

刁一伟, 黄建平, 刘诚, 等. 2015. 长江三角洲地区净生态系统二氧化碳通量及浓度的数值模拟 [J]. 大气科学, 39 (5): 849–860. Diao Yiwei, Huang Jianping, Liu Cheng, et al. 2015. A modeling study of CO₂ flux and concentrations over the Yangtze River Delta using the WRF-GHG model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 849–860, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14127.

长江三角洲地区净生态系统二氧化碳通量及浓度的数值模拟

刁一伟^{1,2} 黄建平^{1,3} 刘诚¹ 崔健¹ 刘寿东^{1,3}

¹ 耶鲁大学—南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044

² 南京信息工程大学中国气象局气溶胶—云—降水重点开放实验室, 南京 210044

³ 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

摘 要 净生态系统碳通量 (NEE) 的计算对于准确模拟区域碳通量和大气 CO₂ 浓度的时空变化至关重要。本文利用中尺度大气—温室气体耦合模式 WRF-GHG (Weather Research and Forecasting Model with Greenhouse Gases Module), 对 2010 年 7 月 28 日至 2010 年 8 月 2 日期间影响长江三角洲地区大气 CO₂ 浓度及时空分布的各种过程进行了详尽模拟。结果表明, 植被光合呼吸模型 (VPRM) 能模拟不同植被下垫面 NEE 的日变化; WRF-GHG 模拟的大气 CO₂ 浓度日变化与观测相吻合, 但低估了大气 CO₂ 浓度 5~15 ppm (ppm 表示 10⁻⁶), 这可能与人为排放源的低估、VPRM 参数的不确定性以及气象场模拟的不准确性有关。太湖和植被覆盖较好的地区如浙江北部山区是该地区的主要碳汇, 而城市为 CO₂ 的主要排放源。太湖和陆地生态系统对区域内碳循环起到一定的调节作用, 减缓区域大气 CO₂ 浓度的升高。此外, 局地气象条件如湖陆风对太湖周边地区大气 CO₂ 浓度有显著影响。

关键词 长江三角洲 WRF-GHG 耦合模式 二氧化碳浓度 净生态系统碳通量

文章编号 1006-9895(2015)05-0849-12

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14127

A Modeling Study of CO₂ Flux and Concentrations over the Yangtze River Delta Using the WRF-GHG Model

DIAO Yiwei^{1,2}, HUANG Jianping^{1,3}, LIU Cheng¹, CUI Jian¹, and LIU Shoudong^{1,3}

¹ Yale–NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Key Laboratory for Aerosol–Cloud–Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

³ Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Accurate quantification of land–atmosphere exchange is crucial for the simulation of regional scale carbon flux and CO₂ concentrations. In this study, a coupling model, WRF-GHG (Weather Research and Forecasting Model with Greenhouse Gases Module) is employed to simulate regional net ecosystem exchange (NEE) and atmospheric CO₂ concentrations over the Yangtze River Delta (YRD) from July 28 to August 2, 2010. In the modeling system, several “tagged” species are defined to trace the contribution of various sources to atmospheric CO₂ concentrations. The

收稿日期 2014-02-17; 网络预出版日期 2014-09-23

资助项目 江苏高校优势学科建设工程项目 PAPD, 长江学者和创新团队发展计划项目

作者简介 刁一伟, 男, 1977 年生, 博士, 讲师, 研究领域: 大气物理学与大气环境。E-mail: yiweidiao@nuist.edu.cn

simulated NEE fluxes and CO₂ concentrations are evaluated against in-situ measurements. The results show that VPRM can reproduce spatial-temporal variation patterns of NEE over different types of vegetation. Overall, the diurnal patterns in CO₂ concentration compared quite well with field measurements, indicating that the model captures the major features in the diurnal variations of CO₂. However, the model underestimates CO₂ concentrations by 5~15 ppm (10⁻⁶). This is most likely due to an underestimation of anthropogenic emissions, the uncertainties of parameters defined in VPRM, and meteorological inputs. Local meteorological conditions, such as land-lake breeze, exert an important impact on CO₂ concentrations. While lake-atmospheric interactions over Lake Taihu and vegetation-atmospheric interactions over mountain areas in northern Zhejiang province play a dominate role in carbon sink, urban-related anthropogenic emissions act as a major source of carbon. The WRF-GHG modeling system demonstrated its capability of simulating local and regional variations in CO₂ fluxes and concentrations.

Keywords Yangtze River Delta, WRF-GHG model, CO₂ concentrations, Net ecosystem exchange

1 引言

二氧化碳 (CO₂) 是最重要的温室气体和气候变化的主要驱动因子之一。自工业革命以来, 大气中的CO₂ 浓度不断升高, 其浓度已从工业前的 280 ppm (ppm表示 10⁻⁶) (Etheridge et al., 1996) 上升至目前的 390 μmol mol⁻¹ (也常表示为ppm, 1 μmol mol⁻¹ = 1 ppm) 左右 (Ballantyne et al., 2012)。工业活动是大气中CO₂ 的主要来源, 而生态系统和海洋可以有效清除大气中CO₂。当人为排放源超过自然清除过程, 必然导致大气中CO₂ 浓度不断升高。受人为排放源、下垫面和天气系统等因素的影响, 大气中CO₂ 的时空分布极不均匀 (Hansen et al., 2007; Raupach et al., 2007)。因此, 估算植被—大气碳通量交换, 准确模拟各种气象过程对于揭示大气CO₂ 的时空分布, 定量估算区域碳收支, 和制定碳的控制减排措施具有重要的理论和实际意义。

大气CO₂ 浓度及其变化趋势一直受到人们的极大关注 (IPCC, 2007)。国内外科学家利用观测 (如地面观测和卫星遥感) 及数值模拟等方法对大气CO₂ 的时空分布及其演变规律进行了广泛研究 (Gurney et al., 2003; Crisp et al., 2004; NIES, 2006^①)。如WMO (World Meteorological Organization) 开展的全球大气观测项目 GAW (WMO's Global Atmosphere Watch), 对估算地—气系统二氧化碳交换及连续监测大气CO₂ 的增长趋势发挥了重要作用 (Marquis and Tans, 2008)。由于观测站点数目的限制, 以及单个站点所代表的区域有限, 仅靠单点观测估算区域碳通量存在较大的不确定性 (Gurney et al., 2003; Gerbig et al., 2006; Geels et al., 2007)。三维数值模式可以全面考虑各种人为源排放、植被吸

收、边界层湍流扩散及输送等过程, 模拟大气中CO₂ 的时空演变及不同源的贡献。过去, 全球尺度大气CO₂ 模式发展较快, 如TM3 模式 (The Chemistry Transport Model version 3; Houweling et al., 1998)、TM5 模式 (The Chemistry Transport Model version 5; Krol et al., 2005)、LMDZ模式 (Laboratoire de Météorologie Dynamique; Hauglustaine et al., 2004) 等。这些模式已被广泛地应用于全球碳收支估算、人类活动对全球CO₂ 时空分布影响的定量评估以及碳源/汇的反演 (Peters et al., 2005; Chevallier et al., 2007; Lauvaux et al., 2008)。由于时空分辨率限制, 全球模式不能准确反映中小尺度天气过程 (如海陆风和山谷风) 等对CO₂ 时空分布的影响, 其结果用于碳源汇反演时会造成较大误差。近年来, Ahmadov et al. (2007) 发展了一个中尺度大气—植被耦合模式, 用于模拟区域大气CO₂ 的时空分布, 结果比全球模式如LMDZ和TM3 等更符合观测值 (Ahmadov et al., 2009)。

作为碳排放大国, 近年来我国在碳通量观测研究方面取得了很大进展。如 2002 年建立的中国陆地生态系统通量观测网 (于贵瑞等, 2011) 极大地推动了我国在CO₂ 通量方面的研究。与此相比, 我国在CO₂ 的数值模拟研究方面明显滞后, 至今还没有开展利用中尺度模式对CO₂ 浓度的数值模拟研究。长江三角洲地区是我国主要经济增长区之一, 其经济增长速度及经济总量居国内首位, 对实现国家CO₂ 排放强度 (即单位国内生产总值的CO₂ 排放量) 削减目标至关重要。因此, 利用中尺度数值模式研究该地区地气CO₂ 净交换和大气CO₂ 浓度的时空分布显得极为迫切。

本文将更新WRF-GHG (Weather Research and

① NIES: GOSAT 2006. Greenhouse Gases Observing Satellite, Tsukuba, Japan.

