

王咏薇,齐德莉,邱阳阳,等.小型水体对气温观测环境影响的初步模拟分析.气象科学,2017,37(3):304-316.

WANG Yongwei, QI Deli, QIU Yangyang, et al. A preliminary simulation analysis on effects of water body on air temperature observation environment. Journal of the Meteorological Sciences, 2017, 37(3): 304-316.

小型水体对气温观测环境影响的初步模拟分析

王咏薇^{1,2} 齐德莉^{1,2} 邱阳阳¹ 金莲姬² 郭建侠³

(1 南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044; 2 南京信息工程大学大气物理学院,南京 210044

3 中国气象局气象探测中心,北京 100081)

摘要 为研究水体对气温观测环境的影响,应用 WRF 中尺度模式,通过对四季晴天小风、阴天大风背景天气下有无水体算例模拟结果的比较,分析了浙江青山湖水体(6.5 km²)对周边 2 m 高度处气温的影响。模拟结果表明:(1)冬季天气条件通常较稳定,水体对下风方的影响最为明显;春、秋季节水体对下风方的影响次之,夏季局地热力环流复杂,水体对下风方气温影响不若其他季节明显。(2)青山湖水体对下风方约 5 km 内的气温可能产生明显影响,非下风方缩短为 0.4 km。(3)水体面积越大,对周边气温影响距离越大。(4)当风速大于 6.2 m·s⁻¹时,水陆热力性质差异迅速被平流项输送携带走,水体对下风方气温影响不明显。而湍流扩散项则将水体与陆面热力性质的差异向上传递,湍流强度大于 0.5 m²·s⁻²时,水体对下风方气温的影响不明显。

关键词 观测环境; 水体; 气温; 风速; 湍流强度

分类号: P412.11

doi: 10.3969/2015jms.0002

文献标识码: A

A preliminary simulation analysis on effects of water body on air temperature observation environment

WANG Yongwei^{1,2} QI Deli^{1,2} QIU Yangyang¹ JIN Lianji² GUO Jianxia³

(1 Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3 Meteorological Observation Center China, Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract In order to research the effects of water body on temperature observation environment at meteorological stations, through comparing the case simulation results with or without water bodies, the impacts of Qingshan Lake (6.5 km²) in Zhejiang province on the surrounding air temperature at 2 m by using WRF model were analyzed under the weather background of clear sky with light wind and cloudy sky with gale in four seasons, respectively. Results show that (1) water body would increase leeward air temperature greater in winter than in spring and autumn due to the stable weather condition, while in summer, the influence of water body was not so obvious because of the complex local thermodynamic circulation. (2) The Qingshan Lake has obvious effects on the air temperature at a distance of 5 km from the lake leeward and 0.4 km in other directions. (3) The larger the water body area is, the longer the affecting distance of surrounding air temperature is. (4) When the wind speed is higher than 6.2 m·s⁻¹, the thermodynamic property divergence between water and land would be quickly carried away by advection, so the effect was not obvious. And then the turbulent diffusion would transmit the thermodynamic property

收稿日期(Received): 2015-09-30; 修改稿日期(Revised): 2016-01-19; 网络出版日期(Published on-line): 2017-07-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1243.P.20170711.1516.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41275024); 公益性国家行业(气象)专项(GYHY201106049); 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)项目; 长江学者和创新团队发展计划

通信作者(Corresponding author): 王咏薇(WANG Yongwei). wyw@nuist.edu.cn

divergence upward, so the effects became not so obvious when the turbulence intensity was larger than $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$.

Key words Observation environment; Water body; Air temperature; Wind speed; Turbulence intensity

引 言

基本气象要素的准确观测是满足国家防灾减灾和应对气候变化需求的基础支撑,而气象站站址的代表性和观测环境的长期稳定性以及不受干扰性,是获取有价值观测数据的根本保证^[1]。气象要素观测的准确性受到观测仪器精度^[2]、观测方法^[3]、观测环境^[4]等多方面因素的影响,其中观测环境的影响最大^[5]。我国现有 2 600 多个国家级气象观测站,相当一部分已经或轻或重地受到了观测环境的影响,目前这些资料正在气象业务、服务中应用,影响了气象业务服务的质量^[6-8]。因此,亟需通过系统的科学研究,确定气象观测环境的分级标准,并给出不同环境下观测站的设置规定,以提高观测资料的使用效益和气象业务服务水平。

影响观测准确性的环境因素主要有建筑物、树木、水体、公路、铁路等,其中水体对气象要素的准确观测影响很大,尤其是对周边气温的影响不容忽视。由于水体与陆地的物理性质有很大差异,例如反照率、热容量、热导率、表面粗糙度、出流入流等水文学特征等,这些差异导致了水体上的局地气象要素特征^[9]。这些局地特征通过水平方向的热量、水汽交换,影响周围陆地,使得陆地气温发生变化。水体对周边气温的影响有地域及季节性变化^[10]。即使两个湖泊深度大致相近,气候背景相同,但是出流及入流水体的温度存在差异,仍然会导致湖泊的热储特征有很大的不同^[11]。秋季温带及高纬度地区湖泊较周边陆地暖,使得表面热通量有所增加^[12]。低纬度地区地表温度较高,湖泊能够增加潜热通量。在秋季和初冬湖面开始结冰过程中,对周边有增温及增湿的作用^[13],并且使得下风方向降水增加^[14,15]。反之,湖面冰雪融化对周边有降温作用^[16]。有学者通过大气环流模式中的湖泊及湿地参数化方案研究了湖泊及湿地在全球范围内的影响^[17,18]。五大湖在夏季对周边大气有降温及加强稳定性的作用,冬季北方的湖面冻结,对气候的影响大为降低^[19]。水体在风作用下,热量向外耗散并扰乱温度廓线,且水体的形状及大小对热量的耗散有一定影响^[20]。

国内进行的局地观测研究也得出了许多有益的

结论^[21-26]。夏季黄河上游鄂陵湖昼(夜)呈现出明显的冷(暖)湖效应^[23];鄱阳湖水体夏季能够提高周边平均气温^[24];长江三峡坝区水体对周边气温有白天降温、夜间增温效应,可抑制极端最高气温,抬升极端最低气温^[24];长江三峡水库的建成对当地气温具有海洋性效应,库区附近春季温度变低,夏季水库下游气温升高、上游则气温降低,冬季又以升温为主^[25]。对深浅不同水体的气候效应以及水体的温度效应进行的数值模拟研究表明,水体降温效应随水体的深度增加而变强^[26]。

国外大多数研究是针对较大水体展开的,对解决周边气温受观测环境影响的具体定量问题研究较少,如影响程度、范围、距离等。我国江浙一带多为面积较小的水体,有必要针对这些小水体展开对气温影响的定量化研究。观测实验方法对于此类问题的研究很重要,但是由于资金、场地等多方面的因素限制,该法不能在任意点进行。本项研究拟通过数值模拟的方法,研究水体对周边观测环境的影响,揭示水体对周边气温的影响机理,从而为观测站的选择提供理论依据。

1 模式、算例及背景天气

浙江省湖泊水体较多,具有研究水体对气温影响的代表性。经过实地考察,选择浙江省临安市青山湖为研究对象。该湖为大型人造湖,建于 1964 年,位于杭州西郊临安市青山镇,距杭州市 38 km,地理位置为(30.24 °N, 119.78 °E),水域面积 6.5 km²。

1.1 模式

选用 Weather Research and Forecasting Model (WRF v3.3.1) 模式,初始及边界条件选用 operational National Centre for Environmental Prediction (NCEP) 提供的 1°×1°再分析资料,该资料每 6 h 更新一次侧边界。模拟过程中选用 Noah (Noah Land Surface Model) 陆面过程方案,该方案当前广泛的应用于天气预报模式及陆面数据同化系统中^[27,28]。ZHANG, et al^[29] 的研究表明,在长三角区域,MYJ 边界层参数化方案^[30,31] 有较好的模拟性能,因此本研究模拟工作中选用 MYJ 边界层参数化方案,针对

城市下垫面,由于湖泊附近是小城镇,采用了单层的城市冠层参数化方案^[32]。

采用四重嵌套模拟水体对周边气温影响,模拟外三重网格的格距分别为 9、3 和 1 km,最内层格距 333.33 m,能更精细地反映区域下垫面各要素分布,相应区域网格格点数分别为 58×49、67×55、73×61 和 91×73,垂直方向分为 43 层,其中 1 km 以下 7 层,模式第一层为 26.6 m。地形分辨率分别为 10′、

