

基于风廓线雷达的鄱阳湖湖陆风特征研究*

赵乐鏊^{1,2}, 赵晓松^{1,3*}, 范兴旺^{1,3}, 王丽梅^{1,2}, 娄婷⁴, 孔韵宁⁵, 徐力刚^{1,3,6}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全重点实验室, 南京 211135)

(2:中国科学院大学, 北京 100049)

(3:中国科学院南京地理与湖泊研究所鄱阳湖湖泊湿地综合研究站, 九江 332899)

(4:南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044)

(5:北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

(6:江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 南昌 330029)

摘要: 基于2021年6月–2023年5月的风廓线雷达监测数据, 综合分析了鄱阳湖湖区的风速风向特征、湖陆风活动规律及典型湖陆风事件的发展过程, 主要结论如下: (1) 湖区白天近地面风速普遍高于夜间, 夏季主风向为东北风, 其余季节则为西南风。垂直风廓线符合幂次律, 各季节风廓线指数依次为: 夏季(0.41) > 春季(0.29) > 冬季(0.26) > 秋季(0.23); (2) 两年内共发生了104次湖陆风事件, 占比为14.3%, 夏季最多(38次), 秋季(24次)、春季(22次)次之, 冬季最少(20次), 春夏季湖风起始时间早于秋冬季, 持续时间更长, 陆风相反。无湖陆风日垂直风廓线指数为0.31, 全天主风向为西南风; 湖陆风发生日近地面风速更低, 风速廓线指数为0.57, 垂直风速变幅更大, 且6–18时主风向为东北风; (3) 在典型湖陆风事件中, 湖风高度在14时达到峰值440 m, 持续时间为9小时; 陆风高度在0时左右达到峰值760 m, 持续时间为14小时, 峰值高度与当日最高和最低温度同时出现。鄱阳湖湖陆风的季节性活动差异与湖泊面积和湖陆温差的季节性变化有关。本文为研究季节性湖泊对大气边界层结构和局地环流的潜在影响提供科学参考。

关键词: 湖陆风; 风廓线雷达; 季节性湖泊; 鄱阳湖

Characteristics of lake-land breeze events in Lake Poyang based on wind profiling radar data

ZHAO Lejun^{1,2}, ZHAO Xiaosong^{1,3,*}, FAN Xingwang^{1,3}, WANG Limei^{1,2}, LOU Ting⁴, KONG Yunning⁵ & XU Ligang^{1,3,6}

(1: Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Lake Poyang Wetland Research Station, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332899, P.R.China)

(4: School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, P.R.China)

*2024年10月14日收稿; 2024年12月1日收修改稿

国家重点研发计划项目(2022YFC3204104)、国家自然科学基金联合重点项目(U2240219)、国家自然科学基金面上项目(42271121)联合资助

**通讯作者: E-mail: xszhao@niglas.ac.cn

(5: Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, P.R.China)

(6: Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Lake Poyang Basin, Nanchang 330029, P.R. China)

Abstract: We analyzed the characteristics of wind speed and direction, and the general patterns of lake-land breezes as well as the process of typical events, based on wind profiling radar data near the Lake Poyang from June 2021 to May 2023. Main conclusions are as follows: (1) The surface-layer wind speed was generally higher in daytime than in nighttime. The prevailing wind direction was northeast in summer, and was southwest in other seasons. The vertical wind profile conformed to the power law, with the wind profile index in a decreasing order as summer (0.41) > spring (0.29) > winter (0.26) > autumn (0.23). (2) A total of 104 lake-land breezes (14.3%) occurred in the study period, most (38 times) in summer, second in autumn (24 times), third in spring (22 times), and least (20 times) in winter. The lake breezes were longer-lasting and started earlier in spring and summer than in autumn and winter, while the opposite is true for the land breezes. When no land-lake breezes occurred, the southwest winds persisted throughout the day and night, and the wind profile index was 0.31. The surface-layer wind speed was generally lower when lake-land breezes occurred. The wind profile index was 0.57 with the northeast winds prevailing between 6:00–18:00. (3) Lake breezes in general peaked at 14:00 with a maximum height of 440 m, whereas land breezes in general peaked at midnight with a maximum height of 760 m. The seasonally varying patterns in lake-land breezes were related to changing water surfaces and contrasting land-water temperatures of the Lake Poyang. This paper provides preliminary conclusions for understanding the potential role of seasonally flooding lakes in local atmospheric circulation and boundary layer structure.

Key words: lake-land breeze; wind profiling radar; seasonal lake; Lake Poyang

湖泊具有表面粗糙度低、比热容大、反照率低等特点,与大气间的物质能量交换过程对于调节区域气候具有重要作用^[1-2]。湖陆风是指在一定的天气条件下,由湖泊、水库等水体与陆地间热力学差异引起的中尺度局地环流系统,是影响区域湖-气、陆-气水热交换及空气对流发展的重要因素^[3-5]。解析湖陆风特征对于揭示大气边界层和局地环流对湖泊的响应机制,进而改进地球系统模式具有重要意义。

针对全球湖泊湖陆风现象的发生频率、起始时刻、持续时间及其季节性差异等特征,国内外学者基于气象站点观测数据^[4,6]与模型模拟^[7]等方法开展了广泛研究。面积较大的深水湖泊更易发生高频率、长历时、高强度的湖陆风^[8-9],且湖泊大小与湖风强度呈正相关关系^[10]。在北美五大湖中,密歇根湖^[11]全年有 40.6% 的时间发生湖陆风现象,安大略湖^[12]的湖陆风发生频率也在 30% 左右,面积在 20000 km² 以上的伊利湖和休伦湖^[8]的湖风持续时间达 9 小时左右;其余小型湖泊^[13]的湖陆风发生频率主要在 5%–20% 之间,持续时间多在 8 小时以下。太阳辐射是湖陆风起始时刻与持续时间存在季节性差异的主要影响因素^[14];地处北半球的博斯腾湖^[15]、太湖^[16]、衡水湖^[17]的夏季湖风比冬季出现时刻更早,持续时间更长,冬季则情况相反。一般认为,观测站点距离湖泊越远,湖陆风的发生频率越低,持续时间越短^[11],起始时间延后^[13]。湖陆温差^[6]和梯度风^[12,18]是湖陆风形成的关键因素,复杂的岸线和地形地势条件^[16]会对湖陆风现象的形成有较强的抑制作用。在观测技术方面,探空气球、风廓线仪、激光雷达等设备的三维风场观测信息^[19-22],被相关学者广泛用于湖陆风等大气环流的研究中^[23-25]。风廓线雷达作为一种新型高空探测设备,时间分辨率和垂直高度分辨率较高,在垂直风场研究中有较大的优势。我国于 20 世纪 80 年代开始计划逐步建立由风廓线雷达构成的低空风探测网^[26]。如 Wang 等^[16]、覃海润等^[27]均曾运用风廓线雷达设备探究太湖湖陆风特征。

长江中下游地区以浅水湖泊为主,鄱阳湖作为我国面积最大的季节性淡水湖泊,受五河与长江来水的双重影响,气象与水文条件复杂^[28-29],湖区内老爷庙水域的流速与风速风向易出现突变,多发生沉船事件,

是我国最凶险的内陆湖水域之一^[30]。已有研究^[4]利用鄱阳湖典型气象站点监测资料,分析了不同空间尺度的湖陆风特征,但垂直方向鄱阳湖的风场结构及不同季节湖陆风活动规律特征尚不完全明晰,仍需探究。鉴于此,本文基于2021年6月至2023年5月鄱阳湖湖泊湿地观测研究站的风廓线雷达监测数据,开展鄱阳湖湖陆风活动规律及生消过程研究,能够为探究区域大气边界层和局地环流变化对湖泊下垫面的响应机制提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据来源