Forecasting Model with Greenhouse Gases Module) 模式中的气象模式, 即将WRF (3.3 版本) 与植被光合呼吸模型VPRM (Vegetation Photosynthesis and Respiration Model; Ahmadov, 2007) 相耦合, 模拟长江三角洲净生态系统碳通量NEE (Net Ecosystem Exchange) 及大气CO₂ 浓度的时空分布并评估现有WRF-GHG的模拟能力。同时讨论各种人为源及植被光合呼吸等过程对该地区大气CO₂ 浓度时空分布的相对贡献, 以及湖陆风等局地环流条件对太湖附近地区CO₂ 浓度的影响。

2 模式介绍及资料获取

2.1 WRF-GHG 简介

WRF-GHG是由中尺度天气研究与预报模式WRF与植被光合呼吸模型VPRM直接动态耦合的大气—温室气体模式 (Beck et al., 2011)。它能直接计算陆地生态系统与大气之间温室气体如CO₂ 和甲烷 (CH₄) 等的相互交换, 考虑大气中的扩散、输送等过程对温室气体的影响, 模拟和预报温室气体在时间和空间上的分布和演变。

WRF模式是20世纪90年代后期由美国国家大气研究中心NCAR发展而来的中尺度天气模式 (Grell et al., 2005), 已被广泛应用于大气、海洋、环境等多个领域的研究和业务预报 (Skamarock and Klemp, 2008)。WRF一方面提供给植被模型VPRM计算所需的气象场, 另一方面, 利用VPRM提供的温室气体通量, 计算温室气体的时空演变。

VPRM模型是一种陆地生态系统温室气体诊断模型。利用卫星观测资料反演得到地表水分指数LSWI、增强型植被指数EVI等参数, 结合WRF输出的2 m气温 (Air Temperature at 2 m, 简称T2) 和太阳短波辐射 (Download Shortwave, 简称SWDOWN), 估算生态系统净交换NEE (Xiao et al., 2004; Mahadevan et al., 2008)。其计算公式如下:

$$NEE = -\lambda \times T_{scale} \times P_{scale} \times W_{scale} \times (1/[1+(PAR/PAR_0)]) \times EVI \times PAR + (\alpha+T)+\beta, \quad (1)$$

$$T_{scale} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{[(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2]}, \quad (2)$$

$$P_{scale} = \frac{1 + LSWI}{2}, \quad (3)$$

$$W_{scale} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}}, \quad (4)$$

其中, PAR₀为光合有效辐射 (PAR) 的半饱和值;

T为气温; λ为最大光能利用率; α和β分别代表与植被类型有关的经验参数; T_{scale}、P_{scale}和W_{scale}分别代表与叶片温度、叶面性状和冠层含水量相关的特征量。方程 (1) 右边的第一项代表总生态系统交换量 (Gross Ecosystem Exchange, 简称GEE), 其它两项是植被呼吸通量R。方程 (2) 中的T_{scale}代表光合作用的温度敏感性 (Raich et al., 1991), T_{min}、T_{max}和T_{opt}分别是光合作用的最低温度、最高温度和最适温度 (Aber and Federer, 1992; Raich et al., 1991)。当大气温度低于光合作用的最低温度时, T_{scale}的值为0。P_{scale}表示物候状况对植被光合作用的影响, 其值随植物生长期而变化。W_{scale}是土壤水分和 (或者) 饱和水汽压差 (VPD) 的函数 (Running et al., 2000), 代表地表水分对植被光合作用的影响。

植被类型对于NEE的计算至关重要。本文采用Jung et al. (2006) 开发的SynMAP资料, 分辨率为1 km。植被类型分为8种, VPRM模型中不同植被类型参数设定如表1所示 (Mahadevan et al., 2008)。

表1 VPRM各参数的设置 (Mahadevan, 2008)

Table 1 Parameters, PAR₀, λ, α, β, selected by different vegetation classes in VPRM (Mahadevan, 2008)

植被类型	PAR ₀ *	λ*	α*	β*	T _{min} /°C	T _{max} /°C	T _{opt} /°C
常绿林	570	0.127	0.271	0.25	0	40	20
落叶林	262	0.234	0.244	0.14570	0	40	20
混交林	629	0.123	0.244	-0.24	0	40	20
灌丛	321	0.122	0.028	0.48	0	40	20
稀树草原	3241	0.057	0.012	0.58	0	40	20
作物	2051	0.064	0.209	0.20	0	40	20
草原	542	0.213	0.028	0.72	0	40	20
裸土和建成区	0	0	0	0	0	40	20

* PAR₀ 的单位为 μmol m⁻² s⁻¹; λ 的单位为 μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹/μmol (PAR) m⁻² s⁻¹; α 的单位为 μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹ °C⁻¹; β 的单位为 μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹

为了定量评估不同源对大气CO₂ 浓度的贡献, WRF-GHG将CO₂ 信号分成5种 (Ahmadov et al., 2007): CO₂ 总浓度 (C₁); 植被光合与呼吸引起的CO₂ 浓度变化 (C₂); 人为排放引起的CO₂ 浓度变化 (C₃); 生态系统生物质燃烧引起的CO₂ 浓度变化 (C₄); 全球背景CO₂ 浓度 (C_B)。WRF-GHG能模拟大气CO₂ 时空变化, 并定量评估各个信号量对大气CO₂ 总浓度变化的相对贡献。

2.2 模式设置

为模拟区域尺度CO₂ 的时空变化, 采用三重嵌套模拟区域 (图1)。最外层模拟区域 (d1) 主要包括中国中部和东部地区, 东西和南北格点为分别为

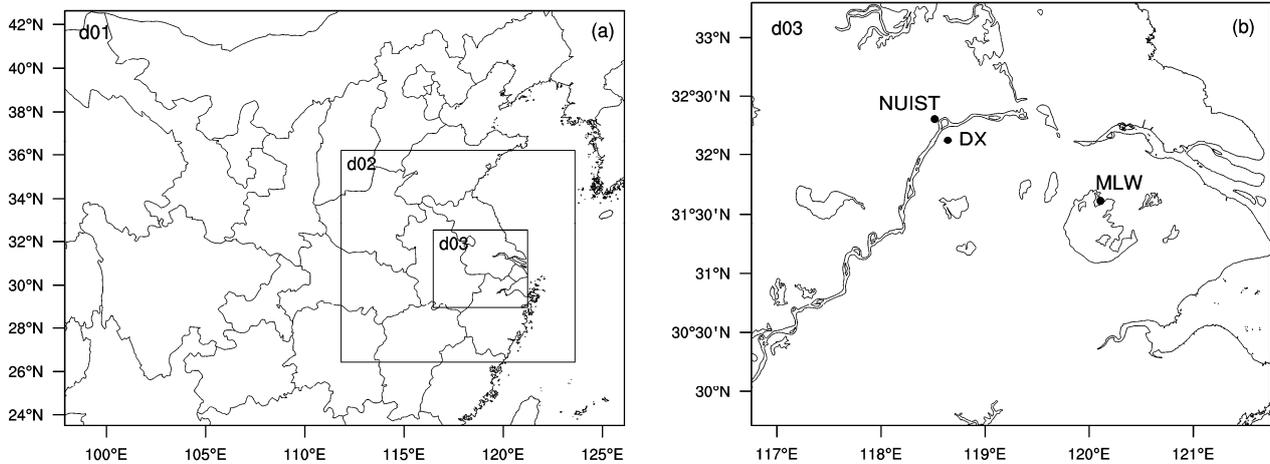


图 1 模拟区域及观测点位置: (a) 三层嵌套模拟区域; (b) 最内层模拟区域以及三个站点位置 (NUIST 为南京信息工程大学站点, DX 为党校站点, MLW 为梅梁湾站点)