2′、2′和 30″。

最内层模拟区域为(30.14~30.34°N,119.64~119.94°E),嵌套模拟区域及最内层区域内地形及下垫面土地类型见图 1。由图 1 可见,区域内仅中间部分有一处水体即青山湖,周边海拔 350 m 以下,湖西有小片城镇,其余下垫面为农田、草地、树林等,无高大山脉,下垫面状况相对较简单,利于水体对周边气温影响的研究。

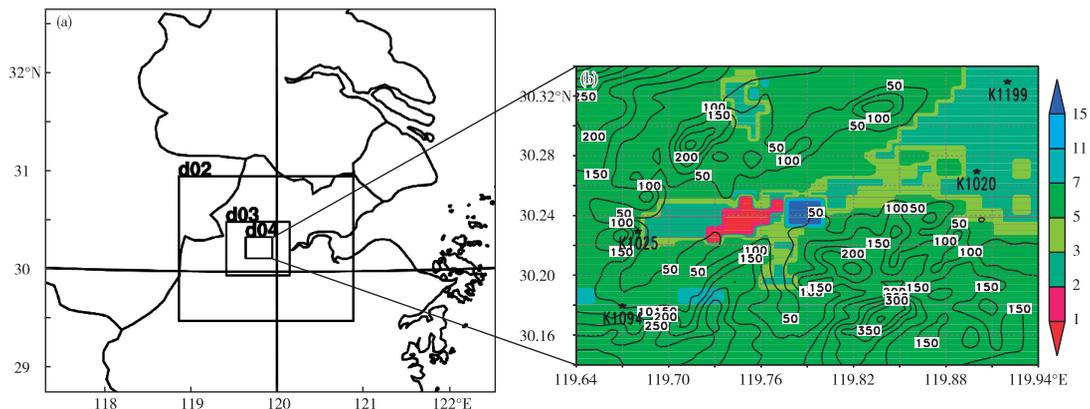


图 1 (a)模拟区域;(b)最内层地形高度及下垫面土地类型分布图

(图例:1-城市;2-干旱农作物和牧场;3-灌溉农作物和牧场;5-农田/草地拼接;7-草地;11-落叶阔叶林;15-混合森林;16-水体)
Fig.1 (a)The terrain of simulated area and the nest land;(b) the land use (1-Urban and built-up land;2-dryland cropland and pasture;3-irrigated cropland and pasture;5-cropland/grassland mosaic;7-grassland; 11-deciduous broadleaf forest;15-mixed forest;16-water bodies)

1.2 背景天气以及算例介绍

水体对周边环境的影响随季节变化而有所不同。考虑有剧烈天气过程时,水体等下垫面对周边环境的影响不明显,因此选择春、夏、秋、冬四季晴天小风以及阴天大风的背景天气条件下水体对周边气温的影响进行研究。晴天小风天气主要满足以下 4 个条件:(1)云量小于 3 成;(2)日平均风速相对较小;(3)日平均气温相对较高;(4)当日主导风向为当月风频统计的主导风方向。阴天大风天气主要满足以下 3 个条件:(1)云量大于 8 成;(2)日平均风速相对较大;(3)当日主导风向为当月风频统计主导风方向。通过对临安市青山湖附近 30 km×30 km 内 10 个自动气象站 2010 年 1、4、7、10 月的观测数据,以及同期的 NCEP 再分析数据进行分析,确定了晴天小风及阴天大风代表日(表 1)。

为研究水体对周边气温的影响,将每一种天气背景代表日分为有水体下垫面、无水体下垫面(将模拟区域中的水体替换为与周围相同的灌溉农作物),共 16 个算例。每个算例模拟长度共 36 h,取当地时间 08:00—次日 08:00 的结果进行分析,提前 12 h 进行模拟,作为模式初始调整期。具体算例如表 1 所示。

表 1 16 个算例情况

Table 1 Introduction of the 16 cases

算例	季节	天气状况	代表日	有无水体
CASE1	冬季	晴天小风	1月7日	有
CASE2				无
CASE3		阴天大风	1月5日	有
CASE4				无
CASE5	春季	晴天小风	4月5日	有
CASE6				无
CASE7		阴天大风	4月10日	有
CASE8				无
CASE9	夏季	晴天小风	7月30日	有
CASE10				无
CASE11		阴天大风	7月10日	有
CASE12				无
CASE13	秋季	晴天小风	10月5日	有
CASE14				无
CASE15		阴天大风	10月19日	有
CASE16				无

选择对周边气温影响较大的冬季晴天小风作为背景天气条件,进一步研究水体面积大小对周边气温的影响。具体分为无水体(CASE17),以及水体部分格点数为 6×6(CASE18)、9×9(CASE19)、12×

12(CASE20)、15×15(CASE21)即水体面积分别为36、81、144、225 km²共5个算例。

2 模拟效果验证

在最内层区域内有4个主要下垫面土地类型的自动气象站,采用观测数据进行模拟效果检验。4个自动气象站(站号为K1020、K1025、K1094及K1199)

的位置见图1,具体情况见表2。

对4个代表站的测站海拔高度与模式地形高度进行订正之后,将观测值与有水体下垫面四季、不同背景天气共8个CASE相应位置的2 m高度气温模拟结果对比,如图2所示,模拟值与观测值相差较小,两者变化趋势及变化幅度较为一致。而在夏季、秋季阴天大风天气条件下,模拟值整体小于观测值。

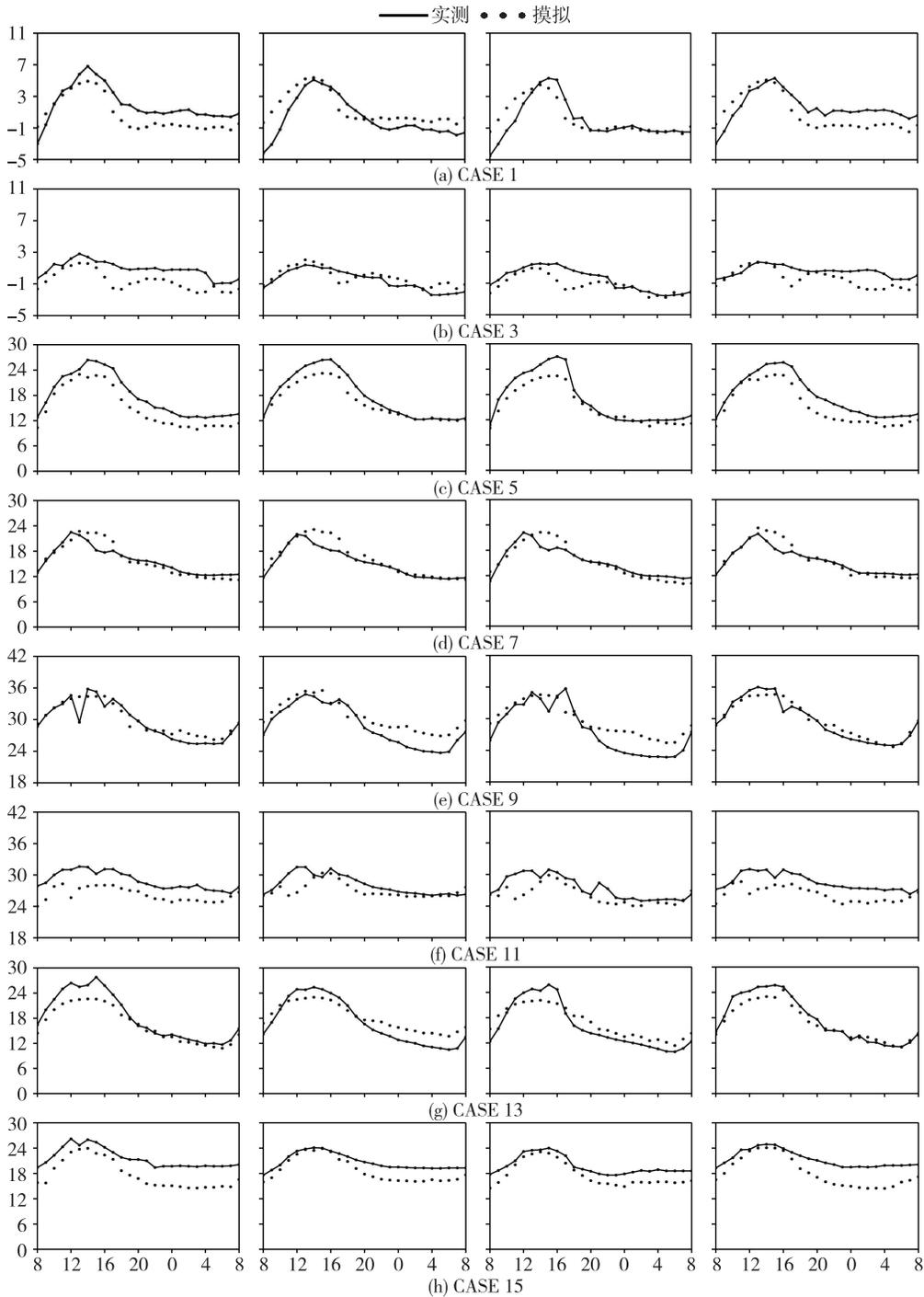


图2 有水体下垫面四季(自左至右:冬、春、夏、秋)不同背景天气下代表站2 m高度气温模拟值与观测值比较(单位:℃)
Fig.2 The comparison of simulated and observed air temperature at 2 m with the actual underlying surface in different weather of four seasons(unit:℃)

