

# 基于 WRF-STILT 模型对高塔 CO<sub>2</sub> 浓度的模拟研究

胡 诚<sup>1,2</sup>, 张 弥<sup>1,2\*</sup>, 肖 薇<sup>1,2</sup>, 王咏薇<sup>1,2</sup>, 王 伟<sup>1,2</sup>, Tim Griffis<sup>3</sup>, 刘寿东<sup>1,2</sup>, 李旭辉<sup>1</sup> (1.南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心,江苏 南京 210044; 2.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室,江苏 南京 210044; 3.明尼苏达大学,美国 圣保罗市 55108)

**摘要:** 利用下垫面均一的美国最大农业种植区已有高塔 CO<sub>2</sub> 浓度观测资料,结合 EDGAR 的 13 种不同类型人为化石源 CO<sub>2</sub> 通量和 Carbon Tracker 的植被 NEE 数据,评估了 WRF-STILT 拉格朗日大气传输模型的模拟能力.结果表明,WRF-STILT 模型能够很好地模拟出高塔 100m 处观测到的 CO<sub>2</sub> 浓度强季节和日变化特征,全年模拟的大气 CO<sub>2</sub> 浓度的均方根误差为  $10.6 \times 10^{-6}$ ,相关系数为 0.44( $n=7784$ ,  $P<0.001$ ); 生长季(6-9月)观测和模拟的浓度增加值线性拟合斜率为 1.08( $R=0.52$ ,  $P<0.001$ ),说明一致性高;截距为  $7.26 \times 10^{-6}$  则反映了使用人为化石燃烧的 CO<sub>2</sub> 通量的高估或者植被 NEE 的低估.2008 年全年高塔观测到的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值为  $4.83 \times 10^{-6}$ ,小于模拟得到化石燃烧贡献的增加量  $6.61 \times 10^{-6}$  与植被 NEE 的贡献值  $3.23 \times 10^{-6}$  之和.其中原油生产和提炼以及能源工业分别贡献了化石燃料燃烧总量的  $2.55 \times 10^{-6}$  (38.6%) 和  $1.43 \times 10^{-6}$  (21.6%).而对生长季观测到的强 CO<sub>2</sub> 浓度日变化特征模拟结果显示,其模拟的平均日振幅为  $24.30 \times 10^{-6}$ ;生物质燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 浓度贡献值为  $0.06 \times 10^{-6}$ ,相对于植被 NEE 和化石源的贡献,可以被忽略.该方法可为将来应用高塔衡量气体浓度观测来反演中国区域尺度的温室气体通量提供参考.

**关键词:** WRF-STILT 模型; 高塔 CO<sub>2</sub>; 浓度模拟; 涡度相关; 区域尺度; 美国玉米带

**中图分类号:** X511      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2017)07-2424-14

**Tall tower CO<sub>2</sub> concentration simulation using the WRF-STILT model.** HU Cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Mi<sup>1,2\*</sup>, XIAO Wei<sup>1,2</sup>, WANG Yong-wei<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, TIM Griffis<sup>3</sup>, LIU Shou-dong<sup>1,2</sup>, LI Xu-hui<sup>1</sup> (1.Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3.University of Minnesota-Twin Cities, Saint Paul 55108, U.S.A). *China Environmental Science*, 2017,37(7): 2424~2437

**Abstract:** By using high spatial and temporal resolution EDGAR fossil emissions (13 categories) and Carbon Tracker NEE flux, WRF-STILT model was evaluated with one year (2008) CO<sub>2</sub> concentration observations at a homogeneous agricultural underlying surface, which located in U.S. corn belt. The results showed that this model could capture the strong seasonal and daily variation, with RMSE be  $10.6 \times 10^{-6}$ ,  $R=0.44$  ( $n=7784$ ,  $P<0.001$ ). The linear regression slope of growing season concentration enhancement was 1.08 ( $R=0.52$ ,  $P<0.001$ ), indicating high consistency, while the intercept ( $7.26 \times 10^{-6}$ ) reflects the overestimation of fossil emission or underestimation of NEE. During this year round, observed enhancement was  $4.83 \times 10^{-6}$ , smaller than sum of the fossil enhancement contribution ( $6.61 \times 10^{-6}$ ) and NEE contribution ( $3.23 \times 10^{-6}$ ). The oil production and refineries and energy industry contributed  $2.55 \times 10^{-6}$  (38.6%) and  $1.43 \times 10^{-6}$  (21.6%) of all fossil enhancements, separately. Biomass burning only contributes  $0.06 \times 10^{-6}$  to the total enhancement which was ignorable compared with fossil and NEE. At the end, it can be concluded that this method can be used to retrieve regional scale greenhouse gas flux in China.

**Key words:** WRF-STILT model; tall tower CO<sub>2</sub>; concentration simulation; eddy covariance; regional scale; U.S. corn belt

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41575147,41475141,41505005);江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT);2016 年度江苏省高校研究生科技创新项目(KY2216-0348);国家公派联合培养博士研究生项目(201508320287)

\* 责任作者, 讲师, zhangm.80@nuist.edu.cn

由于人为化石燃料的大量使用,当前大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度已由 1800 年的  $280 \times 10^{-6}$  上升到了 2015 年的  $400 \times 10^{-6}$ , 并且预计会在 2050 年升高到  $550 \times 10^{-6}$  [1-3]。而陆地生态系统作为重要的碳汇,其对 CO<sub>2</sub> 的吸收作用可以抵消人为 CO<sub>2</sub> 排放量的 30%~60%, 因此在全球碳循环和控制大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化中发挥着重要作用 [4-5]。前人对全球碳平衡各个分量评估的不确定性研究表明,陆地-大气之间的 CO<sub>2</sub> 净交换的变异系数最大,达到了 66.7%, 远远高于化石燃料燃烧和水泥生产释放的 CO<sub>2</sub> (4.2%)、海洋-大气 CO<sub>2</sub> 净交换 (22.7%) 及大气碳储存变化 (4.2%)。其中,对陆地生态系统固碳量大小的估算范围是  $-3.4 \sim -0.2 \text{ Pg C/a}$  [6-7]。由于对陆地碳汇估算的不确定,要准确评价陆地对大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的贡献需加强区域尺度 ( $10^2 \sim 10^6 \text{ km}$ ) 的生态系统 CO<sub>2</sub> 净交换的综合研究和观测 [8-10]。