鄱阳湖(115°49′–116°46′E, 28°26′–29°46′N)地处我国江西省北部(图1),南北长约173 km,东西平均宽约17 km,是我国面积最大的淡水湖。鄱阳湖地处亚热带季风气候区,年均气温16.5–17.8 °C,夏季高温多雨,冬季温和湿润,雨热同期^[31]。鄱阳湖属季节性、吞吐型的通江湖泊,承接了来自赣江、信江、饶河、抚河和修水五河来水,经调蓄后由湖口注入长江,水位和水量的季节性波动大,呈现“丰水一片,枯水一线”的景观^[32–34]。丰水期时鄱阳湖水位较高,面积最大超过3000 km²,平均蓄水量超过150亿 m³;枯水期时水位下降,洲滩裸露,植被快速生长,面积仅为500–1000 km²,平均蓄水量不足50亿 m³。以星子水文站为例,其历史最高水位为22.63 m(2020年7月),最低水位为6.46 m(2022年11月),水位变幅较大^[35–36]。

本研究使用的风廓线雷达设备(PCS.2000-64, METEK, 德国)位于鄱阳湖西岸中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站(116.06°E, 29.45°N)内(图1),可获取不同高度的风速和风向观测信息,观测频率为1 min(每分钟),最大探测高度为1000 m。通过剔除异常值、时间一致性检查等对监测数据进行质量控制。设备临近鄱阳湖主航道和主湖体,丰水期距湖岸约50 m,附近水域宽度为4–8 km,因背靠庐山诸峰,设备所在区域向湖区延伸方向属高风速区,年均风速大^[37]。风廓线雷达基于大气湍流对电磁波的散射作用,向不同方向发射电磁波束探测大气三维风场,技术指标如表1所示。本文所使用的观测数据时间跨度为2021年6月至2023年5月。本文选取美国国家航空航天局(NASA)提供的MYD11A1数据产品,定量探究不同季节湖陆热力性质差异,该产品提供了逐日地表和湖泊表面的温度监测信息,空间分辨率为1 km,通过LAADS DAAC网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)获取。

表1 主要技术性能指标

Table 1 Technical specifications of the instrument

技术指标	范围/数值
风向(°)	0~360
波束宽度(°)	7~12
测量频率(Hz)	1500~2600
高度分辨率(m)	5~100
最小测量高度(m)	15
功率(W)	150
操作温度(°C)	-30~55
重量(kg)	50
水平风速测量范围(m/s)	-50~50
最大测量垂直风速(m/s)	<-10 或 >10

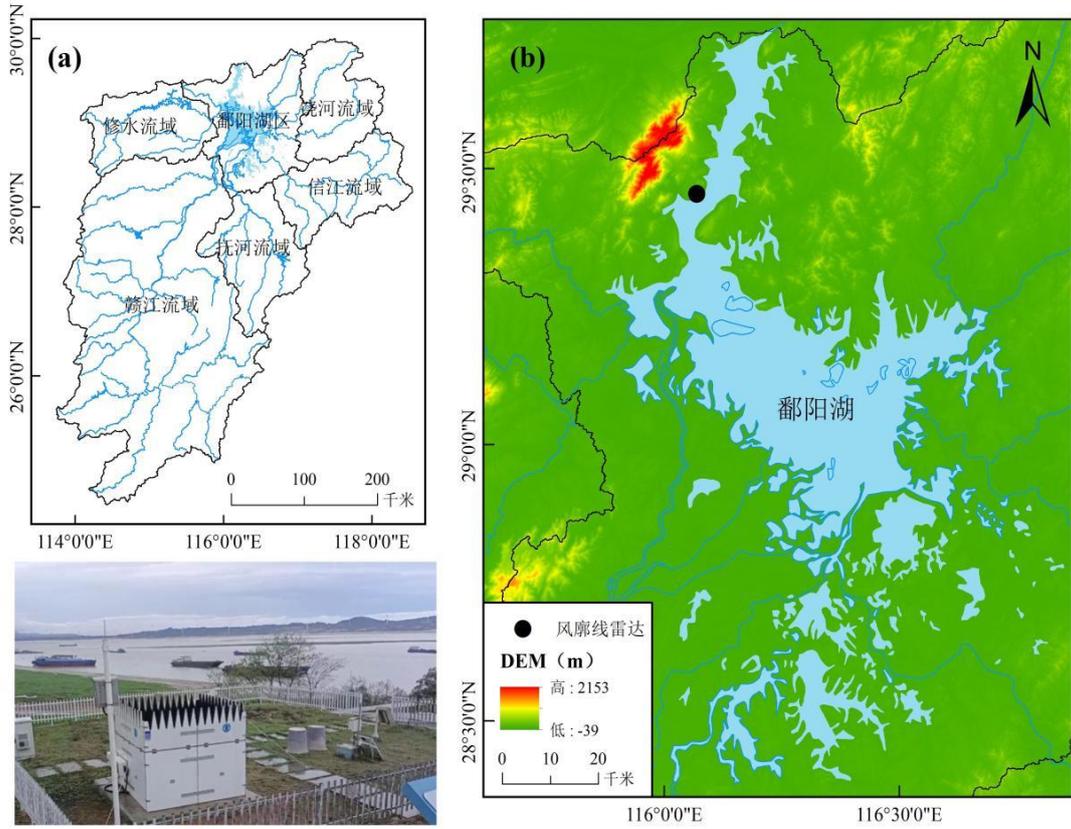


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map of the study area

1.2 研究方法

风速廓线是指风速随高度的分布曲线，受地形地势、天气状况、大气层结稳定度等多种因素的影响，在垂直方向上有多种分布形式。风速廓线可用幂次律公式表达^[38]，其在垂直风场的研究中应用较多。计算公式如下。

$$\bar{u}(Z) = \bar{u}_r \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^n \quad (1)$$

式中， Z 为测量风速的高度， \bar{u} 为 Z 高度的平均风速； Z_r 为参考高度， \bar{u}_r 为 Z_r 高度的平均风速， n 为风速廓线指数，反映了风速大小随高度的变化速率，与大气稳定度、地形和下垫面粗糙度等影响因素有关。一般而言，指数 n 越大，风速随高度的变化越显著，大气层结越不稳定；指数 n 越小，风速随高度的变化越不显著，大气层结越稳定。本文通过模型拟合得到最优 n 值，揭示不同季节和有无湖陆风日的垂直风速廓线特征。选取决定系数（ R^2 ）和均方根误差（RMSE）表征拟合优度，计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{pred,i})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{pred,i})^2}{n}} \quad (3)$$

式中, v_i 为实际观测风速, $v_{pred,i}$ 为模型计算风速, n 为观测值数量, \bar{v} 为观测风速平均值。 R^2 越接近 1, RMSE 越小, 代表拟合结果越好。

1.3 湖陆风日的判定标准

受研究区岸线形状、湖泊深度、地形地貌等因素影响, 不同研究对湖陆风的判定方式有一定差异。Larid 等^[11]以日出日落前后近地面风向转换、湖陆温差和平均风速作为密歇根湖的湖风判断标准; Giovannini 等^[39]以太阳辐射量、风向的转换及其持续时间作为判定加尔达湖湖陆风出现的标准; Yang 等^[17]针对衡水湖的湖陆风现象判断标准为无降水降雪事件、多处观测站点的风向转换与背景风速小。

综合同类型研究、数据可获取性与实际环境概况^[4,40,41], 制定鄱阳湖的湖陆风发生标准如下:

(1) 湖陆风发生日无降水和降雪。湖陆热力性质差异是产生湖陆风的根本原因, 以充足的太阳辐射为驱动, 降水降雪发生意味着更大的云量使得湖陆热力性质差异较小, 存在由其它天气系统引起风的可能。

(2) 日出至日落, 风向由离岸风转为向岸风; 日落至次日日出, 风向由向岸风转为离岸风。用以界定湖风和陆风的风向转换。

(3) 湖风和陆风出现前后, 平均风速小于 4.3m/s。避免由于背景风速过大对湖陆风现象的判断带来影响, 同时应保证湖陆风出现前后的风速低于年平均风速^[16]。