表 2 第四重模拟区域内 4 个观测站具体情况
Table 2 Introduction of the four observation stations

站点	站点位置	经度(°E)	纬度(°N)	海拔(m)	下垫面
K1020	余杭区余杭镇南湖大闸下	119.90	30.27	25	农田
K1025	锦城街道横潭路	119.68	30.23	24	农田
K1094	临安市玲珑街道方家头水库大坝	119.67	30.18	130	树林
K1199	余杭区余杭镇下陡门村	119.92	30.33	7	农田

将模拟值结合观测值求均方根偏差(E_{rms})、一致性指数(I)、相关系数(r),具体公式如下:

$$E_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2}, \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2}}. \quad (3)$$

式中, N 为数据个数, p_i 、 o_i 分别为模拟值和观测值, \bar{p} 、 \bar{o} 分别为模拟平均值及观测平均值。均方根偏差

是指模拟值与观测值偏差的平方与观测次数 N 比值的平方根, E_{rms} 的值越小,说明模型与实测值之间的差异越小。相关系数是表征变量之间线性相关程度的量,当 $r=1$ 时,表征两组变量完全正相关; $r=-1$ 时,表征两组变量完全负相关, $r=0$ 时,表征两个变量完全不相关。 I 的值在 $0 \sim 1$ 之间, $I=0$ 表示模拟值与观测值完全无关, $I=1$ 表示模拟值与观测值完全一致。求得结果见表 3。由表可见, E_{rms} 最大值出现在秋季阴天大风天气条件下,为 $2.85 \text{ } ^\circ\text{C}$, I 与 r 最小值则出现在夏季阴天大风天气条件下,这可能是因为模式对于阴天大风天气过程响应不足。总体而言,8 个算例的 E_{rms} 均较小,表明模拟值和观测值差别不大。一致性指数和相关系数的统计结果均表明观测值和模拟值整体变化趋势一致。

表 3 8 个算例模拟值与观测值的统计检验结果
Table 3 Model performance statistics for the eight cases

CASE	1	3	5	7	9	11	13	15	平均
$E_{\text{rms}}/^\circ\text{C}$	1.51	1.06	2.48	1.73	2.35	2.21	2.77	2.85	2.12
I	0.87	0.81	0.93	0.94	0.88	0.62	0.90	0.73	0.84
r	0.78	0.74	0.95	0.91	0.89	0.61	0.91	0.89	0.84

综上,8 个算例的模拟结果与观测结果虽然在部分时刻略有偏差,但差值较小,且整体变化趋势一致,模拟结果能够相对准确反映气温的变化,模拟方案可用于水体对周边气温影响的研究。

3 结果分析

3.1 不同天气条件下水体对周边 2 m 高度气温的影响

首先通过不同季节、不同背景天气条件下有、无水体算例模拟所得的 2 m 高度气温的差值来分析水体对周边气温影响。本研究中,当水体下风方有水体和无水体的 2 m 气温差值不等于 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,判断湖体对下风方气温有影响。本文中确定水体对下风方的影响距离(图 3a),首先确定湖泊对下风方的最大

影响距离处的经纬度,并进而确定影响距离。

冬季浙江盛行北风,晴天小风及阴天大风条件下,全天水体对上方空气有增温作用。冬季晴天小风条件下典型时刻有水体 2 m 气温与无水体 2 m 气温差值分布见图 3,图中叠加风场为有水体时的 10 m 风速(下同)。由图可见,冬季晴天 08:00,湍流较弱(图 4a),水体导致上方空气增温 $5 \text{ } ^\circ\text{C}$,水体边缘陆地 2 m 高度增温 $4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。参考图 1 的地形高度可见,湖体自西向东北存在一个低谷地带,由图 3a 可见,08:00 模拟范围内地势高的区域风速相对较大,地势低的区域风速小。水体及其西边小城镇皆位于低谷地带,风速较小,出现城市热岛辐合环流,受辐合环流的影响,水体对下风方的影响局限在城市上空,近 7.4 km 范围内气温升高(图 3a)。正午

12:00,此时湖体上方 2 m 气温比陆地高 2 °C 左右。但是此时湍流混合作用较强,水体和陆地温度差异被湍流大涡携带至垂直上空(图 4b),气温水平分布

受到流场影响,呈现不规则大涡的状态(图 3b),因此在湖体下风方并无明显的降温影响。

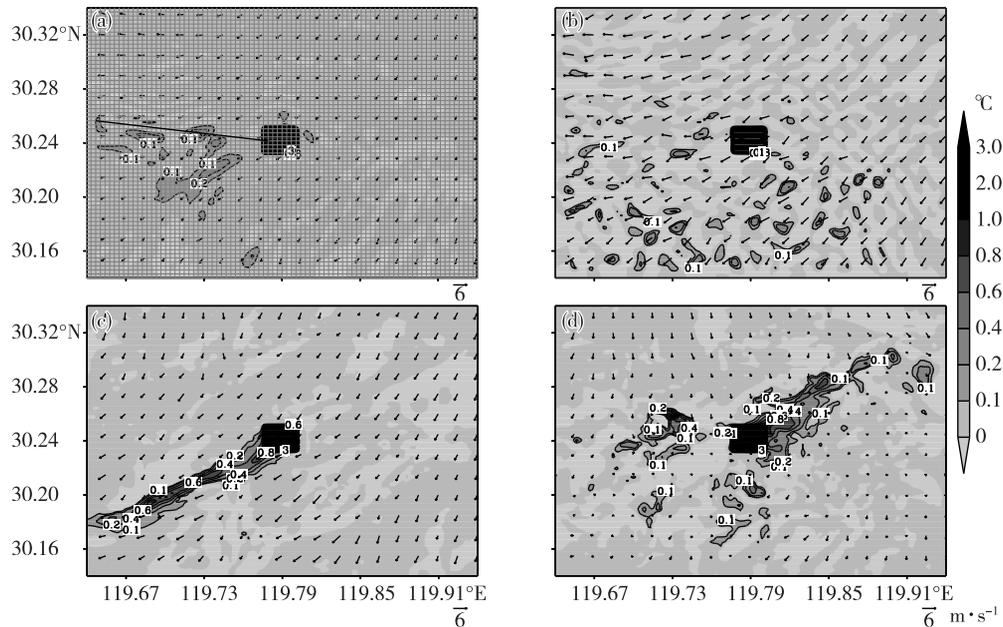


图3 冬季晴天小风天气条件下有水体算例 2 m 气温与无水体算例 2 m 气温差值:
(a)08:00;(b)12:00;(c)18:00;(d)02:00

Fig.3 The difference of 2 m air temperature with and without water body in clear day of winter at (a)08:00; (b)12:00; (c)18:00; (d)02:00

