东洞庭湖湖陆风特征分析

杨伟　刘擎　王威　张巧明　方阳
（湖南省岳阳市气象局，岳阳 414000）

摘要： 采用岳阳国家气候观象台（简称岳阳站）资料分析东洞庭湖的湖陆风日变化和季节变化特征，结合临湘与华容国家气象站、区域自动气象站资料分析2017年8月4—23日湖区气温、湖陆风、相对湿度的时空四维变化特征，结果表明：岳阳站湖陆风昼夜交替，夏季最强、冬季最弱；湖风强弱主要与南、北风频率相关，城市热岛强弱主要和湖、陆风相关。湖（水）面反光增温效应使湖区一定时空内气温升高，湖面上空气温在中午前后随高度降幅大，夜晚逆温明显；岳阳城市热岛效应明显，以傍晚前后最为突出。受东部丘陵山脉大地形影响，夏季东洞庭湖东北部出现明显的实际湖陆风，西南部主要表现为风速大小的日周期性变化，湖陆风与城市热岛、山谷风存在叠加效应，近距离水体、山丘、建筑物、树木植被等对测站风、气温与湿度等作用明显；实际湖陆风随高度先增大后减小，200 m高度仍存在明显的湖陆风。湖心相对湿度随高度递减明显，湖陆风使岳阳站空气湿度变化显著。

关键词： 东洞庭湖，湖陆风，湖心，湖面反光增温效应，城市热岛效应，时空四维特征

DOI： 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.017

Analysis of Land-lake Breeze Characteristics of the East Dongting Lake

Yang Wei, Liu Qing, Wang Wei, Zhang Qiaoming, Fang Yang
(Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000)

Abstract: Based on the data of Yueyang National Climate Observatory, the diurnal and seasonal variations of land and lake winds along the east coast of East Dongting Lake from June 2017 to May 2019 were analyzed. Based on the data of Linxiang, Huarong national meteorological station, regional meteorological station, the temporal and spatial four-dimensional variation characteristics of temperature, land-lake breeze and relative humidity in Dongting Lake from 4 to 23 August 2017 were analyzed. The results show that: the lake-land breeze at Yueyang Station alternates day and night, with the strongest in summer and the weakest in winter. The lake wind is positively correlated with the warm and wet air currents , while the urban heat island is positively correlated with the land-lake breeze. Reflecting sunlight from the lake surface causes the air to warm up in a certain area near the lake. In the daytime, especially at noon, the lake surface temperature decreases greatly with the altitude. At night, the inversion layer appears. Yueyang urban heat island effect is obvious, especially around the evening. There are obvious actual lake-land breezes in the northeast and diurnal periodic variations of wind speed in the southwest. There is a superposition effect between lake-land breeze and urban heat island and valley breeze. Close water, hills, buildings, trees and vegetation have obvious effects on wind, temperature and humidity of the station. The actual lake-land breeze increases first and then decreases with the height, and obvious lake-land breeze still exists at the height of 200 m. The relative humidity of the lake center decreases obviously with altitude. The Lake breeze makes the air humidity of Yueyang station increase significantly, and the urban land breeze makes the lake center humidity decrease significantly.

Keywords: East Dongting Lake, lake-land breeze, lake center, lake surface reflective warming effect, urban heat island, four-dimensional characteristics of time and space

0　引言

湖陆风是一种呈现明显日变化特征的中小尺度天气现象。湖面与陆地显著的温度差异是湖陆风的成因所在，在湖泊附近陆地，白天受太阳短波辐射增温比湖面快，空气膨胀上升，低层空气自湖面流向陆地，形成湖风；夜间陆地比湖面辐射冷却得快，空气下沉，低层空气自陆地流向湖面，形成陆风，从而出现风向昼夜交替的现象。通常来说，离湖区越近，湖陆风越明显[1]。

中国关于湖陆风的研究多集中在相对较大的内陆

收稿日期：2019 年 7 月 5 日；修回日期：2019 年 12 月 3 日
第一作者：杨伟（1967—），Email：1093420326@qq.com
资助信息：湖南省气象局 2016 年重点科研课题（XQKJ16A003）；湖南省气象局 2018 年预报员专项（XQKJ18C007）；交通运输部建设科技项目（2013318798320）；湖南省交通科技项目（201219）

湖泊地区，李连方[2]、林必元等[3]、刘电英等[4]利用洞庭湖周边典型站点资料分析发现，洞庭湖区湖陆风明显，夏季最明显，湖陆风厚度约为300 m。李维亮等[5]发现长江三角洲城市热岛效应、海陆风与太湖湖陆风相互影响；殷长秦等[6]和于强等[7]对巢湖流域典型站点资料分析发现，湖陆温差是湖陆风现象发生的关键因子；王浩等[8]建立中小尺度数值模式发现，水体对山地的气温和风速影响明显，在湖陆风的上方有返回气流存在；李照国等[9]选用夏季鄂陵湖湖滨地区的晴天资料分析发现，近地层气象要素受湖陆风环流影响较大，辐射各分量具有典型日变化；张茜等[10]对博斯腾湖的湖陆风特征及其数值模拟研究发现，博斯腾湖北侧湖风与中天山南侧谷风叠加效应造成局地环流增强。由于探测场地、环境、能力所限，目前尚缺少对湖陆风全面系统、深入细致的研究，湖陆风与城市热岛叠加影响、气温与湿度差异及其成因等研究较少，湖（水）面反射太阳光到湖面上空充沛的水汽、附近陆地建筑物、植被等物体上导致气温上升现象尚未被发现与重视。

东洞庭湖是洞庭湖湖系中最大的湖泊，为长江中游防汛重要地段。岳阳国家气候观象台（简称岳阳站）北部紧邻岳阳楼，西部即为东洞庭湖，是全国唯一建在大型水体附近、且观测资料时间跨度近百年的气象观测站；东部为岳阳市城区，因此兼具湖区和城市气候特征，为湖陆风、湖泊与城市气候相互影响研究提供了得天独厚的宝贵代表性资料。为开展杭瑞高速洞庭湖大桥建设的气象服务需要，2014年10月湖南省气候中心与岳阳市气象局联合在东洞庭湖出口西侧芦苇滩、西桥塔北侧修建了70 m高测风塔，2017年5—12月又在东桥塔H形南塔顶安装了200 m高测风仪。为水上安全气象服务需要，2016年1月在东洞庭湖东岸修建了七里山船舶、鹿角等10个海事站，并且在湖心灯塔修建了扁山与煤炭湾2个自动气象站。本文利用近年较为丰富详实的探测资料分析湖陆风日变化特征和季节特征，夏季气温、湖陆风、湿度的时空四维特征，发现湖（水）面反光增温效应现象、分析湖陆风与城市热岛的叠加影响与主要相关因素，较好地解释了湖陆风强度、维持时间与江湖附近气温、湿度差异等成因，为湖区气象科学研究、科技服务与防灾减灾提供参考。