Fig. 1 Simulation domains and observation sites: (a) The nested domains; (b) the innermost domain and the locations of three observational sites, NUIST: site of Nanjing University of Information Science and Technology, DX: site of Dang Xiao of Nanjing City, MLW: site of Mei Liang Wan of Taihu Lake

80 和 60, 水平格距为 36 km; 第二层 (d2) 包含华北平原南部和整个华东地区, 格点为 100×91 , 水平网格距为 12 km; 第三层区域 (d3) 则包括长江三角洲地区, 水平格点为 121×100 , 格距为 4 km。垂直方向有 46 层并采用不等距分层, 其中第一层大约为 15 m, 模式顶高约 50 hPa。

WRF 模拟采用的物理过程参数化方案主要包括: RRTM 长波辐射方案 (Iacono et al., 2008), Dudhia 短波辐射方案 (Dudhia, 1989), YSU 边界层参数方案 (Hong et al., 2006), Noah LSM 陆面参数方案 (Chen and Dudhia, 2001), WSM3 类简单冰微物理过程方案 (Hong et al., 2004)、Kain-Fritsch 积云参数化方案 (第一和第二嵌套区域) (Kain, 2004)。

气象场初始条件和边界条件采用 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 第三代再分析产品 CFSR (Climate Forecast System Reanalysis; <http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0> [2010-07-31]), 其水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间间隔 6 h。各类 CO_2 总浓度场 (C_1 到 C_B) 的初始条件和边界条件采用 CT2011 (Carbon Tracker 2011) 的全球输出产品 (Peters, 2007)。CT2011 的空间分辨率为 $3^\circ \times 2^\circ$, 垂直分为 34 层, 时间步长为 3 h。CT2011 输出场包括 CO_2 总浓度、生物燃烧源浓度、化石燃料源浓度等。

本文模拟过程中人为排放源采用全球人为排放源的数据库 EDGAR (Emission Database for

Global Atmospheric Research version 4.2), 分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu> [2011-11-01])。植被对 CO_2 的吸收和释放由 VPRM 模式在线计算。由于没有明显的生物质燃烧过程, 本文在模拟过程中没有考虑生物质燃烧排放源的贡献。

2.3 观测资料

2010 年 7 月 28 日至 8 月 2 日, 分别在长江三角洲三个不同地点使用涡动相关系统对 CO_2 通量、浓度、以及风、温、湿等进行了同步观测。站点位置如图 1 所示, DX (32.04°N , 118.79°E) 位于南京市区的白下区市委党校校园, 观测高度 33 m; NUIST (32.21°N , 118.70°E) 位于南京信息工程大学校园, 观测高度 5 m, 距离 DX 约 22 km; MLW (31.45°N , 120.27°E) 代表无锡太湖梅梁湾站, 观测高度 3.54 m。DX 站代表以居民区和商业区为主的都市下垫面; NUIST 位于长江以北, 离 DX 约 22 公里, 站点周围 1 km 内以草地、农田以及低矮的学校居民区为主; MLW 周围 1 km 内以少量农田、稀疏草地和大量水体为主。

观测仪器主要包括超声风速仪 (CSAT3, Campbell), $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外分析仪 (Li-7500, LiCor), Picarro G1301 $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪, 气温表和湿度测量仪 (HMP45C, Vaisala) 和四分量辐射仪 (CNR1, Kipp & Zonen)。资料均经质量控制, 包括野点剔除、坐标旋转、WPL 修正 (Webb et al., 1980) 以及夜间静稳条件下的修正 (van Dijk et al., 2004) 等。

3 结果与讨论

3.1 地面气象要素

WRF-GHG 从 2010 年 7 月 26 日 00:00(北京时,下同)开始,一直模拟到 2010 年 8 月 2 日 00:00。为减少 CO₂ 及各分量初始场的影响,7 月 26 日和 27 日两天的模拟值没有参与模式结果评估和分析。图 2 到图 4 给出了 7 月 28 日至 8 月 2 日三个站点模拟的 2 m 温度 (T2)、向下短波辐射 (SWDOWN)

和风速风向与观测的对比。从图可以看出,DX 和 NUIST 两个站点模拟的 2 m 气温和到达地表太阳短波辐射与实测吻合较好,但 7 月 30 日梅梁湾(MLW)站模拟的 2 m 气温比实际值明显偏低。通过对 WRF 的模拟分析发现,WRF 高估了该地区上空的总云量,使到达地面的向下短波辐射明显低于观测值,导致 2 m 气温的模拟值偏低。MLW 站地处太湖沿岸,空气中水汽含量大,给云的模拟带来较大挑战。另外,WRF 模式没有考虑土壤水分垂直迁移对土壤