区域尺度的 CO<sub>2</sub> 通量研究方法主要分为“自下而上”和“自上而下”两大类 [9]。其中自下而上的方法是基于小区域的通量结果进行尺度上推到更大空间尺度的通量计算。如涡度相关方法,作物模型方法,IPCC 算法等 [2,11-14]。“自下而上”算法原理和计算过程相对容易,所以被广泛应用于区域尺度的碳通量研究中,但是该方法中涉及的模型系数、反应底物、通量直接观测的不确定性大,并且由于下垫面覆盖类型空间异质性强等原因,往往会带来很大的误差 [8,10]。另一种“自上而下”方法,是通过直接观测结果或者间接反演区域尺度的平均通量。如:遥感观测和边界层算法等 [14-15],而其不确定性甚至会大于计算结果本身 [12,16]。基于大气传输(包括欧拉和拉格朗日)模型和 CO<sub>2</sub> 浓度观测的通量反演算法,首先结合先验的 CO<sub>2</sub> 通量和大气传输模型模拟 CO<sub>2</sub> 浓度,再根据真实的大气 CO<sub>2</sub> 来评估下垫面先验的通量偏差并得到调整系数,使其更接近于真实值。由于该方法只需进行 CO<sub>2</sub> 浓度观测,浓度所代表的源区范围主要与观测高度有关 ( $>10^3 \text{ km}$ ),且大气传输模型具有模拟小时尺度 CO<sub>2</sub> 浓度变化的能力,因此具备评估与反演 CO<sub>2</sub> 通量的优势。在高密度的大气 CO<sub>2</sub> 浓度观测网络不断发展的当前,基于

大气传输模型和 CO<sub>2</sub> 浓度观测的通量反演算法可被用于估算区域甚至全球尺度的 CO<sub>2</sub> 通量 [17-19]。在我国开展的《高塔验证系统和综合观测》项目,其目的就是结合 CO<sub>2</sub> 通量与浓度观测,用观测和数值模拟的方法估算区域的 CO<sub>2</sub> 通量。国内 Piao [20] 基于 4 个站点观测反演了中国的生态系统净交换 NEE;刁 [21]、Mallia [22] 和 Nehr Korn [23] 通过大气传输模型模拟了长江三角洲、盐湖城的大气 CO<sub>2</sub> 浓度,结果都存在一定误差,这主要是大气传输模型误差和 CO<sub>2</sub> 通量模拟偏差导致的。由此可以看出,大气传输模型与 CO<sub>2</sub> 浓度观测结合的通量反演方法可以得到区域的 CO<sub>2</sub> 通量及源/汇状况,但是该方法还存在一定的不确定性,尤其是大气传输模型误差和人为化石燃料燃烧释放的 CO<sub>2</sub> 通量的不确定性对 CO<sub>2</sub> 植被 NEE 估算带来的间接影响 [24-25]。

以往的研究中大气传输模型多采用欧拉模型,而 STILT 大气传输模型是基于拉格朗日原理的传输模型,与欧拉模型相比,拉格朗日大气传输模型有数值模拟稳定,物质守恒与计算效率高等几大优点,在高塔 CO<sub>2</sub> 观测站点少的情况下,对于评估以观测站点为中心的区域尺度 CO<sub>2</sub> 通量,拉格朗日模型具有目标性强等优势 [26-28]。因此,基于 STILT 大气传输模型与高塔 CO<sub>2</sub> 浓度观测的通量反演算法,在估算区域 CO<sub>2</sub> 通量方面更具优势。

与城市区域相比,农业种植区下垫面均一性高,且农业区是陆地生态系统中重要的碳汇 [29]。所以是评估 STILT 大气传输模型的理想区域,并且对该区域的 CO<sub>2</sub> 通量进行反演对准确估算区域尺度植被净碳交换量 (NEE) 具有重要作用。本研究将基于明尼苏达大学已有的高塔观测,使用 WRF-STILT 模型,耦合植被 NEE 和高时间 (h) 和空间分辨率 ( $0.1^\circ$ ) 的人为化石源的排放通量,对位于美国最大的农业种植区 Corn Belt (玉米带) 一处高塔的 CO<sub>2</sub> 浓度进行模拟,以评估 WRF-STILT 模型对农业区高塔观测的 CO<sub>2</sub> 浓度时间变化特征的模拟能力并对模拟结果的不确定性进行初步分析,并分析不同化石燃料源对大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的贡献。该方法可为将来应用高塔衡量气体浓度观测来反演中国区域、全国尺度的

温室气体通量提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 观测站点

观测站点位于美国玉米带(站点为图 1 中“+”号所示),它是世界上最大的玉米专业化农业种植区,其区域内约 46%的土地为农业用地<sup>[10,16]</sup>,本文中所使用的观测塔(KCMP tower)处在美国玉米带的北部,明尼苏达州首府(44°41'19"N, 93°4'22"W;海拔高度 290m)西南方向,观测塔的塔高244m,以该高塔为中心,其10km和600km半径区域的农业用地分别占到了41%

和37%,而其余主要是被森林和草地覆盖<sup>[10]</sup>;在农作物生长季(6~9月)高塔能观测到很强的季节和日变化。 $\text{CO}_2$ 浓度观测的进气口安装在距离塔底100m高度处,空气被抽入位于塔底的分析仪中(model TGA 100A, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)测量,测量前会对气体进行降温干燥,每小时对仪器进行在线标定,标准气体来源于美国(NOAA-ESRL),校正后小时平均 $\text{CO}_2$ 浓度的精度为 $0.03 \times 10^{-6}$ <sup>[16]</sup>。由于观测塔距离市区西南部约25km,且盛行风为西北风。因此该塔观测到的 $\text{CO}_2$ 浓度包括了人为化石排放和植物源信号。

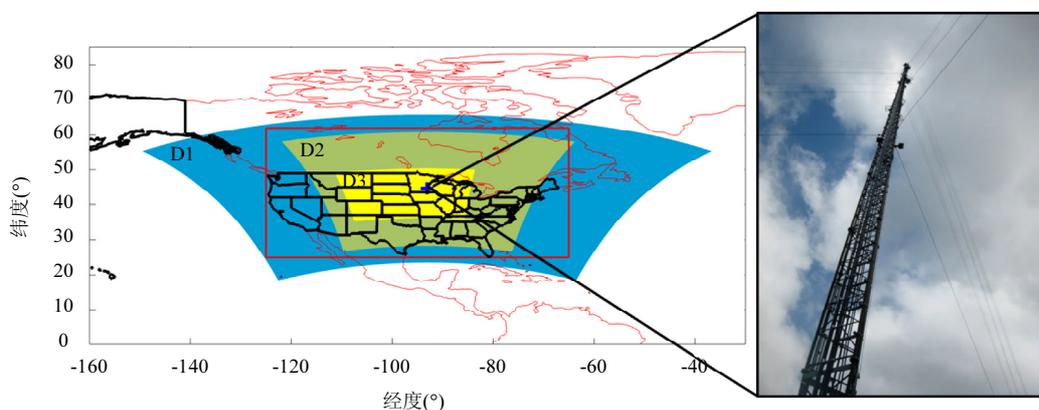


图1 WRF模拟区域及高塔浓度观测站点 KCMP塔(深黄色(Domain3),浅黄色(Domain2)和蓝色(Domain1),红框所围成的矩形区域分别代表 STILT模型所用气象驱动场范围)