1　站点选取和方法介绍

气象站点首选位于东洞庭湖东北岸滨湖的岳阳站（113.05°E，29.23°N，海拔53 m），湖岸线几乎呈南北向，东南方为岳阳市中心城区。另外选取东洞庭湖西北部华容国家一般气象站（112.33°E，29.31°N，海拔31 m，距离湖面33 km），东北部临湘国家一般气象站（113.27°E，29.29°N，海拔60.4 m，距离湖面37 km）。区域自动气象站选取湖区周边南湖站、风雨山、鹿角、漉湖芦苇场水管站（简称漉湖站）、隆庆莲场、良心堡、穆湖铺、七里山船舶站，煤炭湾与扁山湖心灯塔自动气象站（简称煤炭湾站、扁山站），杭瑞高速洞庭湖大桥测风塔（简称测风塔）等（图1）。

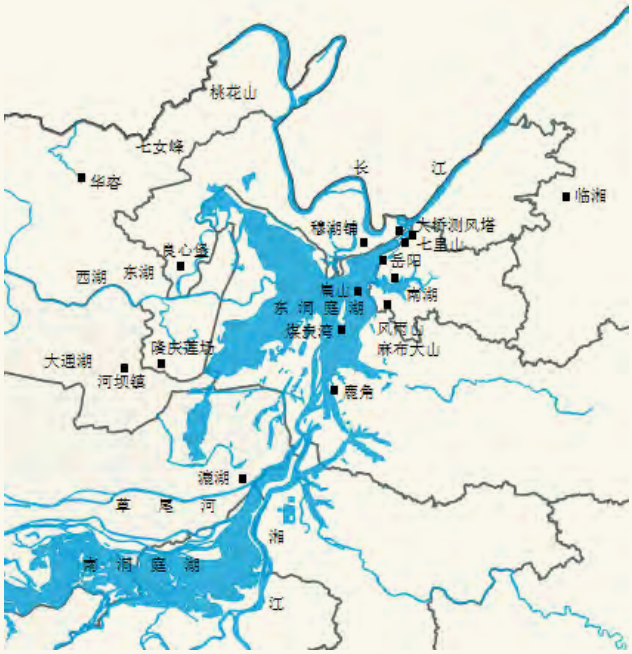

图1　洞庭湖区气象站点分布图
Fig. 1　Distribution map of meteorological stations in Dongting Lake area

采用岳阳站2017年 6 月— 2019年 5 月的逐时观测资料分析湖陆风的日变化特征和季节变化特征。为全方位了解夏季湖陆风时空变化四维特征，通过资料完整性、灵敏性、典型性检查筛选，选取2017年8月3日21时—23日20时多种气象资料，时间步长为每小时一次，测风塔高度梯度为：10 m、30 m、50 m、60 m、70 m（桥西）、200 m（桥东）共6个层次，综合分析研究湖区平均气温、风场、相对湿度等气象要素变化特征及其成因。该时段洞庭湖出口城陵矶水位26.07～28.19 m，能代表东洞庭湖夏季大致情况。

为有效识别湖陆风，首先将各时次的测站风分解为u和v分量，分别代表东西方向和南北方向的风（西风、北风为正值，东风、南风为负值），计算出各站的年（季、月、时段）逐时u、v平均值，之后将24 h的逐时平均值u、v相加求平均获得全日平均值，再用逐时的年（季、月、时段）平均值u和v减去全日平均

值得到逐时距平值。全日平均值可以看作是系统风即背景风，逐时平均值视作实际风，用实际风减去系统风得到距平风（西风、北风为正值，东风、南风为负值），通过分析逐时距平值的日变化特征，就可以了解湖陆风发生规律。

2 湖陆风特征分析

2.1 湖陆风日变化特征

分析岳阳站2017年 6 月—2019年 5 月逐时风资料可知（图2），u的日变化有明显的规律性，09—18时为正距平（西风、湖风），13时最强湖风风速为0.95 m·s^{-1}，19—08时为负距平（东风、陆风），05时最强陆风风速为−0.48 m·s^{-1}，湖风强于陆风；由于u的全日年平均值仅为−0.2 m·s^{-1}，因此实际湖陆风也是相当明显的，湖风持续时间长达8 h。v的日变化也有明显的规律性，13—21时为正距平（北风），16时最强正距平达0.36 m·s^{-1}，22—12时为负距平（南风），07时最强负距平达−0.22 m·s^{-1}，即午后至初夜距平风由城北吹向城南，持续9 h，夜间和上午由城南吹向城北，持续15 h。由于v全日年平均值为0.65 m·s^{-1}，从图可以看出全日实际风均为北风，只是午后更强。这主要是由于岳阳城市中心位于岳阳站东南部，午后在城市热岛效应作用下，岳阳站附近地区气温南高北低形成的。

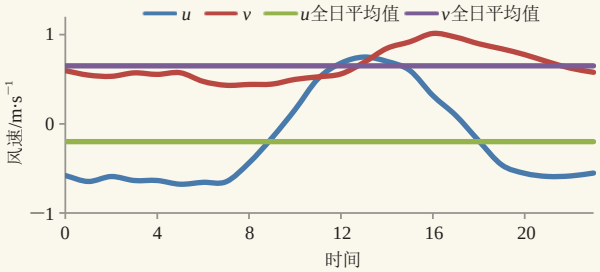

图2 2017年6月—2019年5月岳阳站平均风速逐时变化
Fig. 2 Hourly variation of average wind speed at Yueyang Station from June 2017 to May 2019

2.2 湖陆风季节特征

东洞庭湖水位随季节变化明显，湖水面积冬小夏大，主汛期6—8月最大，因此探讨湖陆风季节特征时采用以下分季方法：春季（3—5月），夏季（6—8月），秋季（9—11月），冬季（12月—次年 2月）。

分析岳阳站2017年6月—2019年5月两年逐时风资料（图3）可知，岳阳站春、夏、秋、冬季四季u全日平均值分别为−0.22、0.26、−0.29、−0.56 m·s^{-1}，日振幅分别为1.71、2.13、1.06、1.07 m·s^{-1}，实际西风持续时间分别为8、10、7、3 h，全日西风正距平（湖风）总和分别为6.55、8.01、3.99、3.42 m·s^{-1}，可见湖陆风夏季最强、冬季最弱。四季v全日平均值分别为0.17、−0.41、1.43、1.43 m·s^{-1}，日振幅分别为0.61、0.95、0.72、0.50 m·s^{-1}，实际北风持续时间分别为20、4、24、24 h，全日北风正距平总和分别为1.67、2.93、1.90、1.26 m·s^{-1}，可见城市热岛效应夏季最强、冬季最弱。

