

太湖对周边城市热环境影响的模拟^{*}

任侠^{1,2} 王咏薇^{1,2} 张圳² 杨亦辰² 胡诚² 康汉青¹

REN Xia^{1,2} WANG Yongwei^{1,2} ZHANG Zhen² YANG Yichen² HU Chen² KANG Hanqing¹

1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044

2. 耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心, 南京, 210044

1. *School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China*

2. *Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing 210044, China*

2016-12-02 收稿, 2017-04-15 改回.

任侠, 王咏薇, 张圳, 杨亦辰, 胡诚, 康汉青. 2017. 太湖对周边城市热环境影响的模拟. *气象学报*, 75(4):645-660

Ren Xia, Wang Yongwei, Zhang Zhen, Yang Yichen, Hu Chen, Kang Hanqing. 2017. Simulation studies for Lake Taihu effect on surrounding cities thermal environment. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(4):645-660

Abstract Previous studies have shown that Lake Taihu's microclimate condition and local thermal environment play an important role in sustainable development of the surrounding cities and atmospheric macro-control. In order to more precisely simulate the lake-air interaction in Lake Taihu, the CLM4-LISSS shallow lake land-surface process parameterization scheme is coupled with the Noah land-surface process model in WRF in the present study. The performance of CLM4-LISSS shallow lake process scheme on the simulation of near-surface meteorological conditions in the region of Lake Taihu is evaluated using observations from the lake platforms and the observational stations in the land. Furthermore, on the basis of the coupled model simulation, the effect of Lake Taihu on the thermal environment in the surrounding cities is analyzed in the present study. The results are as follows. The lake surface temperature simulated by CLM4-LISSS lake surface process scheme can realistically reflect the variational trend of observed temperature. Differences are found in the simulated 2 m air temperature by the two land surface schemes. The Root Mean Square Error (RMSE) of 2 m air temperature between CLM4-LISSSS simulation and observations is 1.77 °C, which is better than that between Noah simulation and observations (2.22 °C). The correlation coefficients between observations and simulations by the two schemes are 0.88 (CLM4-LISSS) and 0.84 (Noah), respectively. The RMSEs of 10 m wind speed and correlation coefficients between observations and simulations by the two schemes are 1.93 m/s and 0.72 (CLM4-LISSS) and 2.78 m/s and 0.68 (Noah), respectively. Lake Taihu has a significant impact on the thermal environment of the surrounding cities. Near-surface temperature can be decreased by 0.5–0.7 °C averagely at 15:00 BT in August due to the lake effects and the influence range of the lake is up to 60 km. Near-surface temperature can be increased by 0.7–1 °C averagely at 06:00 BT in August and the influence range of the lake is up to 50 km. The cold air brought by the lake breeze suppresses the vertical motion induced by the urban heat island effect. Under the control of hot weather, average planetary boundary layer (PBL) heights over the urban areas of Suzhou, Wuxi and Changzhou can be decreased by 300, 400 and 100 m, respectively during the daytime. The maximum temperature decrease within the PBL in the region of Wuxi can reach up to 0.5–0.7 °C. The result indicates that the lake breeze can disrupt the heat island circulation structure in the region of Wuxi, change the distribution of near-surface heat and water vapor fluxes, restrain the vertical expansion of urban heat island and affect the entire region of Wuxi. The change in local thermal circulation may have a great impact on local climate and the

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金面上项目(41275024, 41505005)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20150900)、江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)、中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题(LAPC-KF-2014-09)。

作者简介: 任侠, 主要从事大气边界层与大气环境研究。E-mail: renxia89@126.com

通讯作者: 王咏薇, 主要从事大气边界层与大气环境, 以及陆面过程参数化方案方面的研究。E-mail: wyw@nuist.edu.cn

transport and dispersion of pollutants. Accurate parameterization scheme of lake surface process is significant for weather forecast and air quality simulation and climate study.

Key words WRF model, Shallow lake surface process, Urban thermal environment, Coupling of parameterization schemes

摘要 太湖微气候条件及局地热环境的研究对于太湖周边城市地区可持续发展以及大气宏观调控具有重要意义。为了更准确模拟太湖湖-气交换,将 CLM4-LISSS 浅水湖泊陆面过程参数化方案耦合进入 WRF 中的 Noah 陆面过程模型。采用太湖湖上平台及岸边陆上测站观测的数据,评估了 CLM4-LISSS 浅水湖泊过程方案对太湖区域近地层气象条件的模拟性能。并基于耦合模型模拟研究了太湖对周边城市区域热环境的影响。结果表明,CLM4-LISSS 湖泊陆面过程方案模拟的湖表面温度能反映真实温度的变化趋势。两种陆面过程方案在 2 m 气温的模拟值也存在一定的差异。CLM4-LISSS 与 Noah 方案计算所得湖上 2 m 气温的模拟值与观测值的平均均方根误差分别为 1.77 和 2.22℃,平均相关系数分别为 0.88 和 0.84;模拟 10 m 风速的平均均方根误差分别为 1.93 和 2.78 m/s,平均相关系数为 0.72 和 0.68。太湖对周边城市热环境存在明显的影响。8 月太湖对周边地区 15 时(北京时)近地层平均降温 0.5—0.7℃,影响范围达 60 km。06 时太湖导致周边近地层平均升温达 0.7—1℃,影响范围达 50 km。湖风带来的冷空气抑制了城市热岛的垂直运动,在高温天气下使得苏州、无锡和常州城市地区昼间边界层下降高度可达 300、400 和 100 m。无锡地区边界层内气温最高降幅可达 0.5—0.7℃。通过选取无锡地区 2015 年 8 月 28 日高温小风天气作为背景条件,分析该地区湖风对城市热岛环流的影响机制。结果表明湖风能够破坏无锡地区的热岛环流结构,改变近地面热量和水汽的分布,抑制城市热岛的垂直发展,并影响至整个无锡地区。局地热力环流的变化对于局地气候以及污染物质的输送与扩散有可能产生重要影响,准确的湖泊陆面过程参数化方案对于天气预报、空气污染模拟,以及气候模拟研究等均具有重要意义。

关键词 WRF 模式,浅水湖泊陆面过程,城市热环境,参数化方案耦合

中图法分类号 P404

1 引言

湖泊是地-气系统的重要组成部分,由湖泊水体与周边陆地的热力差异激发的局地热力环流影响着流域内的大气环境以及污染物的扩散和输送(Lyons, 1972),同时湖泊的物理属性在人为活动和气候的影响下发生改变,又反馈于气候系统,对当地社会经济发展及人体健康产生重要的影响。太湖是中国东部最大的浅水湖泊,面积 2338 km²、平均水深 1.9 m(Qin, et al, 2007),太湖流域也是中国城市化进程最快的地区之一,人地矛盾凸出,蓝藻水华等水污染事件频发(王成林等, 2010),由此引发严重的环境问题,改变了局地气候条件,进而影响城市可持续发展及大气宏观调控(钱俊龙等, 2013),太湖微气候条件及局地热环境的研究对于太湖周边城市地区可持续发展以及大气宏观调控具有重要意义。

数值模式由于能够提供局地气候的时空分布特征,是研究水体对局地微气候影响的重要工具。在当前的数值天气预报模式中,不论是全球气候模式(GCMs)还是区域气候模式(RCMs),大部分陆面模式的研究重点仍然集中在不同种类陆面下垫面的研究。在天气尺度模式 WRFv3(Gu, et al, 2015)中 Noah 陆面过程模型对于湖-气交换计算非常简化,

是以海表面的大气温度来取代大面积的湖面大气温度。然而,与海洋不同,浅水湖泊的热力学和水文学状态对大气条件的变化响应非常敏感,呈现出明显的天气尺度及日尺度的变化(颜金凤等, 2007)。在研究浅水湖泊时,应采用适合的数值模型及其陆面过程参数化方案。Deng 等(2013)改进公用陆面模式 CLM4.0 (Community Land Model version 4) (Oleson, et al, 2010) 湖泊模型 (Subin, et al, 2012a; 古红萍等, 2013a),使其较好地应用在太湖等浅水湖泊的模拟研究中。

天气气候模式中湖泊-陆面过程参数化方案的耦合对于动态的预报湖-气相互作用非常重要。区域气候模式、全球气候模式以及 CLM4.0 中 (MacKay, et al, 2009; Mironov, et al, 2010; Subin, et al, 2012a, 2012b) 已引入深水湖泊模型展开研究。研究者 (Bonan, 1995; Krinner, 2003; Dutra, et al, 2010; Samuelsson, et al, 2010) 在模拟过程中将一维的湖模式运用到气候模拟研究中,并将湖面的不同几何形状、不同湖面的光学反射率以及不同气候背景的模拟结果进行比较 (Perroud, et al, 2009; Martynov, et al, 2010; Stepanenko, et al, 2010)。研究表明,关心区域中有大面积的湖泊时,考虑湖-气交换的关键因素后能够大幅度提高区域

气候预测的准确性(Lofgren, 1997; Long, et al, 2007; Krinner 2003; Rouse, et al, 2005; Dutra, et al, 2010; Samuelsson, et al, 2010)。

中尺度数值模式中,古红萍(2013b)将一维热扩散湖模式耦合到中尺度天气研究和预报模式 WRFv3.2 中,建立湖-气耦合模式。其结果表明耦合了湖泊模块的湖-气耦合模式比没有湖面方案的 WRF 模式对太湖水温的模拟能力有很大改进。在 WRFv3.5 中耦合的 CLM4.0(Oleson, et al, 2010)湖泊陆面方案经过 Subin 等(2012a)及 Gu 等(2015)根据北美五大湖观测数据进行优化后,对于五大湖深水湖泊的表面温度模拟精度明显提高。Xu 等(2016)采用耦合湖泊模型的 WRFv3.7.1-CLM4.5 模拟洱海的湖泊物理过程以及湖-气交换过程,并利用观测数据对模式进行评估,发现湖泊模型使用默认参数模拟湖表温度时,白天表现出显著的负偏差,而夜间表现为正偏差。因此,探明湖泊过程和湖-气相互作用对局地天气和气候的影响,开展湖泊模式在中国湖泊的适用性研究很有必要。

