

# 华东沿海高标准农田大气湍流特征的观测分析

胡小旭<sup>1,2,5</sup> 王伟<sup>1,2,3</sup> 徐敏<sup>4</sup> 徐敬争<sup>5</sup> 陆琛<sup>6</sup>

(1 南京信息工程大学中国气象局生态系统碳源汇开放重点实验室, 南京 210044; 2 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044; 4 江苏省气候中心, 南京 210019; 5 航天新气象科技有限公司, 无锡 214028; 6 江苏省海安市气象局, 海安 226600)

**摘要:** 为评估Monin-Obukhov相似理论和涡度相关系统在高标准农田的适用性, 利用南通高标准农田水稻下垫面涡度相关观测数据, 分析了大气稳定度、湍流方差相似性、湍流谱特征、湍流强度和湍流动能等。结果表明: 该高标准稻田上方大气呈现白天不稳定、夜晚稳定的昼夜变化特征; Monin-Obukhov相似理论在该高标准农田适用, 三维风速归一化标准差随大气稳定度的变化符合“1/3”次方规律, 温度、比湿、CO<sub>2</sub>密度归一化标准差随大气稳定度的变化在大气不稳定时符合“1/3”次方规律; 在惯性子区, 三维风速的湍流能谱符合“-2/3”次方斜率, 垂直风速与温度、湿度和CO<sub>2</sub>密度的协谱符合“-4/3”次方斜率, 可见涡度相关系统能够观测该高标准农田的水热和CO<sub>2</sub>通量; 三个方向上的湍流强度均随风速增大而减小, 且水平方向湍流强度大于垂直方向; 湍流动能随风速呈二次函数增大, 呈现昼高夜低的日变化特征, 大气中性时达到最大, 且以动力湍流贡献为主。研究结果可为揭示华东地区高标准农田生态系统与大气之间的物质和能量交换特征以及机制提供参考。

**关键词:** 高标准农田, 大气湍流特征, 湍流强度, 湍流谱, 湍流动能

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.00.001

## Observation and Analysis on Atmospheric Turbulence Characteristics over a High Standard Farmland along the East China Coast

Hu Xiaoxu<sup>1,2,5</sup>, Wang Wei<sup>1,2,3</sup>, Xu Min<sup>4</sup>, Xu Jingzheng<sup>5</sup>, Lu Chen<sup>6</sup>

(1 Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 4 Climate Center of Jiangsu Province, Nanjing 210019; 5 Aerospace New Weather Technology Co., Ltd, Wuxi 214028; 6 Hai'an Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Hai'an 226600)

**Abstract:** In order to evaluate the applicability of Monin-Obukhov similarity theory and the eddy covariance system in high-standard farmland, this paper analyzed the atmospheric characteristics, including atmospheric stability, turbulent variance similarity, power spectra and cospectrum, turbulent intensity and turbulence kinetic energy, using the observation data of the eddy covariance system over the underlying surface of a high-standard farmland in Nantong, Jiangsu Province. The results show that the atmosphere over the farmland is unstable during the daytime and stable at night. The variation of normalized standard deviation of three-dimensional wind components with atmospheric stability obeys the “1/3” power law. The normalized standard deviation of temperature, specific humidity and CO<sub>2</sub> density with atmospheric stability follows the “1/3” power law when atmosphere is unstable. Therefore, Monin-Obukhov similarity theory is applicable at such a high-standard farmland. In the inertia subregion, the power spectra of three-dimensional wind speeds follows the “-2/3” slope relation, and the cospectrum of vertical wind speed and scalar quantities follows the “-4/3” slope relation. So, the sensible heat, latent heat and CO<sub>2</sub> fluxes over the high-standard farmland can be correctly observed by the eddy covariance system. The three-dimensional turbulence intensities decrease with the increase of wind speed, showing horizontal results stronger than those in vertical direction. The turbulent kinetic energy (TKE) increases with the increase of wind speed, following a quadratic function. TKE is high during the daytime and low at night, reaching its maximum under neutral atmosphere. Compared to thermal turbulence, mechanical turbulence contributes more to TKE. The research can advance our understanding of the energy and mass exchanges between high-standard farmland and atmosphere in East China.

收稿日期: 2023年3月2日; 修回日期: 2023年4月12日  
第一作者: 胡小旭(1987—), Email: 20201234015@nuist.edu.cn  
通信作者: 王伟(1986—), Email: wangw@nuist.edu.cn  
资助信息: 国家重点研发计划项目(2019YFA0607202)

**Keywords:** high-standard farmland, atmospheric turbulence characteristics, turbulence intensity, turbulence energy spectra, turbulent kinetic energy

## 0 引言

农田占据了陆表约13%的面积<sup>[1]</sup>，它与大气之间的物质和能量交换影响着区域和全球气候，并在全球碳收支中占有重要地位。首先，卫星观测显示农田生态系统会加剧区域和全球变暖，在中国、印度和巴西等农业大国，其白天增暖效应超过5 °C<sup>[2]</sup>。其次，灌溉农田通过蒸散增湿和降低大气边界层高度显著增强湿热胁迫<sup>[3]</sup>，在中国华北、印度和巴基斯坦等地尤为明显。此外，农田生态系统是最活跃的碳库<sup>[4]</sup>，固碳量约占中国陆地生态系统的12%<sup>[5]</sup>。上述农田与大气之间的物质和能量交换均以湍流方式进行，观测分析大气湍流特征是准确量化农田物质和能量通量的基础。