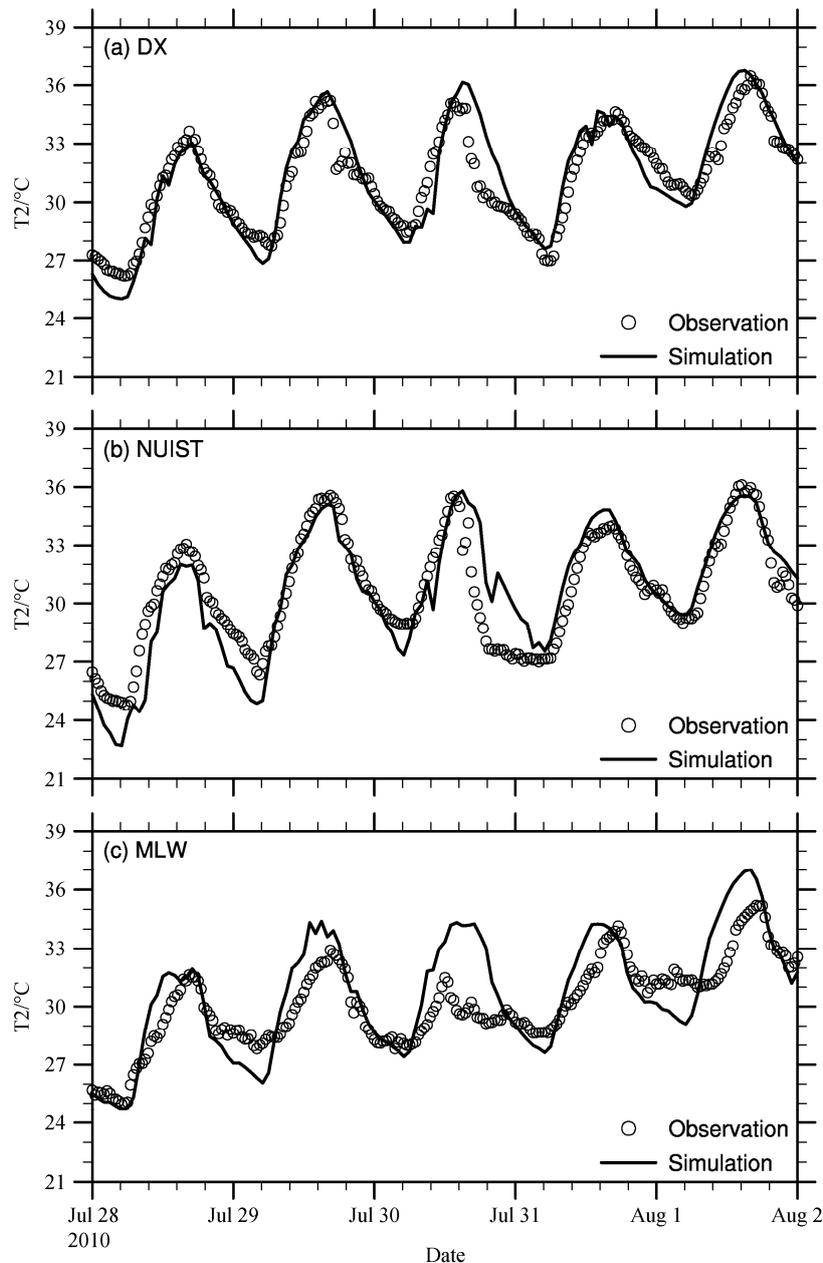


图 2 2010 年 7 月 28 日至 8 月 2 日期间 (a) DX、(b) NUIST、(c) MLW 三个站点的模拟和观测的 2 m 气温 (T2) 对比。圆圈代表观测值,实线为模拟值,下同

Fig. 2 A comparison of simulated 2-m air temperature with observations at (a) DX, (b) NUIST, and (c) MLW, during the period from July 28 to August 2, 2010. Circle: observation, solid line: simulation, the same below

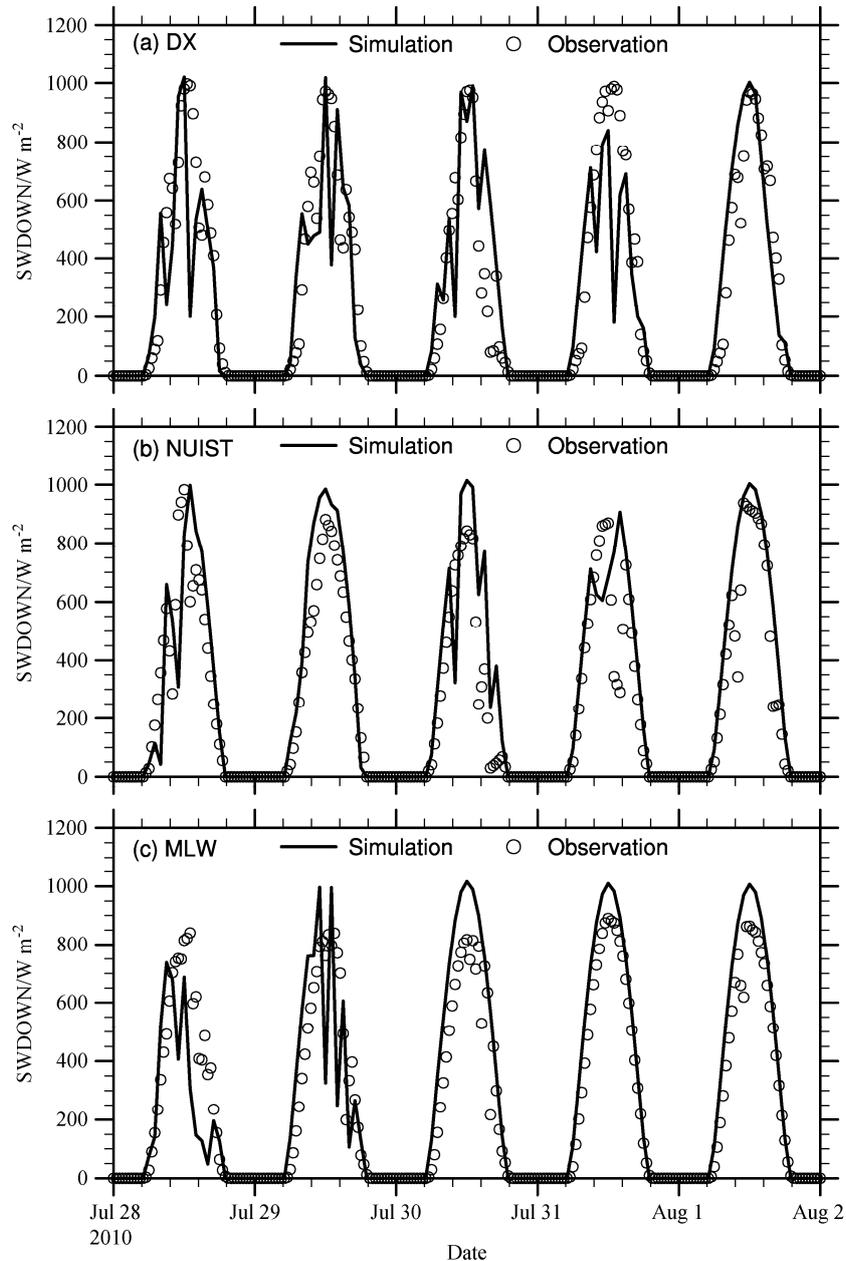


图3 同图2, 但为向下短波辐射 (SWDOWN)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for downward shortwave radiation (SWDOWN)

温度的影响 (代成颖, 2009), 也可导致模拟误差。

统计计算表明, 2 m 气温平均误差 (MBE)、均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (R) 分别为 $0.12 \sim 0.49^\circ\text{C}$ 、 $1.12 \sim 1.60^\circ\text{C}$ 和 $0.89 \sim 0.95$ 。模拟的向下短波辐与观测值相关系数为 $0.89 \sim 0.93$, 平均偏差为 $0.29 \sim 33.36 (\text{W m}^{-2})$ (表 2)。另外, 模拟的风速和风向, 在时间变化上与观测也吻合较好 (图 4), 但模拟的风速平均误差为 $0.57 \sim 1.22 \text{ m s}^{-1}$ 。总的来说, WRF 模式能够提供 VPRM 计算 CO_2 所需要的

各种气象场。

3.2 不同下垫面的 NEE 模拟

图 5 比较了 MLW 和 NUIST 两个站点模拟与观测的 NEE 值。NUIST 点白天 CO_2 为净吸收, 如 28 日午后 NEE 达 $-0.7 \text{ mg } (\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 其它模拟日 NEE 约为 $-0.5 \sim -0.6 \text{ mg } (\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 夜间 CO_2 转为净排放, 其净通量为 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg } (\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。VPRM 较准确地模拟了该站 NEE 日变化趋势, 但明显低估了白天和夜间 NEE 峰值。NEE 的计算与