Fig.1 3 Domains used in WRF (Blue, light-yellow, and deep-yellow indicate the area for Domain1, Domain2, and Domain3, respectively; KCMP tower is indicated by black cross) and STILT (in red rectangular region)

### 1.2 STILT模型介绍

STILT模型是一种拉格朗日随机游走理论的传输模型,它把观测点上游的源(汇)通量与观测点的浓度变化用足迹权重联系起来<sup>[26]</sup>。具体原理就是通过向后释放大量的空气粒子,来模拟气体在湍流和平均风向驱动下的后向运动轨迹,通过计算上游某区域边界层某高度内的所有粒子数量和每个粒子所停留时间来定量计算足迹权重的值,其计算公式如下:

$$f(x_r, t_r | x_i, y_j, t_m) = \frac{m_{\text{air}}}{h\rho(x_i, y_j, t_m)} \frac{1}{N_{\text{tot}}} \sum_{p=1}^{N_{\text{tot}}} \Delta t_{p,i,j,k} \quad (1)$$

式中: $m_{\text{air}}$ 为空气的摩尔重量; $h$ 为下垫面影响层的高度(本文设置为边界层高度的一半); $\rho$ 为所有粒子的平均密度; $N_{\text{tot}}$ 为释放的粒子总数; $\Delta t_{p,i,j,k}$ 每一个粒子对应在某区域 $(x_i, y_j)$ 的下垫面影响层所停留的时间 $t_m$ <sup>[26]</sup>,所有下垫面的通量都假设快速地在下垫面影响层的高度内混合,在本研究中,下垫面影响层高度 $h$ 选择为边界层高度的0.5倍,是因为前人的研究结果认为,STILT模型计算得到的足迹权重对 $h$ 的取值不敏感<sup>[17,26]</sup>。公式单位见 Gerbig<sup>[17]</sup>和 Lin<sup>[26]</sup>。

模拟的 $\text{CO}_2$ 浓度是由两部分组成:刚进入模拟区域的初始场浓度,以及进入模拟区域后的浓

度局地源汇贡献量,流程图如图 2 所示.虽然模拟过程中释放粒子数量越多,其运动轨迹越能接近大气真实运动状况,但会消耗计算机运行时间.通过前期敏感性分析,发现释放 500 个粒子与 1000 及 2000 个粒子的差异很小,所以本研究将采用 Chen<sup>[27]</sup>的方法,选取释放粒子数为 500 个.本研究对于后向释放时间的选取为 7d,通过前期模型调试,发现绝大多数释放的粒子都会在 7d 后流出模型设置的最外层模拟区域;通过追溯后向轨迹 7d 后各个粒子所在的经纬度和高度,选取其所在位置的全球 3 维背景场 CO<sub>2</sub> 浓度值,其平均值作为

该小时的背景值浓度.局地源汇贡献量则由如下公式计算得出:

$$\Delta\text{CO}_2 = \sum_{i=1}^n [(\text{foot}_i \times (\text{flux}_{\text{CO}_2})_i)] \quad (2)$$

式中:  $\Delta\text{CO}_2$  为模拟的小时浓度局地贡献量(来自人为化石燃烧源和植被源),由于 STILT 模型释放的粒子是向后运动 7d,所以小时的  $\Delta\text{CO}_2$  是由过去 7d( $n=168\text{h}$ )粒子经过区域的所有源汇贡献值之和, $i$  为 7d 内所对应的各个小时( $i=1\sim 168$ ),  $\text{foot}_i$  为模拟过程中第  $i$  小时对应的足迹权重,  $\text{flux}_{\text{CO}_2}$  则为相应的源汇通量.

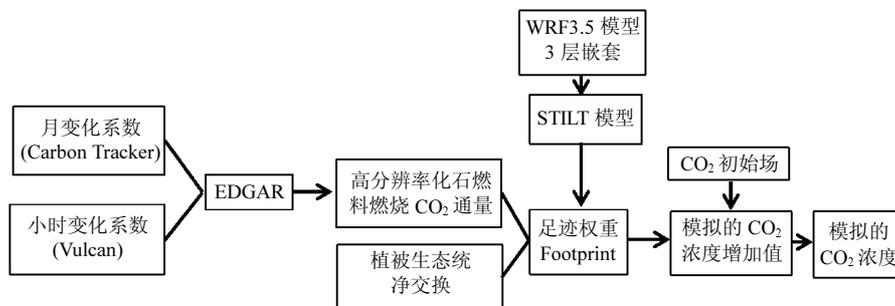


图 2 CO<sub>2</sub> 浓度模拟及与观测结果对比分析流程

Fig.2 Overview of the CO<sub>2</sub> modeling by using the WRF-STILT model

### 1.3 WRF 模式设置

表 1 WRF 模型的主要参数化方案设置

Table 1 WRF parameters setup

设置	所选择方案
微物理过程	WSM3 类简单冰方案 <sup>[28]</sup>
长波辐射	RRTM 方案 <sup>[29]</sup>
短波辐射	Dudhia 方案 <sup>[30]</sup>
近地面层	Monin-Obukhov 参数化方案
陆面过程	Noah 陆面过程方案 <sup>[31]</sup>
边界层	YSU 方案 <sup>[32]</sup>
积云参数化	Kain-Fritsch(new Eta)方案(Domain1 和 Domain2) <sup>[33]</sup>

由图 2 可知,STILT 模型所需的气象场数据须有 WRF 模拟的气象场给出,WRF 模拟气象场设置采用三重嵌套(如图 2)和双向反馈,第一层模拟区域包括美国本土所有区域,加拿大南部陆地和部分海洋区域,空间分辨率为 27km,东西和南北格点数分别为 250×180;第二层模拟区域空间分辨率为 9km,格点数为 385×409;最内层空

间分辨率为 3km,670×532,主要包括土地类型以农田为主的美国中西部区域,垂直方向为 28 层.WRF 模式采用的主要参数化方案如表 1.初始气象场为 NCEP 的 FNL 数据(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>),其空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为 6h.本研究的气象场模拟时间段为 2008 年全年.