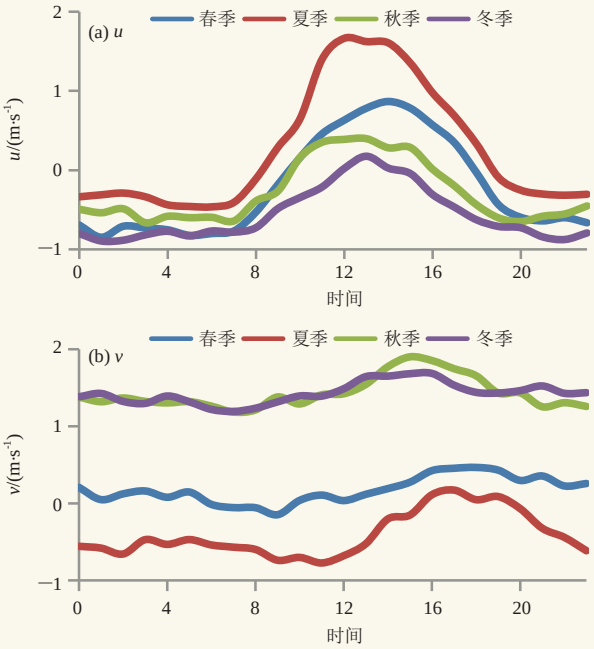

图3 2017年6月—2019年5月岳阳站四季逐时平均风速日变化
Fig. 3 Diurnal variation of hourly average wind speed at Yueyang station from June 2017 to May 2019

从图3可以看出，夏、秋、冬季湖风（西风）在12—13时达到最强，这是因为12—13时城市下班交通高峰、午餐烹调高峰等与太阳辐射叠加形成城市热岛高峰，湖陆温差达到最大所致。春季由于上午降水较多、对流较强，故城市热岛中午高峰较弱； 14—15时上班交通高峰与太阳辐射叠加时城市热岛最强，因此湖风最强。

将2017年 6 月— 2019年 5 月每月15日08时东洞庭湖出口城陵矶水位按季节求算术平均值，得到春、夏、秋、冬四季水位分别为24.39、29.04、25.32、21.7 m。从四季水位数据可以看出，水位高低及湖水面积大小不是湖陆风强弱的主要成因。

计算岳阳站春、夏、秋、冬四季西风（湖风）正距平总和序列6.55、8.01、3.99、3.42 m·s^{-1}与2017年6月—2019年5月16个方位四季的风向频率（图4）序列的相关系数（表1），得出偏南风、偏西风（包括NNW）与湖风强度呈明显正相关，东北风（包括NW）与湖风强度呈明显负相关，即暖、湿系统（气候背景风）越强，湖风越强；冷、干系统越强，湖

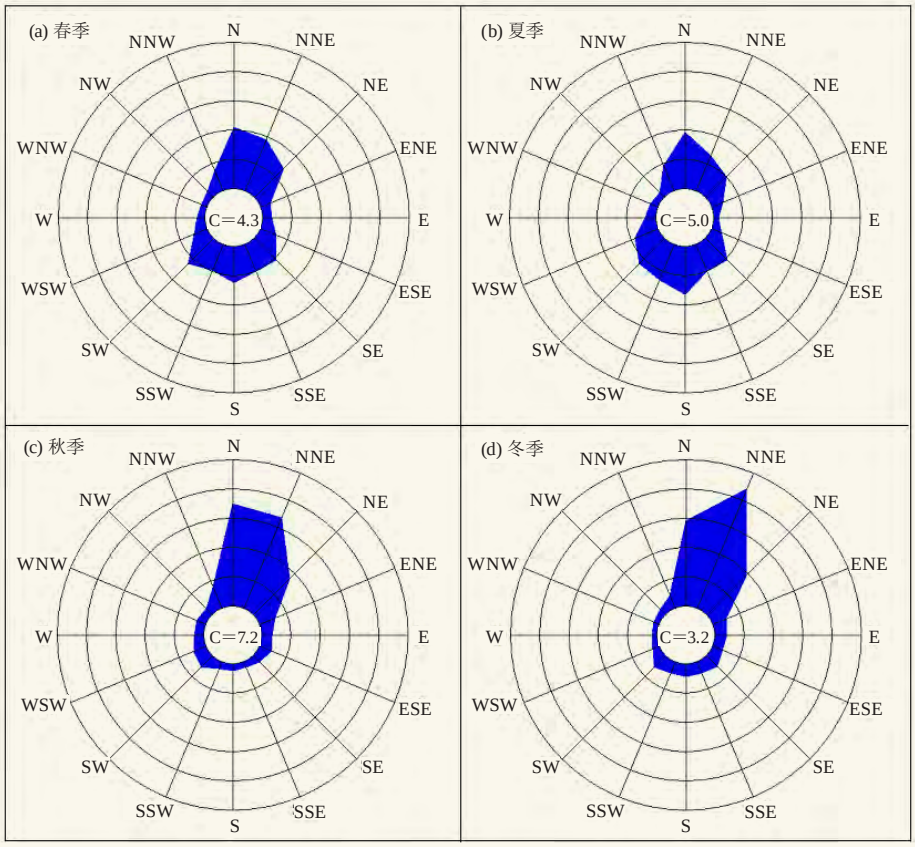

图4 2017年6月—2019年5月岳阳站四季的风向频率玫瑰图（每圈间隔7%）
Fig. 4 Wind direction frequency rose map of the four seasons at Yueyang Station from June 2017 to May 2019 (7% interval per lap)

表1 2017年6月—2019年5月四季湖风（西风正距平）、城市热岛（北风正距平）与16个方位风向频率序列相关系数表
Table 1 Coefficient tables of correlation between four seasons lake wind (westerly positive anomaly), urban heat island (northerly positive anomaly) and 16 azimuth wind direction frequency series from June 2017 to May 2019

种类	16方位风向相关系数								
湖风	风向	SSW	S	SW	SSE	WSW	SE	NNW	W
	相关系数	0.97	0.97	0.95	0.91	0.90	0.90	0.80	0.72
	风向	ESE	WNW	NW	ENE	N	E	NNE	NE
	相关系数	0.10	−0.02	−0.42	−0.84	−0.89	−0.92	−0.98	−0.99
城市热岛	风向	WSW	W	NNW	SSW	S	SW	WNW	SSE
	相关系数	0.98	0.91	0.91	0.73	0.69	0.58	0.52	0.51
	风向	SE	ESE	ENE	N	NW	NNE	NE	E
	相关系数	0.46	−0.36	−0.36	−0.51	−0.66	−0.78	−0.88	−0.97

风越弱，并且系统冷暖（南北风频率）起主导作用。计算岳阳站四季北风正距平总和序列1.67、2.93、1.90、1.26 $m\cdot s^{-1}$与2017年6月—2019年5月16个方位四季的风向频率序列的相关系数，得出偏西风（包括NNW）、偏南风与城市热岛强度呈明显正相关，东部陆地刮来的东风（包括NW）、北偏东风与城市热岛强度呈明显负相关，因此湿、暖系统越强，城市热岛越强；干、冷系统越强，城市热岛越弱，并且系统干湿（湖陆风频率）起主导作用。同时可以看出岳阳城市热岛与湖风强度呈现明显的正相关。

3 夏季湖陆风特征

3.1 气温

3.1.1 水平分布特征

分析2017年8月4—23日逐时平均气温日变化（图5）可知：煤炭湾与扁山湖心灯塔站日平均最低气温为27.7 ℃、27.8 ℃，分别出现在07、06时；滨湖岳阳站、南湖站日平均最低气温为28.0 ℃、27.8 ℃，略高

