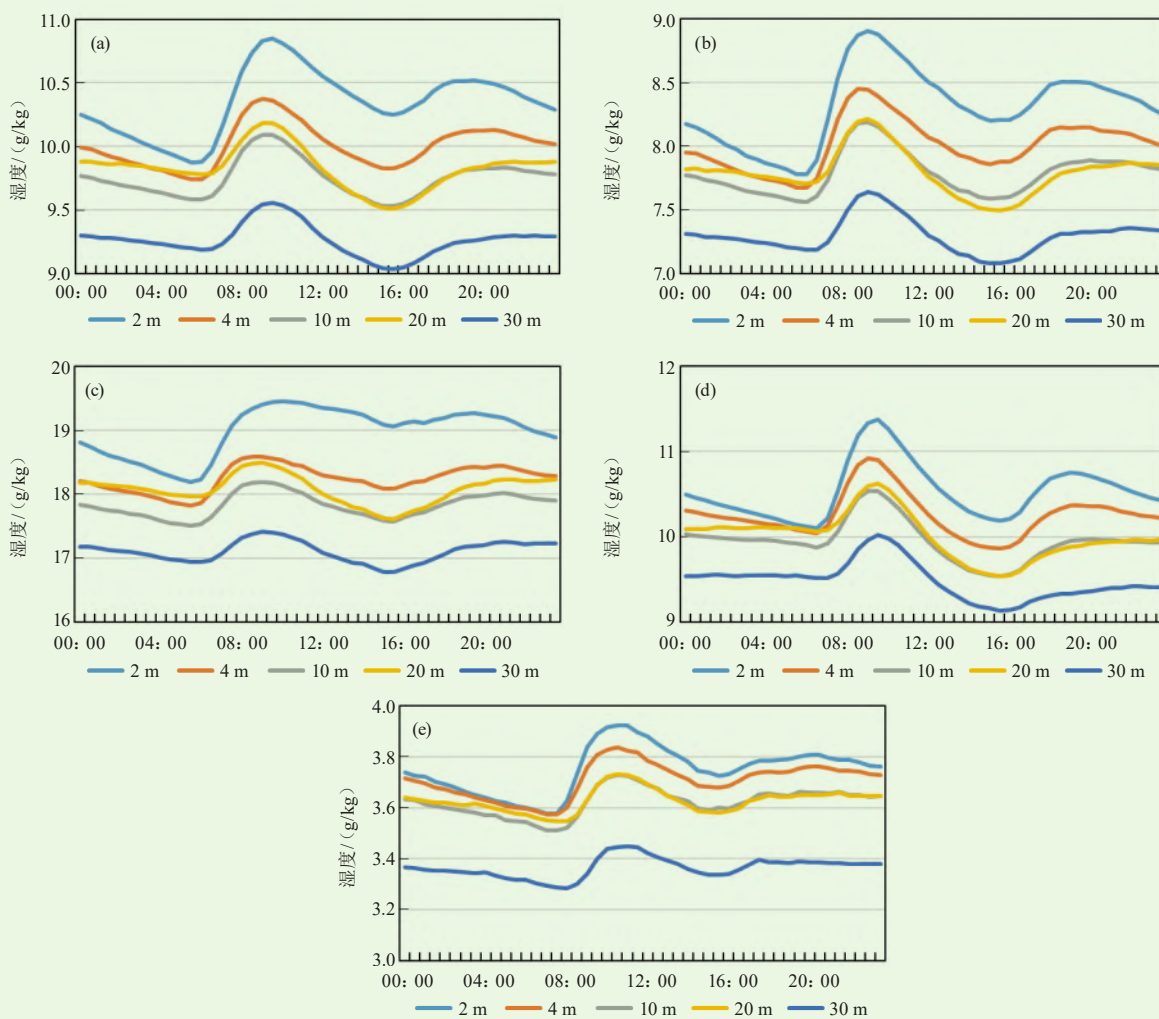


图4 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 湿度日变化
Fig. 4 Daily variation of humidity in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e)

于秋冬季；主谷值高层春季、夏季和秋季出现在15时—15时30分，冬季出现在07—08时。次谷值低层出现在15时—15时30分，春夏季早于秋冬季；次谷值高层春季、夏季和秋季出现在05时30分—09时30分，春夏季早于秋季，冬季在15时—15时30分。