### 1.4 CO<sub>2</sub> 通量和初始场浓度

1.4.1 CO<sub>2</sub> 初始场浓度 目前全球有多种 CO<sub>2</sub> 浓度背景值数据公布,通常的背景值是基于全球的 CO<sub>2</sub> 浓度观测网络,优化地气交换界面的排放通量,再以全球传输模型(TM3 和 TM5)来计算 CO<sub>2</sub> 的空间分布状况<sup>[18,34]</sup>,前人比较不同 CO<sub>2</sub> 背景值发现之间差异很小,且不同的 CO<sub>2</sub> 背景值数据都拥有很高的准确性,基于 Carbon Tracker 在北美有更高的时间和空间分辨率(1°×1°, 3h),所以在本研究中选择 Carbon Tracker 全球 CO<sub>2</sub> 浓度分布.本文将位于太平洋的 Mauna Loa 大气背

景值浓度与对应格点的 Carbon Tracker 的浓度值进行比较,发现 2008 年 Mauna Loa 站大气 CO<sub>2</sub> 浓度年平均值为 385.35ppm,Carbon Tracker 则为  $385.53 \times 10^{-6}$ ,两者 6h 尺度上的标准误差则为  $0.60 \times 10^{-6}$ .

**1.4.2 生态系统净交换(NEE)** 植被的生态系统净交换 NEE 取自 Carbon Tracker<sup>[18]</sup>,其空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为 3h,该通量是结合 CASA 作物生长模型和遥感观测的 NDVI 值来模拟先验的 NEE,然后再基于全球的 CO<sub>2</sub> 浓度观测和大气运输模型(TM3)采用贝叶斯反演算法来优化之前先验的 NEE,通过调整植被 NEE 和海洋 NEE 来使模拟的浓度值与观测值最接近,此时调整过的 NEE 被认为最接近真实情况下垫面生态系统净交换,正值表示碳源,负值代表碳

汇.2008 年全年平均的 CO<sub>2</sub> 生物源如图 3(a)所示,单位为  $10^{-7} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

**1.4.3 生物质燃烧排放和海洋 CO<sub>2</sub> 通量** 生物质燃烧排放通量来自于全球火点燃烧数据集 GFED 产品数据,空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ ,如图 3(b)所示,其计算是基于过火面积、生物质量、以及燃烧完成程度,其中过火面积来自于卫星遥感观测,生物质量是基于 CASA 模型计算的全球生物质量分布<sup>[18,35]</sup>.而海洋的 CO<sub>2</sub> 通量是基于 Carbon Tracker 的同化系统,见图 3(c),在本研究中忽略了海洋源汇项对观测站点高塔浓度的直接影响(计算结果表明全年平均影响小于  $0.02 \times 10^{-6}$ ),因此只把它微弱的影响认为混合在初始背景场浓度中.如图 3(b)和 3(c)所示,分别代表生物质燃烧排放和海洋 CO<sub>2</sub> 通量,单位均为  $10^{-7} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

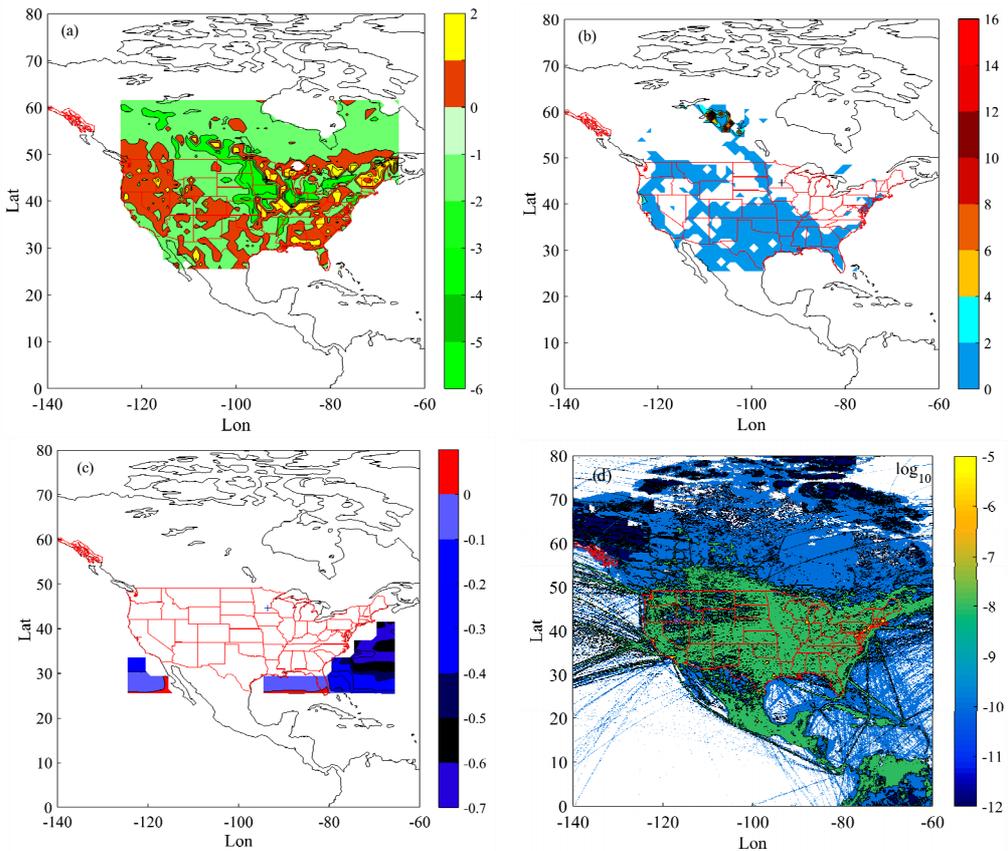


图3 2008 年平均 CO<sub>2</sub> 的排放源与汇

Fig.3 CO<sub>2</sub> flux averaged for 2008

(a) 生态系统净交换(NEE);(b) 生物质燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 的排放源;(c) 海洋的排放源汇;(d) 化石燃料排放源

**1.4.4 CO<sub>2</sub> 化石燃料燃烧通量** 本研究使用的是高时间(h)和空间(0.1°×0.1°)分辨率的化石燃料燃烧释放的 CO<sub>2</sub> 通量,结合了 3 种化石燃料数据库,分别为 EDGAR、Carbon Tracker 和 Vulcan<sup>[18,36-37]</sup>.其中 EDGAR 提供 13 种不同的化石排放源种类,例如石油提炼、能源工业、道路汽车等化石燃料排放的 CO<sub>2</sub> 通量,分别使用这 13 种不同类别的 CO<sub>2</sub> 化石燃料排放通量与 STILT 模型计算出的足迹权重相结合,就可以计算出不同化石燃料源的贡献值大小,EDGAR 拥有高精度的空间分辨率 (0.1°×0.1°),但只有年平均通量,见图 3(d).由于 EDGAR 空间的变化范围大,差异可达 10 个数量级,所以采用常用对数 log<sub>10</sub> 的形式展示,单位为 mol/(m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>).Carbon Tracker 化石燃烧排放源的空间分辨率为 1°×1°,时间分辨率为月尺度,但是由于化石燃料不同于生物源,其空间分布有很大的异质性,一个格点的排放源可能是周围格点的上千倍,因此粗的空间分辨率会带来很大的集合误差“Aggregation error”<sup>[20,38]</sup>,进而使模拟结果偏低.前期结果发现使用 1°的排放源得到的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值是 0.1°的一半,所以在化石燃料源的选取上,本研究选择更高空间分辨率(0.1°×0.1°)的 EDGAR.