Monin-Obukhov相似理论是边界层湍流研究的理论基础，用于分析边界层中的外部参数对湍流扩散的影响。该理论大大推动了大气湍流观测试验的开展和观测仪器的研发<sup>[4]</sup>。测量湍流通量最直接的方式是涡度相关法<sup>[6]</sup>，该方法因其直接测定、理论假设少、观测信息全面等优点，被广泛用于观测农田上方的大气湍流特征。描述大气湍流特征的常见指标有湍流方差相似性、湍流强度、湍流能谱等<sup>[4, 7-8]</sup>。余锦华等<sup>[9]</sup>分析了常熟农业生态试验站的通量观测数据，发现在非中性条件下，水平风速标准差与大气稳定度的关系并不满足“1/3”次方定律，在平流输送明显的绿洲农田也观测到类似结果<sup>[10]</sup>，而“1/3”次方定律在云贵高原西部<sup>[11]</sup>和淮河流域<sup>[12]</sup>农田均成立。在湍流强度方面，杨智等<sup>[11]</sup>观测发现云贵高原西部农田湍流强度比华北平原强，而李英等<sup>[13]</sup>发现同为西部地区的成都平原的农田湍流强度却与华北平原观测结果接近，且农田湍流强度随风速的变化特征尚不明确<sup>[14]</sup>。郭建侠<sup>[15]</sup>分析华北玉米下垫面的涡度相关资料发现，动量谱和感热谱在惯性子区均较为离散，不符合“-4/3”次方规律。可见，由于农田下垫面类型多样且存在高度异质性，导致不同研究观测得到的农田大气湍流特征存在明显差异，使得大气边界层湍流研究基础理论之一——Monin-Obukhov相似理论在农田的适用性存在挑战，亟须在开阔、平坦且均一的标准化农田开展大气湍流特征的观测分析。

农业农村部经国务院批复同意于2021年9月6日印发的《全国高标准农田建设规划（2021—2030年）》指出，到2030年建成12亿亩（1亩≈666.7 m<sup>2</sup>）高标准农田，并改造提升现有高标准农田2.8亿亩，以此稳定保障1.2万亿斤（1斤=0.5 kg）以上粮食产能。高标准农田是指田块平整、集中连片、设施完善、节水高效、

农电配套、宜机作业、土壤肥沃、生态友好、抗灾能力强，与现代农业生产和经营方式相适应的旱涝保收、稳产高产的耕地<sup>[16]</sup>。高标准农田经过“田、水、路、林、村”综合整治，实现了“小田并大田”，下垫面变得均一、平坦，是通量观测的理想下垫面，理论上Monin-Obukhov相似理论更为适用，但这一推论尚未得到观测证实。南通市从2008年起建设高标准农田，目前拥有江苏省内单体最大的“万顷良田”建设示范区<sup>[17]</sup>。农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分，明确高标准农田生态系统的碳收支特征对减少农田碳排放、增加土壤碳存储意义重大。本文基于南通高标准农田水稻下垫面2020年涡度相关观测数据，分析其大气稳定度分布、湍流方差相似性、湍流谱特征、湍流强度和湍流动能等，旨在论证Monin-Obukhov相似理论在高标准农田下垫面的适用性，评估基于湍流交换理论发展起来的涡度相关技术观测高标准农田碳通量的可靠性，为揭示华东地区典型农田生态系统与大气之间的物质和能量交换特征提供参考。

## 1 观测概况与研究方法

### 1.1 观测概况

观测站点位于江苏省南通市雅周镇“万亩良田”工程内，属北亚热带海洋性季风气候，四季分明。根据海安国家气象站的多年观测数据，1981—2010年，年平均气温为15.3 °C，年平均日照时数为2000 h，年平均降水量为1015.1 mm（国家气象科学数据中心 <http://data.cma.cn/>）。以观测站点为中心，250 m半径范围内地势平坦，均为农田<sup>[18]</sup>。地下10~100 cm的土壤类型为细沙土。种植方式为稻（6—10月）麦（11月—翌年5月）轮作。

整个观测系统由开放式涡度相关系统、小气候观测系统、数据采集器、通信设备和供电设备组成（图1）。涡度相关系统由开放式红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪（LI-7500DS，美国LI-COR公司）和三维超声风速仪（Windmaster Pro，英国Gill公司）组成，分别测量大气中的CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O浓度、三维风速和超声虚温，架设高度为2.5 m。小气候观测系统包括2路温湿度传感器（DHC2，航天新气象科技有限公司），用于测量大气温度和相对湿度，架设高度分别为2 m和3 m；翻斗式雨量传感器（SL3-1，上海气象仪器厂），架设高度为1.5 m；四分量净辐射传感器（FS-J1，航天新气象科技有限公司），用于测量向下短波、向上短波、向下长波和向上长波辐射通量密度，架设高度为2 m；5路光合有效辐射传感器（FS-PR，航天新气象科技

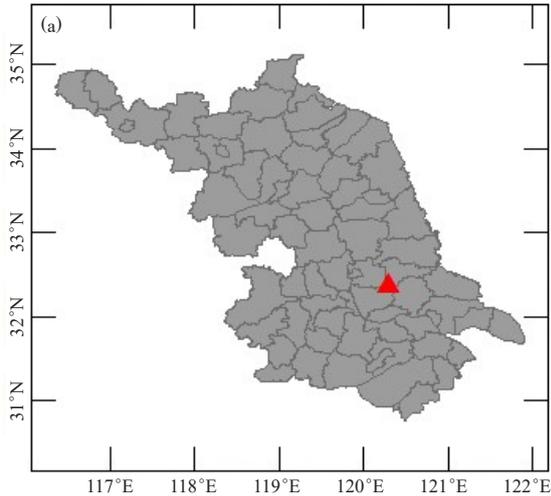


图1 研究区域位置 (a, 红色三角形为观测站点位置) 和观测系统 (b, 农田生态系统小气候、通量观测系统的实景照片)  
Fig. 1 Location of the research area (a, the red triangle representing the location of the observation station) and the observation system (b, the flux observation system for the microclimate of farmland ecosystem)

有限公司), 1路架设高度为2 m, 其他4路均架设在0.5 m高度; 3路土壤热通量传感器 (HFP01-05, 荷兰Hukseflow公司), 均埋设在土壤5 cm深度; 5路土壤温湿度传感器, 分别观测5、10、20、40和60 cm处的土壤温度和体积含水量。涡度相关系统的采样频率为10 Hz, 小气候系统的采样频率为1 Hz。观测数据均由数据采集器 (CR6000, 美国Campbell公司) 采集和存储。整个观测系统由4块100 W的太阳能板和4个120 Ah的蓄电池供电。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 通量数据处理和质量控制