水体驱动热力环流对城市热环境影响的研究主要集中在沿海城市以及大型深水湖泊等地区。如在美国芝加哥地区,湖泊的存在能够加强城市夜间热岛强度,削弱正午时刻的城郊温差(Jason, et al, 2011)。较暖的海风使得墨西哥湾近海郊区气温上升,但对城市区域影响较小,因此破坏了城市热岛的环流结构(Hu, et al, 2016)。城市的存在同时也影响海(湖)陆风的结构特征,中国台湾北部的热岛效应对海陆风环流有显著的影响,主要表现在白天加强海风,夜间削弱陆风(Lin, et al, 2008)。在利用 WRF 耦合单层城市冠层模式研究局地陆面和城市强迫对海陆风环流演变的影响时发现,美国休斯顿地区城市的存在有利于地面风的停滞,削减海风的影响范围(Chen, et al, 2011)。但是不同的湖泊由于纬度、地形、气候、周边地区经济发展等方面的差异而使其水体特性以及对周边地区的影响具有不同的特征。太湖与深水湖泊及海洋相比,湖体较浅,平均水深仅为 1.9 m(Qin, et al, 2007),湖水热容量小,易受到背景天气的影响。太湖湖风产生时湖表气温与岸边差异不大(覃海润等, 2015),不易被观测到。太湖对周边地区热环境产生的影响,有必要深入研究。

有关太湖对周边城市热环境影响的研究已有一

些进展,如康汉青等(2014)应用 WRF/Noah 模型对长三角地区一次高温天气的模拟过程中,发现太湖导致无锡和常州白天近地面平均气温分别下降 0.49 和 0.52℃,使得无锡白天边界层高度最多约下降 450 m,常州约下降 670 m。杨健博等(2013)利用南京大学区域边界层模式,分析了在一次夏季晴天小风的背景天气条件下,苏州地区在湖陆风环流背景下的城市化进程对热岛特征的影响,得出太湖的存在会使苏州地区的地面热岛强度降低的结论。然而在这些研究中,模拟方案都是将太湖湖表温度近似为邻近海洋的海表面温度进行处理。

本研究首先将 Deng 等(2013)适用于浅水湖泊的陆面过程模型耦合进入 WRF 模式,评估耦合方案 CLM4-LISSS(Community Land Model version 4- Lake, Ice, Snow, and Sediment Simulator)(Subin, et al, 2012a)与 Noah(Ek, et al, 2003)默认方案对于太湖近地层交换模拟的适用性,并对 2015 年 8 月太湖及周边城市进行模拟,以讨论太湖对苏州—无锡—常州地区的城市热环境及边界层结构的影响,该研究可以为城市气候、大气环境的改善提供理论依据。

2 模式和数据

2.1 WRF 模式及文中所用的湖泊陆面参数化方案

WRF 模式(Skamarock, et al, 2008)是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等美国的科研机构共同参与开发研究的新一代中尺度预报模式和同化系统。文中基于 WRF/Noah 模型耦合了浅水湖泊陆面过程参数化方案 CLM4-LISSS,并对比了 CLM4-LISSS 与 Noah 默认的湖泊计算方案。

(1) CLM4-LISSS 及其与 WRF/Noah 的耦合

CLM4-LISSS 浅水湖泊陆面过程模型为 Deng 等(2013)基于太湖的观测数据对 CLM4.0 进行优化后,使其发展为适合浅水湖泊模拟并有效验证的湖泊陆面模型。该浅水湖泊模式是一个一维能量、质量守恒模式(Subin, et al, 2012a)。CLM4-LISSS 浅水湖泊陆面过程模型将湖水自上而下垂直分为冰雪层(当有冰雪存在,并大于最小厚度)、液态水体(划分为 10 层)、底泥(划分为 10 层)、基岩(划分为 5 层)。Deng 等(2013)在模拟太湖湖表温度时发现,当在 CLM4-LISSS 中开启冰雪模块,模拟值与

观测值平均偏差为 5 K。而关闭冰雪模块,平均偏差为 3 K。原因可能是当太湖湖面上的气温低于冰点,但湖面并没有结冰,且产生了降雨过程而非降雪过程。故在评估 CLM4-LISSS 浅水湖泊过程方案对太湖区域模拟研究的适用性时,关闭冰雪模块。并假定水体在水平方向上的状态均一,湖水深度为

2 m,在湖水的垂直方向上以 20 cm 为一层划分为 10 层(图 1),并考虑底泥的热量传递作用。用 Crank-Nicholson 方法把一维的热扩散方程写成差分形式,通过有限差分的处理方法求解一维热扩散方程,更精确地计算出各层湖水的温度,进而提高辐射平衡以及能量平衡的模拟精度。

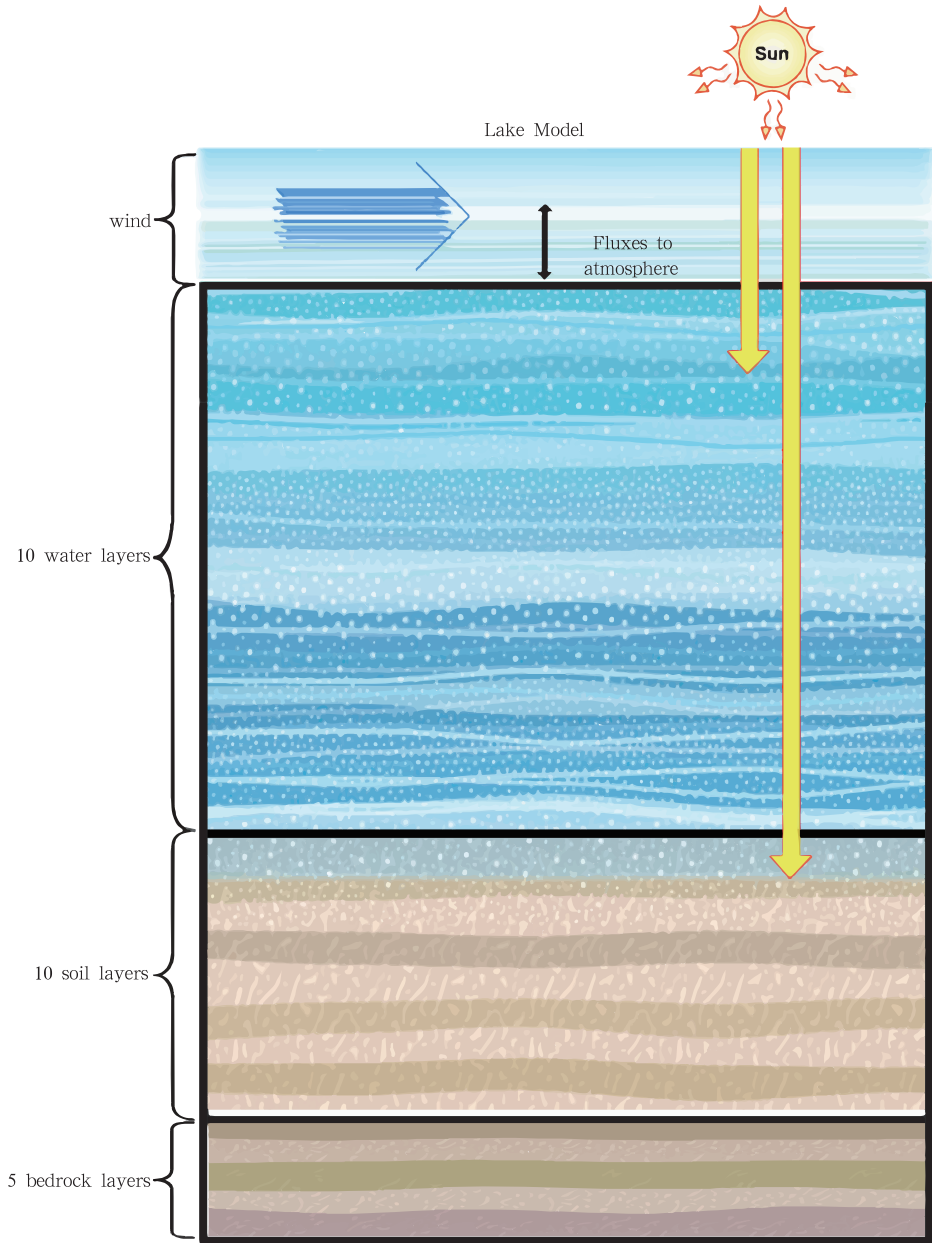


图 1 湖泊模型示意 (Subin, et al, 2012a)
Fig. 1 Schematic lake model (Subin, et al, 2012a)

湖表层的能量平衡方程计算公式为

$$K^* + (L_{\downarrow} - L_{\uparrow}) = Q_H + Q_E + Q_G + (1 - \beta)K^* \quad (1)$$

式中, K^* 为净短波辐射 (W/m^2), L_{\downarrow} 为向下的长波辐射 (W/m^2), L_{\uparrow} 为湖表发射的长波辐射 (W/m^2), Q_H 为感热通量 (W/m^2), Q_E 为潜热通量 (W/m^2),

Q_g 为湖表层与剩余湖体的扩散热通量 (W/m^2), β 为保留在湖表层的短波辐射 (%). $Q_g + (1 - \beta) K^*$ 代表热储项, 这里的热储项与两部分有关, 分别是热扩散和太阳辐射传输。其中 $\beta = 1 - e^{-\kappa_a \eta}$, κ_a 为湖水表层厚度, 这里设置为 $0.2 m$, η 为湖水消光系数。 η 值越大, 蓝藻水华等水污染导致湖水越浑浊, 保留在湖表层的净短波辐射越多; 湖体间的热扩散遵循热扩散方程为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dz} \left[(k_m + k_e) \frac{dT}{dz} \right] + \frac{1}{c} \frac{dS}{dz} \quad (2)$$