至 18:00,水体上方空气增温达 4.7 °C,水体上方聚集较多热量。湍流运动减弱(图 4c),平流输送项占主导地位,水体增温的影响被平流项输送到湖体下风方,下风方的增温影响达到 11.8 km 的范围(图 3c)。18:00 以后,风速减小,热量的平流输送作用较弱,虽然水体上方空气增温变化不大,但是水体对周边气温的影响范围略有减小。夜间 02:00 及以后,水体导致上方空气增温达 5 °C,此时在水体上方出现陆风气流辐合,风速为 2 m·s⁻¹左右。然而由于局地环流出现明显的谷风效应,参考图 1 的模拟区域地形分布可以看出,在第四重模拟区域自西南向东北部存在一个地形高度为 50 m 左右的低谷地带,该区域明显存在由周围较高地势向谷地的辐合气流,从而导致湖体的增温效应向东北方向低谷地带输送最为明显,由于辐合气流的影响,增温效应的影响距离为 7.5 km(图 3d)。谷风环流至次日 06:00 结束,该段时间内,湖体的影响均在谷风环流的下风向。

冬季阴天大风条件下,08:00 湍流较弱,水体导致上方空气增温最大达 3~4 °C,水体边缘陆地 2 m 高度增温 1.5 °C,水体增温效应影响距离为 7.4 km(图 5a)。正午 12:00(图 5b),水体对上方空气增温幅度较小,为 2 °C 左右,且湍流较强,因而水体对下

风方气温无明显影响。16:00 以后,湍流减弱,水体上方空气增温达 3 °C,此时风速降至 5.5 m·s⁻¹,平流作用将水体上方热量输送到下风方向,影响距离为 3 km(图略)。17:00,水体上方空气增温达 5 °C,风速为 4.6 m·s⁻¹,此时模拟区域内近地层并无明显的局地环流,水体增温对下风方的影响达到 13.6 km(图 5c)。02:00(图 5d),水体上方空气平均增温达 4.3 °C,风速减小,均小于 5 m·s⁻¹,水体增温效应影响范围略减,平均达 11.6 km。同时进一步分析可见,大风条件下,模拟范围内全天并无明显的山谷风、城市热岛以及湖风环流局地环流产生,除正午 11:00—16:00 湍流较强情况下,湖体对下风方增温并无明显影响,全天其余时刻,湖风对下风方增温均有一定的影响,最大距离可达到 14 km。

春季水体对上方空气主要为降温作用,对周边气温的影响不如冬季明显。春季晴天小风条件下,09:00 陆面气温明显回升,水体对上方空气的降温达 2.1 °C。此时在模拟区域内西南方,朝向山坡的谷风刚刚开始发展,风速较小。湖面上风速较大,同时湖体下风方地势较低,风速较大,水体影响距离达到 7.9 km(图 6a)。正午 12:00—15:00,水体导致上方空气降温幅度均较大为 5 °C 左右,但由于春季晴天午后湍流运动较强,湍流运动将降温效应扩散

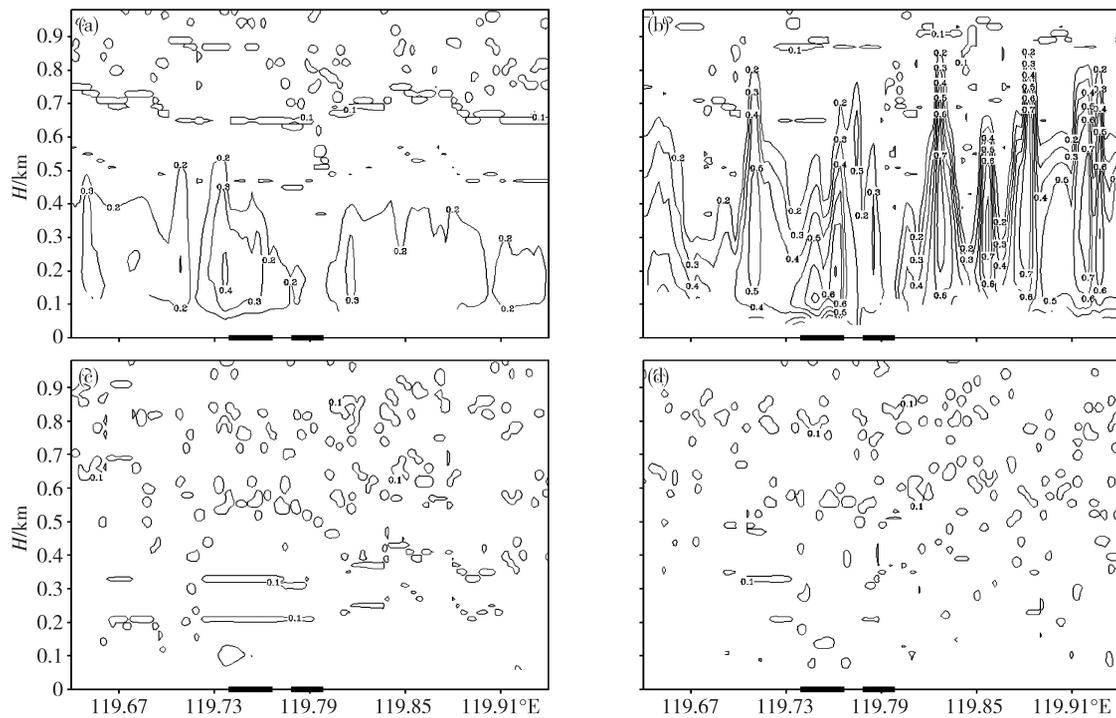


图4 冬季晴天小风条件下沿着 30.24°N 的湍流动能垂直剖面分布。余同图3

Fig.4 The vertical profile distribution of turbulence kinetic energy along 30.24°N in clear day of winter; the rest is the same as Fig.3

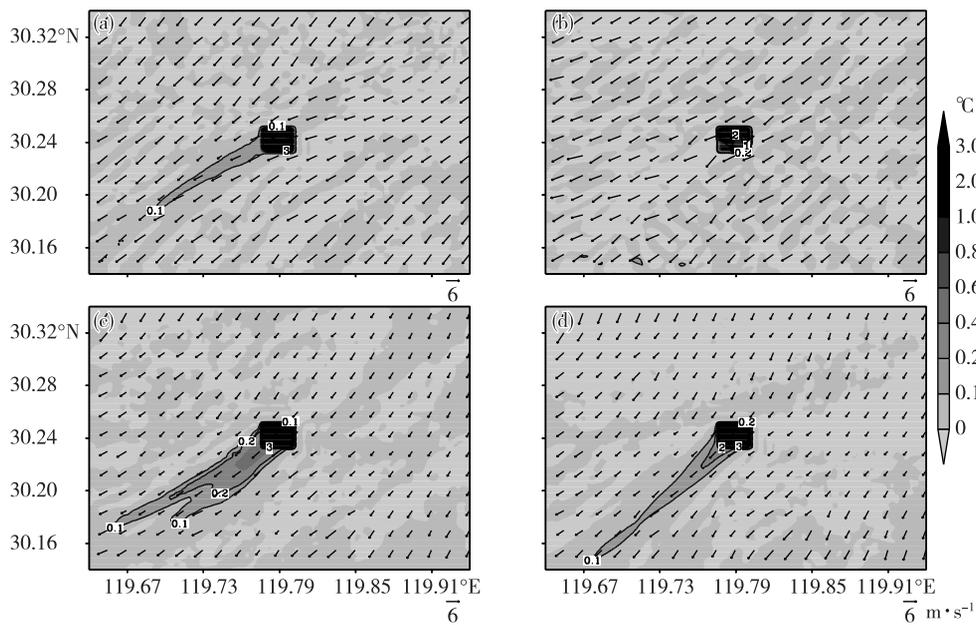


图5 冬季阴天大风天气条件下有水体算例 2 m 气温与无水体算例 2 m 气温差值:(a)08:00; (b)12:00; (c)17:00; (d)02:00

Fig.5 The difference of 2 m air temperature with and without water body in cloudy day of winter at (a)08:00; (b)12:00; (c)17:00; (d)02:00

至下风方的各个区域,水体附近影响距离较小仅为 0.6 km(图略)。20:00(图 6b),湍流运动减弱,且此时模拟区域内风速较大,并无明显的局地热力环流出现。陆面气温逐渐降低,水体导致上方空气降温从 5 °C 逐渐减小至 2 °C,水体对周边气温仍有较为明显的影响,影响距离平均为 10.7 km(图 6b)。21:00—23:00,水体导致上方空气降温在 1 °C 以下,

对水体边缘陆地气温有微弱降温作用。23:00 以后,水体与上方气温基本趋于一致,对水体周边的气温影响不明显。

春季阴天大风条件下,大风使得下垫面的热属性差异导致的水体对周边气温的影响不如晴天小风天气条件下明显(图 7)。08:00,水体导致上方空气降温仅 0.6 °C,在平流作用下,水体降温效应影响距