选取2020年5月1日—10月30日水稻生长期的观测数据, 使用美国LI-COR公司的涡度相关数据处理软件EddyPro 6.1对10 Hz原始通量数据进行处理, 得到30 min平均数据。数据后处理包括野点剔除、超声虚温订正、两次坐标旋转和密度效应订正等<sup>[4]</sup>。将30 min平均数据分为3个质量等级: 0 (最高)、1 (中等)和2 (最低)<sup>[19]</sup>, 剔除1级和2级数据, 仅保留0级数据分析大气湍流特征。通量贡献区描述的是来自通量传感器上风方向地表源对观测垂直通量的相对贡献<sup>[6]</sup>。为了明确通量观测信号的来源, 使用美国LI-COR公司的涡度相关数据分析软件Tovi 2.8.1进行通量贡献源区分析<sup>[20]</sup>。经上述数据处理和质量控制后, 共有4278条0级数据 (占比53.5%) 可用于湍流特征分析。

### 1.2.2 湍流特征量计算

#### (1) 大气稳定度参数

大气稳定度参数 ( $\zeta$ ) 综合考虑了大气湍流的热力 (浮力) 和动力 (风切变) 生成机制, 计算如下<sup>[21]</sup>:

$$\zeta = \frac{z-d}{L}, \quad (1)$$

式中,  $z$ 为观测高度;  $d$ 为零平面位移;  $L$ 为Obukhov长度。当 $-0.04 < \zeta < 0.04$ 时, 大气为中性; 当 $\zeta < -0.04$ 时, 大气不稳定; 当 $\zeta > 0.04$ 时, 大气稳定<sup>[22]</sup>。

$$L = -\frac{u_*^3}{kw'T'\frac{g}{\theta}}, \quad (2)$$

式中,  $w'$ 为垂直风速脉动 (瞬时值与平均值之差);  $T'$ 为超声虚温脉动;  $\theta$ 为位温;  $k$ 为von Karman常数 (0.4);  $g$ 为重力加速度 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ );  $u_*$ 和 $kw'T'\frac{g}{\theta}$ 分别代表动力湍流和热力湍流的贡献。

#### (2) 湍流强度

湍流强度 ( $I$ ) 指风速标准差与平均风速的比值, 用于描述湍流脉动量的相对波动程度。计算如下:

$$I_u = \sigma_u/\bar{u}, \quad I_v = \sigma_v/\bar{u}, \quad I_w = \sigma_w/\bar{u}, \quad (3)$$

式中,  $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_w$ 分别为 $u$  (纬向风速)、 $v$  (经向风速)、 $w$  (垂直风速) 方向上风速的标准差 (m/s); 平均风速 $\bar{u} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$ 。

#### (3) 湍流动能

湍流动能 ( $\bar{e}$ ) 表示单位质量空气脉动速度所具有的动能, 计算如下<sup>[6]</sup>:

$$\bar{e} = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2), \quad (4)$$

式中,  $\sigma_u^2$ 、 $\sigma_v^2$ 、 $\sigma_w^2$ 分别为 $u$ 、 $v$ 和 $w$ 方向上风速的方差。

### 1.2.3 湍流方差相似性

由Monin-Obukhov相似理论可知, 在开阔、平坦且均一的下垫面上, 当湍流充分发展时, 近地层的三

维风速、温度、湿度和CO<sub>2</sub>密度等物理量的标准差经特征尺度参数无量纲化后,均可以表示为大气稳定度的函数<sup>[23]</sup>,即:

$$\frac{\sigma_x}{|x_*|} = f_x(\zeta), \quad (5)$$

式中,当 $x$ 为三维风速 $u$ 、 $v$ 、 $w$ 时, $x_*$ 为摩擦风速 $u_*$ ;当 $x$ 为温度( $T$ )、湿度( $q$ )和CO<sub>2</sub>密度( $c$ )时, $x_*$ 分别为 $T_* = -\frac{\overline{W'T'}}{u_*}$ 、 $q_* = -\frac{\overline{W'q'}}{u_*}$ 和 $c_* = -\frac{\overline{W'\rho_c'}}{u_*}$ 。 $\rho_v$ 和 $\rho_c$ 分别为H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>的质量密度。

对于风速,普适函数 $f_x(\zeta)$ 用下式拟合<sup>[24]</sup>:

$$\frac{\sigma_x}{u_*} = C_{x1}(1 \pm C_{x2}\zeta)^{1/3}, \quad (6)$$

式中, $C_{x1}$ 和 $C_{x2}$ 为常数;当 $\zeta < 0$ 时, $C_{x2}$ 前取负号,当 $\zeta > 0$ 时, $C_{x2}$ 前取正号。

对于温度、湿度和CO<sub>2</sub>密度,普适函数用下式拟合<sup>[25]</sup>:

$$\frac{\sigma_x}{|x_*|} = C_{x3}(C_{x4} \pm \zeta)^{-1/3}, \quad (\zeta < 0) \quad (7)$$

$$\frac{\sigma_x}{|x_*|} = C_{x5}, \quad (\zeta \geq 0) \quad (8)$$

式中, $C_{x3}$ 、 $C_{x4}$ 和 $C_{x5}$ 为常数。

## 1.2.4 湍流能谱分析

湍流是由尺度大小不同的湍涡组成,按照频率(或波长)来研究各种尺度湍涡间的能量分布称为能谱分析。湍流能谱从低频到高频依次为含能涡区、惯性子区和耗散区。经Kolmogorov<sup>[4]</sup>证明,近地边界层内小尺度湍涡各向同性,在惯性子区内能量既不产生也不消耗,以“-5/3”次方规律向更小尺度传递,可用于检验涡度相关系统的响应频率是否满足观测要求。

$$F_x(k_x) = \alpha_x E^{2/3} k_x^{-5/3}, \quad (9)$$

式中, $F_x$ 为湍流能谱函数; $x$ 为三维风速 $u$ 、 $v$ 、 $w$ ; $\alpha_x$ 为 $x$ 方向上的无量纲Kolmogorov常数; $E$ 为湍流耗散率;波数 $k = 2\pi n/\bar{u}$ , $n$ 为自然频率, $\bar{u}$ 为平均风速。当自然频率转换为归一化频率时,湍流能谱与归一化频率在惯性子区符合“-2/3”次方规律,2个物理量之间的协谱与归一化频率在惯性子区符合“-4/3”次方规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 通量贡献源区分析