2.2 近地层风速、温度、湿度廓线特征

2.2.1 风速廓线特征

近地层年平均风速廓线呈现为风速随高度增加而增大，风速梯度随高度增加而减小的对数律关系（图5a、5f）。白天风速随高度递增率明显小于夜间（图5a）。从年平均风速对数廓线（图5f）来看，白天风速与高度的对数呈明显的线性关系，表明白天风速以对数关系向上递增；夜间风速与高度的对数呈明显的对数关系，表明夜间风速以比对数关系更快的速度，即对数加线性规律向上递增。与缪启龙等^[13]、何清

等^[14]、李祥余等^[15-16]的研究结论基本一致，风速廓线可以分为稳定层结的夜间风速廓线和不稳定层结的白天风速廓线^[13]。

白天受太阳辐射影响，大气层结不稳定，湍流混合作用增强，上下层之间动量交换增大，风切变减小，风速以对数关系向上递增。夜间，近地层出现逆温，大气层结稳定，湍流混合作用减弱，湍流交换减小，风切变增大，风速以比白天更快的速度向上递增。白天10—16时2 m到30 m风速增加1.28~1.70 m/s，风速垂直递增率为4.6~6.1 m/(s·100 m)。夜间2 m到30 m风速增加1.77~1.91 m/s，风速垂直递增率为6.3~6.8 m/(s·100 m)，为白天的1.1~1.4倍。风速垂直递增率最大值出现在21时，最小值出现在10时。