式中, T 为湖水温度 (K), k_m 为分子的热扩散系数 (m^2/s), k_e 为涡度扩散系数 (m^2/s), c 为水的定容比热 ($J/(m^3 \cdot K)$); S 为在湖深 z 处吸收的太阳光 (W/m^2), t 为时间, z 为水深 (向下为正)。

水体向下的热力扩散由两部分决定, 一部分为分子的热扩散过程, 另一部分由流体的涡度扩散决定。涡动扩散系数 (k_e) 在湖表面和水热分层中作为动量、通量、湖水深度、湖水温度的函数被参数化。用 Crank-Nicholson 方法将热扩散方程写成差分形式, 离散化的方程组整理成 3 个对角矩阵的形式, 易

求解各层的温度 (Deng, et al, 2013)。

首先将 CLM4-LISSS (Deng, et al, 2013) 耦合进入 WRF/Noah 模型, 用 CLM4-LISSS 模型代替 Noah 中原有的湖泊方案。模拟过程中, 水体的 10 层水温初始温度由太湖 BFG 通量观测站 (图 2) 的观测数据获取。并在耦合时将湖泊和海洋两种下垫面区分开来。此外将 WRF 中水体反照率由 0.08 改为太湖夏季 8 月观测平均值 0.055 (朴美花等, 2014)。

(2) Noah 模型中默认的湖泊陆面计算过程

Noah 陆面方案描述了土壤-积雪-植被与大气的相互作用, 可以用于模拟土壤温度、土壤含水量、冠层含水量、雪深、水汽、能量通量、向上长短波辐射强度等。该模式既可作为一维单点模式独立运行, 也可以耦合到各种气候模式中, 模拟研究陆面过程对气候的影响 (Chen, et al, 1996, 1997, 1999; Wood, et al, 1998)。目前, Noah 陆面过程模型对于湖-气交换计算是以海表面温度来取代大面积的湖面温度。

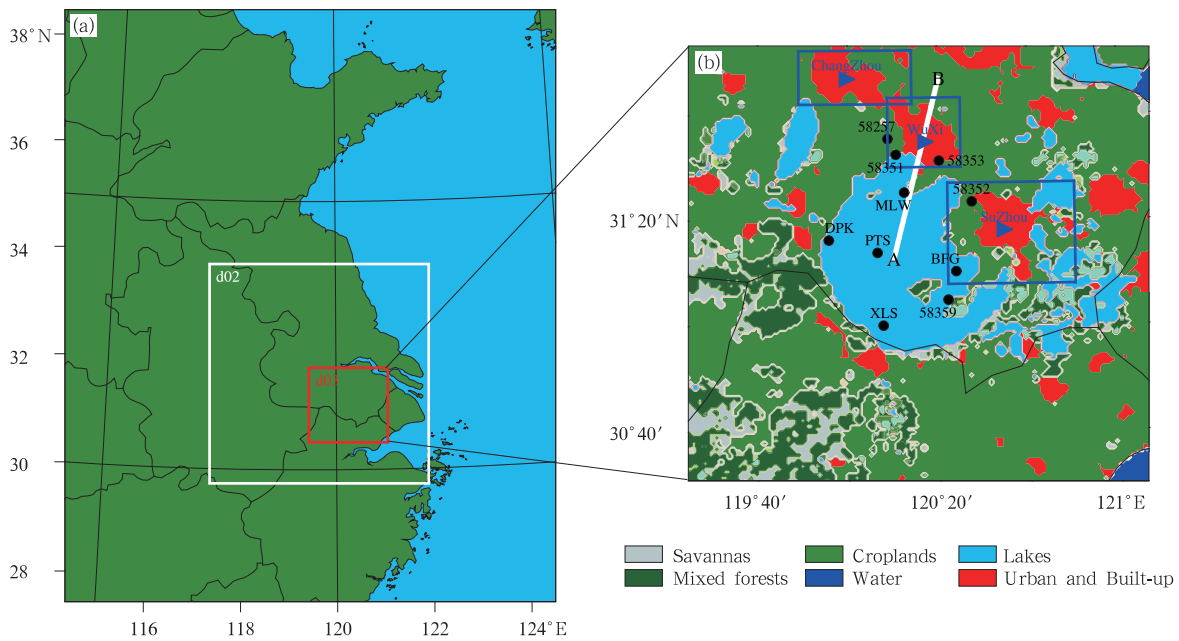


图 2 WRF 模拟区域 (a) 配置及 (b) 最内层下垫面类型

(AB 线为图 9 垂直剖面所在位置; 黑色圆点为气象观测站位置; 蓝色三角形为苏州、无锡以及常州地区; 蓝色方框内的红色区域 (城市地区) 是图 7a—c、图 8a—c 中计算垂直温度廓线差值和边界层高度的平均值的区域)

Fig. 2 Landuse categories over the innermost domain

(line AB denotes the location of vertical cross-section in Fig. 9 and black dots denote the observation stations; the blue triangle indicates Suzhou, Wuxi and Changzhou; The red area (city area) in the blue box is the area in Fig. 7a—c and Fig. 8a—c where the average of the vertical temperature difference values and the average of the boundary layer height are calculated)

2.2 模拟算例

文中设计了3个算例(表1)。其中 Noah 算例采用 Noah 默认的方案计算湖-气交换。Lake 和

Nolake 算例采用耦合入 WRF 的 CLM4-LISSS 湖泊陆面过程方案,其中 Nolake 算例将太湖下垫面替换为耕地。3个算例均使用 WRFv3.3.1。

表1 数值模拟设计

Table 1 Configuration of the numerical simulation

算例名称	Noah	Lake	Nolake
模拟时间	2015年8月1日—9月1日	2015年8月1日—9月1日	2015年8月1日—9月1日
模拟区域中心	33.05°N,119.44°E	33.05°N,119.44°E	33.05°N,119.44°E
网格数	第1层:113×136;第2层:151×151;第3层:163×154	第1层:113×136;第2层:151×151;第3层:163×154	第1层:113×136;第2层:151×151;第3层:163×154
水平分辨率	第1层:9 km;第2层:3 km;第3层:1 km	第1层:9 km;第2层:3 km;第3层:1 km	第1层:9 km;第2层:3 km;第3层:1 km
积分时间步长	18 s	18 s	18 s
垂直分层	53层(近地层取密,2 km以下20层)	53层(近地层取密,2 km以下20层)	53层(近地层取密,2 km以下20层)
地形数据	Modis	Modis_lakes	Modis_lakes(无太湖)
初始边界条件	逐6 h的NCEP再分析资料(1°×1°)	逐6 h的NCEP再分析资料(1°×1°)	逐6 h的NCEP再分析资料(1°×1°)
湖泊陆面过程方案	Noah	CLM4-LISSS	CLM4-LISSS
城市冠层方案	Building Environment Parameterization (BEP) scheme (Martilli,2009)	Building Environment Parameterization (BEP) scheme (Martilli,2009)	Building Environment Parameterization (BEP) scheme (Martilli,2009)
微物理过程方案	WRF Single-Moment 3-class (WSM 3-class) simple ice (Hong, et al,2004)	WRF Single-Moment 3-class (WSM 3-class) simple ice (Hong, et al,2004)	WRF Single-Moment 3-class (WSM 3-class) simple ice (Hong, et al,2004)
长波辐射过程方案	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) (Mlawer, et al,1997)	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) (Mlawer, et al,1997)	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) (Mlawer, et al,1997)
短波辐射过程方案	Dudhia (Dudhia,1989)	Dudhia (Dudhia,1989)	Dudhia (Dudhia,1989)
边界层方案	Bougeault and Lacarrere (Bougeault, et al,1989)	Bougeault and Lacarrere (Bougeault, et al,1989)	Bougeault and Lacarrere (Bougeault, et al,1989)
近地面层方案	Monin-Obukhov (Paulson,1970)	Monin-Obukhov (Paulson,1970)	Monin-Obukhov (Paulson,1970)
积云对流方案	Kain-Fritsch (Kain,et al, 1990, 1993) (只有第一重嵌套使用 KF 方案)	Kain-Fritsch (Kain,et al, 1990, 1993) (只有第一重嵌套使用 KF 方案)	Kain-Fritsch (Kain,et al, 1990, 1993) (只有第一重嵌套使用 KF 方案)

2.3 数据

模式验证数据为2015年8月共31 d的太湖岸边陆地上气象基准观测站及太湖湖上通量观测站(站点位置见图2),共10个气象站逐时2 m气温和10 m风速的数据。选用2015年8月的原因是太湖流域属北亚热带季风气候区,8月主要受到来自海洋的夏季季风控制,盛行东南风,天气炎热多雨。8月上旬以晴朗多云天气为主,中下旬以多云及雷雨天气为主。8月平均雨日为11 d,多为短时雷雨天气。而7月太湖流域以多云降雨天气为主,阴雨天数平均13 d,夏季典型的晴天天数较少,没有连续的高温天气。

BFG、XLS、DPK、MLW、PTS 站点为分别位于

太湖东、南、西、北岸及太湖中心的太湖通量观测站,观测风向、风速、降水、平均气温、辐射4分量和湍流通量。58257、58351、58353、58352、58359 站点为太湖周边城市中国国家基准气候站,分别位于靖江、江阴、张家港、常熟、吴江,观测风向、风速、降水和平均气温。

3 模拟结果验证

图3a给出了Noah算例与Lake算例在8月太湖湖表温度与观测值的平均日变化对比。可以看出,Noah陆面过程方案中以海表面温度来取代湖面温度,一天当中无变化,与观测值有非常大的差异,在14时(北京时,下同)超过3℃。CLM4-LISSS湖

泊陆面过程方案模拟的湖表面温度能较好地反映出观测的变化趋势,与观测值接近。图 3b 为 Noah 以及耦合 CLM4-LISSS 湖泊陆面过程方案模拟 8 月太湖及周边地区 2 m 气温与观测值的平均日变化对比。结果表明,两种模拟的气温平均日变化与实际较为一致,在太湖湖面上的站点(包括 BFG、MLW、DPK、XLS、PTS)的模拟结果普遍比观测值低。可以明显地看出昼间 CLM4-LISSS 方案的模拟结果比 Noah 默认方案更接近实际观测值,在气温高值处更为明显。在气温低值处 CLM4-LISSS 方案的模拟结果低于 Noah 默认方案。由于太湖平均水深只有 1.9 m,属于典型的浅水湖泊。相比