图2是2020年水稻生长期的通量贡献源区图,等值线从内到外依次为10%~80%的通量贡献源区范围,颜色表示空间上某一点对通量观测值的贡献率。由图2可知,水稻生长期80%的通量贡献源区范围分布在距离涡度相关系统70 m以内的2块水稻田内,且主

要通量贡献来源于涡度相关系统东侧的稻田,与研究时段内的主导风向一致。

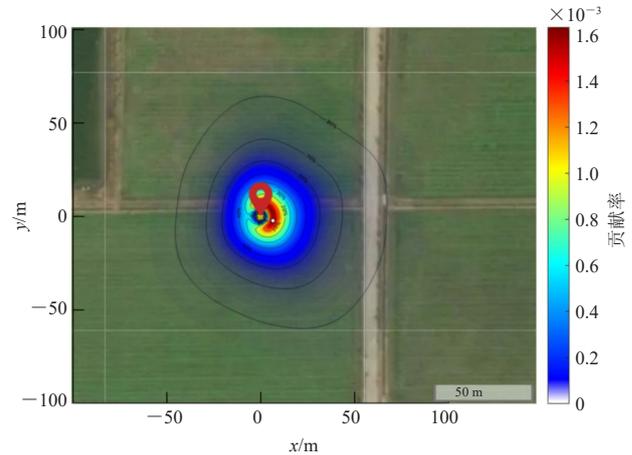


图2 2020年水稻生长期涡度相关观测的通量贡献源区范围(底图来源于Google Earth,不同颜色表示每个点对涡度相关观测值的贡献率)

Fig. 2 Flux footprint area of eddy covariance system during rice growing period in 2020 (The base image is from Google Earth. Different colors indicate the contribution of each point to eddy covariance observation.)

### 2.2 风向、风速和大气稳定度特征

如图3a所示,2020年水稻生长期主导风向为东东南(ESE, 13.1%),其次为东东北(ENE, 12.3%)、东(E, 12.1%)和东南(SE, 10.1%)。观测高度2.5 m处平均风速在0~4 m/s,0~2 m/s和2~4 m/s的风速频率分别为53.4%和43.5%。由大气稳定度参数的概率密度分布图(图3b)可知,水稻生长期,稻田上方大气以稳定状态为主,占研究时段的57.3%,大气不稳定频数占比为42.2%,大气中性频数占比为0.5%。稻田上方大气稳定度呈现显著的昼夜变化特征(图3c),白天(07:00—16:00,北京时)不稳定,夜晚(17:00—次日06:00,北京时,下同)稳定。

### 2.3 湍流方差相似性

#### 2.3.1 风速归一化标准差随大气稳定度参数的变化

由图4可知,三维风速归一化标准差随大气稳定度参数的变化均符合“1/3”次方规律,大气不稳定时的拟合效果更佳,尤其是在 $v$ 方向上。大气不稳定时, $v$ 方向上的拟合值与观测值之间的相关系数 $R$ 最大,为0.61; $u$ 方向上次之, $R=0.60$ ; $w$ 方向上最低, $R=0.52$ 。大气稳定时,三维风速的归一化标准差在1~5变化,变化幅度较大气不稳定时减小,“1/3”次方规律较大气不稳定时减弱。此时,拟合效果以 $w$ 方向上最好, $R=0.50$ ; $u$ 和 $v$ 方向上 $R$ 分别为0.41和0.35。大气中性时,三维风速的归一化标准差都趋于常数,即 $\sigma_u/u_* \rightarrow 2.64$ , $\sigma_v/u_* \rightarrow 2.36$ , $\sigma_w/u_* \rightarrow 1.15$ 。

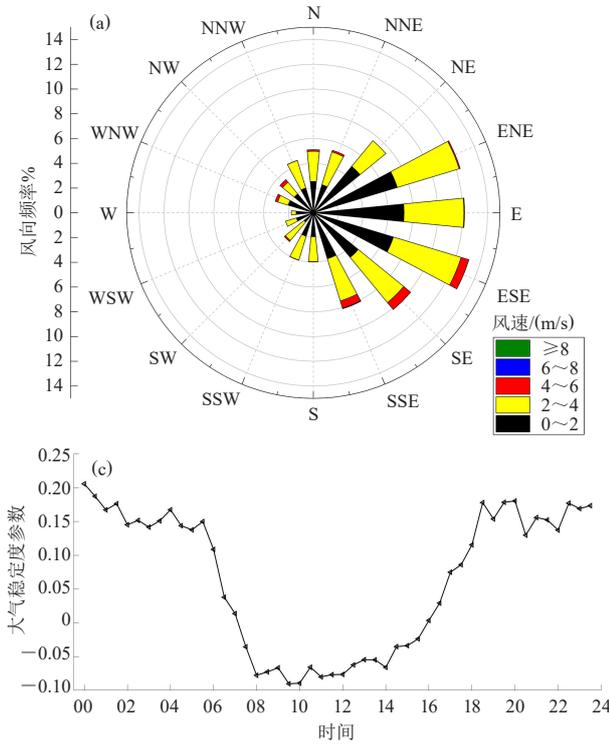


图3 2020年水稻农田风向、风速和大气稳定度  
(a) 风向玫瑰图; (b) 大气稳定度-概率密度分布; (c) 大气稳定度日变化 (N、E、S、W分别表示北、东、南、西)  
Fig. 3 Wind direction, wind speed and atmospheric stability over paddy field in 2020

(a) Wind rose; (b) Probability density distribution of atmospheric stability parameter; (c) The diurnal variation of atmospheric stability parameter (N, E, S, W indicating wind direction of north, east, south, and west, respectively)