基于以上结论,本研究发挥 3 种排放源的各自优势,在选取 2008 年 EDGAR 排放源的基础上,把 Vulcan<sup>[36]</sup>的小时通量变化系数和 Carbon Tracker 的月变化系数应用于 EDGAR 上,在不改变年平均的 EDGAR 化石燃烧 CO<sub>2</sub> 通量的基础上,使结果更接近于真实排放和更精确的空间(0.1°×0.1°)和时间(h)分辨率的 CO<sub>2</sub> 化石燃料燃烧排放.小时尺度的日内变化系数如图 4(a)所示,这 6 种排放源占据了化石燃烧总排放的 95%以上,公路交通(On-road mobile)拥有最大的日振幅,其白天的排放量达到了夜晚的 13 倍,其它的 4 类(居民区使用、工业源、商业源和电力发电设备)的日变化系数则在 0.8~1.2 内变化,且都是白天大于夜晚.对于月变化系数,变化范围在 0.91~1.17,且由于冬季供暖等因素,使得冬季大于夏季.

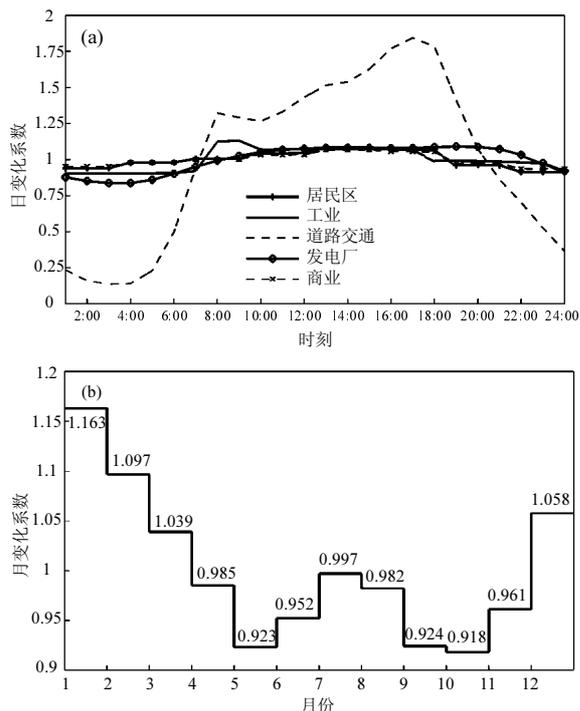


图 4 基于 ‘Vulcan’ 的小时尺度系数与基于 ‘Carbon Tracker’ 的月尺度系数

Fig.4 Diurnal scale factors derived from ‘Vulcan’ dataset, and Monthly scale factors from ‘Carbon Tracker’ dataset

## 2 结果与讨论

### 2.1 CO<sub>2</sub> 浓度增加值

高塔 100m 处观测的小时 CO<sub>2</sub> 浓度增加值是由该小时过去 7d(168h)气流流经上游区域时的累积贡献计算得出的.为了计算在这 168h 的累计过程中任意时间对总浓度增加量的贡献值,选取 4 个季节的典型月份(冬:2 月;春:5 月;夏:8 月;秋:11 月),为了忽略夏季植被光合作用对 CO<sub>2</sub> 吸收的干扰,只分析人为化石燃料燃烧的累积贡献.模拟结果显示(图 5),所有月份 70%以上的浓度增加值是由模拟时间点的前 0.5d 的贡献产生,随着时间的增加,后面时间段对浓度增加值的贡献呈现对数减少的趋势,这表明该观测高度浓度的主要影响源区为 0.5d 气流所流经的区域,若使用高塔观测的 5.4m/s 平均风速<sup>[10]</sup>,则该区域的半径在 200km 以内,和图 6 中足迹权重的黑色区域几乎完全一致.4 个季节,总的 7d 累积

贡献值都大于 5ppm,其中 7d 累计的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值 秋季 (9×10<sup>-6</sup>)> 冬季 (6.5×10<sup>-6</sup>)> 夏季 (5.5×10<sup>-6</sup>)> 春季 (5.2×10<sup>-6</sup>).秋季的 CO<sub>2</sub> 浓度大于

其它 3 个季度的主要原因是因为强的局地源贡献(足迹权重较大)以及远距离输送带来的化石燃料燃烧的信号.

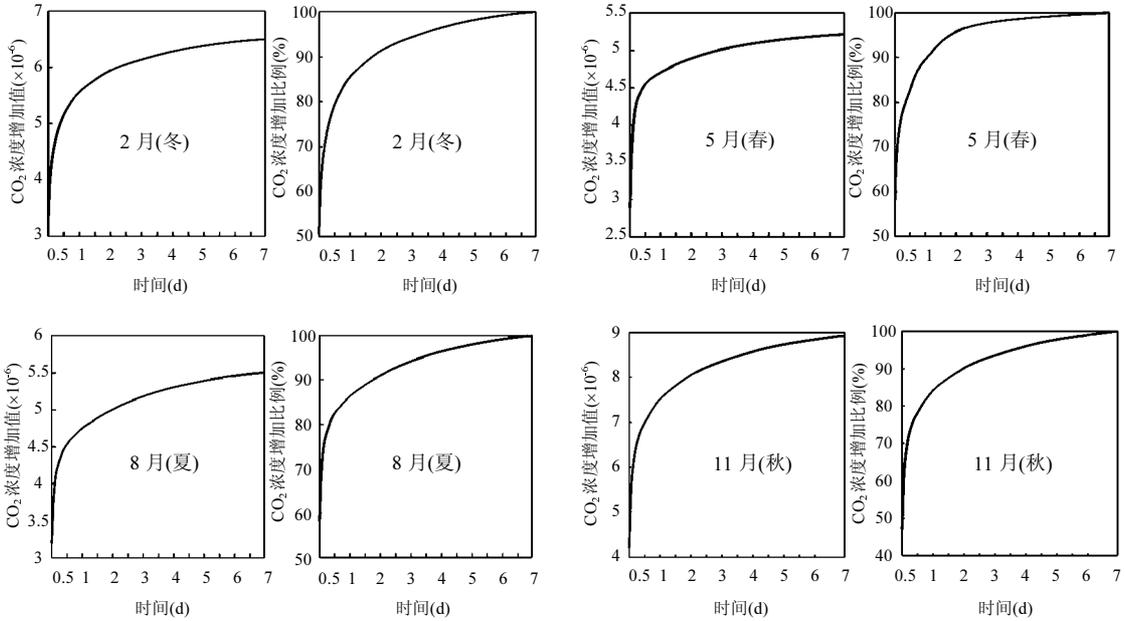


图 5 2008 年 4 个季节的典型月份 CO<sub>2</sub> 浓度累积增加值随时间变化及其所占比例

Fig.5 Cumulated CO<sub>2</sub> concentration enhancement, and its percentage for total enhancement in the past 7days, time shown is 4 typical months for 4 different seasons