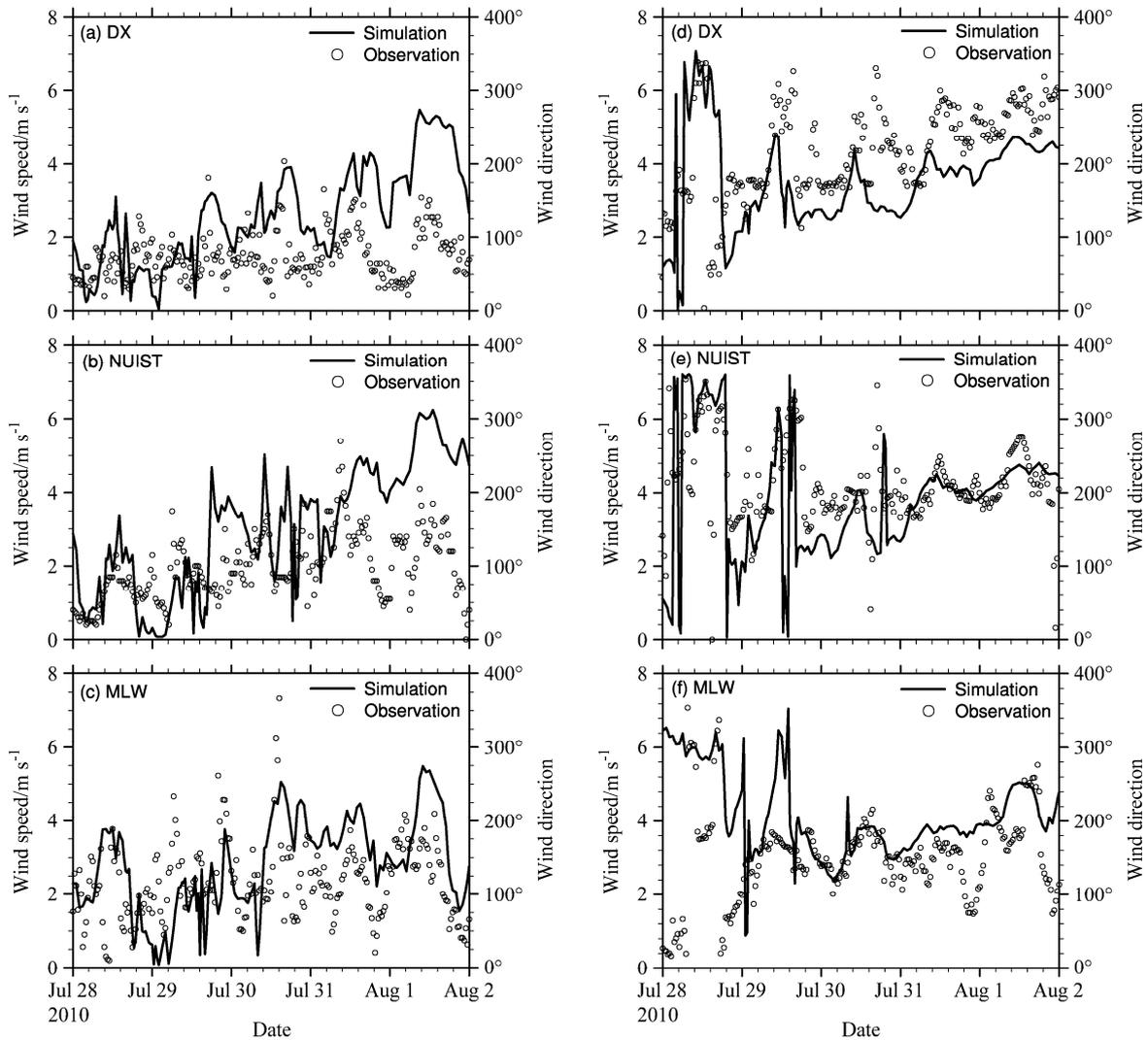


图 4 2010 年 7 月 28 日至 2010 年 8 月 2 日期间 (a, d) DX、(b, e) NUIST、(c, f) MLW 三个站点的模拟和观测的风速、风向对比

Fig. 4 A comparison of simulated wind speed and wind direction with observations at (a, d) DX, (b, e) NUIST, and (c, f) MLW, during the period from July 28 to August 2, 2010

VPRM 中最大光能利用率 λ 等参数的选择密切相关。现有 VPRM 中各参数是根据欧美地区观测资料拟合所得。刘成等 (2014) 利用千烟洲碳通量等观测资料拟合发现, 对于针叶林, VPRM 现有 λ 值可能比实际值偏小。本研究直接采用 VPRM 自带参数, 也是导致 NEE 模拟偏差的主要原因之一。另外, 植被光合呼吸过程受到生物和非生物过程的控制, 如土壤异养呼吸排放的 CO₂ 等, 然而 VPRM 模型仅考虑太阳短波辐射和温度两个因子的影响。因此, VPRM 模型本身的不完善以及输入气象要素模拟的不准确也可导致模式计算的 NEE 偏差 (图 5a)。

MLW 站, 南临太湖, 周围水体覆盖面积较大, 植被少。如图 5b 所示, 7 月 28 和 29 日 VPRM 明

显高估白天 NEE, 30 到 31 日与白天 NEE 观测峰值吻合地很好, 而 8 月 1 日低估了 NEE; 夜间模式明显高估 NEE。白天, 在太阳辐射的作用下, 湖面大量浮游植物, 通过光合作用吸收 CO₂, 使得太湖成为 CO₂ 的汇, 这种吸收为主导的情形一直能够维持到夜间 21h 左右, 通常在这之后间浮游植物的呼吸作用占主导, 但在研究期间我们发现湖面在夜间也有 CO₂ 负通量现象, 如 7 月 30 和 7 月 31 日夜间。过去李香华 (2005) 使用“静态箱法”夜间在太湖 MLW 站观测到类似现象, 他们没有给出合理解释。最近, 本研究小组所在的耶鲁大学—南京信息工程大学大气环境中心李旭辉等人认为夜间水生大型藻类和浮游植物利用 CAM (Crassulacean Acid

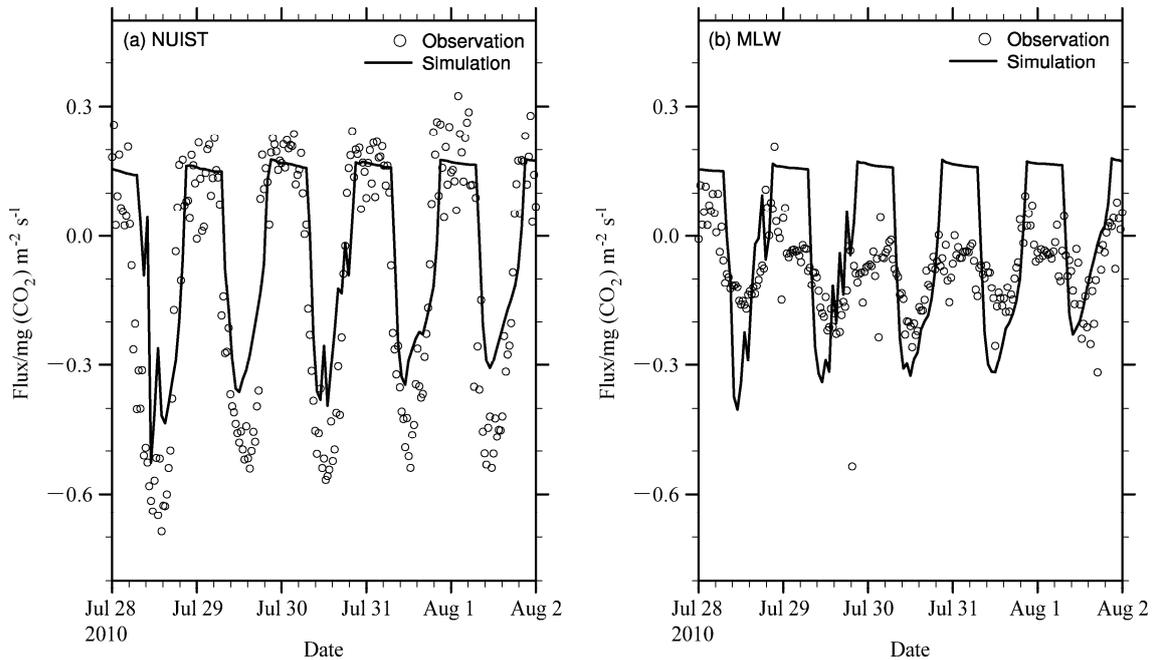


图 5 2010 年 7 月 28 日至 2010 年 8 月 2 日期间 (a) NUIST 和 (b) MLW 站点模拟和观测的净生态系统碳通量对比

Fig. 5 A comparison of simulated net ecosystem exchange flux (NEE) with observations at (a) DX, (b) MLW, during the period from July 28 to August 2, 2010