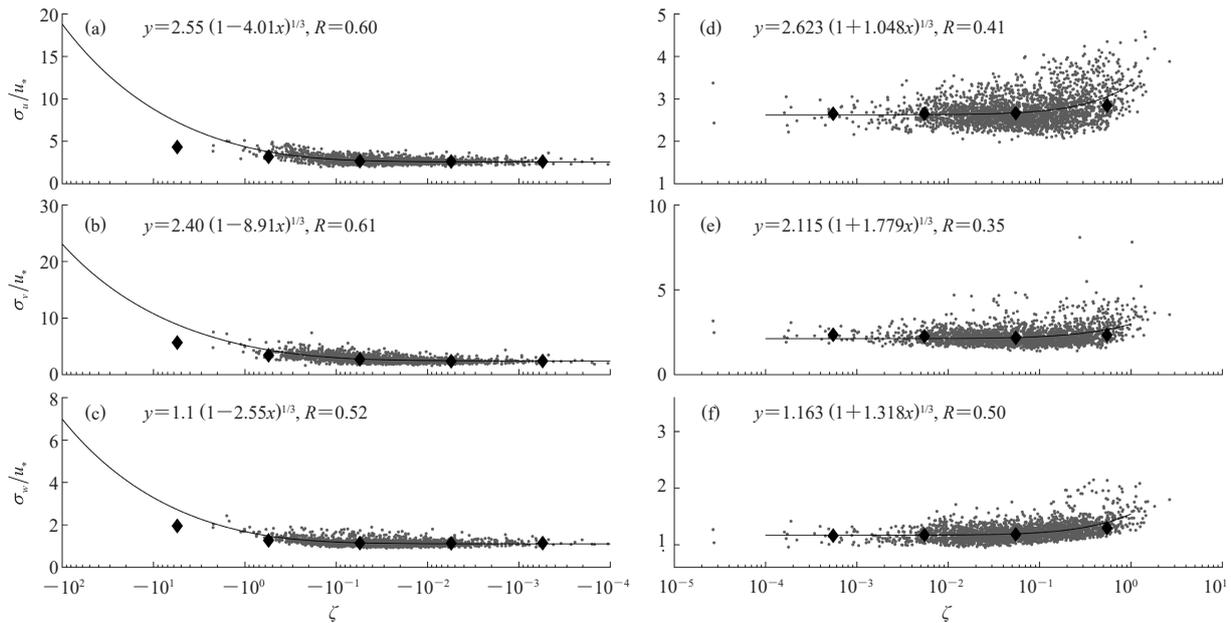


图4  $u$ 、 $v$ 、 $w$ 风速分量归一化标准差 ( $\sigma_w$ 、 $\sigma_v$ 、 $\sigma_u$ ) 随大气稳定度参数 ( $\zeta$ ) 的变化

(a~c) 不稳定条件下; (d~f) 稳定条件下 (菱形为纵坐标在 $\zeta$ 某个区间范围内的平均值, 不稳定条件下 $\zeta$ 区间为  $-10^2 \sim -10^1 \sim -10^0 \sim -10^{-1} \sim -10^{-2} \sim -10^{-3} \sim -10^{-4}$ , 稳定条件下 $\zeta$ 区间为  $10^{-5} \sim 10^{-4} \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \sim 10^{-1} \sim 10^0 \sim 10^1$ )

Fig. 4 Normalized standard deviation of  $u$ ,  $v$ ,  $w$  wind components variation with atmospheric stability parameter  $\zeta$  (a-c) Unstable conditions; (d-f) Stable conditions (The diamond represents the  $\zeta$  bin average within a certain interval;  $\zeta$  interval is  $-10^2$  to  $-10^1$  to  $-10^0$  to  $-10^{-1}$  to  $-10^{-2}$  to  $-10^{-3}$  to  $-10^{-4}$  under unstable conditions;  $\zeta$  interval is  $10^{-5}$  to  $10^{-4}$  to  $10^{-3}$  to  $10^{-2}$  to  $10^{-1}$  to  $10^0$  to  $10^1$  under stable conditions)

### 2.3.2 标量归一化标准差随大气稳定度参数的变化

图5为温度、湿度和 $\text{CO}_2$ 密度归一化标准差随大气稳定度参数的变化。温度的归一化标准差随大气稳定度的变化在大气不稳定时符合“1/3”次方规律, 但

在大气稳定时符合“-1”次方规律。比湿的归一化标准差随大气稳定度参数的变化在大气不稳定时符合“1/3”次方规律, 大气稳定时趋于常数3.49。 $\text{CO}_2$ 密度归一化标准差与大气稳定度参数的关系在大气不稳定

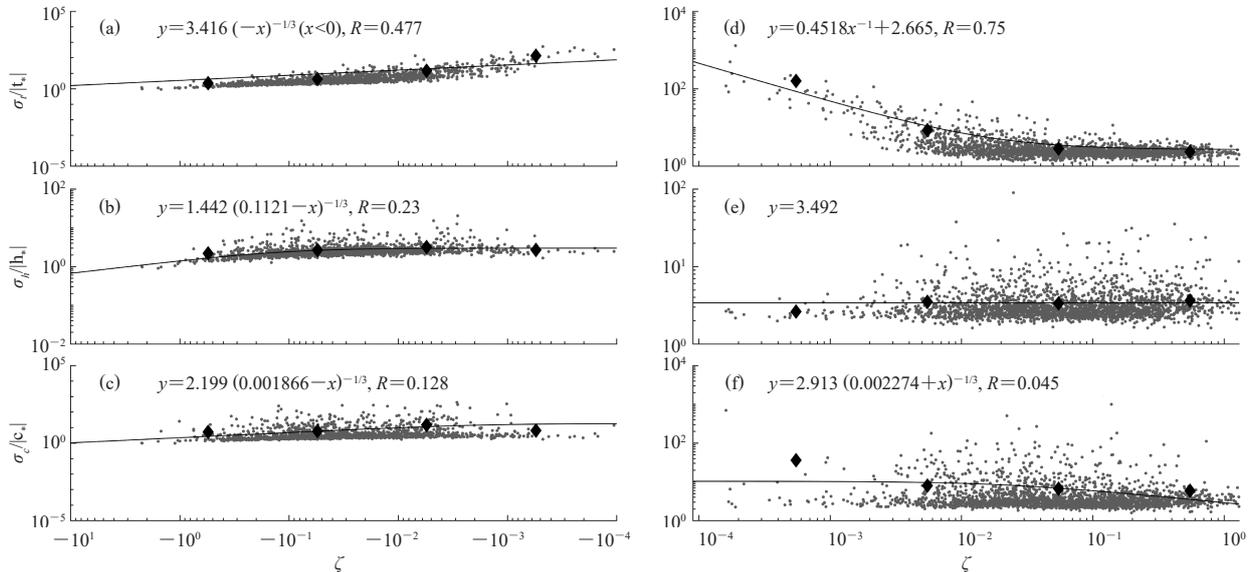


图5 温度( $T$ )、湿度( $q$ )和 $\text{CO}_2$ 密度( $c$ )的归一化标准差( $\sigma_T$ 、 $\sigma_q$ 、 $\sigma_c$ )随大气稳定度参数( $\zeta$ )的变化 (a~c) 不稳定条件下; (d~f) 稳定条件下(菱形为纵坐标在 $\zeta$ 某个区间范围内平均值, 不稳定条件下 $\zeta$ 区间为 $-10^1 \sim -10^0 \sim -10^{-1} \sim -10^{-2} \sim -10^{-3} \sim -10^{-4}$ , 稳定条件下 $\zeta$ 区间为 $10^{-4} \sim 10^{-3} \sim 10^{-2} \sim 10^{-1} \sim 10^0$ )