### 2.2 足迹权重

为了分析足迹权重的季节变化差异,根据当地气候条件,定义 4 个季节分别为春 3~5 月、夏 6~8 月、秋 9~11 月、冬 12~次年 2 月,如图 6 季节平均足迹权重所示(由于空间的变化范围大,差异可达到 7 个数量级,所以采用常用对数 log<sub>10</sub> 的形式展示),足迹范围有明显的季节变化.Hu<sup>[39]</sup>和 Chen<sup>[27]</sup> 把大于 -4log<sub>10</sub>(footprint) 的足迹区域定义为高塔浓度的强贡献区,即图 6 中黑色和红色所表示区域.可以看出 4 个季节的强贡献区的形状都是呈现西北-东南方向,且西北方向的足迹面积会大于东南方向,这是由当地西北-东南盛行风向导致的.高塔浓度的强贡献区面积总体是夏季<秋季<春季<冬季,其中夏季,由于强太阳辐射,使得下垫面

湍流加强,因此高塔的浓度强贡献区面积小于其它几个季节.由于 4 个季节的足迹权重都覆盖了位于其西南部的玉米带农业种植区,所以都会受到玉米带农作物 NEE 变化的影响.图 5 中 70% 的人为源化石燃料燃烧的浓度增加值来自于后向轨迹 0.5d 气流所流经区域,而黑色强贡献区覆盖范围包含了观测塔北部的明尼阿珀利市和圣保罗市的城市人为源的影响.此外,由于当地盛行风向为西北风,从足迹权重的形状判断,背景气团主要从加拿大北部方向流入,气流在流入北美大陆后受微弱下垫面贡献源的影响(浅黄色和深黄色区域),其接近高塔大约 10° 区域,即强贡献区(黑色和红色区域),开始受到强贡献源的影响,最后到达 100m 高塔被仪器观测到.

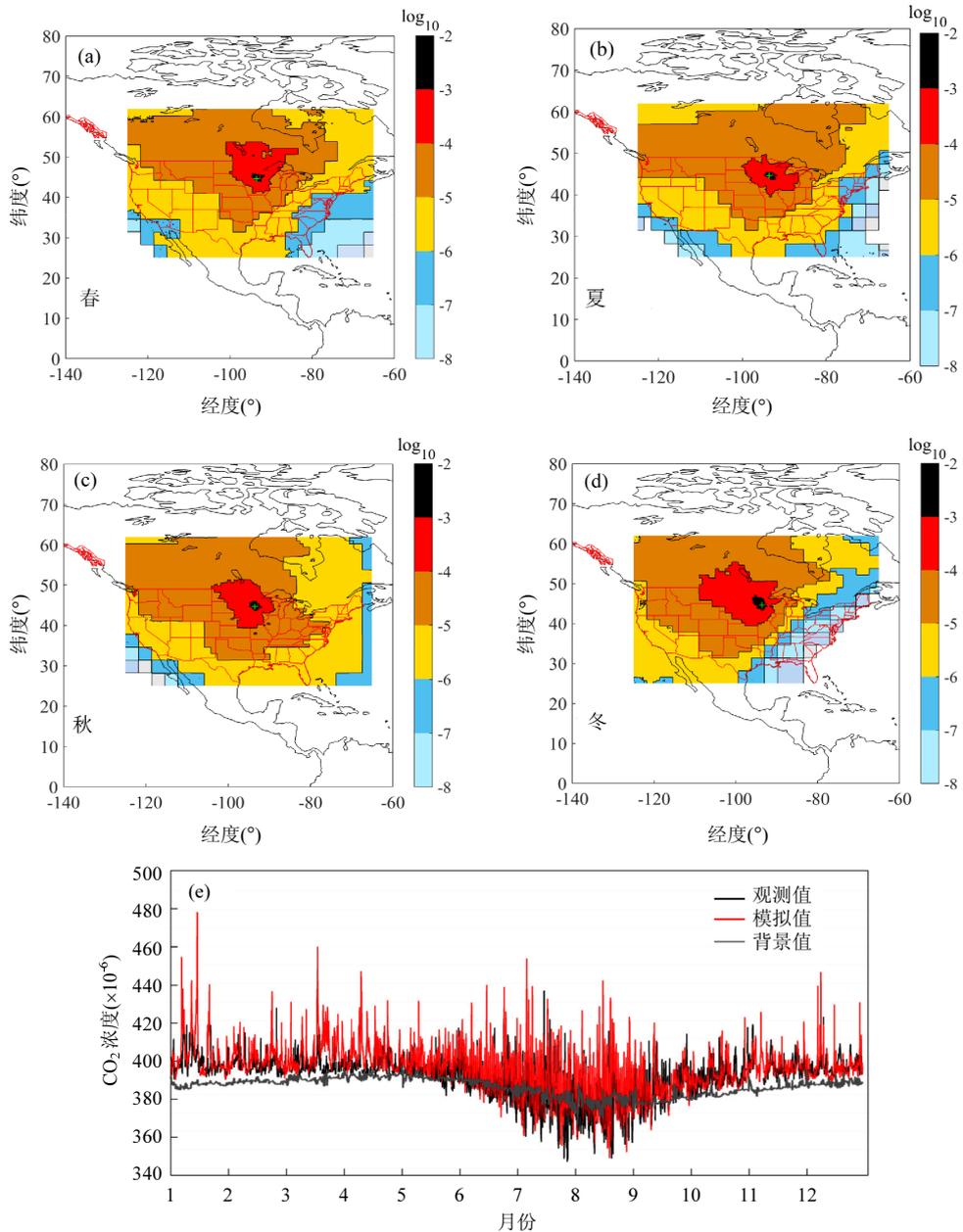


图 6 WRF-STILT 模型计算出的 2008 年 4 季平均足迹权重及观测与模拟结果对比

Fig.6 Averaged footprint in 2008 for 4seasons and Comparison between hourly CO<sub>2</sub> concentration observations and modeled results in 2008