四季风速廓线特征（图6b—6e）与年平均风速相似，表现为风速随高度增加而增大，风速梯度随

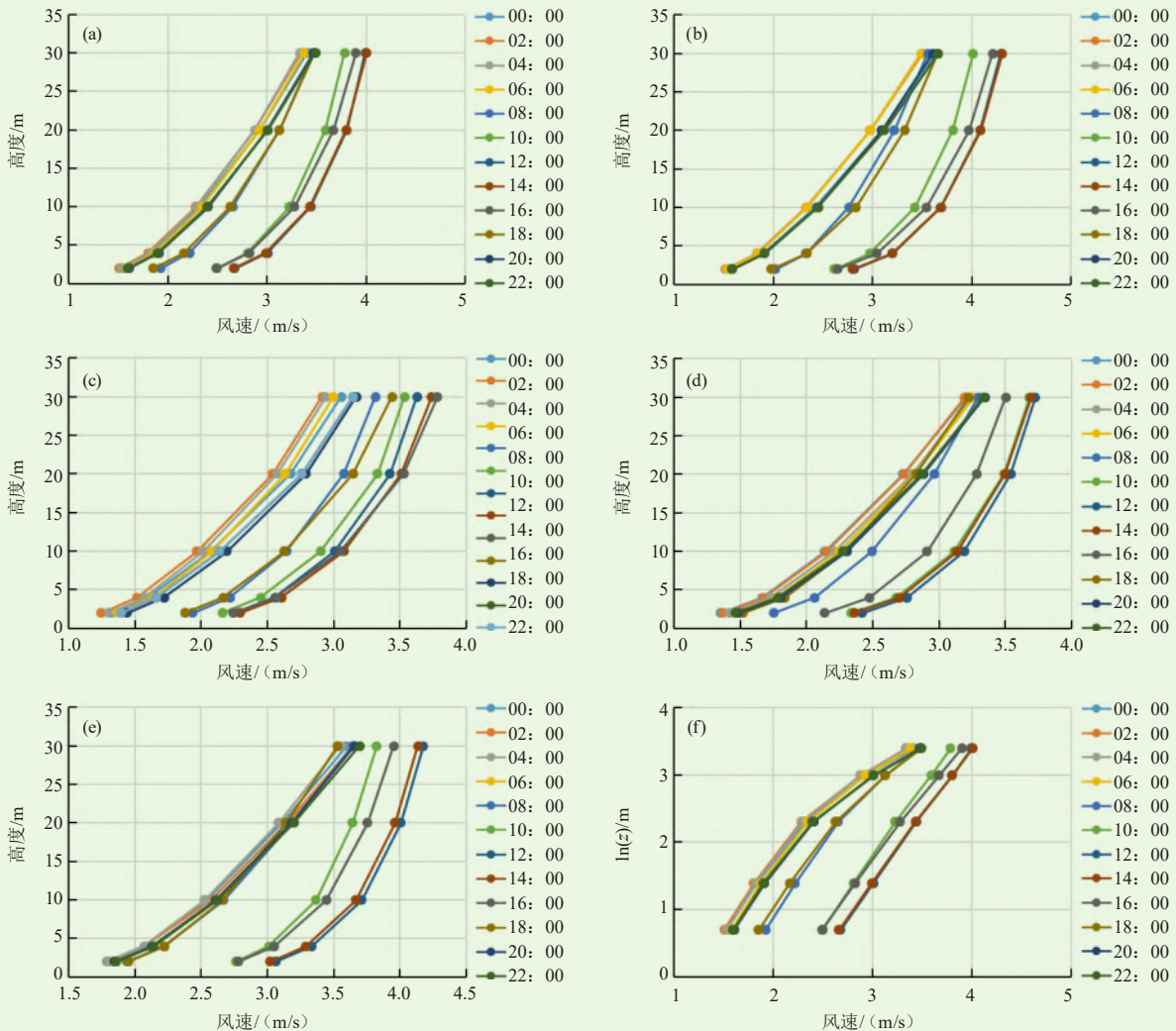


图5 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 风速廓线和年 (f) 风速对数廓线

Fig. 5 Wind velocity profiles in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e) and wind velocity logarithmic profiles in years (f)

高度增加而减小，白天风速垂直递增率小于夜间。但四季风速垂直递增率大小及其最大值和最小值出现时间明显不同。风速垂直递增率春季最大，为4.92~7.49 m/(s·100 m)，秋季其次，夏季最小，为4.85~6.33 m/(s·100 m)。风速垂直递增率最大值春季出现最早，在21时，夏季和秋季其次，均在21时30分，冬季最晚，在01时30分。最小值春夏季出现最早，在09时，冬季其次，在10时，秋季最晚，在13时30分。

2.2.2 温度廓线特征

近地层年平均气温随高度有四种变化特征，即白天随高度递减，晚上随高度递增，早晨随高度先递减后递增，傍晚随高度先递增后递减（图6a）。与缪启龙等^[13]、何清等^[14]、李祥余等^[15-16]的研究结论基本一致，分别对应白天日射型、夜间辐射型、早上过渡型和傍晚过渡型四种温度廓线类型^[19]。

白天日射型温度廓线出现在09时30分—17时。

白天随着太阳辐射逐渐增强，地面温度急剧上升，热量由地面输向大气，因此，温度随高度增加而减小，近地层气温垂直递减率为0.79~3.23 °C/100 m，最大值出现在12时，40 m气温比2 m降低0.9 °C。由于大气层结不稳定，湍流混合作用增强，上下层热量交换增多，因此温度梯度随高度增加而迅速减小。气温垂直递减率随高度增加明显减小，12时2~4 m气温递减率为19 °C/100 m，而4~40 m仅为2 °C/100 m。

夜间辐射型温度廓线出现在20—07时。夜间地面辐射冷却，热量由大气输向地面，因此近地层出现逆温，气温随高度增加而增大。夜间近地层气温垂直递增率为4.06~4.93 °C/100 m，最大值出现在22时，40 m气温比2 m升高1.4 °C。夜间气温垂直变化率明显大于白天，为白天的1.5~5.1倍。由于大气层结稳定，湍流混合作用减弱，上层热量不能很快地传到下层。因此温度梯度随高度增加而减小的速度没有白天快。气温垂直递增率随高度增加而减小，