Metabolism) 机制吸收 CO_2 , 导致太湖湖面夜间 CO_2 负通量 (Lee et al., 2014)。

VPRM 白天高估 NEE, 即高估了植被对 CO_2 的吸收。由于 MLW 站处在太湖岸边, 周围下垫面类型比较复杂, 而本研究模拟的最里层模式格距为 4 km, 模拟过程中该站所在的整个模式格点均被当作植被处理, 导致该站点白天 NEE 被 VPRM 高估。MLW 夜间出现吸收的现象又导致模式高估了夜间的 CO_2 通量。如要确保该格点仅代表陆地而没有水体, 唯一的方法是提高模式模拟的精度。但由于 NEE 观测以及 CO_2 人为污染源的限制, 这是目前我们所能做到的模拟研究以及与观测对比分析。今后应通过改进污染源, 提高模式模拟精度, 和完善观测等方面加以改进。此外, 7 月 28 日中午 T_{scale} 为 0.82, 随着气温的升高 T_{scale} 逐渐下降, 到 8 月 1 日中午降到 0.59, 导致 8 月 1 日中午处的最大净碳吸收偏低。

观测期间该站主要盛行偏东南和西南风 (图 4f), 大部分通量信号来自湖面。这些都是造成 VPRM 在 MLW 站的模拟结果高于 NEE 观测值的原因。另外, DX 位于南京市, 植被覆盖率低, 其 NEE 结果本文没有给出。

3.3 大气 CO_2 浓度

图 6 给出了三个站点上大气 CO_2 浓度的时间序

列。如图所示, CO_2 呈明显的日变化。日出后地表受太阳辐射作用, 湍流混合强烈, 同时植被光合作用增强, 导致近地层大气 CO_2 浓度不断降低, 于 15:00 左右达最低值; 随着光合作用和大气湍流不断减弱, 近地层大气 CO_2 浓度逐渐升高。夜间, 大气边界层趋于稳定, 大气边界层内 CO_2 不断累积, 其浓度不断升高, 并在日出前达到日极大值。WRF-GHG 较准确地模拟了 CO_2 浓度的日变化和不同模拟日之间的变化趋势。另外, DX 位于南京市, 周围植被覆盖少, 加上建筑较多, 浓度较高。NUIST 站点几公里内有热电厂和化工园, 受工业活动影响剧烈, CO_2 浓度最高。而 MLW 站位于太湖沿岸, 处于风景区内, 植被较多, 同时周围人口及工厂较少, CO_2 浓度最低。表明局地人为排放源对大气 CO_2 浓度有着重要影响。WRF-GHG 较好地模拟了 CO_2 的这些时空演变特征, 但夜间存在一定的高估, 而白天存在一定的低估。模拟评估结果显示, 三个站点模拟的 CO_2 浓度的平均偏差 (MBE) 分别为 0.7 ppm、-15.2 ppm 和 -4.7 ppm, 相关系数分别为 0.62、0.63 和 0.67 (见表 2)。

另外, 局地气象条件如风对大气 CO_2 浓度也有着重要影响。风速大不利于近地层 CO_2 的积累, 导致其浓度偏低。如图 4 所示, WRF 模式对于风的模拟还存在一定的难度, 加上模式的风速和风向的输

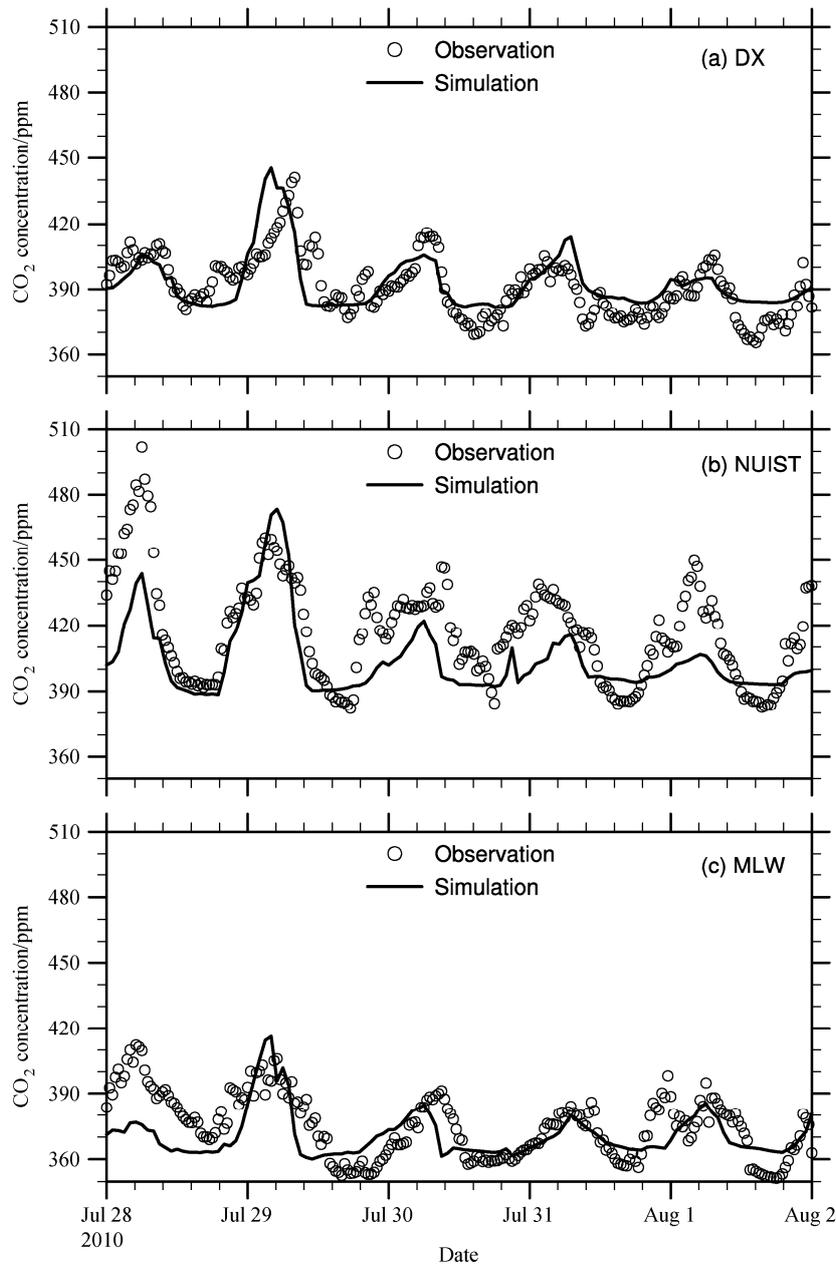


图 6 同图 2，但为大气 CO₂ 浓度

Fig. 6 Same as Fig. 2, but for CO₂ concentrations

表 2 模拟值与实测资料对比统计检验结果

Table 2 Statistical comparison of the simulation and the measurements

站点	T2/°C			SWDOWN/W m ⁻²			平均风速/m s ⁻¹			风向/(°)			CO ₂ 浓度/ppm			NEE/mg (CO ₂) m ⁻² s ⁻¹		
	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R	MBE	RMSE	R
DX	0.21	1.12	0.95	0.29	161.72	0.89	1.22	1.68	0.47	-39.57	76.36	0.58	0.74	12.13	0.67	/	/	/
NUIST	0.12	1.41	0.92	52.26	156.47	0.91	1.21	1.95	0.41	-9.37	85.66	0.46	-15.23	24.16	0.63	0.099	0.25	0.71
MLW	0.49	1.60	0.89	33.36	135.63	0.93	0.57	1.45	0.33	44.61	100.82	0.36	-4.65	12.50	0.62	0.083	0.17	0.52