Fig. 5 Relationship between normalized standard deviation of  $T$ ,  $q$ ,  $c$  and atmospheric stability parameter  $\zeta$  (a~c) Unstable conditions; (d~f) Stable conditions (The diamond represents the ordinate  $\zeta$  average value within a certain interval;  $\zeta$  interval is  $-10^1$  to  $-10^0$  to  $-10^{-1}$  to  $-10^{-2}$  to  $-10^{-3}$  to  $-10^{-4}$  under unstable conditions;  $\zeta$  interval is  $10^{-4}$  to  $10^{-3}$  to  $10^{-2}$  to  $10^{-1}$  to  $10^0$  under stable conditions)

和稳定条件虽然可以用“1/3”次方拟合, 但结果较为离散, 相关系数仅分别为0.13和0.05。

## 2.4 湍流能谱分析

图6为三维风速分量的归一化功率谱和垂直风速与温度、湿度、 $\text{CO}_2$ 的协谱。在惯性子区(0~10 Hz)内,  $u$ 、 $v$ 的功率谱均符合“ $-2/3$ ”次方规律, 峰值分别出现在0.002 Hz和0.003 Hz附近;  $w$ 的功率谱斜率略小于 $-2/3$ , 峰值出现在0.3 Hz附近。三维风速的功率谱在大于0.1 Hz的高频区间均上翘, 说明观测系统受到高频噪音的影响。垂直风速与温度、湿度和 $\text{CO}_2$ 密度的协谱均与标准谱线<sup>[26]</sup>一致, 在惯性子区内均符合“ $-4/3$ ”斜率特征, 峰值都出现在0.1 Hz附近。可见, 涡度相关系统能够有效地观测该高标准农田上方垂直风速与温度、湿度和 $\text{CO}_2$ 密度的协方差。

## 2.5 湍流统计量分析

### 2.5.1 湍流强度

由图7a可见,  $u$ 和 $v$ 方向上的湍流强度概率密度分布一致, 分别有97.4%和96.1%的湍流强度集中分布在0.2~0.6, 峰值均出现在0.45附近。与 $u$ 、 $v$ 方向相比,  $w$ 方向上的湍流强度明显较低, 概率密度峰值出现在0.2附近, 0.05~0.4范围内的湍流强度占99.6%。三个方向上的湍流强度均随风速增大而减小(图7b)。风速小于2 m/s时, 湍流强度随风速增加迅速降低; 当风速

超过3 m/s时, 湍流强度趋于常数, 即 $I_u \rightarrow 3.03$ ,  $I_v \rightarrow 2.71$ ,  $I_w \rightarrow 1.31$ 。从区间均值来看, 当风速超过1 m/s时,  $u$ 方向上的湍流强度开始大于 $v$ 方向的结果; 当风速超过5 m/s时,  $I_u > I_v > I_w$ 。

### 2.5.2 湍流动能

由图8a可知, 大气中性时, 湍流动能最大; 当大气趋向稳定和不安定时, 湍流动能迅速下降。热力湍流对湍流动能的贡献( $\sim 10^{-4}$ )明显小于动力湍流。中性条件下, 动力湍流对湍流动能的贡献最大。大气稳定时, 逆温对应的负浮力抑制湍流发展, 对湍流动能的贡献为负值。湍流动能随平均风速增大而增加(图8b), 可用二次函数 $y = 0.0817x^2 + 0.0319x + 0.0536$ 拟合两者之间的关系, 相关系数 $R = 0.86$ 。湍流动能呈现白天高、夜晚低的日变化特征(图8c), 从06:00开始增大, 13:00达到峰值 $0.96 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , 随后下降, 03:00降至最低值 $0.22 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。湍流动能日变化与风速一致, 可见湍流动能主要受动力湍流控制。

## 3 讨论

已有研究发现, 长三角常熟地区水稻在非中性条件下水平风速标准差与大气稳定度之间的关系较分散, 难以满足“1/3”次方定律<sup>[9]</sup>。华北玉米下垫面垂直风速与温度的协谱在惯性子区内不符合“ $-4/3$ ”次方斜率规律<sup>[15]</sup>。与上述研究相比, 本研究选取的高标