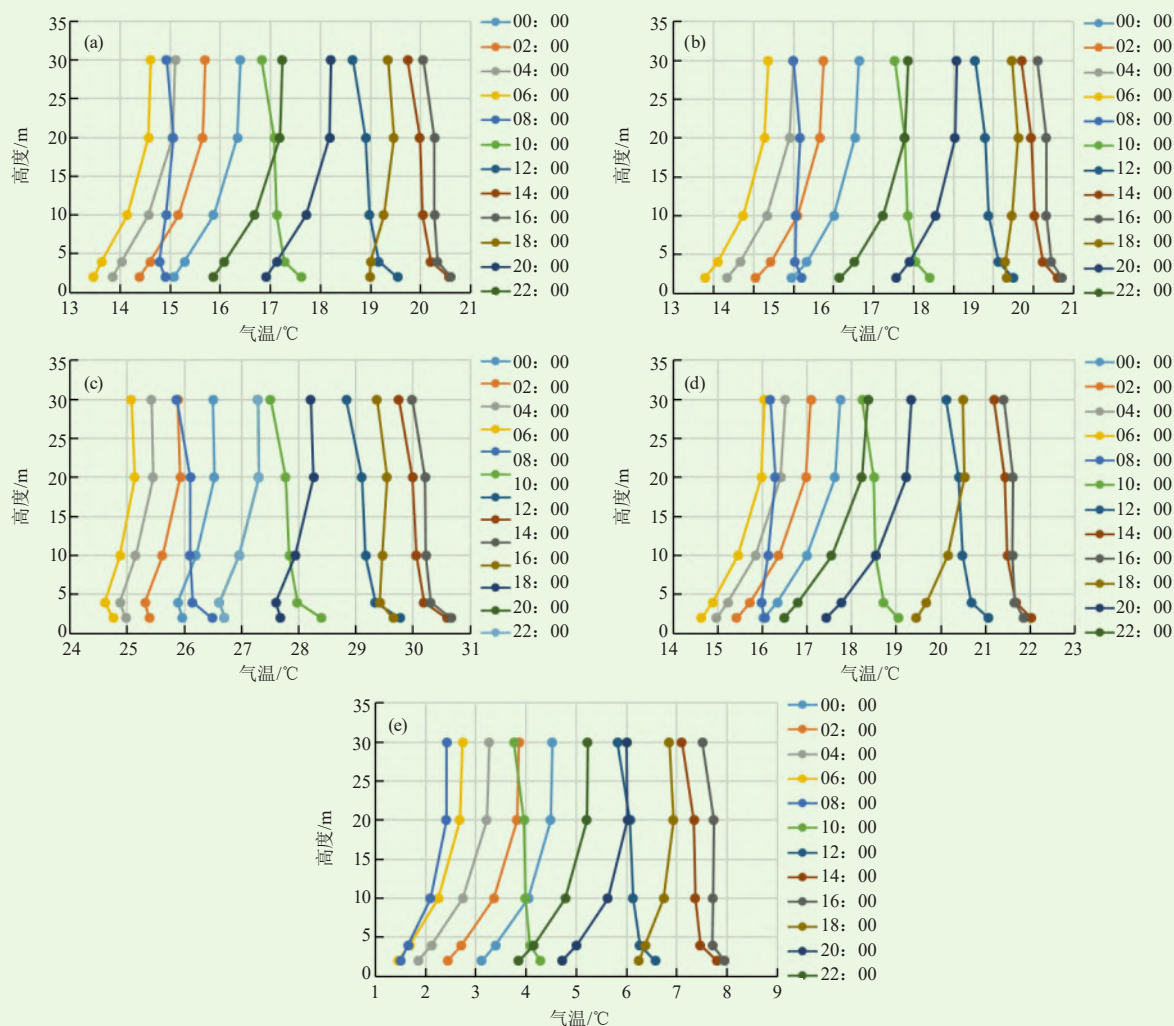


图6 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 温度廓线
Fig. 6 Air temperature profiles in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e)

22时2~4 m气温递增率为11 °C/100 m, 而4~40 m为4.5 °C/100 m。

早上过渡型温度廓线出现在07时30分—09时。表现为气温随高度递增转变为随高度递减。早晨, 太阳辐射开始增强, 地面辐射平衡很快由负转正, 地面迅速增温破坏了近地层逆温分布, 这个破坏过程由低层向高层传播。此时下层大气已经进入白天日射型, 而上层大气依然处于夜间辐射型。8时温度廓线可以看出, 4 m高度处存在拐点, 2~4 m气温已经进入白天日射型, 随高度递减, 而4~30 m还处于夜间辐射型, 随高度递增。