Noah 方案中以近似海温插值得到的湖水温度的处理方案,CLM4-LISSS 浅水湖泊模型考虑了太湖湖体较浅的特点。浅水湖泊昼间湖水升温较快,进而影响上层的大气温度,使其升温迅速,且温度较高。而夜间由于浅水湖泊比海洋或深水湖泊的热容小,故湖水温度降低较快,进而使得夜间上层的大气温度降温迅速,温度较低。所以,文中使用的 CLM4-LISSS 浅水湖泊模型模拟的夜间 2 m 气温比 Noah 默认的陆面过程模拟的夜间温度低。综上分析可知,针对浅水湖泊 CLM4-LISSS 方案有较好的模拟效果。

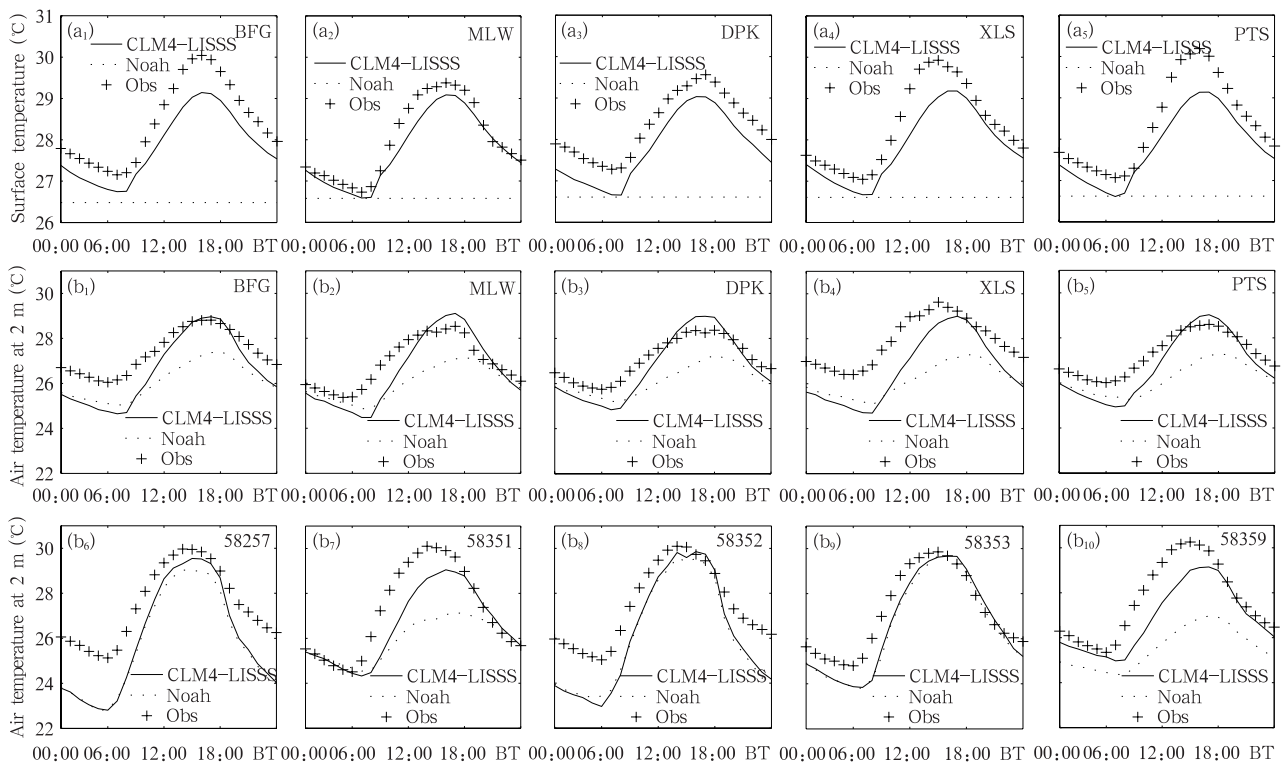


图 3 2015 年 8 月太湖湖上站点(a₁—a₅)和太湖及周边 10 个站点(b₁—b₁₀)(站点位置见图 2b)的湖表温度和 2 m 气温观测值与 CLM4-LISSS、Noah 两种陆面过程方案模拟值的平均日变化对比

Fig. 3 Comparison of simulated diurnal variations of lake surface temperature and 2 m temperature with observations at Lake Taihu area (a₁—a₅) and the 10 sites of the Taihu Lake and the surrounding area (b₁—b₁₀) (see Fig. 2b)

在陆地站点(58257、58352、58353),两种陆面过程方案的模拟结果较为接近,气温高值处与观测值较为吻合,因为这 3 个站点距离太湖较远,靠近城市地区,太湖对其气温的影响有限。观测站 58351 位于太湖岸边,湖-陆的热力差异对其影响显著,模拟情况与在湖面上站点接近。站点 58359 位于水网复

杂的太湖西南侧,其周边具有山地、耕地、城市等多种土地覆盖类型,同时受到两侧湖陆风环流以及谷风环流的影响,所以两种方案的模拟值与观测对比结果较其他站点更为复杂。

选取太湖及周边 10 个气象台站的湖表面温度、2 m 气温以及 10 m 风速观测数据对模拟结果进行

验证。为量化评估两种模型模拟结果与观测值的符合情况,计算了均方根误差和相关系数

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - O_k)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

CLM4-LISSS 方案在各观测站点的 2 m 气温模拟值与观测值的平均均方根误差以及平均相关系数,优于 Noah 默认方案的模拟结果(图 4)。CLM4-

LISSS 和 Noah 默认方案的所有站点 2 m 气温平均均方根误差分别为 1.77 和 2.22℃,平均相关系数分别为 0.88 和 0.84。CLM4-LISSS 陆面过程方案在太湖区域近地面气温有优良的模拟效果。

CLM4-LISSS 方案在太湖湖面上站点(包括 BFG、MLW、DPK、XLS、PTS)的 2 m 气温平均均方根误差和平均相关系数分别为 1.59 m/s 和 0.87,在陆地站点(58257、58352、58353、58351、58359)平均均方根误差和平均相关系数分别为 1.96 m/s 和 0.89,说明 CLM4-LISSS 湖泊陆面过程方案在模拟湖泊区域近地面气温时比在陆地更接近观测值。

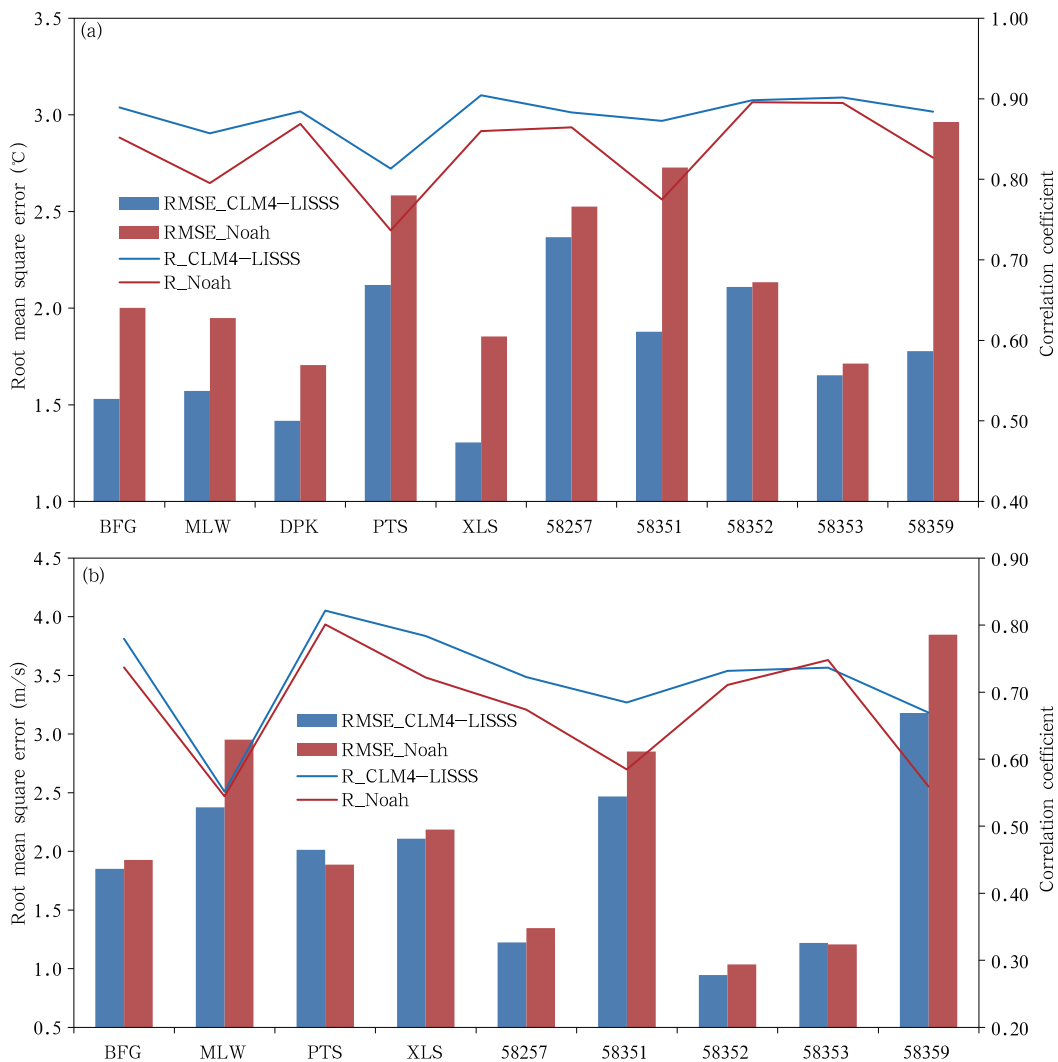


图 4 2015 年 8 月 CLM4-LISSS(蓝)和 Noah(红)与观测值在平均 2 m 气温(a)与平均 10 m 风速(b)的均方根误差(柱状图)和相关系数(折线图)对比