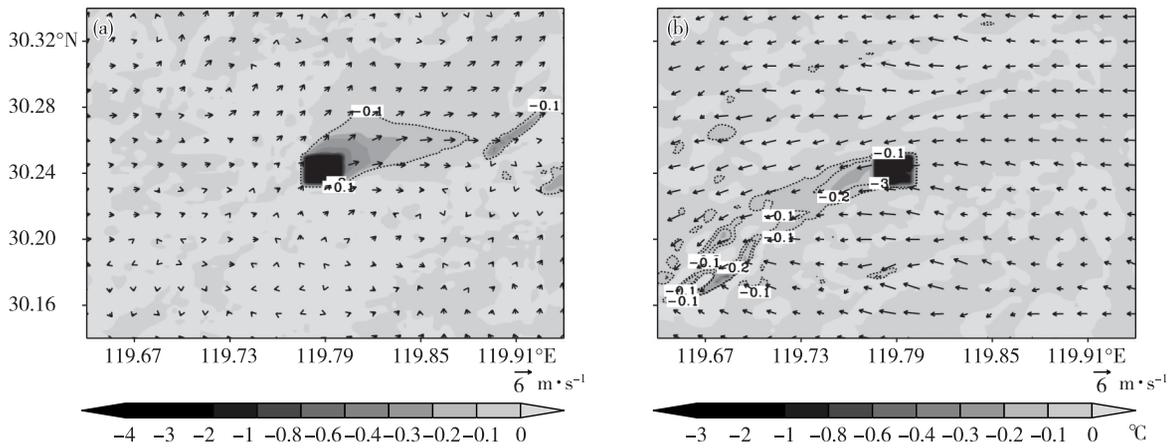


图6 春季晴天小风天气条件下有水体算例2 m气温与无水体算例2 m气温差值:(a)09:00;(b)20:00
 Fig.6 The difference of 2 m air temperature with and without water body in clear day of spring at (a) 09:00; (b) 20:00

离仅为 0.7 km。09:00 陆面气温明显回升,阴天条件下机械产生项对湍能的贡献更大,此时风速较大,产生的机械湍流较强,水体导致上方 2 m 高度空气降温仅 2.1 °C,虽然风速达 4.3 m·s⁻¹,下风方水体降温效应影响距离仅 3.5 km(图 7a)。12:00 时风速减小,仅为 1~2 m·s⁻¹,湍流机械产生项减小,湍能变小。水体导致上方空气降温大于 3.5 °C,此时风速为 3.7 m·s⁻¹,下风方水体降温效应影响距离较大达到 16 km。13:00 风速较小,仅为 0.9 m·s⁻¹,水体导致上方降温幅度较大为 5.4 °C,水体上方空气

形成辐散,水体仅对周边约 1 km 范围内的陆地空气有降温作用(图 7b)。16:00,地表风速又逐渐增大至 6 m·s⁻¹,机械摩擦作用产生的湍流较强,将水体的降温效应迅速向上传递,虽风速增至 5.4 m·s⁻¹,水体降温效应的影响距离仍然较小仅 3.7 km。17:00,水体导致上方空气降温达 4.4 °C,对下风方的影响距离为 4.9 km。此后水体导致上方空气降温幅度逐渐减小,至次日 05:00 转为微弱的升温作用,对周边气温无明显影响。

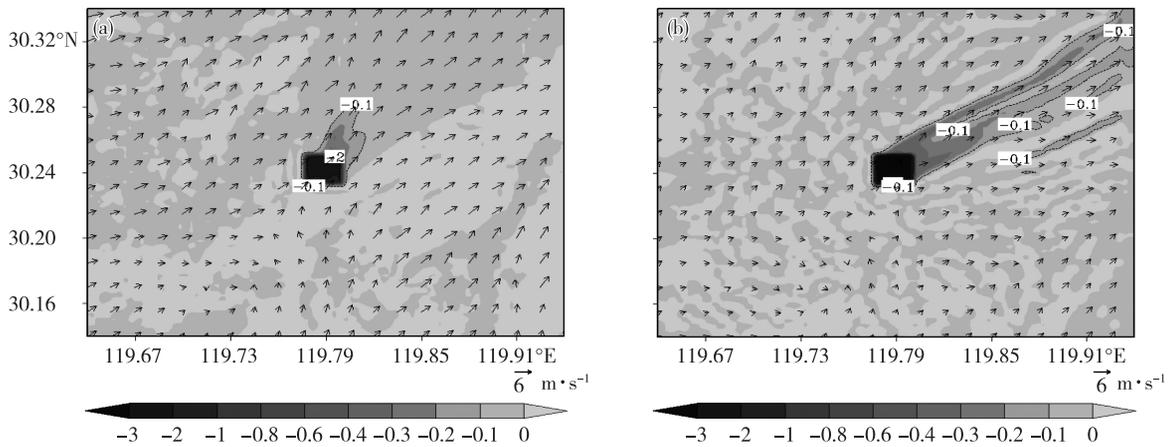


图7 春季阴天大风天气条件下有水体算例2 m气温与无水体算例2 m气温差值:(a)09:00;(b)13:00
 Fig.7 The difference of 2 m air temperature with and without water body in cloudy day of spring at (a) 09:00; (b) 13:00

模拟结果表明,夏季白天水体对上方空气有降温作用,夜间转为增温作用,对周边气温影响不明显。夏季晴天白天局地热力环流复杂,且湍流较强,仅 08:00—11:00 水体对周边气温有微弱降低作用,其余时段影响不明显。夜间水体导致上方空气增温平均小于 1 °C,对水体周边气温的影响不明显。夏

季阴天白天水体的降温作用较弱,对周边气温无明显影响。夏季阴天夜间,在 21:00 水体对上方空气转为增温作用,水体边缘陆地气温增加 0.2 °C。次日 07:00 水体对上方空气转为降温作用,08:00 水体导致上方空气降温达 1.2 °C,下风方水体降温效应影响距离达到 2.7 km。

秋季晴天小风条件下(图8),水体对上方空气为升温作用,阴天除正午前后部分时刻为较弱的降温作用,其余时刻均为升温作用。水体对上方空气的升温作用晴天大于阴天,夜间大于白天。秋季晴天小风条件下,08:00 水体导致上方空气增温达 $3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,水体边缘陆地气温增加达 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时风速为 $3.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,平流作用使下风方 15.7 km 范围内有增温作用(图8a)。09:00 以后,水体对上方空气增温作用减小,至 17:00,水体导致上方空气增温均小于

$1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,水体对周边气温无明显影响。夜间 20:00—23:00,水体导致上方空气增温达到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,但由于此时间段风速很小在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,平流作用不足以将热量传输到较远处,仅对水体周边边缘有增温作用。00:00—08:00,水体对上方空气增温作用增强,水体上方 2 m 高度气温增加大于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,水体边缘陆地气温增加达 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,且风速增大,对下风方有明显的增温作用,最大影响距离达 14.7 km ,且影响距离随风速增加而增加(图8b)。

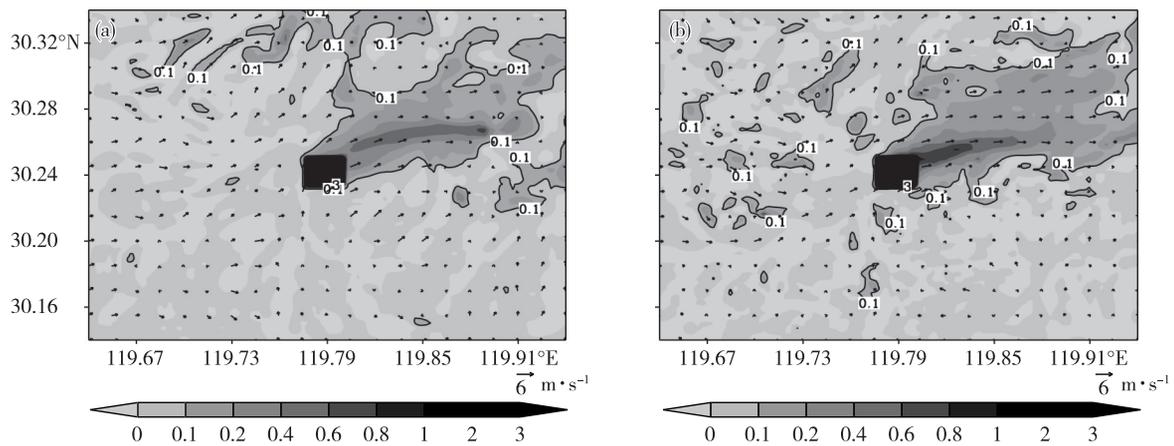


图8 秋季晴天小风天气条件下有水体算例 2 m 气温与无水体算例 2 m 气温差值:(a)08:00;(b)04:00
Fig.8 The difference of 2 m air temperature with and without water body in clear day of autumn at(a)08:00;(b)04:00