傍晚过渡型温度廓线出现在17时30分—19时30分, 表现为气温随高度递减转变为随高度递增。傍晚, 太阳辐射明显减弱, 地面辐射平衡很快由正转负, 地面迅速冷却, 近地面气温快速下降, 但高层大气还保持日间增温。此时下层大气已经进入夜间辐射型, 而上层大气依然处于白天日射型。18时廓线可以看出, 20 m高度存在拐点, 2~20 m气温已经形成逆温, 进入夜间辐射型, 随高度递增; 20~30 m还保持微弱的日射型, 随高度递减。

四季气温廓线特征(图6b—6e)与年平均气温相似, 均表现出白天日射型、夜间辐射型、早上过渡型和傍晚过渡型四种温度廓线类型。但四季气温垂直变化率大小及其最大值出现时间明显不同。白天气温垂直递减率春季最大, 秋季其次, 冬季最小。春季最大值为3.53 °C/100 m, 出现在12时30分; 夏季、秋季、冬季最大值均出现在12时, 分别为3.34、3.39、2.69 °C/100 m。夜间气温垂直递增率前半夜春季最大, 春季其次; 后半夜春季最大, 秋季其次; 冬季均最小。夏季和秋季最大值出现在21时, 分别为2.19、6.94 °C/100 m, 春季和冬季出现在1时和3时30分, 分别为6.13、5.11 °C/100 m。早上过渡型和傍晚过渡型四季均非常短。春季和夏季早上过渡型均出现在07时30分—08时, 早于秋冬季(08时—08时30分和08时30分—09时)。秋冬季傍晚过渡型均为17时30分—18时, 早于春夏季(18时30分—19时和18时—18时30分)。

夏季夜间2~4 m气温随高度增加而减小, 与年和其他季节的夜间辐射型温度廓线明显不同。夏季夜间2 m气温比4 m高, 可能与夏季农田下垫面为水稻, 夜间水稻冠层温度高有关。

2.2.3 湿度廓线特征

近地层年平均比湿廓线表现为随高度增加先减小后增大再减小(图7a)。比湿10 m以内随高度升高而缓慢减小, 比湿垂直递减率为

3.65~9.79 g/(kg·100 m), 白天递减率明显大于夜间, 最大值在12时30分, 最小值在05时30分。10~20 m出现逆湿层, 比湿随高度增加而增大。逆湿层比湿垂直递增率为-0.21~2.04 g/(kg·100 m)。夜间逆湿比白天更为明显, 尤其是后半夜, 最大值发生在05时30分。14—18时比湿随高度增加而减小, 没有发生逆湿, 其中15时30分递减率最大。20~30 m比湿度随高度增加而减小, 垂直递减率为4.74~6.46 g/(kg·100 m), 最大值出现在08时, 最小值出现在14时30分。

四季中, 10~20 m比湿多数随高度增加而增大, 存在逆湿, 但时间长短差异明显。夏季逆湿时间最长, 一天24小时均出现逆湿; 其次是秋季, 有18 h, 出现在20时—15时30分; 冬季有14.5 h, 出现在23—13时; 春季逆温时间最短, 有12.5 h, 出现在22时30分—10时30分。比湿垂直递增率最大值夏季出现最早, 在05时30分, 递增率最大, 为4.61 g/(kg·100 m); 秋季其次, 在06时30分, 为1.9 g/(kg·100 m); 冬季最晚最小, 在07时, 仅为0.41 g/(kg·100 m)。

四季中, 2~10 m和20~30 m比湿均为随高度增加而减小, 但比湿垂直递减率夏季最大, 2~10 m为8.48~19.69 g/(kg·100 m), 20~30 m为8.4~11.13 g/(kg·100 m); 秋季其次, 冬季最小, 2~10 m为0.7~2.59 g/(kg·100 m), 20~30 m为2.4~2.93 g/(kg·100 m)。冬季20~30 m比湿垂直递减率比2~10 m大; 春季、夏季、秋季白天和前半夜2~10 m比湿垂直递减率比20~30 m大, 后半夜则相反。2~10 m比湿垂直递减率最大值冬季出现最早, 在09时, 秋季其次, 夏季最晚, 在13时。比湿垂直递减率最小值出现在05时30分—06时, 春夏季早于秋冬季。20~30 m比湿垂直递减率最大值出现在08~09时, 春夏季早于秋冬季; 最小值出现在14时30分—15时30分, 秋冬季早于春夏季。