出高度与实际观测高度不一致。这些都可能导
致 CO₂ 模拟偏差。

图 7 给出 2010 年 7 月 29 日不同时间长江三角

洲地区 WRF-GHG 模拟的大气 CO₂ 浓度和风的空
间分布演变图。可以看出，模式能很好地模拟不同土
地覆盖类型 CO₂ 浓度的空间分布。比如浙江省北部

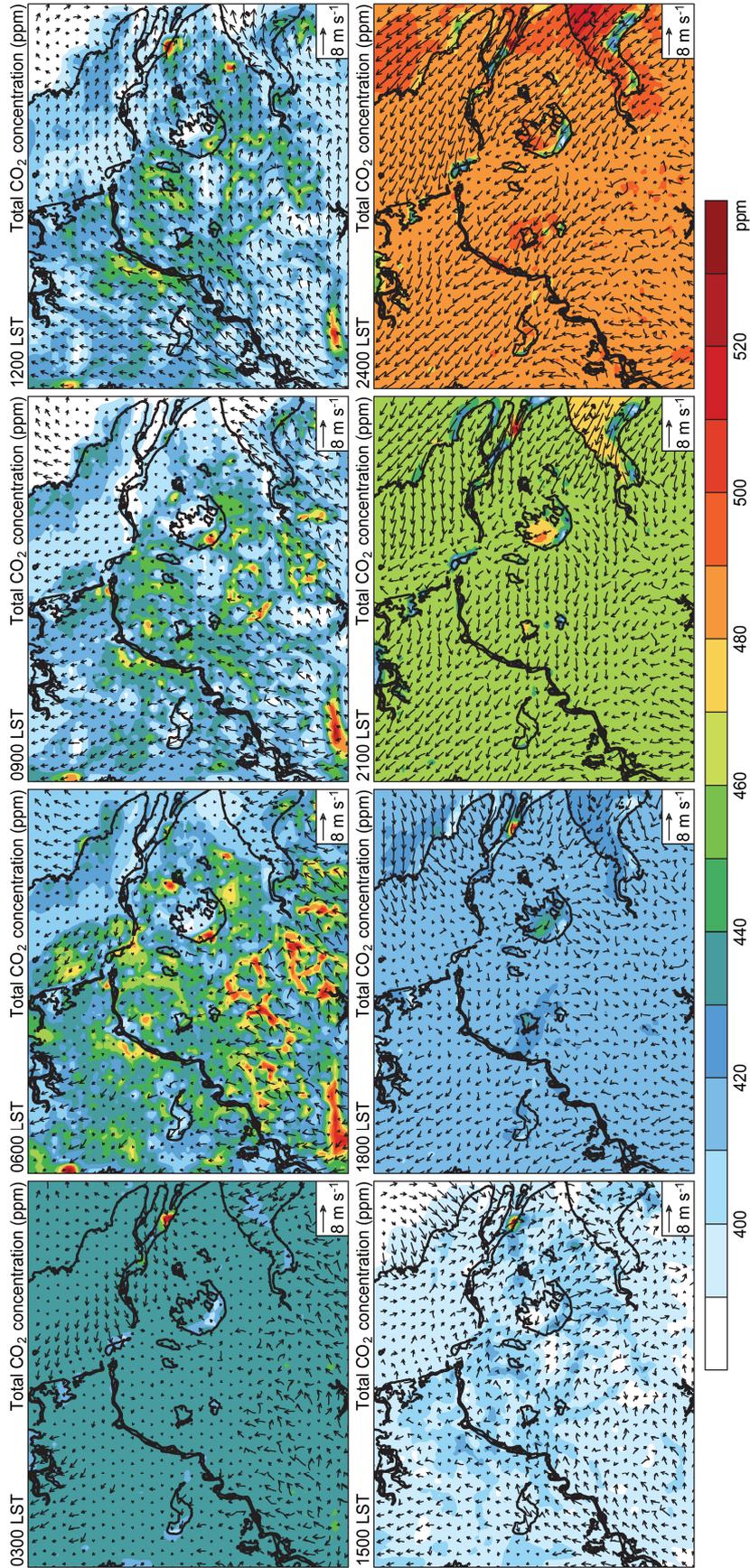


图 7 2010 年 7 月 29 日模拟区域 d03 上的 CO₂ 浓度 (单位: ppm) 分布特征
Fig. 7 Spatial variations in CO₂ concentrations (units: ppm) over the inner domain at different simulation time on Jul 29, 2010

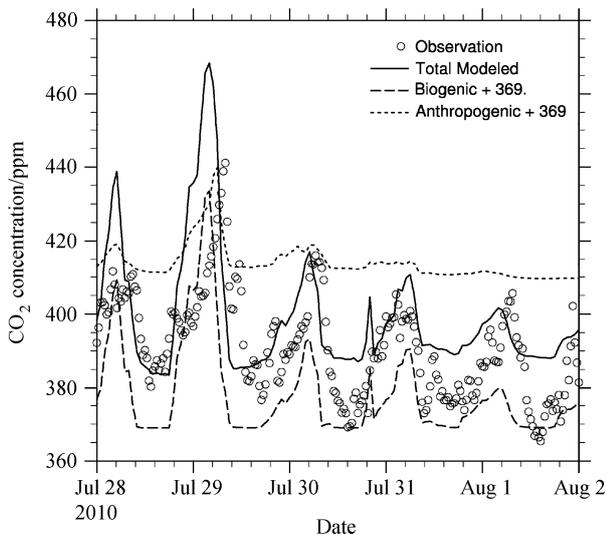


图8 NUIST 观测点的不同排放源对 CO₂ 浓度的贡献时间序列

Fig. 8 Time series of the different tagged tracers contributions to CO₂ concentrations from the model at site NUIST

山区受陆地生态系统控制 CO₂ 浓度偏低, 而苏南和上海市区人为排放源大, 夜间 CO₂ 快速积累。一些主要排放源如上海金山、仪征工业区等排放源对局地大气 CO₂ 浓度有着重要影响。太湖附近的城市如苏州和无锡等, 其大气 CO₂ 同时还受湖陆风的影响。白天湖风可以向市区输送低浓度 CO₂ 的空气, 夜间陆风可将城区高浓度 CO₂ 输送到太湖近地层, 部分被湖体吸收。就整个研究区域而言, 太湖等水体和浙江省北部陆地生态系统对区域碳循环有一定的调节作用, 减缓区域大气 CO₂ 浓度偏高。

3.4 不同源对大气 CO₂ 浓度的贡献

为定量评估不同源对长江三角洲地区 CO₂ 浓度的影响, 图 8 给出了 NUIST 站人为源和自然源对大气 CO₂ 浓度的贡献。如图所示, CO₂ 的背景场浓度为 369 ppm, 人为排放源的贡献为 40.4~70.6 ppm (平均值为 44.1 ppm), 植被呼吸对大气 CO₂ 浓度的贡献为 0~64.5 ppm (平均值为 7.8 ppm)。夜间, 大气 CO₂ 浓度主要受植被呼吸作用控制, 但人为排放对 CO₂ 浓度的总量贡献较大。