秋季阴天大风条件下(图9),08:00、09:00 水体导致上方空气增温分别为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速均小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;10:00 水体导致上方空气增温为 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速仅 $0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;该时间段内水体对周边气温无明显影响。11:00—15:00,水体导致上方空气转为降温效应,降温幅度很小,平均小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速增至 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,对周边气温无明显影响。16:00—19:00,水体上方空气又转为较弱的增温效

应,平均风速为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水体对周边气温亦无明显影响(图9a)。20:00—次日 08:00,水体导致上方空气增温达到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,水体边缘陆地气温增加 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,下风方水体增温效应的影响距离达到 14.3 km (图9b)。

3.2 水体对周边的影响及初步机理分析

四季代表性天气下水体对周边气温影响相关统计量见表4。图10给出了8个算例湖表气温与湖上 2 m 气温的差值,从图中可以看出,湖泊的热容量

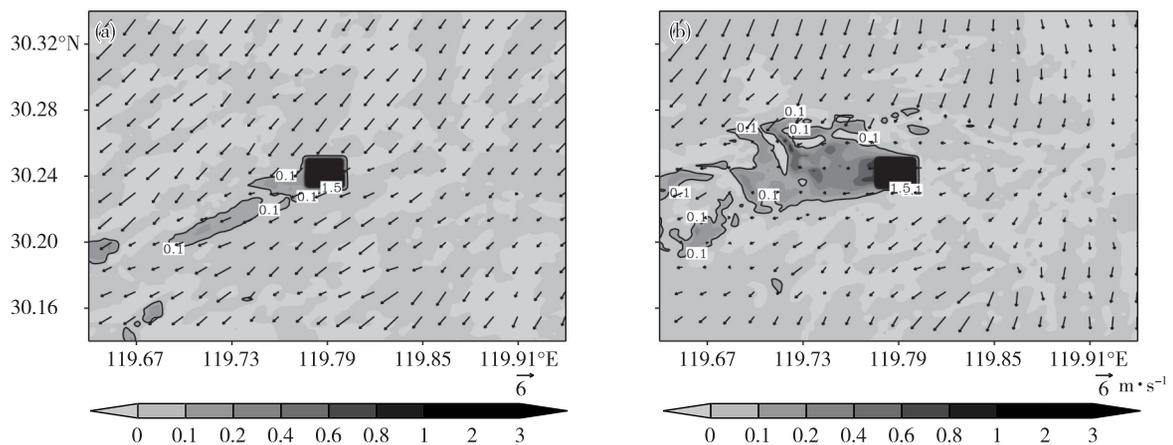


图9 秋季阴天大风天气条件下有水体算例 2 m 气温与无水体算例 2 m 气温差值:(a)19:00;(b)02:00
Fig.9 The difference of 2 m air temperature with and without water body in cloudy day of autumn at (a)19:00;(b)02:00

大于大气,春季、夏季太阳辐射较强,湖泊开始储存热量,湖泊相对于大气较冷,湖表温度与湖上 2 m 气温的差值基本为负值,湖泊对于大气主要为降温作用。而到了秋冬季节,湖泊储存的热量向上释放,湖表温度大于之上的 2 m 气温,对大气主要是加热作用。

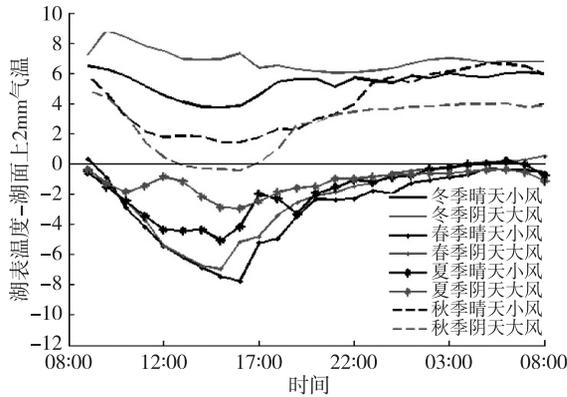


图 10 8 个算例湖表温度与湖上 2 m 气温的差值
Fig.10 The difference between skin surface temperature of lake and 2 m air temperature on lake in eight cases

表 4 水体对周边气温影响及相关因子列表

Table 4 Effects of water body on surrounding air temperature and related factors

天气条件	下风方影响	上风方影响	风速 阈值	湍流强度 阈值
	距离日平均 /km	距离日平均 /km		
冬季晴天小风	5.42	0.45	3.9	0.16
冬季阴天大风	8.70	0.38	6.2	0.45
春季晴天小风	4.08	0.38	4.6	0.22
春季阴天大风	4.15	0.35	6.0	0.49
夏季晴天小风	2.38	0.48	4.4	0.38
夏季阴天大风	1.37	0.41	4.9	0.31
秋季晴天小风	5.70	0.45	3.6	0.22
秋季阴天大风	7.26	0.39	3.0	0.10
平均值	4.88	0.41	—	—

相对稳定的层结条件下,湖泊和陆地的温差能够通过平流作用传递到更远的地方。而在春夏或者是晴天的天气,湍流运动较强的时候,湖泊对下风方的影响很难明确确定。通过表 1 的分析可以看出,水体对周边气温有明显影响的时刻冬季最多,夏季最少。水体对下风方气温的影响距离,秋冬季较远,春夏季较近;阴天水体对周边气温影响距离的平均值大于晴天。水体对非下风方气温的影响距离,夏季较远,春季较近。8 个代表性天气水体对下风方影

响距离平均达到 4.88 km,非下风方仅达 0.41 km。

从之前的分析可以看出,背景水平风速及湍流是湖体对下风方气温影响的关键因子。在不同的风速及湍流动能条件下,湖体对下风方的影响可大致分为 4 种类型:当风速相对较大,湍流动能较小时,湖体对下风方的影响如图 11a 所示,风速将湖陆温差携带至较远的距离。然而当背景风速过大时,湖陆温差迅速的被平流项带走,湖体对下风方的影响并不明显,如图 11b 所示。当区域湍流动能较大时,由于对流大涡的作用,所有的标量及矢量场的按照大涡的运动形式分布,很难分辨出水体的影响范围,如图 11c 所示;当风速不太大,同时湍流动能不太大时,水体对于下风方有一定的影响,如图 11d 所示。

为了量化分析风速和湍流动能的影响,本文统计了不同天气条件下有明确影响时刻 1.5 km 高度处的背景水平风速平均值及模拟区域内湍流动能最大值。如表 4 所示,水体对周边气温有明显影响的风速阈值为 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,湍流阈值为 $0.49 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。说明虽然水体对周边气温的影响主要通过平流输送及湍流扩散等作用实现,然而当风速大于 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,水陆热力性质差异迅速被平流项输送携带走,从而导致水体对周边气温无明显影响。湍流较弱时,水体对周边气温影响范围主要受平流输送项影响;湍流较强时,水体对上方气温的影响向上层大气传输,湍流强度超过 $0.49 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 时,水体对周边气温的影响不明显。

3.3 水体大小的对周边气温的影响

水体对周边气温的影响随水体大小不同而有差异^[33]。选择水体对周边气温影响较大的冬季 2010 年 1 月 7 日作为背景天气,设计不同水体面积的有、无水体算例进行模拟试验,每个算例的积分时间仍然为 36 h,取后 24 h 进行分析,其余试验条件参见文章中第二部分。并通过分析不同水体面积有、无水体模拟所得 2 m 高度气温的差值研究水体大小对周边气温的影响。采用两重嵌套进行不同水体面积对周边气温影响的敏感性试验,模拟网格格距分别为 3 km、1 km,格点数分别为 50×50 、 100×100 ,分为无水体和有不同水体面积进行模拟。