气候异常对廓线特征有明显影响。选择2016年、2017年秋季作为气候异常的典型个例, 并进一步分析其廓线特征。2016年、2017年秋季寿县均出现持续性阴雨天气, 降水量较1981—2010年平均值分别异常偏多98%和148%, 为1961年以来历史同期第三多和第二多, 导致大范围农田土壤持续过湿, 发生严重渍涝。2016年秋季2~4 m和20~30 m比湿均为随高度增加而减小, 4~10 m比湿随高度增加而增加, 10~20 m比湿随高度变化较小(图8a)。2017年秋季2~4 m和10~30 m比湿均为随高度增加而减小, 4~10 m比湿

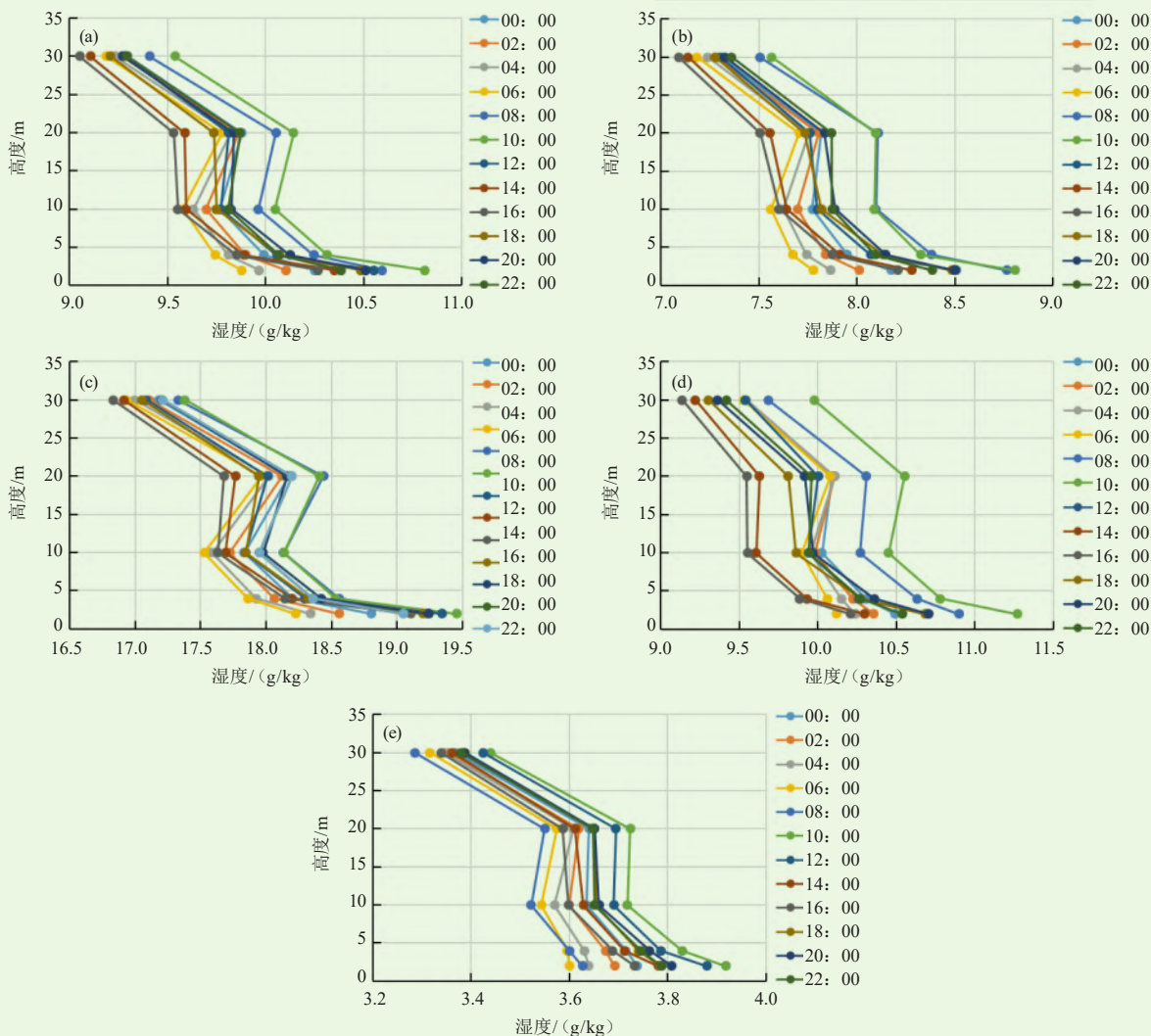


图7 年平均 (a)、春季 (b)、夏季 (c)、秋季 (d)、冬季 (e) 比湿廓线
Fig. 7 Humidity profiles in years (a), spring (b), summer (c), autumn (d) and winter (e)