Fig. 4 Root mean square errors (histograms) and correlation coefficients (solid lines) of 2 m temperature (a) and 10 m wind speed (b) simulated by the two surface schemes (CLM4-LISSS: Blue, Noah: Red)

各站点(DPK 无风速观测资料)两种方案模拟的 10 m 风速与观测结果的差异较小。CLM4-LISSS 方案模拟值的平均均方根误差比 Noah 默认方案的模拟结果小,与观测值接近(图 4b)。CLM4-LISSS 和 Noah 默认方案的所有站点 10 m 风速平均均方根误差分别为 1.93 和 2.78 m/s,平均相关系数分别为 0.72 和 0.68。CLM4-LISSS 陆面过程方案在模拟太湖区域近地面风场时具有优势。

总体来说,对于浅水湖泊的陆-气交换,CLM4-LISSS 模型较 Noah 模型更有优势。

4 太湖对周边地区热环境的影响

4.1 太湖对周边近地层气温的影响

通过土地覆盖类型敏感性试验,定量分析夏季(8月)太湖对周边城市地区热环境的影响,主要针对太湖沿岸的苏州(SZ)、无锡(WX)、常州(CZ)3座城市。

水体比陆地具有更大的比热容,升温缓慢,使水体与陆地形成较大温差,引起局地气流变化。从图 3 可以看出,8月太湖湖上及岸边陆上平均最高气温约出现在 15 时,最低值出现在 06 时,故选择这两个时刻作为典型时刻进行太湖对周边热环境影响的分

析。

图 5 与图 6 为 Lake 算例与 Nolake 算例 15 时和 06 时月平均近地层气温和风场的差值(Lake - Nolake),能够反映太湖对局地气温以及风场的影响。15 时,显著的湖-陆温差引起强烈的湖风环流,在背景风场和湖风的共同作用下,太湖对周边和下风向地区近地层降温显著。太湖导致周边及下风向地区近地层平均降温达 0.5—0.7℃(图 5),影响范围可达 60 km(图 5 中 L1 线)。8 月太湖流域盛行东南风,苏州位于太湖的上风向,易受背景风场影响,使太湖对苏州降温影响很小,无锡和常州位于下风向,太湖使这两座城市白天平均 2 m 气温下降 0.3—0.5℃。由风速、风向的差值看出,太湖中心在 15 时均产生强烈辐散气流,其他地区风速无明显差异。

夜间太湖对周边热环境的影响与昼间相反,夜间太湖湖体温度高于陆地,产生的陆风对周边地区产生升温作用。06 时太湖导致周边及下风向地区平均升温可达 0.7—1℃(图 6),影响范围可达 50 km(图 6 中 L2 线)。在背景风场影响下,太湖使无锡和常州平均 2 m 气温升高 0.3—0.5℃。

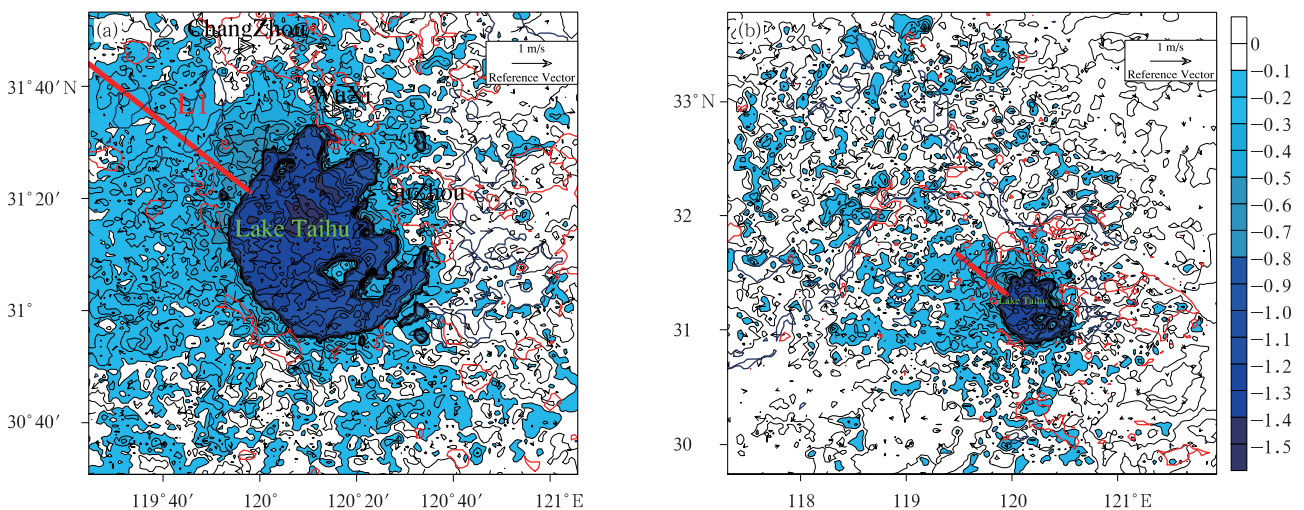


图 5 2015 年 8 月 Lake 与 Nolake 算例在 15 时 2 m 气温(色阶;单位:℃)和 10 m 风速的差值(箭头;单位:m/s)

(a. 最内层嵌套,b. 第二重嵌套;红色线条区域为城市地区(苏州、无锡以及常州地区在 a 图中标注);深蓝色线条区域为湖泊地区)

Fig. 5 Differences in averaged 2 m temperature (shaded; unit: °C) and 10 m wind field (arrows; m/s) between experiments with and without Lake Taihu at 15:00 BT

(a. the innermost domain, b. the nest domain 2. Red lines indicate urban areas and the blue lines indicate lake areas)

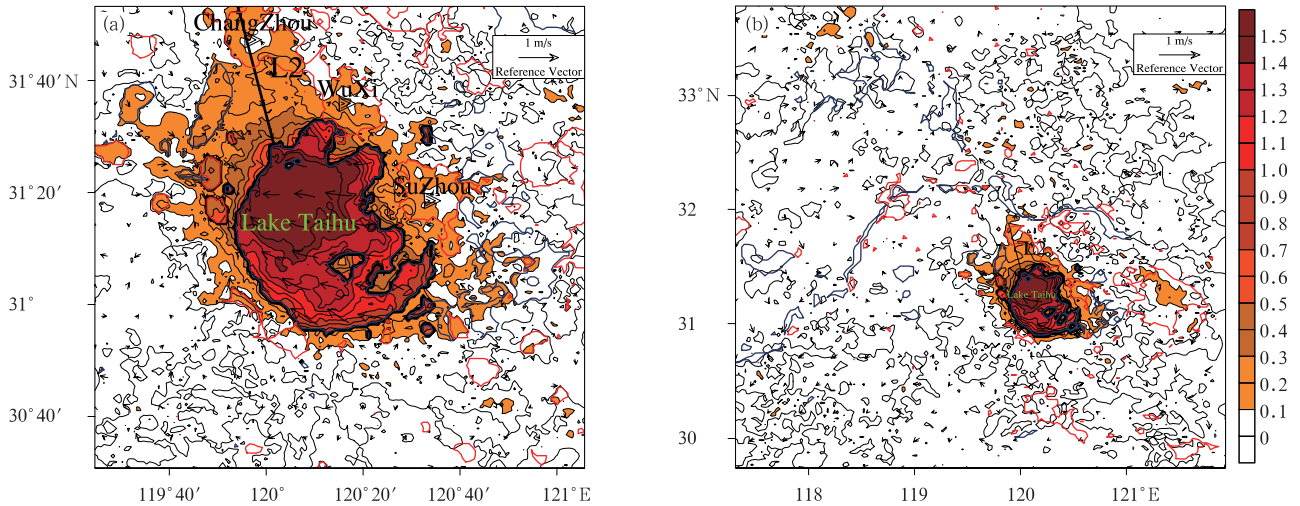


图6 2015年8月Lake算例与Nolake算例在06时2 m气温(色阶;单位:°C)和10 m风速的差值(箭头)

(a. 最内层嵌套, b. 第2重嵌套;红色线条区域为城市地区(苏州、无锡以及常州地区在a图中标注);深蓝色线条区域为湖泊地区)

Fig. 6 Differences in averaged 2 m temperature (shaded; unit: °C) and 10 m wind field (arrows; m/s) between experiments with and without Lake Taihu at 06:00 BT
(a. the innermost domain, b. the nest domain 2. Red lines indicate urban areas and blue lines indicate lake areas)

4.2 太湖对其周边城市边界层内气温的影响

图7为2015年8月Lake与Nolake算例在苏州、无锡及常州模拟的边界层高度差及气温差(Lake - Nolake)的平均日变化。图7a—c、8a—c中气温平均值的计算范围为图2b中蓝色方框内的城市区域(下垫面类型为红色),即为各城市区域面平均值的平均日变化。太湖使无锡和苏州边界层内平均气温均下降0.2—0.3°C,该过程主要发生在中午前后,此时湖陆温差最大。夜间太湖使3座城市边界层内气温平均上升0.1—0.2°C,在日出前后达到最大。同时,太湖会使苏州和无锡的边界层高度最大均降低约80 m,但是对常州影响非常微弱。无锡市中心相比其他两座城市更靠近太湖,且处在下风向位置,太湖带来的冷空气对近地面降温作用更加显著,削弱湍流输送,减弱垂直运动,使得边界层高度降低。

夏季高温天气过程,太湖对周边地区热环境的影响更为显著。8月上旬太湖周边位于副热带高压后部,在高压系统的影响下,太湖及其周边地区天气晴朗,无风或东南风,有利于产生高温天气。后期受到台风的影响,太湖地区多为多云或雷阵雨天气。查阅历史天气可知,8月1—6日最高气温在35°C以

上,以晴朗静稳天气为主,8月2—4日为全年最高气温38°C。8月6日之后陆续有多云雷雨天气,平均降温幅度约为5°C。因此,选取8月1—6日高温天气进行3座城市的垂直气温和边界层高度的分析。