单位为  $\log_{10}(\times 10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \mu\text{mol})$ ,不同颜色分别代表足迹权重常用对数( $\log_{10}$ )的大小范围,黑色(-2~-3),红色(-3~-4),深黄色(-4~-5),浅黄色(-5~-6),深蓝色(-6~-7),浅蓝色(-7~-8).绿色 '+' 为 KCMP 高塔所在位置

### 2.3 模拟和观测对比

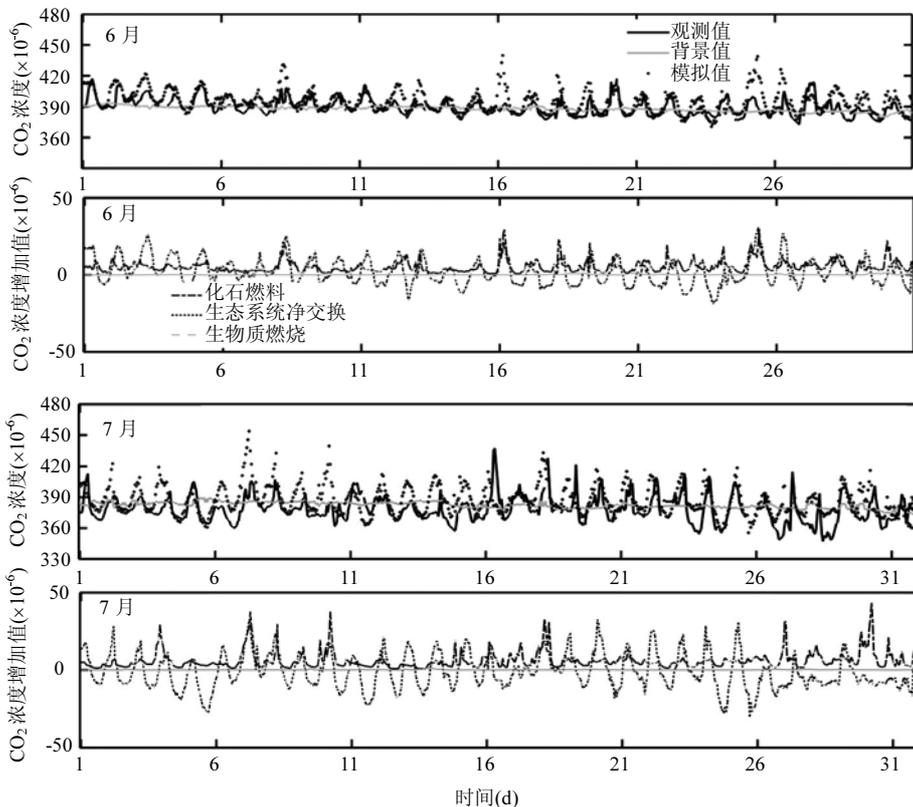
2.3.1 全年结果对比分析 对比模拟和观测的大气 CO<sub>2</sub> 浓度日变化和季节变化,如图 6(e)所示,模拟与观测变化高度一致,2008 年全年的相关系

数为 0.44( $n=7784, P<0.001$ ),均方根误差为  $10.6 \times 10^{-6}$ ,平均误差为  $4.4 \times 10^{-6}$ .1~5 月,由于区域下垫面植被光合作用强度低于呼吸消耗与化石燃料排放源之和,所以模拟和观测值高于背景场浓度.从

5月开始,由于观测高塔南部的强贡献区为大豆、玉米带种植区[图 6(e)],所以随着作物光合作用的增加,下垫面逐渐变成碳汇,观测和模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度低于背景场浓度.9月底农作物开始收割,区域又从碳汇变成碳源.高塔观测的2008年全年平均的 CO<sub>2</sub> 浓度为 391.26×10<sup>-6</sup>,CO<sub>2</sub> 浓度背景值为 386.43×10<sup>-6</sup>,两者之差为 4.83×10<sup>-6</sup>,即观测到的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值,小于模拟得到的化石燃烧贡献的增加量 6.61×10<sup>-6</sup> 与植被 NEE 的贡献值 3.23×10<sup>-6</sup> 之和.由于高塔位于玉米带农作物区域和森林自然下垫面的交接地带[图 3(a)浅黄色和绿色地带],为了找出模拟的植被 NEE 贡献值为正的原因,计算了 Carbon Tracker 两块区域(农作物种植区和森林区)的年平均 NEE 值,玉米带农业种植区的 NEE 为 -4.80μmol/(m<sup>2</sup>·s),其年平均浓度贡献值应为负,而在观测塔东北部森林区的 NEE 为 2.60μmol/(m<sup>2</sup>·s),这是模拟出植被 NEE 贡献值为正的原因.因为没有该地区森林下垫面的 CO<sub>2</sub> 通量直接观测,所以在本文中还不能评估其

不确定性和误差大小.

**2.3.2 生长季的对比与不确定性分析** 这里定义生长季为6~9月共4个月<sup>[10]</sup>,通过图7模拟和观测的小时 CO<sub>2</sub> 浓度可以看出,生长季节观测值显示 CO<sub>2</sub> 浓度有很强的日变化特征,其生长季平均日振幅(日最高浓度减去日最低浓度)为 20.16×10<sup>-6</sup>,而模拟的平均日振幅为 24.30×10<sup>-6</sup>(图 8b),说明 WRF-STILT 模型能很好地模拟出高塔 CO<sub>2</sub> 浓度日变化特征,生长季生物质燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 浓度贡献值为 0.06×10<sup>-6</sup>,且 6月(0.118×10<sup>-6</sup>)>7月(0.077×10<sup>-6</sup>)>8月(0.045×10<sup>-6</sup>)>9月(0.001×10<sup>-6</sup>),表明与植被 NEE 和化石燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放通量的高贡献相比,生物质燃烧的浓度贡献可以被忽略.少数时间段,模拟 CO<sub>2</sub> 浓度明显高于观测值,且模拟的化石燃料燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值接近 50×10<sup>-6</sup>(例如7月7日,7月10日),这是由于该时间段,气团在观测塔附近强停留时间长,所以导致化石燃料和植被 NEE 模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度信号强.