(4) 在风向发生转换后, 持续时间须保持在 2 小时以上。尽可能排除了由于短暂的风向突变对湖陆风现象带来误判。

2 结果与分析

2.1 风速与风向特征

鄱阳湖湖区风速随高度的增加而增加, 距离地面 600 m 以上的风速变化逐渐趋于稳定 (图 2a)。夏季近地面风速最小 (3.8 m/s), 冬季 (4.1 m/s) 和春季 (4.6 m/s) 次之, 秋季的近地面风速最大 (5.0 m/s)。垂直方向上, 风速廓线特征的季节性差异显著, 风速廓线特征符合幂次律。经拟合计算, 不同季节风速廓线指数的大小依次为夏季 (0.41) > 春季 (0.29) > 冬季 (0.26) > 秋季 (0.23), R^2 分别为 0.94、0.92、0.98、0.99, RMSE 分别为 0.38、0.58、0.17 和 0.11 m/s, 拟合效果较好。日均风速的变化范围为 1.4–12.3 m/s (图 2b), 最大值均出现在秋季 (2021 年 10 月 11 日、2022 年 11 月 30 日)。不同季节近地面风速日内变化规律基本一致, 呈现“白天风速大, 夜晚风速小”的特征 (图 2c), 4 时平均风速最小 (3.4 m/s), 14 时风速最大 (4.7 m/s)。研究区内春季以西南风为主风向, 夏季转为东北风, 秋冬季节再次转为西南风 (图 2d)。

以 2022 年 10 月为例, 深入探究鄱阳湖的风速风向特征 (图 3a)。该时段内风速与气温整体具有相似的日变化规律, 即白天高而夜间低。进一步以 10 月 3 日至 10 月 4 日为例, 分析垂直方向的风速风向规律 (图 3b)。该时段气温急剧下降, 降温幅度在 20°C 以上, 近地面平均风速为 11.71 m/s, 最大风速为 23.10 m/s, 明显高于该月的其它时段。风速自近地面向高空逐渐增强, 4 日 6 时前近地面风速整体偏弱, 风向以向岸风为主; 此后开始快速降温, 近地面风速显著增强, 风向转为以离岸风为主。4 日 21 时前后达到风速的最大值, 垂直方向影响高度在 600m 左右。

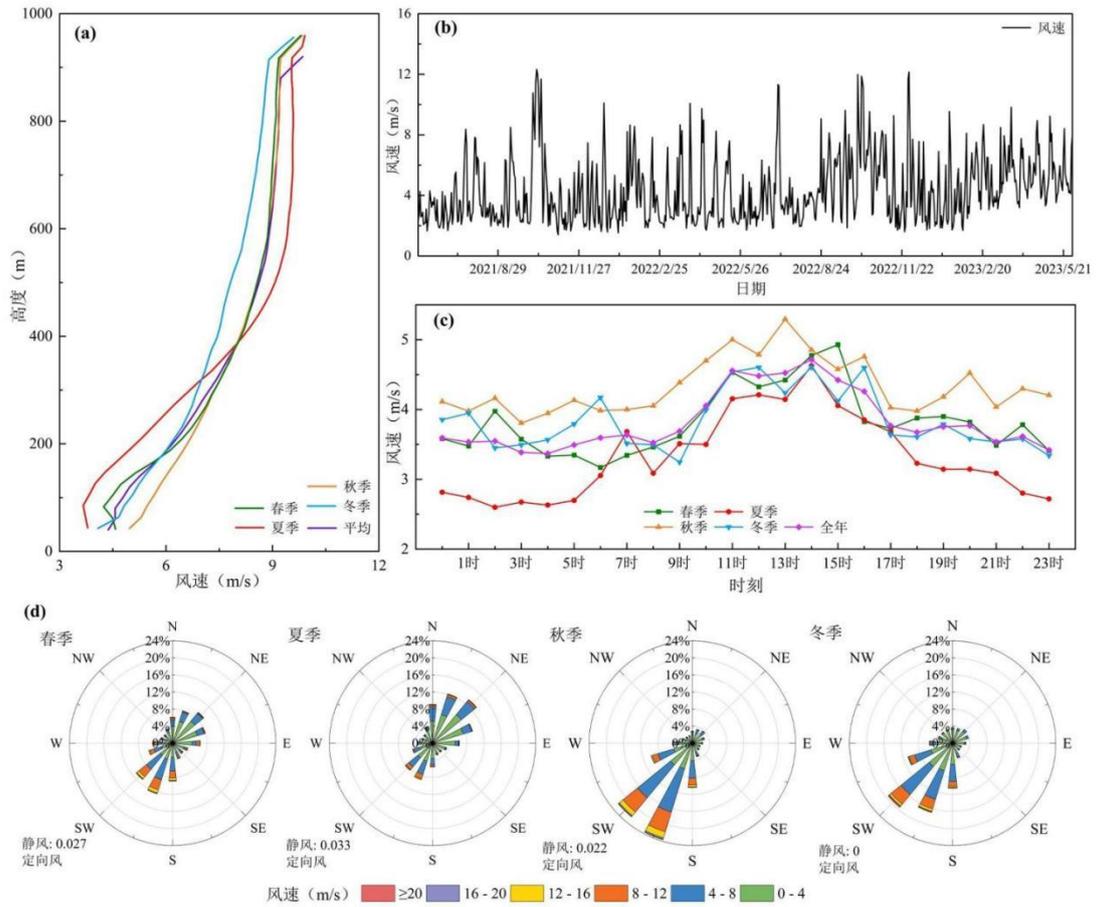


图2 风速与风向特征概况：(a) 不同高度平均风速；(b) 逐日近地面风速季节变化；(c) 不同季节的近地面风速日变化；(d) 近地面不同季节风向风频玫瑰图

Fig. 2 Characteristics of wind speed and direction including (a) vertically resolved wind speed, (b) seasonal variation of daily near-surface wind speed, (c) daily variations in near-surface wind speed by season, and (d) near-ground rose map of wind direction and frequency in different seasons.

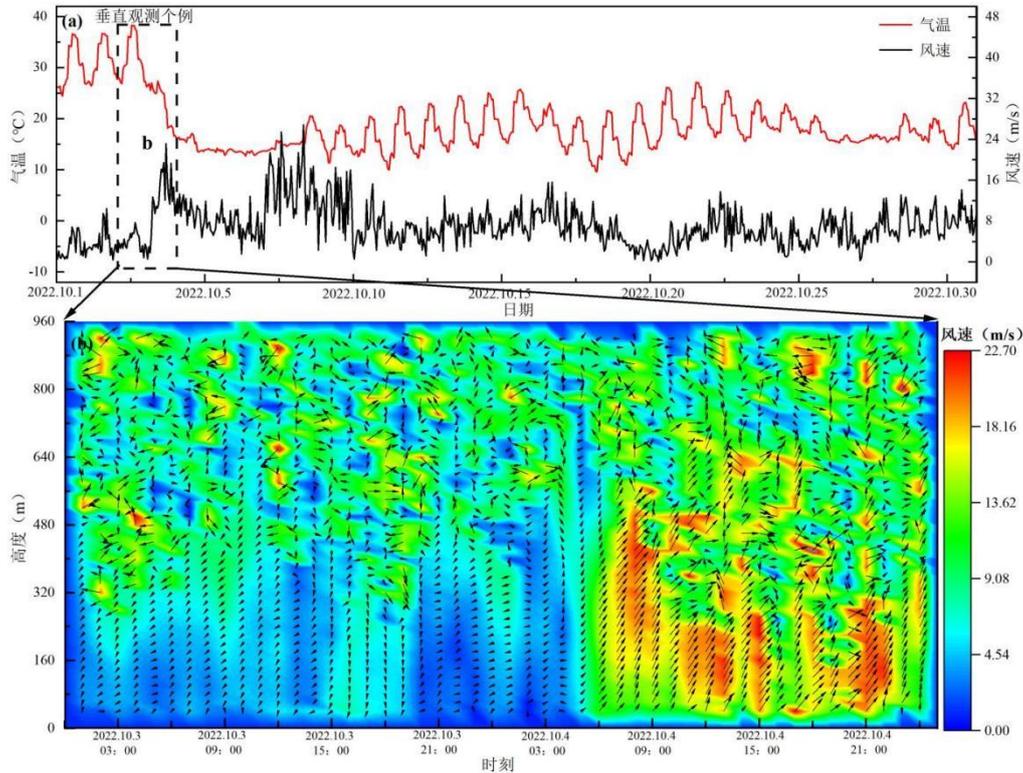


图3 2022年10月(a)近地面风速、气温和10月3-4日(b)风速风向垂直分布特征

Fig. 3 (a) near-surface wind speed and air temperature in October 2022, and (b) vertical distribution of wind speed and direction on Oct.3-4.