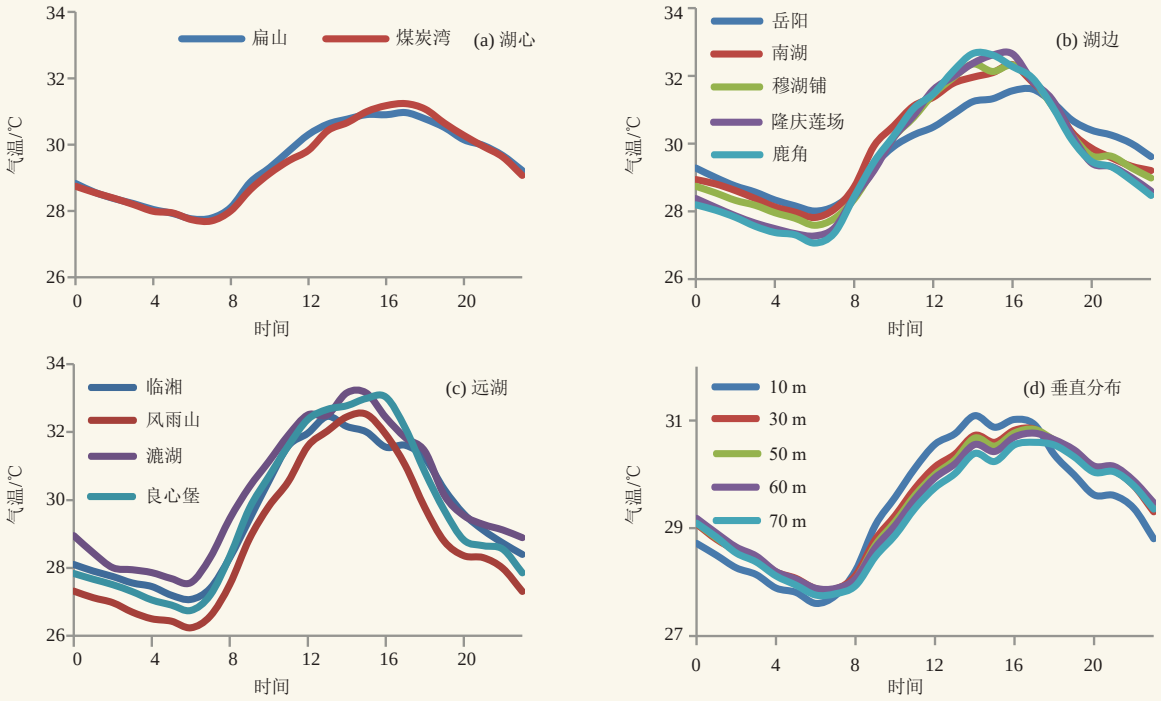

图5 2017年8月4—23日东洞庭湖区逐时气温分布图

Fig. 5 Hourly temperature distribution of East Dongting Lake area during 4 August to 23 August 2017

于湖心，其他各站均低于湖心，风雨山、良心堡日平均最低气温分别为26.2 ℃、26.7 ℃，比湖心低1℃以上，湖边及较远地区最低气温均出现在06时。煤炭湾与扁山站日平均最高气温为31.2 ℃、31.0 ℃，均出现在17时；受白天湖风影响，岳阳站最高气温31.6 ℃，略高于湖心；其他湖边站及较远地区最高气温均出现在16时以前，达32 ℃以上。总而言之，湖心气温日较差小于周边陆地。

3.1.2 垂直分布特征

从测风塔气温资料（图5）可知，白天气温随高度降低，中午前后降温幅度最大，12时10 m高度气温比70 m高度高0.8 ℃；夜晚气温则以10 m最低，30～70 m温差很小，并以60 m气温最高，23时60 m气温比10 m高0.7℃。气温随着高度升高而下降的一般规律是：从地面到高空11 km时，每升高1 km气温下降6 ℃，由上述气温昼夜变化可知，湖面上空中午降温幅度明显大于一般规律，夜晚出现明显的逆温层，这表明湖面上空白天为下沉气流，12时左右最强；夜晚为上升气流，23时左右最强。

3.1.3 湖（水）面反光增温效应

湖（水）面如镜，白天太阳光照射在湖（水）面上发生反射作用，反射到湖区上空充沛的水汽、气溶胶上以及周边陆地建筑物、树木植被、丘陵山脉等，使得一定时空范围内气温升高，以早晨和傍晚最明显。从图6可以看出，岳阳站西部湖面反光明显，且2019年7月21日16：56的反射强度明显强于16：29。例如2017年8月4—23日08—09时东洞庭湖与悦来湖西部良心堡站平均气温升高1.4 ℃，而东岸的岳阳站、七里山船舶站升温仅0.8、0.7 ℃，傍晚16—17时岳阳站、七里山船舶站气温升高0.05 ℃，而良心堡站气温下降0.9 ℃。湖心最高气温出现时间明显晚于陆地，也主要是傍晚强盛的湖面反光增温效应和湖陆风锋面向湖面移动的叠加影响所致。

岳阳、扁山、煤炭湾、临湘站2018年1月、4月逐时气温分布如图7所示，1月午后最高气温从高到低依次为临湘6.24 ℃、煤炭湾5.59 ℃、岳阳5.57 ℃、扁山5.33 ℃，傍晚17—18时气温降幅大小依次为临湘0.65 ℃、岳阳0.49 ℃、煤炭湾0.24 ℃、扁山0.19 ℃。临湘站位于丘陵山区，气温日较差最大、傍晚降幅最大；该时段岳阳站主导风向为NNE，其次为N、NE，在主导风向控制下，湖面反光增温效应与湖风对岳阳站影响较小，因此岳阳站气温日较差与傍晚降幅较大；扁山站位于湖心岛灯塔上，四周为宽广湖面，因此气温日较差最小，傍晚受湖面反光增温效应影响，气温下降缓慢、降幅最小；该时期东洞庭湖出口城陵矶水位维持在20～21.5 m，湖区露出大面积泥涂、沙洲，煤炭湾站位于沙洲上，东侧为湖面，西侧为大面积泥涂区，同时受水面、沙洲与泥涂等影响，因此气

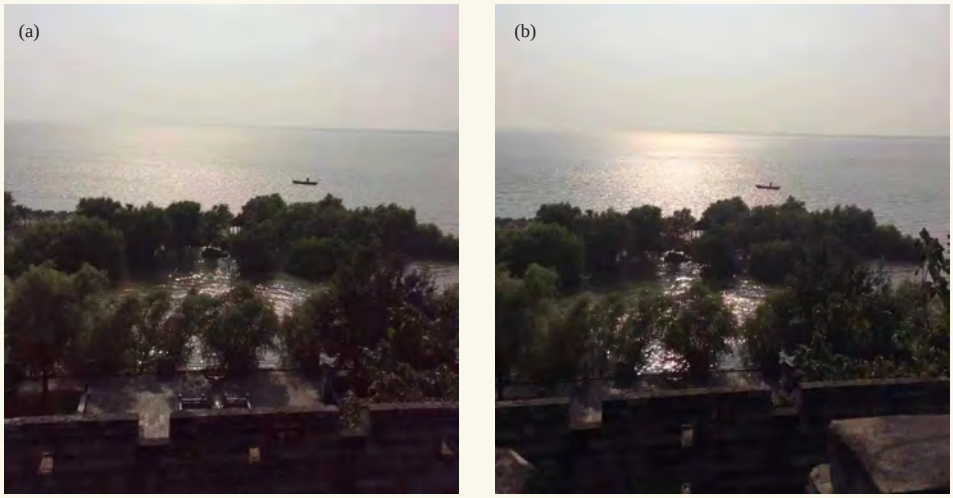

图6 2019年7月21日岳阳站西边东洞庭湖实景
（a）16：29；（b）16：56
Fig. 6 The scene of East Dongting Lake in the west of Yueyang Station on 21 July 2019
(a) 16:29; (b) 16:56