4 结论

本文利用中尺度大气-温室气体耦合模型 WRF-GHG 对 2010 年 7 月 28 日至 2010 年 8 月 2 日期间影响长江三角洲地区大气 CO₂ 浓度及时空分布的各种过程进行了详尽模拟。通过与三个站点 (DX、NUIST、MLW) 的 CO₂ 通量和浓度观测值

对比, 我们发现:

(1) 植被光合呼吸模型 VPRM 计算的净生态系统碳通量, 对 WRF-GHG 模拟 CO₂ 的日变化至关重要。现有的 VPRM 能较准确地模拟 NEE 的日变化趋势, 但低估了白天的 NEE。利用我国现有通量网的观测数据, 优化 VPRM 模式中各种植被类型所对应的参数, 改进 VPRM 的 NEE 模拟将是今后工作的重点之一。

(2) WRF-GHG 可较为准确模拟长江三角洲地区大气 CO₂ 的时空变化特征。模式低估了大气 CO₂ 浓度 5~15 ppm, 这与人为排放源的低估和 VPRM 的关键参数的不确定性密切相关。

(3) 太湖和植被覆盖较好的地区如浙江北部山区是该地区的主要碳汇, 而城市为 CO₂ 的主要排放源。NUIST 站的计算表明, 人为源对大气 CO₂ 浓度的贡献为 40~70 ppm。制定人为源减排措施, 对于有效控制大气 CO₂ 浓度极为重要。

参考文献 (References)

- Aber J D, Federer C A. 1992. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration, and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems [J]. *Oecologia*, 92 (4): 463-474.
- Ahmadov R, Gerbig C, Kretschmer R, et al. 2007. Mesoscale covariance of transport and CO₂ fluxes: Evidence from observations and simulations using the WRF-VPRM coupled atmosphere-biosphere model [J]. *J. Geophys. Res.-Atmos*, 112, D22107, doi:10.1029/2007JD008552.
- Ahmadov R, Gerbig C, Kretschmer R, et al. 2009. Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO₂ transport models with coastal tower measurements of CO₂ [J]. *Biogeosciences*, 6 (5): 807-817, doi:10.5194/bg-6-807-2009.
- Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, et al. 2012. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the last 50 years [J]. *Nature*, 488 (7409): 70-72.
- Beck V, Koch T, Kretschmer R, et al. 2011. The WRF Greenhouse Gas Model (WRF-GHG) [R]. Technical Report No. 25, Max Planck Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the PENN State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569-585.
- Chevallier F, Bréon F M, Rayner P J. 2007. The contribution of the orbiting carbon observatory to the estimation of CO₂ sources and sinks: Theoretical study in a variational data assimilation framework [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D09307, doi:10.1029/2006JD007375.
- Crisp D, Atlas R M, Breon F M, et al. 2004. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission [J]. *Adv. Space Res.*, 34 (4): 700-709.
- 代成颖, 高志球, 王琳琳, 等. 2009. 两种土壤温度算法的对比分析 [J]. *大气科学*, 33 (1): 135-144. Dai Chengying, GAO Zhiqiu, WANG Linlin, et al. 2009. Intercomparison between two soil temperature

- algorithms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 135–144.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (20): 3077–3107.
- Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. 1996. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D2): 4115–4128.
- Geels C, Gloor M, Ciais P, et al. 2007. Comparing atmospheric transport models for future regional inversions over Europe —Part 1: Mapping the atmospheric CO₂ signals [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7 (13): 3461–3479.
- Gerbig C, Lin J C, Munger J W, et al. 2006. What can tracer observations in the continental boundary layer tell us about surface-atmosphere fluxes? [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 6 (2): 539–554.
- Grell G A, Peckham S E, McKeen S, et al. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (37): 6957–6975.
- Gurney K R, Law R M, Denning A S, et al. 2003. TransCom 3 CO₂ inversion intercomparison: 1. Annual mean control results and sensitivity to transport and prior flux information [J]. *Tellus B*, 55 (2): 555–579.
- Hauglustaine D A, Hourdin F, Jourdain L, et al. 2004. Interactive chemistry in the Laboratoire de Météorologie Dynamique general circulation model: Description and background tropospheric chemistry evaluation [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D04314, doi:10.1029/2003JD003957.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. 2007. Dangerous human-made interference with climate: A GISS model study [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7 (9): 2287–2312.
- Hong S Y, Jimy D, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (1): 103–120.
- Hong S Y, Yign N, Jimy D. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (9): 2318–2341.
- Houweling S, Dentener F J, Lelieveld J. 1998. The impact of non-methane hydrocarbon compounds on tropospheric photochemistry [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D9): 10673–10696.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Jung M, Henkel K, Herold M, et al. 2006. Exploiting synergies of global land cover products for carbon cycle modeling [J]. *Remote Sens. Environ.*, 101 (4): 534–553.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 170–181.
- Krol M, Houweling S, Bregman B, et al. 2005. The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 5 (2): 417–432, doi:10.5194/acp-5-417-2005.
- Lauvaux T, Uliasz M, Sarrat C, et al. 2008. Mesoscale inversion: First results from the CERES campaign with synthetic data [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (13): 3459–3471, doi:10.5194/acp-8-3459-2008.
- Lee X, Liu S, Xiao W, et al. 2014. The Taihu Eddy Flux Network: An observational program on energy, water and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake [J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 95: 1583–1594.
- 李香华. 2005. 太湖水—气界面温室气体通量及时空变化特征研究 [D]. 河海大学硕士学位论文. Li Xianghua. 2005. Study of the greenhouse gas flux of water–air Interface and its spatio–temporal change in Taihu Lake [D]. M. S. thesis (in Chinese), Hohai University.
- 刘诚, 黄建平, 刁一伟, 等. 2015. 植被光合呼吸模型在千烟洲亚热带常绿针叶林的优化与验证 [J]. *植物生态学报*, 待刊. Liu Cheng, Huang Jianping, Diao Yiwei, et al. 2015. Photosynthesis and respiration parameter optimization and evaluation of VPRM with the measurements at a coniferous-evergreen forest site [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* (in Chinese), in press.
- Mahadevan P, Wofsy S C, Matross D M, et al. 2008. A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2005, doi:10.1029/2006GB002735.
- Marquis M, Tans P. 2008. Climate change: Carbon crucible [J]. *Science*, 320 (5875): 460–461.
- Peters W, Miller J B, Whitaker J, et al. 2005. An ensemble data assimilation system to estimate CO₂ surface fluxes from atmospheric trace gas observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D24304, doi:10.1029/2005JD006157.
- Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. 1991. Potential net primary productivity in South America: Application of a global-model [J]. *Ecol. Appl.*, 1 (4): 399–429.
- Raupach M R, Marland G, Ciais P, et al. 2007. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (24): 10288–10293.
- Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [M] // *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer, 44–57.
- Skamarock W C, Klemp J B. 2008. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications [J]. *J. Comput. Phys.*, 227 (7): 3465–3485.
- van Dijk A, Moene A F, de Bruin H A R. 2004. *The principles of surface flux physics: Theory, practice and description of the ECPack library*. Meteorology and Air Quality Group, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 99 pp.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106 (447): 85–100.
- Xiao X M, Hollinger D, Aber J, et al. 2004. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest [J]. *Remote Sensing of Environment*, 89 (4): 519–534.
- 于贵瑞, 王秋风, 朱先进. 2011. 区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性 [J]. *地理科学进展*, 30 (1): 103–113. Yu Guirui, Wang Qiufeng, Zhu Xianjin. 2011. Methods and uncertainties in evaluating the carbon budgets of regional terrestrial ecosystems [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 30 (1): 103–113.