2.2 湖陆风活动规律

经统计,研究时段内共发生104次湖陆风事件,占比14.3%,两年内分别发生57次(15.6%)和47次(13.0%)。湖陆风现象存在显著的季节性差异(图4a)。夏季发生频次最多,共发生38次湖陆风事件,占比高达36.5%;秋季、春季分别发生了24次(23.1%)和22次(21.2%),冬季仅有20次(19.2%),发生频次最少。月际变化来看,7月份湖陆风事件发生次数最多,共16次(15.4%);5月、6月和8月则均发生11次(10.6%)。对于湖陆风的起始时刻。66.5%的湖风始于7-10时,8时发生频率最高(20.1%);51.0%的陆风始于18-21时,19时(18.2%)发生频率最高(图4b)。春夏季节湖风起始时间早于秋冬季(图5a),陆风相反(图5b)。约六成(58.3%)的春季湖风和约五成(47.4%)的夏季湖风发生于8时及以前,秋冬季节湖风起始时间整体延后,仅约四成的秋季(40.9%)和冬季(40.0%)湖风出现在8时及以前;春夏季节陆风起始时间多在20时及以后,分别为15次(62.5%)和25次(65.8%),秋冬季节陆风则多发生于20时之前,分别为11次(50.0%)和13次(65.0%)。持续时间方面,湖风平均持续时间为11小时(图4c),春夏季分别为13小时和12小时,秋冬季分别为10小时和9小时(图5c);陆风平均持续时间为10小时(图4c),春夏季分别为9.5小时和10小时,秋冬季均在11小时左右(图5c)。

湖陆风日具有典型的近地面风速、风向和垂直风速廓线特征。660m以上,湖陆风日和无湖陆风日的风速较为相近;660m以下,湖陆风日风速显著低于无湖陆风日(图6a)。有湖陆风日的风速廓线指数为0.57 ($R^2=0.98$, $RMSE=0.22$ m/s),明显大于无湖陆风日的风廓线指数0.31 ($R^2=0.95$, $RMSE=0.55$ m/s)。湖陆风日的垂直风速变幅整体较大。有无湖陆风日的近地面风速差异最显著(图6b),逐小时风速最大差

异为 1.9 m/s (12 时), 最小为 1.0 m/s (18 时)。对于湖陆风日的风向特征 (图 6c), 6-12 时为湖风出现的主要时段, 主风向为东北风; 12-18 时主风向仍为东北风, 出现频率和势力都较强; 18 时至次日 6 时主风向为西南风, 东北风势力相对较弱。无湖陆风日 (图 6d) 的各时段则均以西南风为主风向。

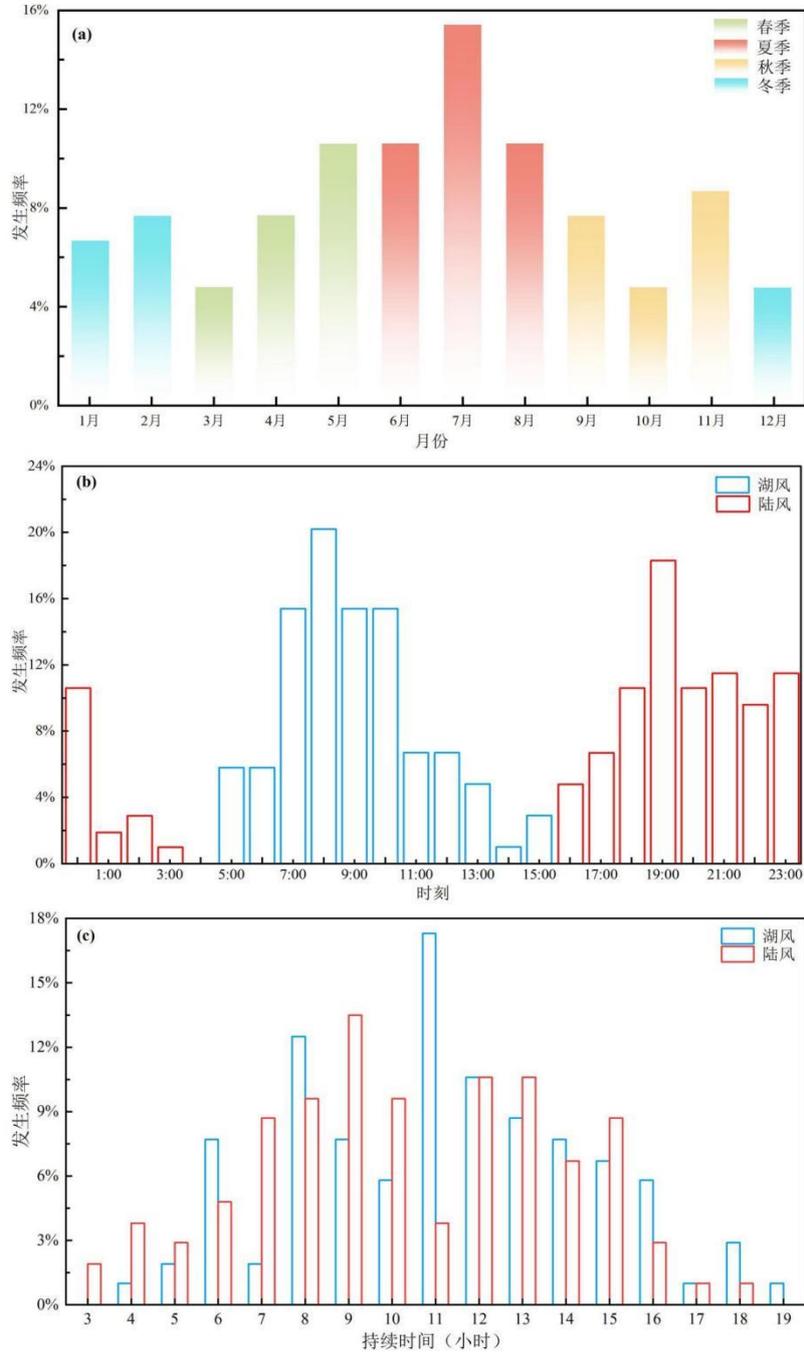


图 4 湖陆风活动规律: (a) 不同季节发生频率, (b) 起始时间的发生频率, (c) 持续时间频率
 Fig. 4 General patterns of lake-land breezes activity including (a) the occurrence frequency, (b) the frequency of onset time, and (c) the frequency of duration.

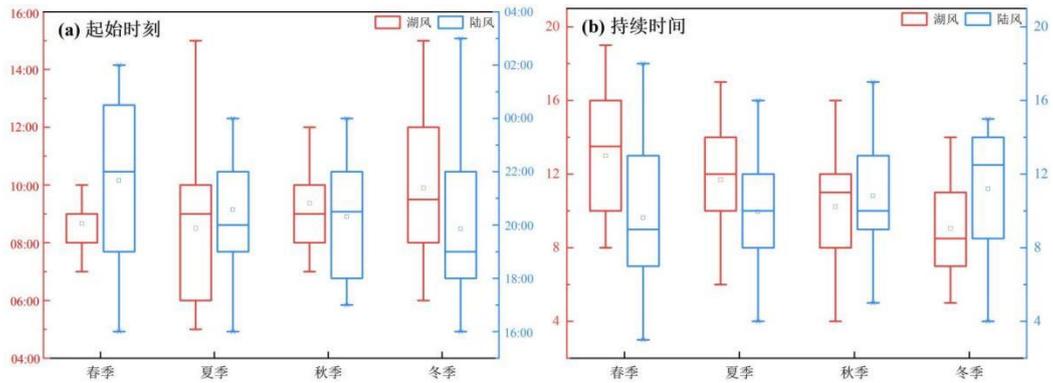


图5 不同季节湖风和陆风的起始时刻 (a)、湖风和陆风的持续时间 (b)

Fig. 5 The onset time of lake breezes and land breezes(a), as well as the duration of lake breezes and land breezes in different seasons(b).