在高温天气下,湖-陆温差显著,湖风发展旺盛,图8为2015年8月1—6日Lake与Nolake算例在苏州、无锡及常州模拟的边界层高度差及气温差(Lake - Nolake)的平均日变化。3座城市的高温日平均边界层高度要明显高于月平均边界层高度。太湖白天对无锡的降温作用更显著,边界层内降温幅度最高可达0.5—0.7°C。而太湖使得苏州,常州边界层内降温幅度最高只有0.2—0.3°C。太湖对常州夜间气温影响最大,最大升温可达0.9°C。由苏州和无锡的Lake与Nolake算例的边界层高度的平均日变化可以发现(图8a、b),在高温日,太湖会使苏州和无锡昼间边界层高度显著降低,苏州边界层高度最大降低约300 m,无锡最大降低约400 m,太湖对常州影响较晚,在昼间气温最高时刻对常州影响较小,常州地区边界层高度降低约100 m(图8c)。

太湖使城市上空1.8—2 km处明显升温,苏州、无锡和常州上空升幅可达0.2—0.4、0.7—0.8

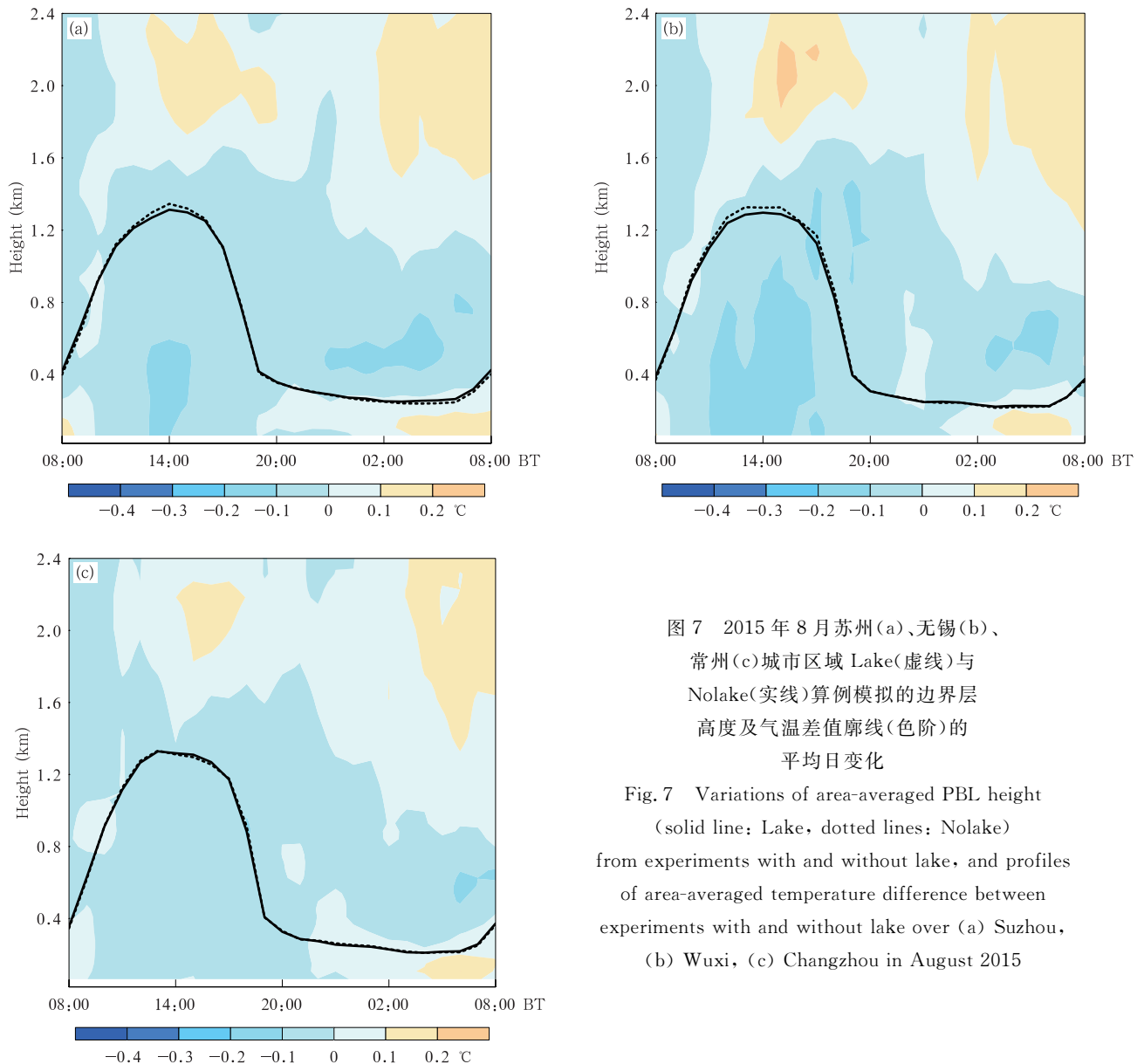


图7 2015年8月苏州(a)、无锡(b)、常州(c)城市区域 Lake(虚线)与 Nolake(实线)算例模拟的边界层高度及气温差值廓线(色阶)的平均日变化

Fig. 7 Variations of area-averaged PBL height (solid line: Lake, dotted lines: Nolake) from experiments with and without lake, and profiles of area-averaged temperature difference between experiments with and without lake over (a) Suzhou, (b) Wuxi, (c) Changzhou in August 2015

和 $0.2\text{--}0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。苏州和无锡城市地区出现升温的区域大约位于 Lake 和 Nolake 算例白天边界层顶部之间,而常州出现的时间较晚,约在 19 时。出现这一现象的原因可能是在太湖湖风锋的抬升作用下,城市近地层的热量被带入边界层顶部。由于是在利用土地覆盖类型敏感性试验来分析太湖对周边环境的影响(Lake - Nolake)。当太湖区域被替换为耕地后,城市未受到太湖上冷空气的影响,湍流发展旺盛,使得边界层增高。在边界层的夹卷作用下,将上层大气中的冷空气带入边界层顶部。故这也可能为产生上述结果的原因。

4.3 太湖对下风向城市热岛的影响

水体与周边陆地相比具有更大的比热容,升温较慢,在水体和陆地之间形成较大的温差,进而引起局地气流变化。苏州、无锡和常州位于太湖沿岸,从图 7、8 可以看出,2015 年 8 月太湖对无锡城区气温及边界层高度的影响较另 2 座城市更加明显,所以通过敏感性试验讨论太湖湖风效应对无锡地区城市热岛环流的影响。图 9 为 2015 年 8 月 28 日 09、11、14 和 17 时 4 个时刻,图 2b 的 AB 剖面上 Lake ($a_1\text{--}d_1$)与 Nolake($a_2\text{--}d_2$)算例气温、相对湿度以及风场的叠加。其中色阶代表气温,等值线为相对

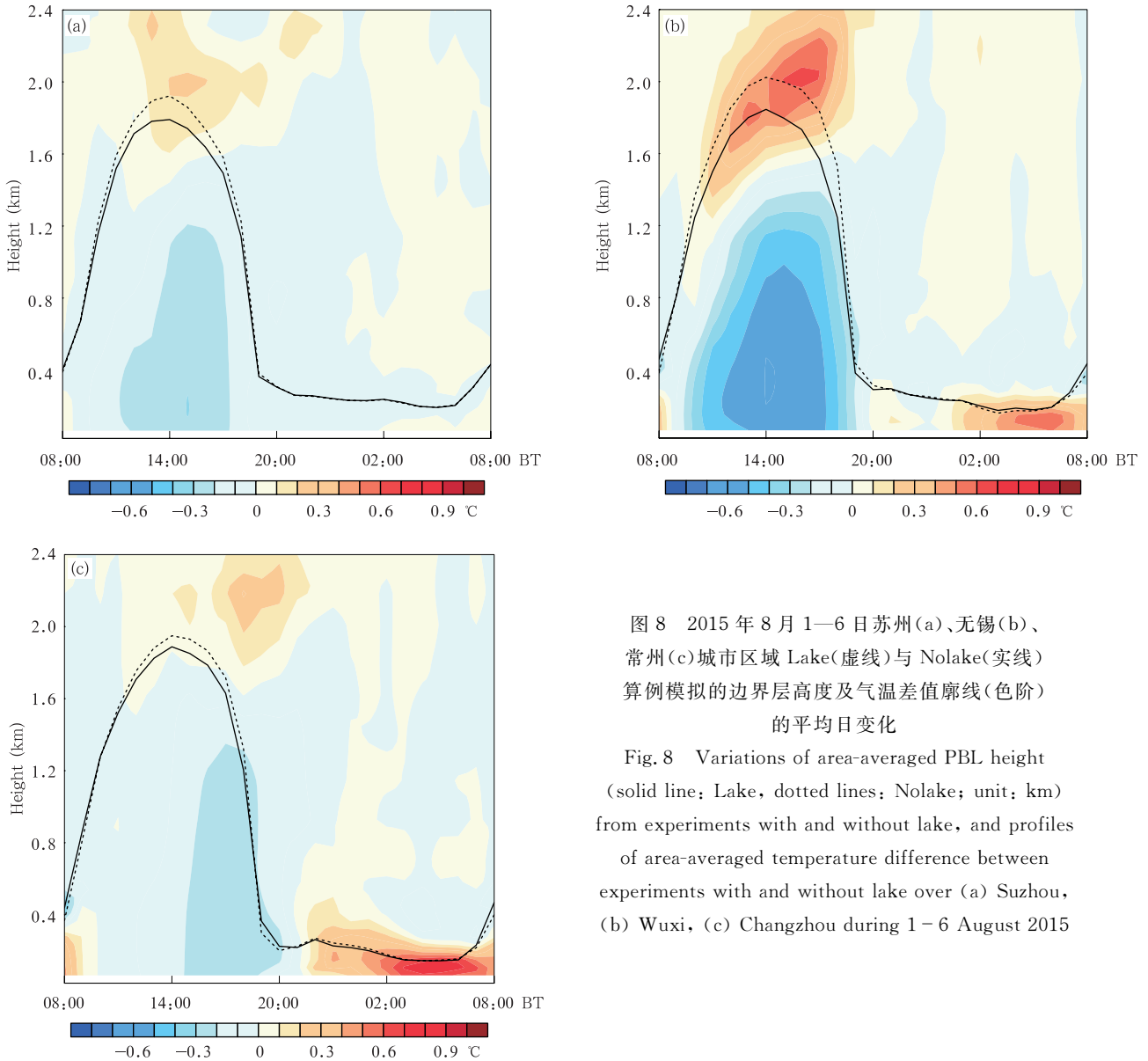


图8 2015年8月1—6日苏州(a)、无锡(b)、常州(c)城市区域 Lake(虚线)与 Nolake(实线)算例模拟的边界层高度及气温差值廓线(色阶)的平均日变化