随高度增加而增加 (图8b)。作为对比, 选择2007年秋季作为降水异常偏少的典型个例。2007年秋季降水异常偏少64%, 为1961年以来历史同期第9少。2007年秋季2~30 m比湿多数为随高度增加而减小 (图8c)。与多年平均廓线 (图7d) 相比, 2016年和2017年秋季比湿廓线特征最大差异是在4~10 m, 而2007年在10~20 m; 降水偏多年比湿廓线在4~10 m多了一个明显的逆湿层, 而降水偏少年在10~20 m逆湿层消失, 变为比湿随高度增加而减小。表明降水异常对湿度廓线的影响主要表现在逆湿程度: 降水异常偏多时, 逆湿现象更为明显; 降水异常偏少时, 逆湿现象不明显, 甚至消失。

3 结论

本研究利用寿县国家气候观象台32 m气象观测塔梯度系统采集的风速、气温、湿度资料, 分析了淮河

流域2007年7月—2019年12月农田近地层风速、温度和湿度日变化特征和廓线特征。

风速和气温日变化呈单峰型, 而湿度日变化呈双峰型。风速峰值在11时30分—13时30分, 谷值在00时30分—03时; 峰值时间秋季最早, 夏季最晚, 夏季高层晚于低层, 春季、秋季和冬季高低层一致; 谷值时间春季低层早于高层, 夏季高低层一致, 秋冬季低层晚于高层。气温峰值在14时30分—16时, 夏秋季早于冬春季; 谷值在05时30分—08时, 夏季最早, 冬季最晚; 四季峰值和谷值时间低层早于高层; 早晨等温出现在07—09时, 夏季最早, 冬季最晚; 傍晚等温出现在17时—18时30分, 冬季最早, 夏季最晚。湿度主峰值在08时30分—11时, 春季最早, 冬季最晚; 次峰值在18时30分—22时, 高层晚于低层。主谷值低层在05—07时, 春夏季早于秋冬季; 主谷值高层春季、夏

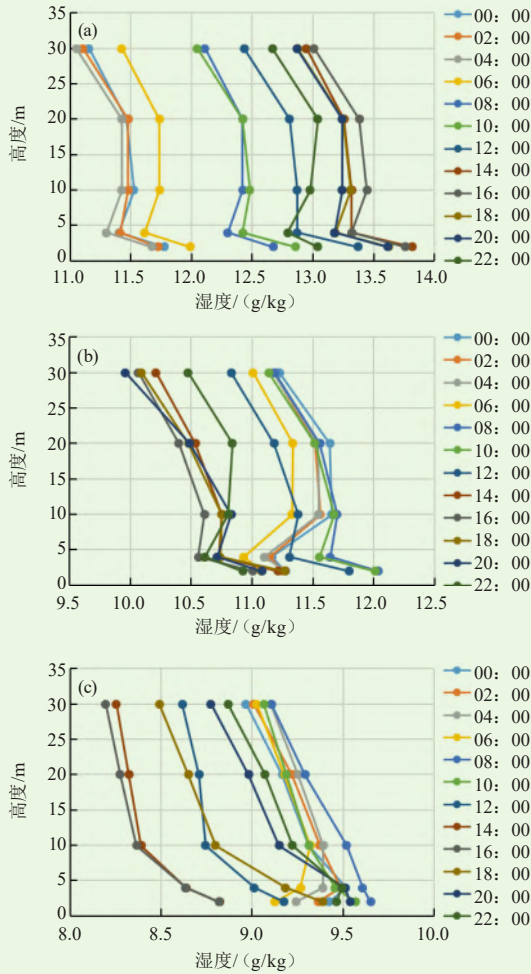


图8 2016年 (a)、2017年 (b) 和2007年 (c) 秋季湿度廓线
Fig. 8 Humidity profiles in autumn 2016 (a), 2017 (b) and 2007 (c)