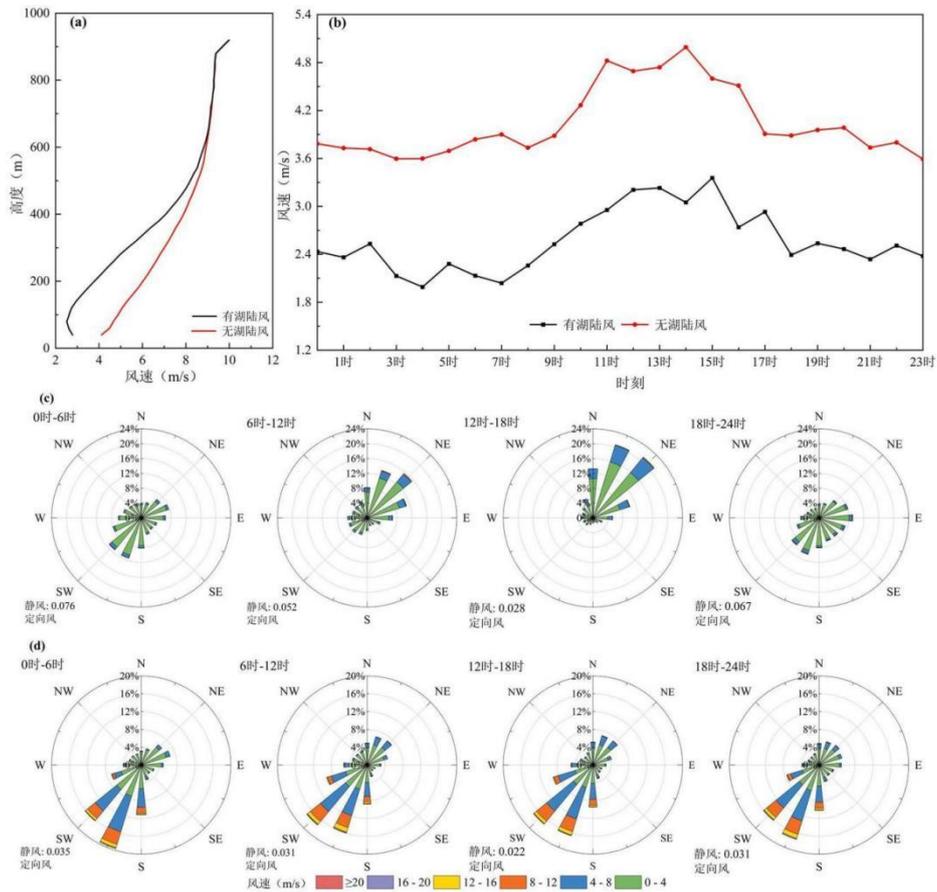


图6 有无湖陆风日的风速风向特征：(a) 垂直方向风速特征，(b) 近地面风速特征，(c) 湖陆风发生时的日内风向特征，(d) 未发生湖陆风时的日内风向特征

Fig. 6 Wind speed characteristics during the days with or without lake-land breezes, including (a) the vertical distribution, (b) the near-surface wind speed, (c) the wind direction characteristics during lake-land breezes, and (d) the wind direction characteristics without lake-land breezes.

2.3 湖陆风个例分析

以 2022 年 10 月的一次典型湖陆风事件为例（图 7），揭示研究区湖陆风生消过程。期间气温呈现波动变化特征，气压与相对湿度的变化趋势与气温相反。19 日 11 时至 20 日 10 时无湖陆风发生，主风向为离岸的西南风，近地面风速整体较强，平均风速为 4.7 m/s。20 日 11 时开始，近地面风向由离岸的西北风（300°）转为向岸的东北风（160°），湖风开始出现，平均风速为 0.5 m/s。

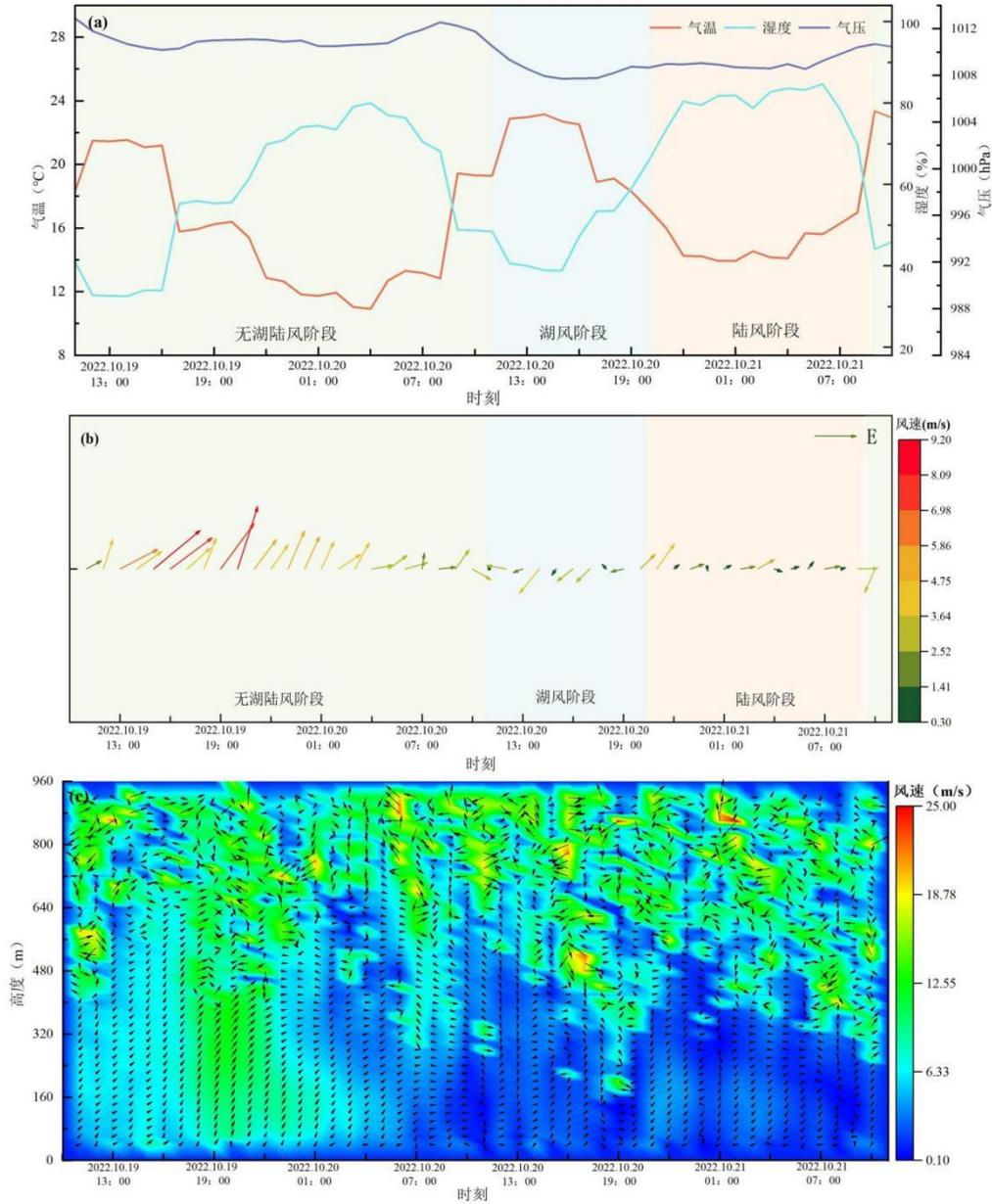


图 7 湖陆风过程气象要素变化：(a) 气温、湿度、气压，(b) 近地面风速风向，(c) 不同高度风速风向
Fig. 7 Temporal changes in meteorological parameters during a lake-land breeze event, including (a) temperature, humidity and air pressure, (b) near-surface wind speed and direction, and (c) vertically resolved wind speed and direction.