Fig. 8 Variations of area-averaged PBL height (solid line: Lake, dotted lines: Nolake; unit: km) from experiments with and without lake, and profiles of area-averaged temperature difference between experiments with and without lake over (a) Suzhou, (b) Wuxi, (c) Changzhou during 1–6 August 2015

湿度。它反映了太湖对局地气温、水汽分布以及风场结构的影响。8月28日背景风场为东北风,近地面风速小于3 m/s,最高气温30℃,少云,利于无锡地区湖风环流的产生。09时在 Lake 算例中无湖风产生,近地面风场为微弱北风,存在2—3℃的湖-陆温差。Nolake 中近地面气温差异较小。11时 Lake 算例中湖陆温差达到3—6℃,太湖岸边已产生明显的湖风环流,且湖风锋面已到达无锡城市地区。湖风锋处产生强烈的水汽辐合和抬升运动,底层的水汽被抬升至高空凝结,有助于云和降水的发展加强(杨薇等,2014)。无锡的城市热岛环流随着太阳辐射的增强而进一步发展。在 Nolake 算例中,存在一

定的城郊温差,由于不受太湖冷空气的影响,城市地区的垂直运动旺盛,水汽较为均匀地分布在整个陆地上空。14时湖风环流进一步发展旺盛并逐步瓦解城市热岛的环流结构,湖风锋面已到达城市北部,影响到整个无锡地区,将近地面热量向下游(无锡市北部)输送。与 Nolake 算例相比,Lake 算例中湖风环流带来的冷气团进入城市上空,对无锡地区的垂直运动具有明显的削弱作用。17时仍存在微弱的湖风环流,与 Nolake 算例相比,湖风对近地层气温的分布影响非常微弱,但水汽仍聚集在湖风环流顶部。总之,太湖能够瓦解无锡地区的热岛环流结构,改变近地面的热量分布,抑制城市热岛的垂直发展。

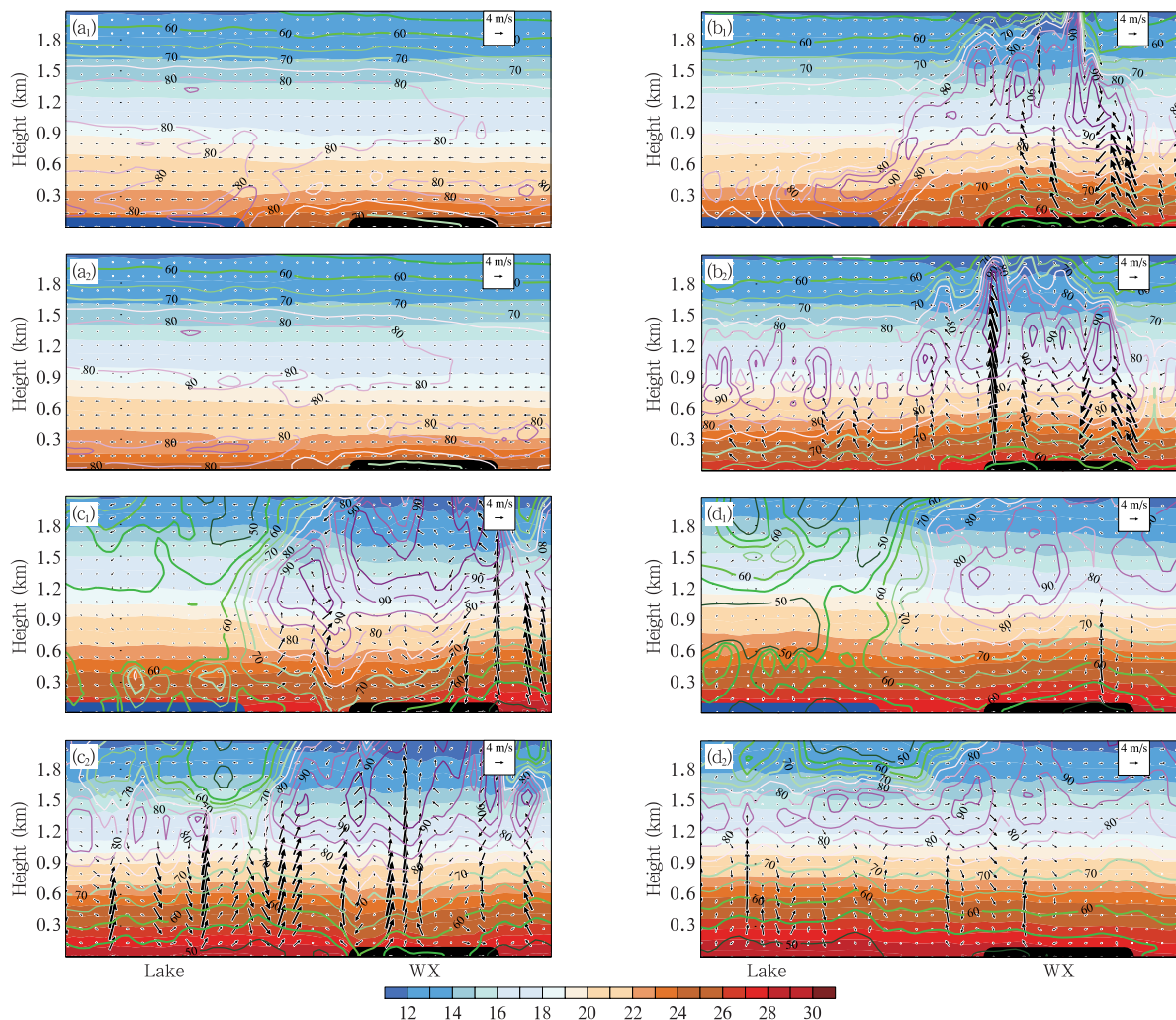


图9 2015年8月28日09(a)、11(b)、14(c)、17时(d)图2b的AB剖面上Lake算例(a₁—d₁)与Nolake算例(a₂—d₂)气温(色阶;单位:℃)、风场(箭矢;单位:m/s)以及相对湿度(等值线;单位:%)的叠加 (Lake和WX分别代表太湖和无锡)

Fig.9 Vertical cross-sections of temperature (color shaded; unit: ℃), wind (vectors, unit: m/s) and relative humidity (color lines, unit: %) in experiments with (a₁—d₁) and without lake (a₂—d₂) along line AB (Lake Taihu-Wuxi) at 09:00 (a), 11:00 (b), 14:00 (c), 17:00 (d) BT in 28 August 2015

太湖相对于北美五大湖,湖体较浅,热力学和水文学状态对大气条件的变化响应非常敏感,对周边地区的影响有限。Sills等(2011)在2007年7、8月对北美五大湖湖风进行为期60d的观测,在90%的观测日中观测到了一个或多个湖风,湖风向内陆的穿透距离为100—200 km。而由图5.9可以看出,太湖湖风向内陆的穿透距离只有约50 km。五大湖属于大面积深水湖泊,昼间的湖-陆温差高于太湖等浅水湖泊,湖泊效应明显。康汉青等(2014)应用WRF/Noah模型对长三角地区一次高温天气的模拟过程中,太湖的湖-陆温差达到5—8℃,同时太湖

使无锡白天边界层高度最多下降约450 m,常州约下降670 m。其中Noah陆面过程方案对于大面积湖区的湖温采用类似海表温度的处理办法通过插值得到,由图3b可以看出,该方案对于太湖上近地层气温有明显的低估。导致模拟的湖陆温差较大,高估太湖湖风效应对周边城市地区的影响。

5 结论

本研究将CLM4-LISSS浅水湖泊陆面过程参数化方案耦合进入WRF中的Noah陆面过程模型,评估了CLM4-LISSS浅水湖泊过程方案对太湖区

域模拟研究的适用性。并分析了2015年8月太湖对周边城市热环境的影响。结论如下:

采用CLM4-LISSS浅水湖泊陆面过程方案对于近地层气温及风速的模拟结果较好。Noah默认方案采用海表温度确定太湖湖面的温度,在一天当中其模拟的湖表温度无变化。而CLM4-LISSS湖泊陆面过程方案模拟的湖表面温度有合理的变化趋势,与观测值接近。Noah默认方案模拟的湖上2 m气温的观测与模拟均方根误差为 2.22°C ,CLM4-LISSS方案为 1.77°C 。此外,CLM4-LISSS与Noah方案对10 m风速的模拟也存在一定的差异,平均均方根误差分别为1.93和2.78 m/s,平均相关系数分别为0.72和0.68。由于CLM4-LISSS方案合理地考虑了浅水湖泊的陆-气交换过程,模拟所得湖表温度及近地层气象场与观测更为吻合。

太湖对周边城市的热环境存在显著影响。15时太湖对周边地区近地层平均降温 $0.5\text{--}0.7^{\circ}\text{C}$,影响范围达60 km。06时太湖导致周边近地层平均升温可达 $0.7\text{--}1.0^{\circ}\text{C}$,影响范围达50 km。湖风环流带来的冷空气造成3座城市白天边界层内一定幅度的降温,尤其无锡地区的降温幅度可达 $0.5\text{--}0.7^{\circ}\text{C}$ 。因此抑制了城市热岛的垂直运动,在高温天气下使得苏州、无锡和常州城区昼间边界层高度下降幅度达300、400和100 m,对于局地气候以及污染物质的输送与扩散产生重要影响。