温日较差、傍晚降幅大于扁山站。岳阳、扁山、煤炭湾3站20—21时气温略有上升，是因为该月20—21时有十多次强弱不同的日周期性暖锋影响（其他要素亦然）。4月东洞庭湖区偏南风已占主导地位，城陵矶水位大部分时候在22～24 m，湖区沙洲基本淹没，泥涂面积减小、湿度增大。东南风致使岳阳站、扁山站受城市热岛效应影响，早晨前后气温较高；西南风致使湖风吹向岳阳站，下午到傍晚岳阳、扁山、煤炭湾三站环境背景与湖面反光增温效应基本一致，因此气温差别很小。

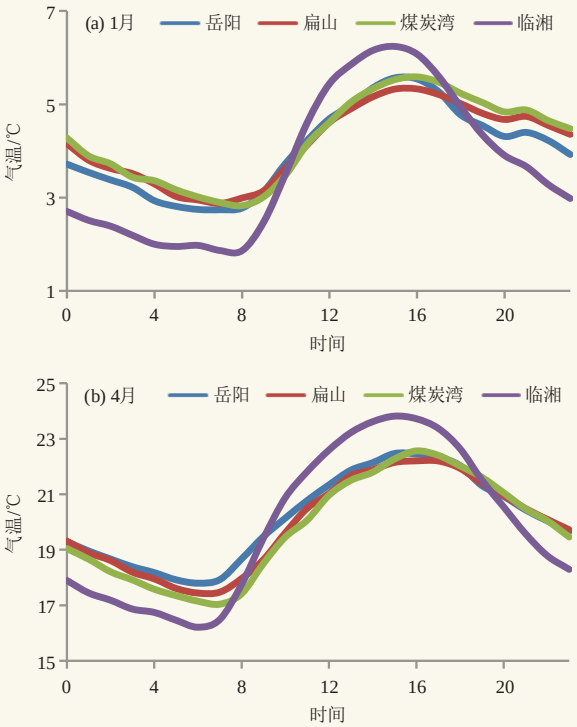

图7 2018年1月、4月东洞庭湖区逐时气温演变图
Fig. 7 Hourly temperature distribution map of East Dongting Lake area in January and April 2018

3.2 湖陆风

分析2017年8月4—23日东洞庭湖东、西、南、北、湖心以及测风塔不同高度逐时平均风向风速日变化，得到以下结果。

3.2.1 东部

湖区东部岳阳、鹿角、南湖、临湘站逐时平均风速日变化如图8所示，4站逐时平均u的日振幅分别为2.38、1.22、1.66、0.94 m·s^{-1}，全日平均值为0.20、−0.23、0.49、0.46 m·s^{-1}，正距平时段为10—18、09—17、08—17、11—17时，西风正距平（湖风）总和分别为8.08、4.18、4.6、2.33 m·s^{-1}。可见日变化有明显的规律性，u分量白天为正距平西风，由湖面吹向陆地；夜间和清晨为负距平东风，由陆地吹向湖面，岳阳站湖陆风最强、南湖次之，随着与湖面距离的增加，湖陆风逐渐减弱，但持续时间更长，从图8可以看出实际湖陆风也是相当显著的。

4站逐时平均v的日振幅分别为1.09、0.99、1.20、1.40 m·s^{-1}，全日平均值为−1.33、−0.85、−0.75、−1.06 m·s^{-1}，正距平时段为14—21、15—22、14—22、17—07时（04时除外），北风正距平总和分别为3.26、2.19、3.39、3.85 m·s^{-1}。v分量正距平北风持续时间以岳阳、鹿角8 h最短、临湘14 h最长，振幅、北风正距平总和以临湘最大、鹿角最小。临湘站北部为丘陵、南部为城区，南北风转换是山谷风与城市热岛效应相叠加形成的；岳阳站西部为东洞庭湖，东北

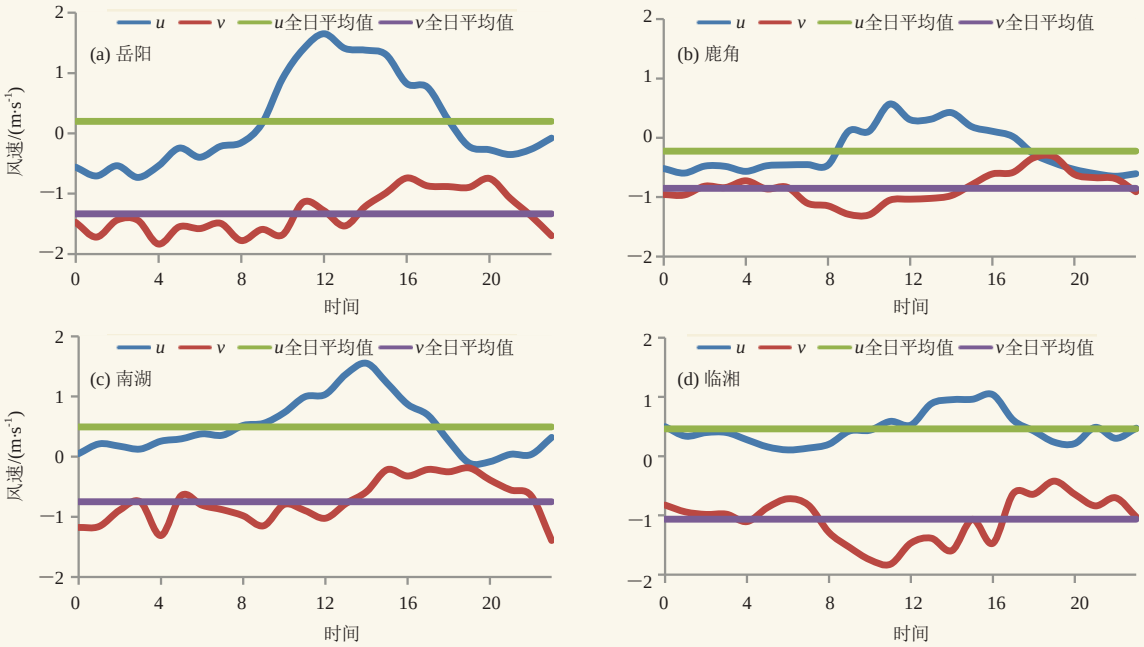

图8 2017年8月4—23日东洞庭湖东部逐时平均风速日变化

Fig. 8 Diurnal variation of hourly average wind speed in eastern Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