湖风发展高度在 11 时前后仅为 100 m, 12 时前后达 260 m, 14 时达到峰值 440 m, 此时气温也达到当日最高值 (23.2 °C)。此后湖风高度不断下降, 19 时下降为 140 m。20 时开始, 近地面风向转换为离岸的西南风 (230°), 即由湖风转换为陆风, 该时刻风速为 3 m/s。初始时陆风高度为 320 m, 随后不断升高。21 日 0 时前后达到陆风发展高度的峰值 760 m, 此时气温也降至最低 (13.9 °C)。此后陆风高度不断下降, 仅在 5 时前后出现了一定的上升 (640 m)。至 21 日 9 时, 近地面风向为西北风 (270°), 风速为 2.9 m/s, 10 时风向再次转为东北风 (25°), 即陆风结束。该时段内湖风持续时间为 9 小时, 陆风为 14 小时, 湖风发展高度的峰值小于陆风; 此外, 湖陆风发生期间, 近地面相对湿度与前一日相比整体偏高。

3 讨论

3.1 风速风向概况

研究区夏季近地面风速最小, 冬春季次之, 秋季风速最大, 这与当地的地形条件密切相关。9 月至次年 5 月冷空气南下, 经湖区北部庐山与鄱阳湖湖口段狭长水域后形成狭管效应, 推动风速的增强^[30]。同时, 本研究运用风廓线雷达设备进一步揭示了垂直风速风向变化规律、有无湖陆风日和不同季节的风廓线特征, 与以往同类型研究相比^[4,28,36]有一定创新。本文发现夏季风速廓线指数最大, 春季、冬季次之, 秋季最小。秋季天气系统相对稳定, 大气层结较均匀, 风廓线指数小; 夏季太阳辐射强, 对流和强风天气多, 垂直风速差异显著。朱诚等^[30]发现夏季鄱阳湖老爷庙水域多发生短时强对流天气, 使水流加速和风向突变, 对船舶航行存在隐患。同时, 湖陆风作为一种的局地环流系统, 对近地面风场的影响较大, 但其影响程度随高度升高而减弱, 故有湖陆风日风廓线指数大, 无湖陆风日则更接近大气边界层的典型特征。

3.2 湖陆风现象的形成与活动规律

研究时段内, 鄱阳湖湖陆风发生频率为 14.3%, 两年内的发生频次分别为 15.6%、13.0%, 而麦子等^[40]统计发现 2010–2015 年鄱阳湖湖陆风的发生频率为 19%。2022 年鄱阳湖发生极端干旱事件, 水位下降导致湖泊热容降低, 成为湖陆风形成的限制因素, 但整体结果较为相近。湖泊深度是湖陆风形成和发展的重要因素, 深水湖泊热容较大, 湖陆热力差异显著。如表 2 所示, 密歇根湖 (深度 84 m)^[11]与安大略湖 (深度 85 m)^[12]湖陆风发生频率分别为 40.6%与 30%, 与本文相比更高。尤福拉湖 (7 m)^[13]与鄱阳湖 (5.1 m) 水深接近, 湖陆风发生频率 (11%) 与本文相似。虽然温尼伯湖^[13]的深度 (12 m) 与面积 (24514 km²) 均超过鄱阳湖, 但因其位于中高纬度 (52°07'N), 太阳辐射较弱, 因此湖陆风发生频率 (7%) 较低。

个例分析中, 鄱阳湖的湖风与陆风于 14 时和 0 时达到峰值。曹渐华等^[4]利用常规气象观测站的监测数据分析表明, 鄱阳湖最强湖风和陆风分别出现于正午和凌晨前后; Cheng 等^[42]利用 WRF 模式模拟揭示了湖风环流在正午前后强度最大, 这与本研究结果一致。Lyons 等^[43]分析表明, 芝加哥湖夏季湖风最大发展高度为 1000 m; Oliphant 等^[44]发现澳大利亚 Tiwi 岛海风最大高度为 1200 m; Stivari 等^[45]模拟揭示了伊泰普湖能维持高度为 1500 m 的湖风。上述密歇根湖、伊泰普湖的湖水深度相对较大, 且 Tiwi 岛地处低纬度热带地区, 热力差异大。鄱阳湖水体较浅, 且地处北温带, 湖陆风发展高度偏低; 作为典型浅水湖泊, 太湖平均水深仅为 2 m, 湖陆风高度在 400–550 m 之间^[16,27], 平均持续时间较短 (3.5 h)。

鄱阳湖夏季湖陆风发生频次最多, 冬季最少。为探究这一湖陆风季节变化规律的成因, 通过在鄱阳湖边界外建立 10km 缓冲区作为陆地区域, 利用遥感温度数据定量揭示其与湖泊区域不同季节湖陆热力差异。同时在计算过程中将庐山部分的数据剔除, 以排除由地形地势条件带来的局地温度变化。其中, 夏季日间与夜间的湖陆温差为 2.12 ± 1.81 °C 和 1.02 ± 1.16 °C, 冬季分别为 0.78 ± 1.43 °C 和 0.27 ± 1.29 °C (图 8)。鄱阳湖夏季时湖泊水位和水量达到最大, 水体比热容更大, 湖陆热力性质差异较为显著, 湖陆风发生频次最高; 冬季的太阳辐射和湖泊热容均显著降低, 湖陆风发生频次随之减少。作为同属于长江

中下游的典型湖泊，洞庭湖^[46-47]的湖陆风现象也在夏季更为明显。纵观北半球其它湖泊，博斯腾湖^[48]夏季湖风的持续时间长于冬季；密歇根湖^[11]5-8月湖风的势力更强；衡水湖^[17]夏季湖风的移动速度快于冬季，陆风情况相反，且衡水湖春夏秋三个季节湖风的起始时间均早于冬季。这与本文揭示的规律相一致。

表 2 不同湖泊的湖陆风特征对比

Table 2 Characteristics of lake-land breezes in different lakes

湖泊名称	纬度	面积(km ²)	深度(m)	频率(%)	持续时间(h)	参考文献
密歇根湖	41°47'-43°06'N	58030	84	40.6	7	[11]
安大略湖	43°N	19000	85	30	—	[12]
尤福拉湖	35°16'N	410	7	11	5	[13]
温尼伯湖	52°07'N	24514	12	7	6	[13]
奥基乔比湖	26°56'N	1900	2.7	5-17	4-5	[13]
大盐湖	41°10'N	4400	4.9	6-15	6-11	[14]
太湖	30°50'-31°40'N	2250	2	22.6	3.5	[16]
衡水湖	37°N	75	4-5	20.5	4.8	[17]
鄱阳湖	28°26'-29°46'N	3900	5.1	14	9-13	本文