典型时刻不同面积水体对周边气温影响的模拟结果见表 5。由表可知,水体对周边气温的影响距离随水体面积的增加而增大,水体对周边气温影响距离日平均分别为 11 km、25 km、32.4 km、42.7 km。且以傍晚至夜间水体对周边气温影响较大。

22:00 不同面积水体对周边气温影响的模拟

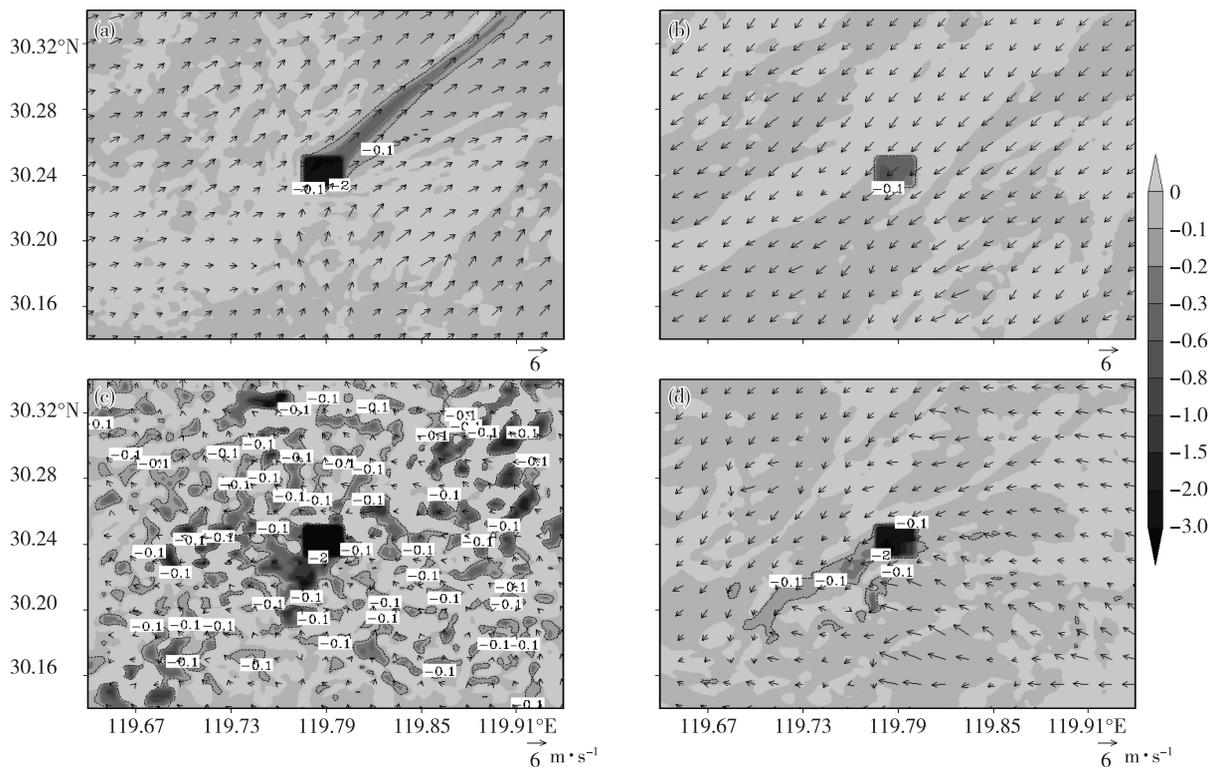


图 11 不同风速及湍流条件下水体对周边的影响

Fig.11 Effect of water body on surrounding air temperature in different wind speed and turbulent kinetic energy

表 5 不同面积水体对周边气温影响

Table 5 Effect on surrounding air temperature of water bodies with different areas

水体面积 /km ²	影响距离/km				平均值 /km
	10:00	16:00	22:00	04:00	
36	1	2.3	23.8	1	11
81	15.7	2.6	60.2	9	25
144	20.1	2.9	64.3	43.6	32.4
225	30.6	3.1	71.4	51.1	42.7

结果见图 12。由图可见,水体对周边气温的影响距离随着水体面积增大而明显增加。22:00 4 个不同面积水体导致上方空气增温平均达 4.5 °C 左右,水体对下风方增温效应影响距离分别为 23.8 km、60.2 km、64.3 km、71.4 km。

4 结论与讨论

本文以浙江省临安市青山湖为代表,水体面积约为 6.5 km²,选择 2010 年典型时段的天气条件,分别代表春、夏、秋、冬晴天小风及阴天大风的背景天气,采用 WRF 模式模拟分析了水体对周边 2 m 气温的影响,得到以下初步结论:

(1) 青山湖湖体常年下风方向约 5 km 内有湖

体的明显影响,其余方向约 0.4 km 内有湖体明显影响。水体对周边环境的影响随着季节和天气的变化显著不同。冬季天气条件通常较稳定,水体对周边气温有明显影响,平均增温达 2.4 °C,平均影响距离为 7.1 km。其次,春秋季节水体对周边气温也有明显影响。春季水体对周边空气为降温作用,平均降温达 1.1 °C,平均影响距离为 4.2 km。秋季水体对周边气温为增温作用,平均增温为 2.2 °C,平均影响距离为 6.5 km。夏季水体温度相对于大气温度较低,但是由于湍流较强,局地热力环流复杂,水体对下风向气温影响不明显。就影响距离平均值来看,秋、冬季较大,其它季节较小,阴天水体对周边气温的影响距离均值大于晴天。

(2) 以水体影响较大的天气条件,设计理想算例,研究水体面积大小对气温的影响,算例中水体面积分别为 36 km², 81 km², 144 km² 及 225 km²。模拟结果表明,水体面积越大,对周边气温影响距离越大,平均影响距离分别为 11 km、25 km、32.4 km、42.7 km。水体主要通过平流输送作用影响周边气温的变化。当风速小于 6.2 m·s⁻¹ 时,风速越大,水体对下风向的影响越大。当风速大于 6.2 m·s⁻¹ 时,水陆热力性质差异迅速地被平流项输送携带走,水体对下风方的影响不明显。而湍流扩散项则将水体

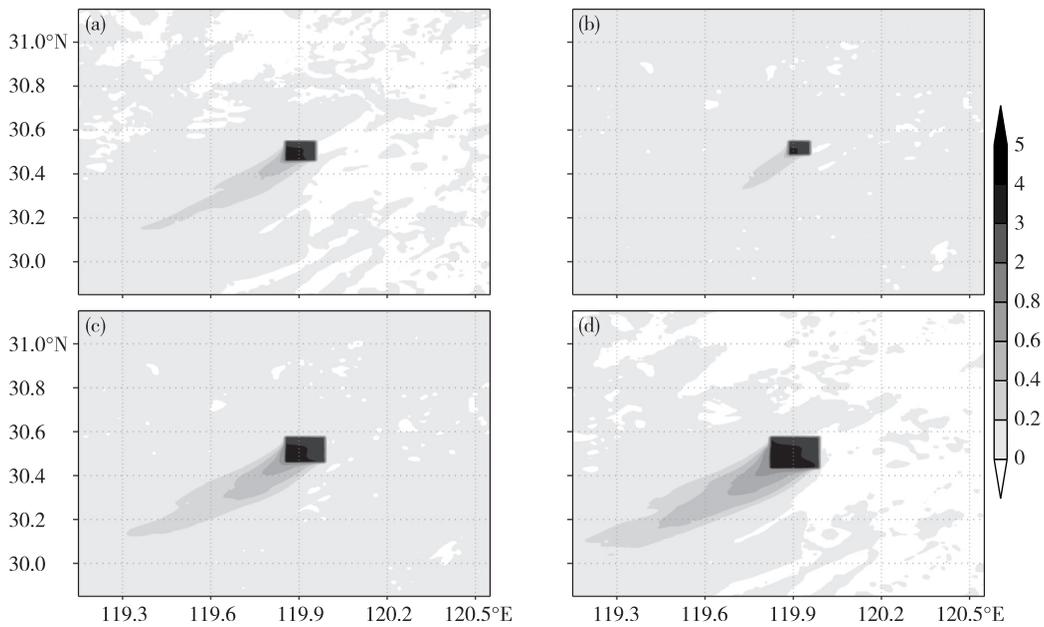


图 12 22:00 不同面积水体算例与无水体算例 2 m 气温差值:(a)36 km²; (b)81 km²; (c)144 km²; (d)225 km²
 Fig.12 The difference of 2 m air temperature with different area and without water body at 22:00 of
 (a)36 km²; (b)81 km²; (c)144 km²; (d)225 km²