部为岳阳楼景区以及郊区，东南部为城市中心、较远处为南湖和南部丘陵山区，南北风转换主要是城市热岛效应、南湖下午到傍晚反光增温效应叠加形成的，因此北风正距平较大值从下午16时持续到20时；南湖站位于岳阳市区南部边缘、南部为南湖，稍远为丘陵山区，南北风转换主要是南湖湖陆风、山谷风与南湖下午到傍晚反光增温效应叠加形成的，与岳阳站相似但正距平较大值位相提前约1 h；因为该站南部受东南—西北向的龙山等山脉阻挡，故南风风速较小。鹿角镇呈向东洞庭湖突出的鹿角状，鹿角站东南部百余米有较大池塘、西南部距离洞庭湖水体仅百余米，南北风转换主要是湖陆风效应和湖（水）面反光增温效应叠加形成的；鹿角站位于岳阳县地方海事处院内，受建筑物与树木遮挡影响较大，因此风速较小。从图8可以看出，上述4站实际上都吹南风，南北风距平转换实际表现为南风风速大小的日周期性变化。

3.2.2 西部

湖区西部良心堡站逐时平均风速日变化如图9所示，逐时平均u的日振幅为0.85 m·s^{-1}，全日平均值为−0.60 m·s^{-1}，负距平时段为09—16时，风速总和为1.96 m·s^{-1}，实际东风持续时间24 h。可见u分量白天为负距平东风，由湖面吹向西部陆地；夜晚到清晨为正距平西风，由西部陆地吹向湖面。由于河湖密布，导致影响因素较多，故呈现波动状态。良心堡东部有东北～西南向悦来湖，受早晨湖面反光增温效应影响，气温西高东低明显，因此最强湖风出现在09时，负距平达−0.48 m·s^{-1}，实际东风1.08 m·s^{-1}。逐时平均v的日振幅为0.69 m·s^{-1}，全日平均值为0.16 m·s^{-1}，较明显正距平时段为16—00时，负距平时段为10—15时。v分量傍晚前后为正距平，中午前后为负距平，北风正距平持续时间为9 h，南风最强负距平−0.37 m·s^{-1}，这主要是由良心堡北部七女峰、桃花山等山脉丘陵形成的山谷风造成的。

隆庆莲场站逐时平均u的日振幅为1.41 m·s^{-1}，全日平均值为弱西风0.19 m·s^{-1}， 08—16时为正距平西风，17—07时（00时除外）u为负距平，与良心堡明显不同。由于隆庆莲场站西边为莲场水体，东部靠近东洞庭湖，故日出后首先受湖面反光增温效应影响，气温西低东高，之后受西湖东陆大地形影响，西风逐渐增大，13—14时u正距平达0.74 m·s^{-1}；傍晚前后，莲场水体东部因反光效应增温，东洞庭湖西部气温则明显下降，该站附近气温东低西高，u东风负距平傍晚以后达到最大，20时达−0.67 m·s^{-1}，从图9可以看出，实际湖陆风的日周期性变化是相当明显的。该站逐时平均v的日振幅为0.79 m·s^{-1}，全日平均值为南风−0.95 m·s^{-1}，18—01时为正距平， 08—13时为负距平，与良心堡相似，但南风较大。

3.2.3 南部

湖区南部漉湖站（图10）逐时平均u的日振幅为1.15 m·s^{-1}，全日平均值为东风−0.72 m·s^{-1}，16—23时为正距平， 08—13时为负距平。逐时平均v的日振幅为0.68 m·s^{-1}，全日平均值为弱北风0.20 m·s^{-1}，

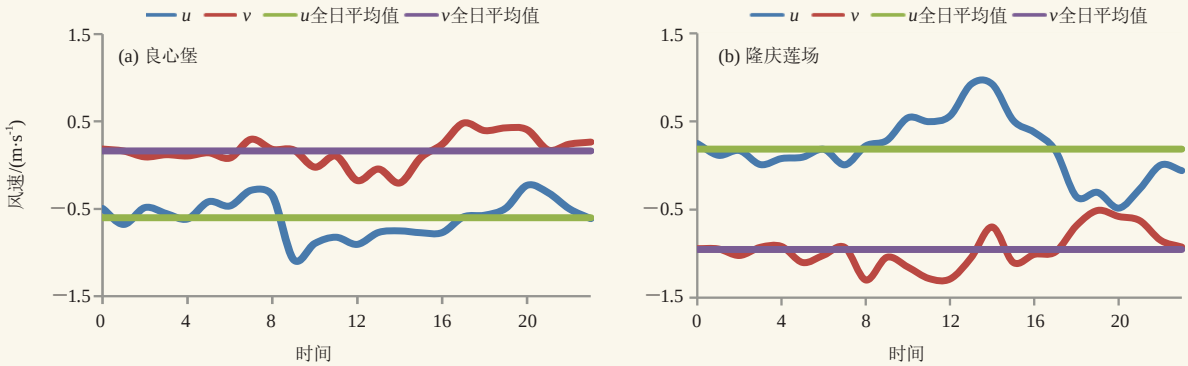

图9 2017年8月4—23日东洞庭湖西部逐时平均风速日变化

Fig. 9 Diurnal variation of hourly average wind speed in the west of East Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

07—12时为正距平，13—19时为负距平。由于漉湖站南边为草尾河、东部靠近湘江，故日出后首先受草尾河、湘江水面、漉湖等向西反光增温效应和弱东北背景风影响，站点附近气温西南高东北低，东北风逐渐增大，12时u负距平达−0.59 m·s^{-1}，10时v正距平达0.44 m·s^{-1}；午后主要受湘江、洞庭湖水面等向东反光增温效应和东北方麻布大山丘陵山脉大地形叠加影响，该站附近气温东北高西南低，西南风逐渐增大，u正距平20时达0.55 m·s^{-1}，且午后到傍晚为较弱的南风负距平。从图10可以看出，漉湖站实际上以东偏北风为主，风距平转换表现为东偏北风风速大小的日周期性变化。

3.2.4 北部

湖区北部穆湖铺站（图10）逐时平均u的日振幅为0.65 m·s^{-1}，全日平均值为弱东风−0.11 m·s^{-1}，09—16时为正距平，17—08时u为负距平。逐时平均v的日振幅为1.54 m·s^{-1}，全日平均值为南风−1.19 m·s^{-1}，13—21时为正距平，22—12时为负距平。由于穆湖铺南部为湖面，东部为岳阳市北部郊区、稍远为丘陵山脉，东南部为岳阳市区，故白天气温西南低东北高，受湖风、谷风影响，西南风较大，11时u正距平西风达0.40 m·s^{-1}，09时v负距平南风达−0.52 m·s^{-1}；午后受湖面反光增温效应、岳阳城市热岛效应和南湖北陆大地形影响，该站附近气温逐渐转为南高北低，v正距平北风午后到傍晚十分明显，18时高达0.92 m·s^{-1}，从图10可以看出，穆湖铺站实际上以南偏东风为主，白天出现弱西风，下午到初夜南风明显减小，南风风速大小的日周期性变化明显。