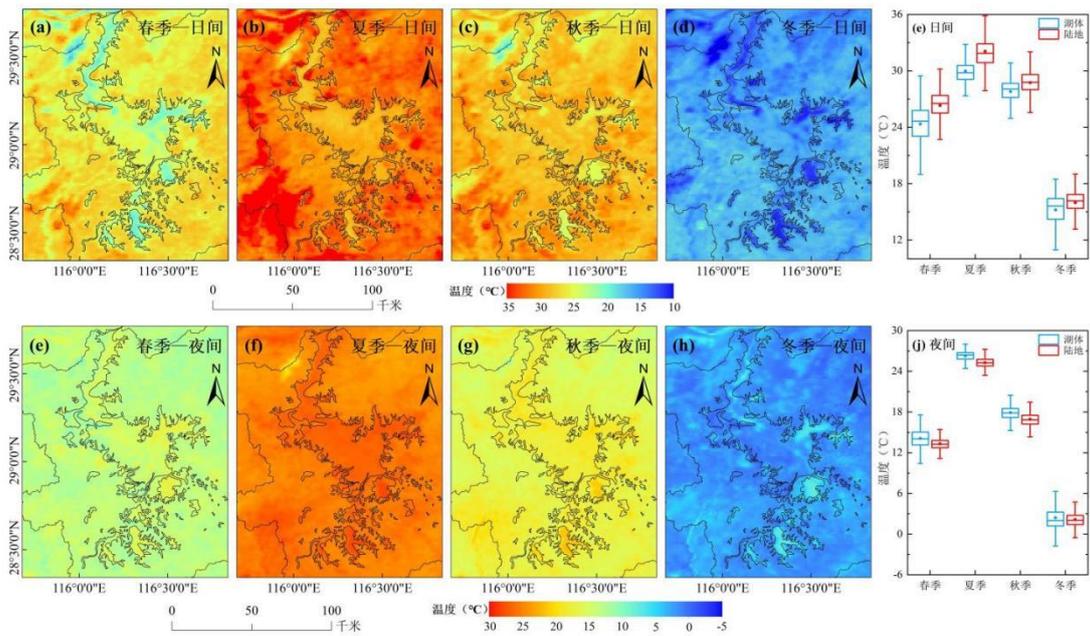


图 8. 不同季节湖陆温差：(a-d) 不同季节白天温度均值，(f-i) 不同季节夜间温度均值，(e) 和 (j) 为温度统计数据。

Fig. 8. Land-water temperature differences in (a-d) daytime and (f-i) nighttime of the four respective seasons. Statistics are shown in (e) and (j).

3.3 研究优势与展望

揭示垂直风速风向特征对于理解区域风场结构和湖陆风特征具有重要意义，但长期观测技术限制，三维观测资料较为匮乏。本文采用的风廓线雷达不仅能够揭示鄱阳湖不同季节以及有无湖陆风日的风速廓

线特征,还可以定量评估湖风和陆风的发展高度。此外, Yang 等^[17]在衡水湖湖陆风分析中,观测站点与湖岸的距离范围为 12–69 km;对于鄱阳湖的湖陆风研究,曹渐华等^[4]选取的多个站点(湖口、进贤)离主湖体相对较远(约 50 km),麦子等^[40]选取的观测站点与湖岸间的距离分别为 4 km 和 10 km;而本文风廓线雷达设备与湖岸距离较近,丰水时期仅相距约 50 m,且临近主湖体和主航道,在湖陆风活动规律和发展过程研究中有较大优势。未来将进一步结合鄱阳湖地区多站点不同空间尺度的观测信息,利用区域气候模式模拟和遥感等方法^[49],继续探究鄱阳湖的风场结构,深入分析湖陆风现象的活动规律及形成机制。

4 研究结论

(1) 鄱阳湖白天近地面风速高于夜间,日内风速变化趋势基本一致。夏季近地面风速最小,秋季最大。各季节垂直风廓线指数大小关系为夏季(0.41) > 春季(0.29) > 冬季(0.26) > 秋季(0.23)。夏季主风向为东北风,其余季节均为西南风。

(2) 观测时段内共发生 104 次湖陆风事件,占比 14.3%,两年内湖陆风分别发生 57 次和 47 次。夏季湖陆风发生频次最多(38 次),冬季最少(20 次)。春夏季湖风起始时间较早,持续时间长于秋冬季,但陆风起始时间晚,持续时间短于秋冬季。湖陆风日近地面平均风速整体低于无湖陆风日,且垂直风速差异更为显著,有无湖陆风日的风廓线指数分别为 0.57 和 0.31。

(3) 2022 年 10 月的一次典型的湖陆风事件表明,湖风在午后 14 时前后达到峰值,高度可达 440 m;陆风在凌晨 0 时前后达到峰值,高度可达 760 m。湖风和陆风发展高度峰值的出现时刻与当日的最高和最低温时刻相一致。湖陆风发生期间,近地面相对湿度与前一日相比整体偏高。

致谢:感谢南京林业大学生态与环境学院胡诚老师、河北师范大学地理科学学院李夫星老师提供的宝贵修改建议!感谢鄱阳湖湖泊湿地综合研究站刘贺在仪器维护方面提供的支持!

5 参考文献

- [1] Long Z, Perrie W, Gyakum *et al.* Northern Lake Impacts on Local Seasonal Climate. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, **8**(4): 881-896.
- [2] Zou HB, Tian MX, Huang AN *et al.* A strong short-duration convection near Lake Poyang in daytime of warm season. *The Science of the total environment*, 2023, 8911: 64659.
- [3] Huang XL, Li GP. Effects of Thermal Forcing on the local circulation. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **19**(04): 488-495. [黄先伦, 李国平. 热力强迫对局地环流的扰动作用. *应用气象学报*, 2008, **19**(04): 488-495.]
- [4] Cao JH, Liu XM, Li GP *et al.* Analysis of the Phenomenon of lake-land breeze in Lake Poyang area. *Plateau Meteorology*, 2015, **34**(2): 426-435. [曹渐华, 刘熙明, 李国平等. 鄱阳湖地区湖陆风特征及成因分析. *高原气象*, 2015, **34**(2): 426-435.]
- [5] Zhang YS, Han CB, Ma YM *et al.* Influence of Lake Breezes on the Triggering of Moist Convection on the Tibetan Plateau: A Large-Eddy Simulation Study. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2024, **81**(6): 983-998.
- [6] Yin CQ, Wang TJ, Shi CE *et al.* Analysis on wind characteristics at typical sites over Chaohu lake basin. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, **35**(2): 249-256. [殷长秦, 王体健, 石春娥等. 巢湖流域典型站点的风场特征分析. *大气科学学报*, 2012, **35**(2): 249-256.]
- [7] Zhang M, Zhang Y, Li KP *et al.* Distribution characteristics of ozone and associated meteorological factors in Chibi, Hubei. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(11): 18-24. [张咪, 张宇, 李坤鹏等. 赤壁市臭氧污染特征及气象影响因素分析. *环境科学与技术*, 2021, **44**(11): 18-24.]
- [8] Sills D M L, Brook J R, Levy I *et al.* Lake breezes in the southern Great Lakes region and their influence during BAQS-Met 2007.

- Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(237): 7955-7973.
- [9] Mariani Z, Dehghan A, Paul J *et al.* Observations of Lake-Breeze Events During the Toronto 2015 Pan-American Games. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, **166**(1):113-135.
- [10] Zhang YS, Han CB, Ma YM *et al.* Influence of Lake Breezes on the Triggering of Moist Convection on the Tibetan Plateau: A Large-Eddy Simulation Study. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2024, **81**(6): 983-998.
- [11] Larid NF, Kristovich DAR, Liang XZ *et al.* Lake michigan lake breezes: climatology, local forcing, and synoptic environment. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, **40**(3): 409-424.
- [12] Comer NT, Mckendry IG. Observations and numerical modelling of Lake Ontario breezes. *Atmosphere-Ocean*, 1993, **31**(4): 481-499.
- [13] Segal M, Leuthold M, Arritt RW *et al.* Small lake daytime breezes: Some observational and conceptual evaluations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, **78**(6): 1135-1147.
- [14] Zumpfe DE, Horel JD. Lake-Breeze Fronts in the Salt Lake Valley. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, **46**(2): 196-211.
- [15] Zhang X, Yang J, Gao Y. Characteristics and numerical simulation of the lake/land breeze in Bosten lake area. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(1): 165-178. [张茜, 杨军, 高雅. 博斯腾湖的湖陆风特征及其数值模拟研究. 高原气象, 2019, **38**(1): 165-178.]
- [16] Wang YW, Gao YQ, Qin HR *et al.* Spatiotemporal characteristics of lake breezes over Lake Taihu, China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, **56**(7): 2053-2065.
- [17] Yang T, Li HY, Cao J *et al.* Investigating the climatology of North China's urban inland lake based on six years of observations. *The Science of the total environment*, 2022, 826:154120.
- [18] Biggs WG, Graves ME. A lake breeze index. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1962, **1**(4): 474-480.
- [19] Yang JB, Liu HN, Fei S *et al.* The impact of urbanization on the urban heat island in Suzhou under the influence of Taihu lake-land breeze. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2013, **33**(5): 473-484. [杨健博, 刘红年, 费松等. 太湖湖陆风背景下的苏州城市化对城市热岛特征的影响. 气象科学, 2013, **33**(5): 473-484.]
- [20] Cheng YT, Carlos BK, Yu T *et al.* Where and how to cool through blue infrastructure? Large lake groups to ameliorate urban overheating in a typical inland multi-lake megacity. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104869.
- [21] Wang JL, Qian Y, William P *et al.* Contrasting effects of lake breeze and urbanization on heat stress in Chicago metropolitan area. *Urban Climate*, 2023, 48: 10149.
- [22] Hu H, Chen JX, Yu L *et al.* Study on formation and transformation characteristics of water-land wind in Wuhan city. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2018, **10**(05): 521-526. [胡辉, 陈佳欣, 余玲等. 武汉城市区域水陆风环流的形成与转化特征研究. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, **10**(5): 521-526.]
- [23] Wang F, Wang YW, Gao S *et al.* Simulation analysis of the influence of lake-land breeze circulation on high ozone concentration events. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5):1392-1401. [王凡, 王咏薇, 高嵩等. 湖陆风环流对于臭氧高浓度事件影响的模拟分析. 环境科学学报, 2019, **39**(5):1392-1401.]
- [24] Yang YW, Song XQ, Lian WC *et al.* Characteristics of sea-land breeze in Huludao during Spring, 2021 and its impact on ozone pollution. *Acta Optica Sinica*, 2023, **43**(12): 222-231. [杨雅雯, 宋小全, 廉文超等. 2021年春季葫芦岛海陆风特征及对臭氧污染影响. 光学学报, 2023, **43**(12): 222-231.]
- [25] Xu MM, Shao SY, Liu Q *et al.* Influences of sea and land winds on atmospheric turbulence under complex terrain. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(12): 14-21. [许满满, 邵士勇, 刘庆等. 复杂地形下海陆风对大气湍流的影响. 光学学报, 2020, **40**(12): 14-21.]
- [26] 何金海, 郭品文, 银燕等. 大气科学概论. 北京: 气象出版社, 2012.
- [27] Qin HR, Liu SD, Wang YW. Analysis of a lake Taihu breeze case. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(20): 193-200. [覃海润, 刘寿东, 王咏薇. 太湖湖风个例分析. 科学技术与工程, 2015, **15**(20): 193-200.]
- [28] 谭国良, 郭生练, 王俊等. 鄱阳湖生态经济区水文水资源演变规律研究. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [29] Yao J, Zhang Q, Li YL *et al.* The influence of uniform winds on hydrodynamics of Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2016,

- 28(1):225-236. [姚静, 张奇, 李云良等. 定常风对鄱阳湖水动力的影响. 湖泊科学, 2016, 28(1):225-236.]
- [30] Zhu C, Zhang Q, Chen X *et al.* Environmental characteristics of Laoyemiao water area and causes of shipwreck in Lake Poyang. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 30(6):198-208. [朱诚, 张奇, 陈星等. 江西鄱阳湖老爷庙水域环境特征与沉船事件的成因研究. 自然灾害学报, 2017, 30(6):198-208.]
- [31] Zou HB, Tian MX, Huang HA *et al.* A strong short-duration convection near Lake Poyang in daytime of warm season. *The Science of the total environment*, 2023, 891: 164659.
- [32] Tian BQ, Gao P, Mu X M *et al.* Water Area Variation and River-Lake Interactions in the Lake Poyang from 1977 - 2021. *Remote Sensing*, 2023, 15(3): 600-600.
- [33] Peng YJ, Chen G, Chao NF *et al.* Detection of extreme hydrological droughts in the Lake Poyang basin during 2021-2022 using GNSS-derived daily terrestrial water storage anomalies. *The Science of the total environment*, 2024, 919:170875.
- [34] Cao SJ, Li YL, Chen J *et al.* Influence of extreme drought in 2022 groundwater hydrological regime in the Lake Poyang floodplain area. *China Environmental Science*, 2023, 43(12): 6601-6610. [曹思佳, 李云良, 陈静等. 2022年鄱阳湖极端干旱对洪泛区地下水文情势的影响. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6601-6610.]
- [35] Xiong B, Zhuo YQ, Xu CY *et al.* Analysis on the evolution and driving mechanism of low flow regime form 1956 to 2022 in Lake Poyang, China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(3): 313-324. [熊斌, 卓云强, 许崇育等. 1956—2022年鄱阳湖枯水情势演变及驱动机制分析. 水利学报, 2024, 55(3): 313-324.]
- [36] Liu L, Zeng FX, Fu ZQ *et al.* Research on technology of concrete construction and large equipment installation for underground nuclear power plants. *Yangtze River*, 2016, 47(3):30-32+66. [刘恋, 曾繁翔, 付志强等. 鄱阳湖星子站水位62年变化规律分析. 人民长江, 2016, 47(3):30-32+66.]
- [37] 纪伟涛. 鄱阳湖—地形·水文·植被. 北京: 科学出版社, 2017.
- [38] Pang YC, Gao T, Li XF *et al.* Applicability of the generalized wind profile model over mountainous forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(3):577-586. [庞云超, 高添, 李秀芬等. 通用风速廓线模型在山区森林的适用性. 应用生态学报, 2024, 35(3):577-586.]
- [39] Giovannini L, Laiti L, Zardi D *et al.* Climatological characteristics of the Ora del Garda wind in the Alps. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(14): 4103-4115.
- [40] 麦子. 鄱阳湖湖陆风的观测研究和数值模拟. 北京: 中国气象科学研究院, 2016, 7-21.
- [41] Potes M, Salgado R, Costa J M *et al.* Lake-atmosphere interactions at Alqueva reservoir: a case study in the summer of 2014. *Tellus: Series A, Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2017, 69(1): 1272787.
- [42] Cheng YT, Carlos KB, Tian Y *et al.* How to use lake breeze circulations to improve urban natural ventilation: A case study in a typical inland multi-lake megacity. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 230: 104628.
- [43] Lyons WA. The climatology and prediction of the Chicago Lake Breeze[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(8): 1295-1270.
- [44] Oliphant JA, Sturman PA, Tapper JN. The evolution and structure of a tropical island sea/land-breeze system, northern Australia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2001, 78(1-2): 45-59.
- [45] Stivari SMS, Oliveira APD, Karam HA *et al.* Patterns of local circulation in the Itaipu Lake Area: numerical simulations of lake breeze. *Journal of Applied Meteorology*, 2003, 42(1): 37-50.
- [46] Lin BY, Li MX. Characteristic feature of the lake-land breeze and its effect on precipitation over the Dongting lake. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1988, 11(1): 78-88. [林必元, 李敏娴. 洞庭湖湖陆风特征与降水. 南京气象学院学报, 1988, 11(1): 78-88.]
- [47] Li LF. Primary study on the effects and its decline of Dongting lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1987, 9(3): 34-38. [李连方. 洞庭湖湖泊效应及其效应衰减初探. 海洋湖沼通报, 1987, 9(3): 34-38.]
- [48] Wang R, Du Y. The climate and wind difference between the land and lake areas in the Bostan lake basin. *Arid Land Geography*, 1994, 17(3): 90-94. [王容, 杜勇. 波斯腾湖流域气候及湖陆风. 干旱区地理, 1994, 17(3): 90-94.]

- [49] Guo YF, Bao YX, Shen LH *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics and simulation analysis of Subaerial ozone in Suzhou city. *Environmental Science & Technology*, 2022, **45**(7): 66-77. [郭云飞, 包云轩, 沈利洪等. 苏州市近地面臭氧时空分布特征及模拟分析. *环境科学与技术*, 2022, **45**(7): 66-77.]