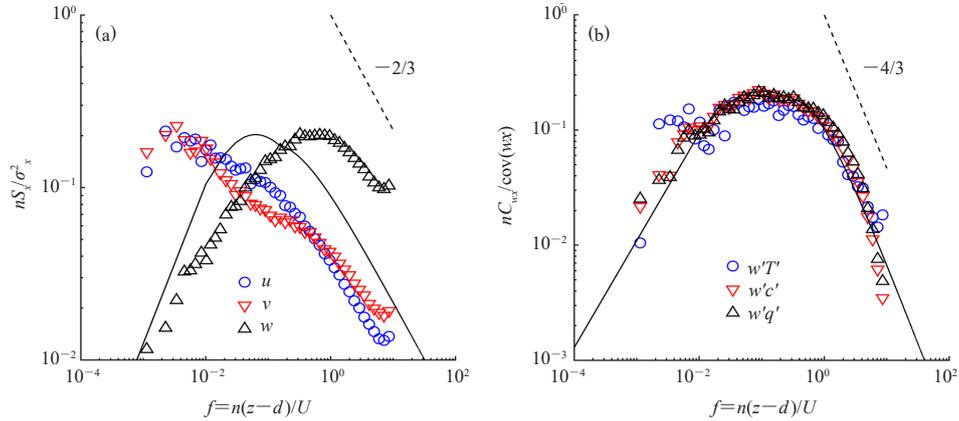


图6 三维风速分量的归一化功率谱 (a, 虚线为 $-2/3$ 次方斜率线) 和垂直风速 ( $w$ ) 与温度 ( $T$ )、比湿 ( $q$ )、 $\text{CO}_2$  密度 ( $c$ ) 的协谱 (b, 虚线为 $-4/3$ 次方斜率线) (黑色实线为Kaimal标准曲线)  
Fig. 6 Normalized power spectra of three-dimensional wind components (a, dash line representing the  $-2/3$  slope) and normalized cospectrum of vertical wind speed ( $w$ ) with temperature ( $T$ ), specific humidity ( $q$ ) and  $\text{CO}_2$  density ( $c$ ) (solid line denoting the standard spectra of Kaimal)

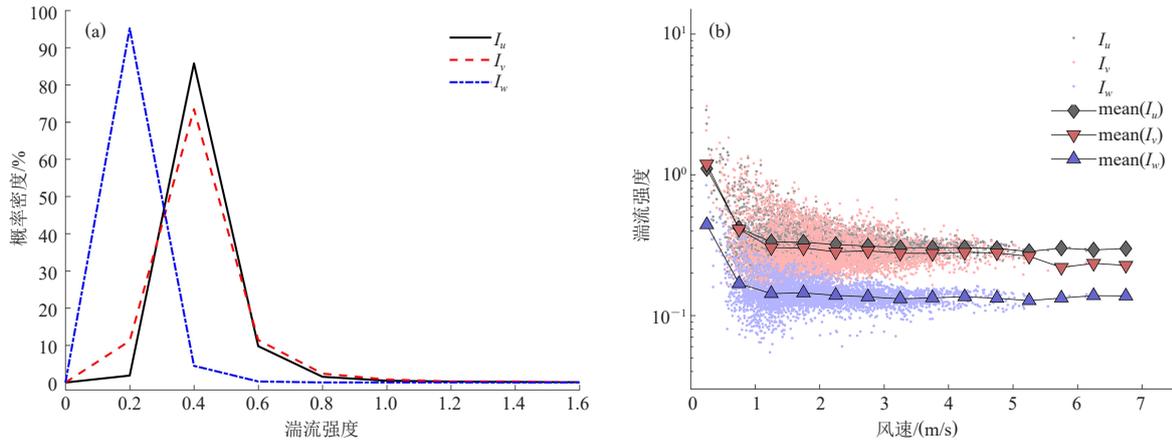


图7 三维风方向上湍流强度的概率密度分布 (a) 和湍流强度随风速的变化特征 (b) (标记为0.2区间平均值)  
Fig. 7 Probability density distribution of turbulence intensity of three-dimensional wind speeds (a) and variation of turbulence intensity with wind speed (b) (Marks are bin averages with width of 0.2)

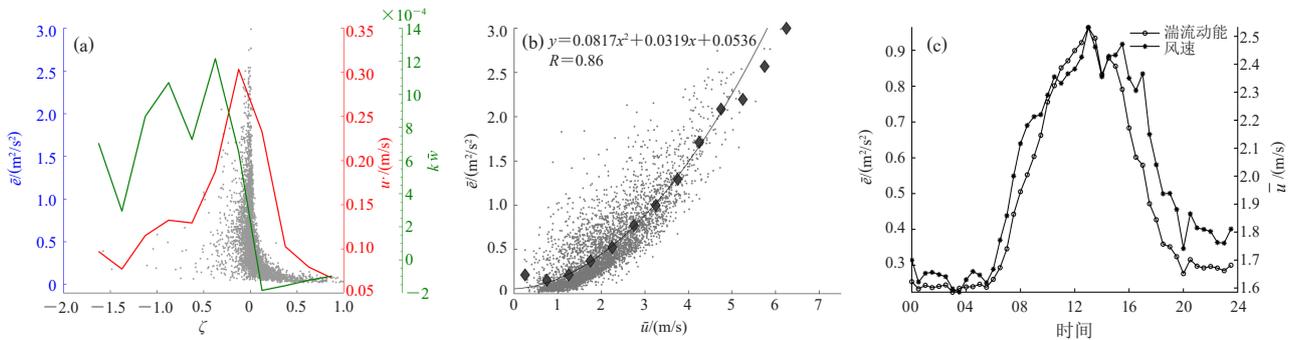


图8 湍流动能 ( $\bar{\epsilon}$ ) 随大气稳定度 ( $\zeta$ )、风速 ( $\bar{u}$ ) 和时间的变化特征  
(a) 湍流动能、动力湍流和热力湍流贡献随大气稳定度的变化; (b) 湍流动能随风速的变化特征; (c) 湍流动能和风速的日变化特征  
Fig. 8 Variations of turbulent kinetic energy ( $\bar{\epsilon}$ ) with atmospheric stability ( $\zeta$ ), wind speed ( $\bar{u}$ ) and time  
(a) Turbulent kinetic energy, mechanical turbulence and thermal turbulence varying with atmospheric stability; (b) Turbulent kinetic energy varying with wind speed; (c) Diurnal variations of turbulent kinetic energy and wind speed