季和秋季在15时—15时30分, 冬季在07—08时。次谷值低层在15时—15时30分和05时30分—09时30分, 春夏季早于秋冬季。

风速随高度递增, 风速梯度随高度递减。风速垂直递增率白天小于夜间; 春季最大, 夏季最小; 最大值在21时—01时, 春季最早, 冬季最晚; 最小值在09时—13时30分, 春夏季最早, 秋季最晚。气温白天随高度递减, 晚上随高度递增, 早晨随高度先递减后递增, 傍晚随高度先递增后递减。气温垂直递减率白

天最大值在12时—12时30分, 春季最大, 冬季最小。晚上逆温最大值在21—03时, 秋季最大, 冬季最小。早上过渡型出现在07时30分—09时, 春夏季早于秋冬季。傍晚过渡型出现在17时30分—19时, 秋冬季早于春夏季。湿度随高度先减小后增大再减小; 10~20 m存在逆湿现象, 夜间比白天明显, 尤其是后半夜; 逆湿时间夏季最长, 春季最短; 逆湿最大值在05时30分—07时, 夏季最大最早, 冬季最小最晚; 2~10 m和20~30 m随高度递减, 垂直递减率夏季最大, 冬季最小; 垂直递减率2~10 m最大值在09—13时, 冬季最早, 夏季最晚, 20~30 m最大值在08—09时, 春夏季早于秋冬季。

参考文献

- [1] 王庚辰, 李立群, 王勇, 等. XLS-II型系留气艇探测系统. 气象科技, 2004, 32(4): 269-273.
- [2] 蒋维楣, 徐玉貌, 于洪彬. 边界层气象学基础. 南京: 南京大学出版社, 1994.
- [3] 李英, 李跃清, 赵兴炳. 青藏高原东坡理塘地区近地层湍流通量与微气象特征研究. 气象学报, 2009, 67(3): 417-425.
- [4] 郭凤霞, 朱文越, 饶瑞中. 非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究. 气象, 2010, 36(6): 90-94.
- [5] 李鹏, 田景奎. 不同下垫面近地层风速廓线特征. 资源科学, 2011, 33(10): 2005-2010.
- [6] 杨湘婧, 徐祥瑞, 陈宏尧, 等. L波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型. 气象, 2011, 37(12): 1504-1510.
- [7] 解以扬, 刘学军. 天津气象塔风温湿度观测资料的统计特征. 气象, 2003, 29 (1): 12-13.
- [8] 龚玺, 朱蓉, 范广洲, 等. 内蒙古草原近地层垂直风速廓线的观测研究. 气象学报, 2014, 72(4): 711-722.
- [9] 李靖, 李斌. 吉阳核电厂址近地面层温度梯度及风廓线规律适用性研究. 环境保护科学, 2010, 36(x): 4-6.
- [10] 陈胜东, 徐卫民, 桂保玉, 等. 江西九江近地层温度梯度及风廓线规律的适用性. 亚热带资源与环境学报, 2019(2): 49-54.
- [11] 金莉莉, 李振杰, 何清, 等. 乌鲁木齐市城区和郊区近地层风速廓线. 中国沙漠, 2017, 37(04): 755-769.
- [12] 赵佳伟, 何清, 金莉莉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地起伏地形近地层微气象特征. 中国沙漠, 2020, 40(02): 144-155.
- [13] 廖启龙, 王晶, 何清, 等. 新疆沙漠腹地大气边界层气象要素廓线分析. 气象与减灾研究, 2009, 32(2): 6-10.
- [14] 何清, 魏文寿, 李祥余, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地沙尘暴过境时近地层风速、温度和湿度廓线特征. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(6): 6-11.
- [15] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季阴天近地层风速、温度和湿度廓线特征分析. 干旱气象, 2007, 25(2): 22-28.
- [16] 李祥余, 何清, 艾力·买买提明, 等. 塔中春季晴天近地层温度、湿度和风速廓线特征. 干旱区地理, 2008, 31(3): 389-396.
- [17] 中国气象局. 近地层通量观测规范. 北京: 气象出版社, 2007.
- [18] 气象行业标准. QX/T 118—2010. 地面气象观测资料质量控制. 北京: 气象出版社, 2010.
- [19] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981.