通过选取无锡地区2015年8月28日晴天小风的天气作为背景天气条件,分析该地区湖风对城市热岛环流的影响机制。从结果来看,太湖湖风环流将湖面上的冷空气带入城市上空,抑制城市热岛的垂直发展,逐步瓦解无锡地区的城市热岛环流,并能够影响整个无锡地区。

文中仅选取了8月进行分析,其研究结论不能代表其他季节太湖对周边地区热环境的影响,将在以后的工作中进一步深入分析,并同时结合CMAQ(Community Multiscale Air Quality)模型分析局地热力环流对污染物质输送与扩散产生的影响。

参考文献

古红萍,沈学顺,金继明等. 2013a. 一维热扩散湖模式在太湖的应用研究. 气象学报, 71(4): 719-730. Gu H P, Shen X S, Jin J M. 2013. An application of a 1-D thermal diffusion lake model to Lake Taihu. Acta Meteor Sinica, 71(4): 719-730 (in Chinese)

- 古红萍. 2013b. 湖气耦合模式的发展及其应用[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Gu H P. The development and application of a lake-atmosphere coupled model[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese)
- 康汉青,朱彬,朱彤等. 2014. 苏州—无锡—常州城市带热岛效应个例研究. 大气科学学报, 37(4): 432-440. Kang H Q, Zhu B, Zhu T, et al. 2014. Investigation of an urban heat island episode along Suzhou - Wuxi - Changzhou urban cluster. Trans Atmos Sci, 37(4): 432-440 (in Chinese)
- 朴美花,刘寿东,王咏薇等. 2014. 夏季太湖表面辐射和能量通量特征观测分析. 科学技术与工程, 14(19): 1-7. Piao M H, Liu S D, Wang Y W, et al. 2014. Observed analysis of radiation and energy fluxes characteristics across Lake Taihu surface in summer. Sci Technol Eng, 14(19): 1-7 (in Chinese)
- 钱俊龙,刘红年,唐丽娟等. 2013. 苏州城市灰霾及气溶胶对大气消光贡献的模拟研究. 南京大学学报(自然科学), 49(3): 312-319. Qian J L, Liu H N, Tang L J, et al. 2013. Numerical simulation of the urban haze and the contribution of aerosol to ambient light extinction in the Suzhou area, Jiangsu, eastern China. J Nanjing Univ (Nat Sci), 49(3): 312-319 (in Chinese)
- 覃海润,刘寿东,王咏薇. 2015. 太湖湖风个例分析. 科学技术与工程, 15(20): 193-200. Qin H R, Liu S D, Wang Y W. 2015. Analysis of a Lake Taihu breeze case. Sci Technol Eng, 15(20): 193-200 (in Chinese)
- 王成林,陈黎明,潘维玉等. 2010. 适宜太湖蓝藻水华形成的风场辐散特征及其形成机制. 中国环境科学, 30(9): 1168-1176. Wang C L, Chen L M, Pan W Y, et al. 2010. Divergence characteristics and formation mechanism of wind field appropriate for the cyanobacteria bloom in Taihu Lake. China Environ Sci, 30(9): 1168-1176 (in Chinese)
- 颜金凤,孙菽芬,夏南等. 2007. 湖-气水热传输模型的研究和数值模拟. 上海大学学报(自然科学版), 13(3): 308-313. Yan J F, Sun S F, Xia N, et al. 2007. Exchange of water and heat between atmosphere and lake: Modeling and numerical simulation. J Shanghai Univ (Nat Sci), 13(3): 308-313 (in Chinese)
- 杨健博,刘红年,费松等. 2013. 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, 33(5): 473-484. Yang J B, Liu H N, Fei S, et al. 2013. The impact of urbanization on the urban heat island in Suzhou under the influence of Taihu lake-land breeze. J Meteor Sci, 33(5): 473-484 (in Chinese)
- 杨薇,苗峻峰,谈哲敏. 2014. 太湖地区湖陆风对雷暴过程影响的数值模拟. 应用气象学报, 25(1): 59-70. Yang W, Miao J F, Tan Z M. 2014. Numerical simulation of the lake breeze impact on thunderstorm over the Taihu area. J Appl Meteor Sci, 25(1): 59-70 (in Chinese)
- Bonan G B. 1995. Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces. J Climate, 8(11): 2691-2704
- Bougeault P, Lacarrere P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. Mon Wea Rev, 117(8): 1872-1890

- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J Geophys Res*, 101(D3): 7251-7268
- Chen F, Janjić Z, Mitchell K. 1997. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. *Bound Layer Meteor*, 85(3): 391-421
- Chen F, Mitchell K. 1999. Using the GEWEX/ISLSCP forcing data to simulate global soil moisture fields and hydrological cycle for 1987–1988. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 77(1B): 167-182
- Chen F, Miao S G, Tewari M, et al. 2011. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area. *J Geophys Res*, 116(D12): D12105
- Deng B, Liu S D, Xiao W, et al. 2013. Evaluation of the CLM4 lake model at a large and shallow freshwater lake. *J Hydrometeorol*, 14(2): 636-649
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional Model. *J Atmos Sci*, 46(20): 3077-3107
- Dutra E, Stepanenko V M, Balsamo G, et al. 2010. An offline study of the impact of lakes on the performance of the ECMWF surface scheme. *Boreal Environ Res*, 15(2): 100-112
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for environmental prediction operational mesoscale Eta model. *J Geophys Res*, 108(D22): 8851
- Gu H P, Jin J M, Wu Y H, et al. 2015. Calibration and validation of lake surface temperature simulations with the coupled WRF-lake model. *Climatic Change*, 129(3-4): 471-483
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Wea Rev*, 132(1): 103-120
- Hu X M, Xue M. 2016. Influence of synoptic sea-breeze fronts on the urban heat island intensity in Dallas-fort worth, Texas. *Mon Wea Rev*, 144(4): 1487-1507
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci*, 47(23): 2784-2802
- Kain J S, Fritsch J M. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *American Meteorological Society*, 24: 165-170
- Keeler J M, Kristovich D A R. 2012. Observations of urban heat island influence on lake-breeze frontal movement. *J Appl Meteor Climatol*, 51(4): 702-710
- Krinner G. 2003. Impact of lakes and wetlands on boreal climate. *J Geophys Res*, 108(D16): 4520
- Lin C Y, Chen F, Huang J C, et al. 2008. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan. *Atmos Environ*, 42(22): 5635-5649
- Lofgren B M. 1997. Simulated effects of idealized Laurentian great lakes on regional and large-scale climate. *J Climate*, 10(11): 2847-2858
- Long Z, Perrie W, Gyakum J, et al. 2007. Northern lake impacts on local seasonal climate. *J Hydrometeorol*, 8(4): 881-896
- Lyons W A. 1972. The climatology and prediction of the Chicago lake breeze. *J Appl Meteor*, 11(8): 1259-1270
- MacKay M D, Neale P J, Arp C D, et al. 2009. Modeling lakes and reservoirs in the climate system. *Limnol Oceanogr*, 54(6 Part 2): 2315-2329
- Martilli A. 2009. On the derivation of input parameters for urban canopy models from urban morphological datasets. *Bound Layer Meteor*, 130(2): 301-306
- Martynov A, Sushama L, Laprise R. 2010. Simulation of temperate freezing lakes by one-dimensional lake models: Performance assessment for interactive coupling with regional climate models. *Boreal Environ Res*, 15(2): 143-164
- Mironov D, Heise E, Kourzeneva E, et al. 2010. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environ Res*, 15(2): 218-230
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res Atmos*, 102(D14): 16663-16682
- Oleson K, Lawrence D A, Bonan G, et al. 2010. Technical description of version 4. 0 of the community land model (CLM). NCAR Technical Note NCAR/TN-478 + STR, doi: 10.5065/D6FB50WZ
- Paulson C A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J Appl Meteor*, 9(6): 857-861
- Perroud M, Goyette S, Martynov A, et al. 2009. Simulation of multiannual thermal profiles in deep Lake Geneva: A comparison of one-dimensional lake models. *Limnol Oceanogr*, 54(5): 1574-1594
- Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, et al. 2007. Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 581(1): 3-14
- Rouse W R, Oswald C J, Binyamin J, et al. 2005. The role of northern lakes in a regional energy balance. *J Hydrometeorol*, 6(3): 291-305
- Samuelsson P, Kourzeneva E, Mironov D. 2010. The impact of lakes on the European climate as simulated by a regional climate model. *Boreal Environ Res*, 15(2): 113-129
- Sills D M L, Brook J R, Levy I, et al. 2011. Lake breezes in the southern Great Lakes region and their influence during BAQS-Met 2007. *Atmos Chem Phys*, 11(15): 7955-7973, doi: 10.5194/acp-11-7955-2011
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of

the advanced research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, doi: 10.5065/D68S4MVH

- Stepanenko V M, Goyette S, Martynov A, et al. 2010. First steps of a Lake Model Intercomparison Project: LakeMIP. *Boreal Environ Res*, 15(2): 191-202
- Subin Z M, Riley W J, Mironov D. 2012a. An improved lake model for climate simulations: Model structure, evaluation, and sensitivity analyses in CESM1. *J Adv Model Earth Syst*, 4(2): M02001, doi: 10.1029/2011MS000072
- Subin Z M, Murphy L N, Li F, et al. 2012b. Boreal lakes moderate seasonal and diurnal temperature variation and perturb atmospheric circulation: Analyses in the community earth system model 1 (CESM1). *Tellus A*, 64(1): 15639, doi: 10.3402/tellusa.v64i0.15639
- Wood E F, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1998. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) phase 2(c) Red-Arkansas River basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons. *Glob Planet Change*, 19(1-4): 115-135
- Xu L J, Liu H Z, Du Q, et al. 2016. Evaluation of the WRF-lake model over a highland freshwater lake in southwest China. *J Geophys Res*, 121(23): 13989-14005