准农田中, 三维风速归一化标准差随大气稳定度的变化均符合“1/3”次方规律, 且三维风速的湍流谱在惯性子区中均符合“ $-2/3$ ”次方关系, 垂直风速与标量的协谱在惯性子区中都符合“ $-4/3$ ”次方规律。可见, Monin-Obukhov相似理论在高标准农田更为适用, 涡度相关系统能够准确地观测该高标准农田上的感热、水汽和CO<sub>2</sub>通量。大气近中性时, 三维风速的归一化标准差都趋于常数。不同农田在中性条件下得到的风速分量归一化标准差值基本符合 $\sigma_u/u_* > \sigma_v/u_* > \sigma_w/u_*$ 的规律。本研究区域与常熟同属于长三角地区, 本区域( $\sigma_u/u_* = 2.64$ 、 $\sigma_v/u_* = 2.36$ )与常熟稻田的结果( $\sigma_u/u_* = 2.51$ 、 $\sigma_v/u_* = 2.26$ )<sup>[9]</sup>接近, 但大于成都地区农田结果( $\sigma_u/u_* = 2.0$ 、 $\sigma_v/u_* = 2.1$ )<sup>[13]</sup>, 可能与周围地形和农作物差异有关。从湍流强度概率密度峰值来看, 本研究中高标准农田的湍流强度峰值( $I_u = 0.40$ 、 $I_v = 0.40$ 、 $I_w = 0.20$ )约为华北平原观测结果( $I_u = 0.20$ 、 $I_v = 0.20$ 、 $I_w = 0.10$ )的2倍<sup>[15]</sup>, 也明显大于成都平原的观测结果( $I_u = 0.28$ 、 $I_v = 0.29$ 、 $I_w = 0.16$ )<sup>[13]</sup>, 与云贵高原大理地区结果( $I_u = 0.50$ 、 $I_v = 0.45$ 、 $I_w = 0.15$ )<sup>[11]</sup>相当。

#### 4 结论

基于南通高标准农田水稻下垫面2020年5—10月涡度相关观测数据, 分析了大气稳定度分布、湍流方差相似性、湍流谱特征、湍流强度和湍流动能等, 得到以下结论。

1) 水稻生长期, 80%的通量贡献源区范围分布在距离涡度相关系统70 m以内的2块水稻田内, 且以东侧稻田贡献为主。稻田上方大气呈现白天不稳定、夜晚稳定的昼夜变化特征。

2) Monin-Obukhov相似理论在该高标准农田适用。三维风速归一化标准差随大气稳定度的变化均符合“1/3”次方规律, 大气不稳定时拟合效果更佳。温度、比湿、CO<sub>2</sub>密度的归一化标准差随大气稳定度的变化在不稳定条件下符合“1/3”次方规律。

3) 涡度相关系统能够观测该高标准农田的感热、潜热和CO<sub>2</sub>通量。在惯性子区, 三维风速的湍流谱符合“ $-2/3$ ”次方关系, 垂直风速与温度、湿度和CO<sub>2</sub>密度的协谱符合“ $-4/3$ ”次方规律。

4) 该高标准农田水平方向上的湍流强度大于垂直方向上结果, 三个方向上的湍流强度随风速增大均趋于常数。大气中性时湍流动能最大, 以动力湍流贡献为主。湍流动能随风速呈二次函数增大, 并呈现与风速类似的昼高夜低的日变化特征。

#### 参考文献

- [1] Thenkabail P S, Teluguntla P G, Xiong J, et al. Global cropland-extent product at 30-m resolution (GCEP30) derived from Landsat satellite time-series data for the year 2015 using multiple machine-learning algorithms on Google Earth Engine cloud. Professional Paper, Reston, VA, 2021.
- [2] Zhou D, Xiao J, Frohling S, et al. Croplands intensify regional and global warming according to satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 264: 112585.
- [3] Kang S, Eltahir E. North China Plain threatened by deadly heatwaves due to climate change and irrigation. *Nature Publishing Group*, 2018, 9: 2894.
- [4] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法(第2版). 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [5] Fang J, Yu G, Liu L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [6] 李旭辉. 边界层气象学基本原理. 北京: 科学出版社, 2018.
- [7] 沈鹏珂, 张雪芹. 藏南羊卓雍错湖面大气湍流特征观测分析. *湖泊科学*, 2019, 31(1): 243-255.
- [8] 秦志昊, 王伟, 肖薇, 等. 小型农业养殖塘上大气湍流特征的观测分析. *中国农业科技报*, 2022, 24(5): 145-156.
- [9] 余锦华, 刘晶淼, 任健. 长江三角洲常熟地区近地层湍流特征的研究. *南京气象学院学报*, 2001, 24(4): 536-544.
- [10] 陈晋北, 胡隍樵, 吕世华, 等. 绿洲和戈壁复杂下垫面平流对湍流特征的影响. *中国科学: 地球科学*, 2014, (11): 2499-2514.
- [11] 杨智, 刘劲松, 朱以维, 等. 云贵高原西部大理地区近地层湍流特征分析. *大气科学学报*, 2010, 33(1): 117-124.
- [12] 徐敏, 蒋维楣, 胡非, 等. 湍流湿度脉动特性研究—根据淮河流域实验资料. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 17-25.
- [13] 李英, 李跃清, 赵兴炳. 青藏高原东部与成都平原大气边界层对比分析 II——近地层湍流特征. *高原山地气象研究*, 2008, 28(3): 8-14.
- [14] 苏永亮, 穆桂金, 潘燕芳, 等. 塔里木盆地南缘策勒典型下垫面水的湍流特征. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 458-463.
- [15] 郭建侠. 华北玉米下垫面湍流输送特征及参数化方案比较研究. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [16] 中华人民共和国农业农村部. 高标准农田建设 通则: GB/T 30600—2022.
- [17] 徐凤英, 王明华, 沈金兵. “三个聚焦”彰显整治综合效益——南通的实践探索. *中国土地*, 2018(2): 11-13.
- [18] 徐敏, 徐敬争, 刘文菁, 等. 华东沿海稻麦轮作区生态系统能量闭合度和CO<sub>2</sub>通量特征研究. *中国生态农业学报*, 2022, 30(3): 367-379.
- [19] Mauder M, Cuntz M, Drüe C, et al. A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 122-135.
- [20] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, et al. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3695-3713.
- [21] 斯塔尔. 边界层气象学导论. 徐静琦, 杨殿荣, 译. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991.
- [22] Hsieh C I, Katul G, Chi T. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Advances in Water Resources*, 2000, 23(7): 765-772.
- [23] Foken T. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory. *Boundary-Layer Meteorol*, 2006, 119(3): 431-447.
- [24] Panofsky H A, Dutton J A. *Atmospheric turbulence: models and methods for engineering applications*. New York: Wiley, 1984.
- [25] Tillman J E. The indirect determination of stability, heat and momentum fluxes in the atmospheric boundary layer from simple scalar variables during dry unstable conditions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1972, 11(5): 783-792.
- [26] Kaimal J C, Wyngaard J C J, Izumi Y, et al. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 1972, 98(417): 563-589.