3.2.5 湖心

湖心煤炭湾、扁山站（图10）逐时平均u的日振幅分别为1.74、1.36 m·s^{-1}，全日平均值为−0.16、0.65 m·s^{-1}，即煤炭湾为弱东风、扁山为西风；日变化有较明显的规律性，煤炭湾09—18时为正距平，扁山23—11时为正距平。逐时平均v的日振幅分别为2.76、3.39 m·s^{-1}，全日平均值为明显的南风−3.0、−1.88 m·s^{-1}，日变化规律相似，11—21、10—19时为正距平。由于煤炭湾东南部为距东洞庭湖较近的麻布大山丘陵山脉主体，故白天湖风、谷风叠加形成西北风，13时u正距平西风达0.99 m·s^{-1}，16时v正距平北风达1.58 m·s^{-1}，夜晚则转为东南风，负距平均较小，即陆风、山风较小。由于扁山站西部为宽广湖面，北偏西部为扁山小岛、东部为南湖、东北部为岳阳市区、东南部为南湖新区，受南湖水体及城市热岛效应等综合影响，扁山站东西向温差较小，湖陆风较弱；由于扁山东偏北部到南湖之间有甑壁山、月山等较小范围丘陵，东南部为大范围丘陵山脉，且距离陆地较煤炭湾近，因此上午湖风与谷风叠加形成西北风，出现时间较煤炭湾早；下午甑壁山、月山、扁山岛等小范围丘陵东侧背阳面气温下降较快，西南部湖心气温上升，扁山站气温东北低、西南高，山风与陆风叠加形成东北风，17时u负距平东风达−0.82 m·s^{-1}，v正距平北风达1.53 m·s^{-1}。从图10可见，煤炭湾站实际湖陆风转换明显，扁山站仅17—18时出现弱东风（陆风）；湖心南北距平风变化明显，实际表现为南风风速昼小夜大。

3.2.6 测风塔

测风塔风速（图11）u分量白天为西风，10～60 m高度维持约14 h，200 m高度维持7 h；湖风（西风）随高度先增大后减小，午后14时60 m最大为1.85 m·s^{-1}，200 m上空仍有1.04 m·s^{-1}。夜晚60 m以下风速较小，200 m上空则为明显的东风（陆风），21时达2.15 m·s^{-1}。近地面东风较弱的主要原因是湖东七里山丘陵、高楼大厦等建筑物、树木植被等阻挡摩擦造成的。风速v分量下午至初夜正距平较强，峰值出现在18—19时，200 m上空更加明显，19时正距平北风高达1.49 m·s^{-1}。大桥西侧测风塔10～60 m正距平北风峰值主要和东洞庭湖主体位于测风塔以南、湖面反

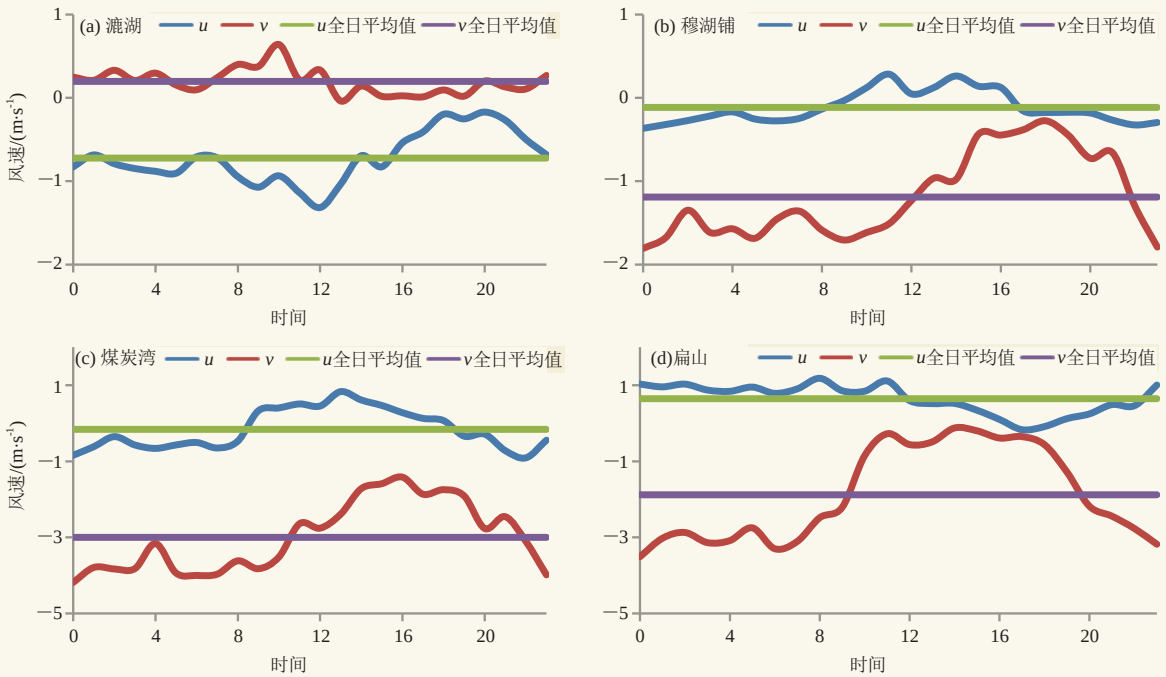

图10 2017年8月4—23日东洞庭湖南部、北部、湖心逐时平均风速日变化

Fig.10 Diurnal variation of hourly average wind speed in the south, north, lake center of East Dongting Lake during 4 August to 23 August 2017

光增温效应致使气温南高北低有关；大桥东岸200 m测风塔南部为岳阳市区，傍晚18—19时下班交通高峰、晚餐烹调高峰等叠加形成城市热岛高峰，加之东洞庭湖主体位于测风塔西南以及湖面反光增温效应，致使测站附近气温南高北低显著，因此200 m正距平北风最大峰值出现在19时，12时、14时为城市热岛效应高峰，亦出现相应峰值。夜晚60 m高度以下v风速随高度波动加大，200 m上空为明显的南风，03时达$-4.86\ m\cdot s^{-1}$。

3.2.7 不同位置湖风的差别

通过比较各个站点的逐时风日变化可知，地理环境差异越明显，其湖陆风效应越显著，如东洞庭湖东部为丘陵山区，西部为湖区，因此东北方向的岳阳、南湖、穆湖铺、煤炭湾站与洞庭湖大桥测风塔等站湖陆风显著，其他方向则不太明显；地理环境复杂，其湖陆风效应相应也变得复杂，测站附近小微尺度水体、山丘、建筑物与植被等都可能造成较大影响，如隆庆莲场、良心堡、扁山、鹿角与漉湖站等，需要进行实地考察分析研究，才能了解其真实成因。

测站越高、探测环境越开阔，风速越大，如煤炭湾、扁山、岳阳站与大桥东岸200 m测风塔等；湖面上空风速大小随高度呈波动性变化（表2），与刘电英等[4]研究结论相似。