与陆表热力性质的差异向垂直方向上传递,湍流大于 $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 时,湍流强度较大,局地环流复杂,水体对下风方的影响不明显。

最后,本文必须指出的是实际水体对周边气温的影响随水体面积的大小,水体深度,水体所在的纬度,季节等等都会发生变化。本文仅以浙江省临安市 6.5 km^2 的青山湖为例,对水体影响周边气温的程度及机理进行初步分析。该问题的研究,仍需针对不同天气条件,不同纬度条件,及不同大小的湖体再做更加长期的模拟研究,并进行大量深入分析。此外,进一步的研究中采用更高分辨率的再分析场数据,以及采用观测数据同化等技术可以提高数值模拟的准确性。

参 考 文 献

- [1] 陈贵川,卞林根,李平,等. 国家气候观测台建设观测环境问题. 气象科技, 2008, 36(2): 244-248.
 CHEN Guichuan, BIAN Lin'gen, LI Ping, et al. Issues on observation environment for building national climatic stations. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2008, 36(2): 244-248.
- [2] 杨仲江,朱浩,唐宏科,等. 地面电场仪测量数据的误差来源及分析处理. 大气科学学报, 2010, 33(6): 751-756.
 YANG Zhongjiang, ZHU Hao, TANG Hongke, et al. Research on source of error and analytical processing of atmospheric electric field data. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010, 33(6): 751-756.
- [3] 何冬燕,田红,邓伟涛. 多种方法在年平均风速均一性检验中的效果对比. 大气科学学报, 2012, 35(3): 342-349.
 HE Dongyan, TIAN Hong, DENG Weitao. Comparative analysis of the effects of different methods in homogeneity test on annual mean wind speed. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2012, 35(3): 342-349.
- [4] 周建平,孙照渤,倪东鸿,等. 中国气象台站迁移对年平均气温均一性的影响. 大气科学学报, 2013, 36(2): 139-146.
 ZHOU Jianping, SUN Zhaobo, NI Donghong, et al. Impact of meteorological station relocation on homogeneity of annual mean temperature in China. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2013, 36(2): 139-146.
- [5] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation. 6th ed. WMO-No.8, Geneva: WMO, 1996.
- [6] 刘勇,王东勇,田红,等. 气象观测环境的变化对气温序列的影响分析. 气象科学, 2006, 26(4): 436-441.
 LIU Yong, WANG Dongyong, TIAN Hong, et al. Temperature series affected by the change of environment around meteorological observing stations. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 2006, 26(4): 436-441.
- [7] 吴利红,康丽莉,陈海燕,等. 地面气象站环境变化对气温序列均一性影响. 气象科技, 2007, 35(1): 152-156.
 WU Lihong, KANG Lili, CHEN Haiyan, et al. Effect of meteorological observation environment variability on homogeneity of temperature series in Zhejiang province. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2007, 35(1): 152-156.
- [8] 相京霞. 观测场环境恶化对气象资料的影响分析. 山西气象, 2003(1): 35-36.

- XIANG Jinxia. Analysis of the influence of environmental deterioration of observation field on meteorological data. *Shanxi Meteorological* (in Chinese), 2003(1): 35-36.
- [9] Long Z, Perrie W, Gyakum J, et al. Northern lake impacts on local seasonal climate. *J. Hydrometeor.*, 2007, 8(4): 881-896.
- [10] Avissar R, PAN Hai. Simulations of the summer hydrometeorological processes of Lake Kinneret. *J. Hydrometeor.*, 2000, 1(1): 95-109.
- [11] Rouse W R, Blanken P D, Bussières N, et al. An investigation of the thermal and energy balance regimes of great slave and great Bear Lakes. *J. Hydrometeor.*, 2008, 9(6): 1318-1333.
- [12] Dutra E, Stepanenko V M, Balsamo G, et al. An offline study of the impact of lakes on the performance of the ECMWF surface scheme. *Boreal Environ. Res.*, 2010, 15(2): 100-112.
- [13] Jeffries M O, ZHANG Tingjun, Frey K, et al. Estimating late-winter heat flow to the atmosphere from the lake-dominated Alaskan North Slope. *J. Glaciol.*, 1999, 45(150): 315-324.
- [14] Goyette S, McFarlane N A, Flato G M. Application of the Canadian regional climate model to the Laurentian great lakes region: Implementation of a lake model. *Atmosphere-Ocean*, 2000, 38(3): 481-503.
- [15] Laird N F, Desrochers J, Payer M. Climatology of lake-effect precipitation events over Lake Champlain. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2009, 48(2): 232-250.
- [16] Samuelsson P, Kourzeneva E, Mironov D. The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. *Boreal Environ. Res.*, 2010, 15(2): 113-129.
- [17] Bonan G B. Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces. *J. Climate*, 1995, 8(11): 2691-2704.
- [18] Krinner G. Impact of lakes and wetlands on boreal climate. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D16): 4520.
- [19] Lofgren B M. Simulated effects of idealized Laurentian great lakes on regional and large-scale climate. *J. Climate*, 1997, 10(11): 2847-2858.
- [20] Elo P A R. The energy balance and vertical thermal structure of two small boreal lakes in summer. *Boreal Environ. Res.*, 2007, 12(5): 585-600.
- [21] 裴海瑛, 姜爱军, 叶香. 南京市不同下垫面对近地层温度影响. *气象科学*, 2011, 31(6): 777-783.
PEI Haiying, JIANG Aijun, YE Xiang. Impacts of different underlying surfaces over urban district in Nanjing on surface layer temperature. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2011, 31(6): 777-783.
- [22] 王浩, 傅抱璞. 水体的温度效应. *气象科学*, 1991, 11(3): 233-243.
WANG Hao, FU Baopu. The effects of water body on temperature. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1991, 11(3): 233-243.
- [23] 万军山, 吕丹苗, 刘福基. 鄱阳湖水体夏季气温效应. *湖泊科学*, 1993, 5(1): 26-31.
WAN Junshan, LTU Danmiao, LIU Fuji. Summer temperature effect of Poyang lake water body. *Journal of Lake Sciences* (in Chinese), 1993, 5(1): 26-31.
- [24] 毛以伟, 陈正洪, 王珏, 等. 三峡水库坝区蓄水前水体对水库周边气温的影响. *气象科技*, 2005, 33(4): 334-339.
MAO Yiwei, CHEN Zhenghong, WANG Jue, et al. Effect analysis of three gorges reservoir water on surrounding area air temperature before water storing. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2005, 33(4): 334-339.
- [25] 马占山, 张强, 秦琰琰. 三峡水库对区域气候影响的数值模拟分析. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(9): 1044-1052.
MA Zhanshan, ZHANG Qiang, QIN Yanyan. Numerical simulation and analysis of the effect of three gorges reservoir project on the regional climate change. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 2010, 19(9): 1044-1052.
- [26] 王浩. 深浅水体不同气候效应的初步研究. *南京大学学报(自然科学版)*, 1993, 29(3): 517-522.
WANG Hao. A preliminary study about the different climatic effects of deep and shallow waterbody. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)* (in Chinese), 1993, 29(3): 517-522.
- [27] CHEN Fei, Mitchell K, Schaake J, et al. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(D3): 7251-7268.
- [28] CHEN Fei, Janji Ć Z, Mitchell K. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP Mesoscale Eta Model. *Bound.-Lay. Meteor.*, 1997, 185(3): 391-421.
- [29] ZHANG Ning, CHEN Yan. A case study of the upwind urbanization influence on the urban heat island effects along the Suzhou-Wuxi Corridor. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 2014, 53(2): 333-345. doi: 10.1175/JAMC-D-12-0219.1.
- [30] Janji Ć Z I. The surface layer in the NCEP Eta Model//Proceedings of the 11th Conference on Numerical Weather Prediction. Norfolk, VA: American Meteorological Society, 1996.
- [31] Janji Ć Z I. Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, Office Note #437. Camp Springs, MD: NCEP, 2001.
- [32] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Lay. Meteor.*, 2001, 101(3): 329-358.
- [33] 李书严, 轩春怡, 李伟, 等. 城市中水体的微气候效应研究. *大气科学*, 2008, 32(3): 552-560.
LI Shuyan, XUAN Chunyi, LI Wei, et al. Analysis of microclimate effects of water body in a city. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(3): 552-560.