表2 洞庭湖大桥测风塔各高度风速（单位：$m\cdot s^{-1}$）

Table 2 Wind velocities at different heights of wind tower of Dongting Lake Bridge (unit: $m\cdot s^{-1}$)

类别	数值				
高度	10 m	30 m	50 m	60 m	200 m
风速	2.0	3.3	3.1	3.8	5.3

3.3 相对湿度

从图12可以看出，湖面上空逐时平均相对湿度差异明显，大桥西侧测风塔位于洞庭湖出口西侧芦苇滩中，距离湿地10 m，西部为长江弯道水面，因此相对湿度最大；七里山船舶站位于大桥东侧船舶顶上，距离水面约10 m，东南部靠近陆地及岳阳市区，相对湿度较小；煤炭湾与扁山站位于湖心灯塔上，距离水面二十余米，相对湿度最小，20时煤炭湾与测风塔湿度相差最大达13.3%，11时相差最小为7.5%。这表明湖面相对湿度随高度增加迅速减小；受湖陆风环流等影响，白天湿度下降，下午最小；夜晚湿度上升，凌晨湿度最大。

岳阳站受湖陆风与城市建筑影响明显，白天湖风（西风）控制时相对湿度明显大于远离湖区的临湘与华容站，晚上陆风控制时，因城市建筑物、道路固化、植被与水体较少，导致湿度明显偏小。鹿角站西部为洞庭湖，东南部、东北部亦有较大面积池塘水体，因此相对湿度始终较大。

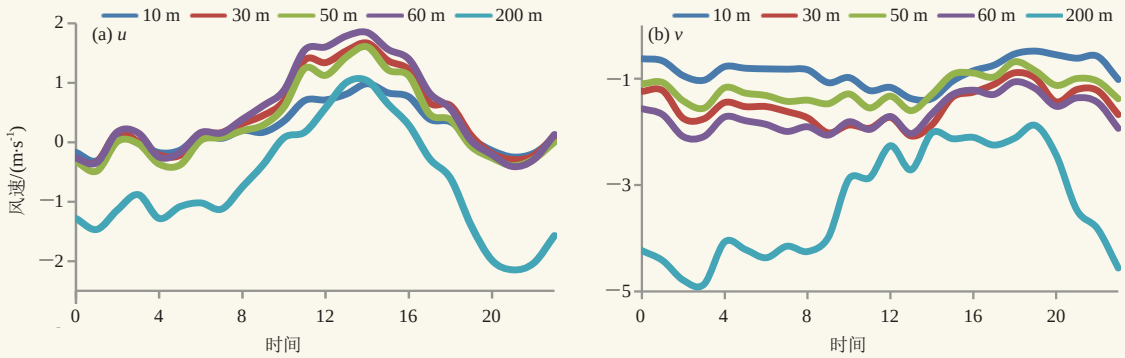

图11 2017年8月4—23日洞庭湖大桥测风塔逐时平均风速日变化

Fig. 11 Daily variation of hourly average wind speed in wind tower of Dongting Lake Bridge during 4 August to 23 August 2017

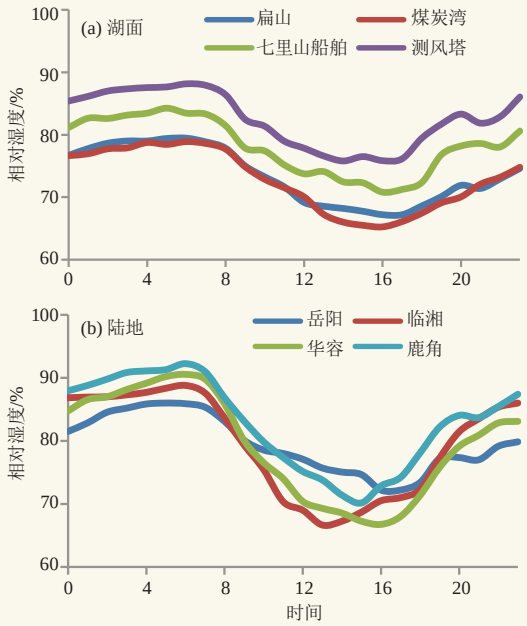

图12 2017年8月4—23日东洞庭湖区逐时平均相对湿度日变化

Fig. 12 Diurnal variation of hourly average relative humidity in East Dongting Lake area during 4 August to 23 August 2017

4 小结与讨论

1）岳阳站存在明显的湖陆风，夏季最强、春季次之，冬季最弱；受城市热岛效应叠加影响，夏、秋、冬季最强湖风出现在中午前后。由于城市热岛效应等，岳阳站午后到傍晚存在南北风距平转换，春夏季出现实际南北风风向转变。岳阳站湖风大小和南风频率正相关，城市热岛和湖风频率正相关，湖陆风与城市热岛效应相辅相成。

2）湖心与周边陆地水平温差存在昼夜反转现象，湖心气温日较差小，周边陆地气温日较差大。湖面反光增温效应致使一定时空范围内气温上升。湖面上空气温白天随高度逐渐降低，中午前后降温幅度最大，夜晚出现明显的逆温层，这表明湖面上空白天为下沉气流，夜晚为上升气流。

3）夏季湖陆风明显，受洞庭湖东部大范围丘陵山脉影响，东北部更加显著。洞庭湖大桥附近上空东西向湖风随高度先增强后减小，60 m高度最强；南北方向城市热岛与湖面反光增温效应叠加影响随高度上升逐渐明显，200 m高度更加显著，12时、14时、尤其是18—19时城市热岛效应高峰得到清晰展现。

4）湖面相对湿度随高度迅速减小，湖心相对湿度较大，湖边相对湿度较小；岳阳站受湖风与城市干燥环境交替影响，白天相对湿度偏大，夜晚相对湿度偏小；鹿角站周边水体较多，相对湿度始终偏大。测站气象要素演变受附近小微尺度水体、山丘、建筑物、树木植等影响较大。

致谢：湖南省益阳市气象局杨令女士、华容县气象局侯勇军、苏韬先生以及谢学武先生等提供相关资料，英国考文垂大学李福嘉博士为本文整理相关资料，在此特表感谢。

参考文献

[1] 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.
[2] 李连方. 岳阳（洞庭湖畔）的湖陆风. 气象, 1978(4): 30.
[3] 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(1): 78-88.
[4] 刘电英, 邹希云, 彭杰彪, 等. 洞庭湖湖面风速与湖区陆地风速的对比分析. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15902-15903.
[5] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究. 中国科学, 2003, 33(2): 97-04.
[6] 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] 于强, 陆佩玲. 巢湖对冬季陆面辐射和热量过程的影响. 湖泊科学, 1996, 8(1): 8-15.
[8] 王浩. 湖陆风演变过程的数值模拟. 南京大学学报, 1991, 27(2): 383-395.
[9] 李照国, 吕世华, 奥银焕, 等. 鄂陵湖湖滨地区夏季近地层微气象特征与碳通量变化分析. 地理科学进展, 2012, 31(5): 602-608.
[10] 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.