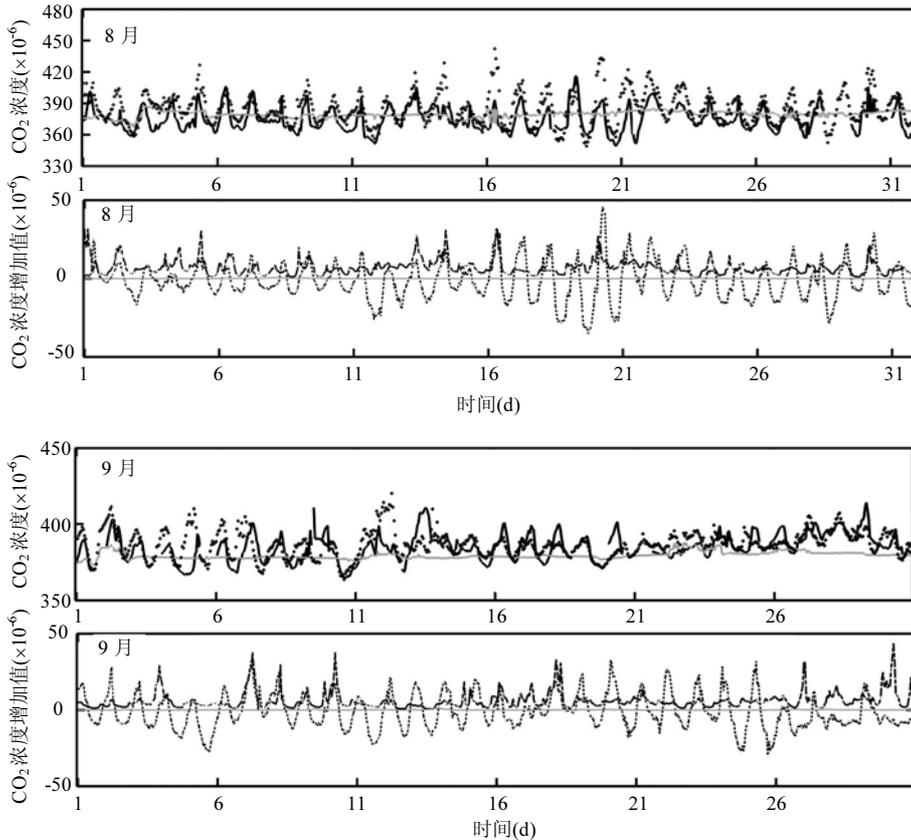


图7 生长季高塔观测 CO<sub>2</sub> 浓度与模拟结果对比

Fig.7 Comparison between CO<sub>2</sub> concentration observations and modeled results in growing seasons

模拟和观测的 CO<sub>2</sub> 浓度的均方根误差为  $13.7 \times 10^{-6}$ , 对比模拟和观测的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值[图 8(a)], 其拟合直线斜率为 1.08, 说明模型能够很好的模拟出 CO<sub>2</sub> 浓度变化的趋势, 这进一步验证了 WRF-STILT 模型对于农业区大气 CO<sub>2</sub> 浓度强日变化的模拟能力, 以及在先验的 CO<sub>2</sub> 通量的基础上, 基于高塔浓度观测对通量进行优化的潜力. 线性拟合得到的截距则表明模拟得到的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值整体偏高约  $7.26 \times 10^{-6}$ , 由于观测的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值是高塔浓度观测值与大气背景值之差(图 1), 前期分析背景值浓度与真实值相差在  $0.6 \times 10^{-6}$  以内, 而仪器观测误差为  $0.03 \times 10^{-6}$ , 所以可以得出截距偏高主要是由模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值偏高造成的, 这很可能是由于整个生长季 NEE 的低估、化石燃料燃烧排放的 CO<sub>2</sub> 高估或者边界层高度的误差这 3 方面导致的. 下面将就

这 3 个方面的不确定性进行分析.

Peter<sup>[18]</sup>表明 Carbon Tracker 在区域尺度上的 NEE 存在一定的误差. 为了分析所使用的 Carbon Tracker 生长季植物 NEE 的误差, 将同样位于高塔 100m 观测处的涡度相关观测 NEE 和所对应的 Carbon Tracker 格点中 NEE 进行比较(3h 平均, 表 2), 斜率表示 Carbon Tracker 与涡度相关观测 NEE 的比值(白天: 反应光合作用; 夜晚: 反应呼吸作用). 回归线过零点, 除了 6 月份两者的斜率接近于 1 之外(白天和夜晚分别为 0.91 和 1.1), 在 7、8、9 月白天的 NEE 偏高, 接近观测值的 2 倍, 7、8 月的夜间 NEE 也同样接近于 2. 虽然其足迹代表范围有一定差异, 鉴于整个玉米带下垫面植被类型均一性较高<sup>[10]</sup>, 该结果依然可以反映出 Carbon Tracker 提供的 NEE 依然存在很大不确定性.

对于化石燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放, EDGAR 虽

然在国家尺度上误差为 5%~10%,但在区域尺度上,其不确定性会远远大于该范围<sup>[40-41]</sup>.Ciais等<sup>[42]</sup>认为 25 个欧洲国家的化石燃料燃烧释放的 CO<sub>2</sub> 不确定性在国家尺度上为 19%,但是在小于 200km 的区域尺度上其不确定性却达到了 60%.Liu 等<sup>[43]</sup>使用 CMAQ 空气质量模型模拟了一个月的美国西部高塔 CO<sub>2</sub> 浓度观测,通过使用不同的 CO<sub>2</sub> 通量,发现模型模拟能力主要依赖于 CO<sub>2</sub> 通量,且结果差异较大.Mallia 等<sup>[22]</sup>使用 WRF-STILT 模型对盐湖城的高塔 CO<sub>2</sub> 浓度模拟结果显示,模型能较好地表示其日变化特征,而日变化的主要贡献是由化石燃料燃烧导致.这些研究结果表明化石燃料燃烧的 CO<sub>2</sub> 排放的不确定性会导致模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值偏高.

此外,Boon 等<sup>[25]</sup>使用 CHIMERE 大气传输模型,模拟并对比分析了伦敦城区和郊区 2012 年夏季 6~9 月 4 个不同观测站点的 CO<sub>2</sub> 浓度,发现模型最低偏低了  $5 \times 10^{-6} \sim 9 \times 10^{-6}$ ,且主要是由模型模拟边界层高度误差以及使用的 CO<sub>2</sub> 通量偏差导致的.本研究组的 Chen 等<sup>[27]</sup>,Hu 等<sup>[39]</sup>和 Su 等<sup>[44]</sup>对 WRF-STILT 模型在美国玉米带的其它衡量气体的模拟结果其进行了进一步阐释, Su 等<sup>[44]</sup>使用和本研究相同的 YSU<sup>[32]</sup>边界层方案,并与本研究高塔所在区域边界层观测高度相对比,发现其能较好反应边界层的日变化过程,只是相对误差为 21%,Chen 等<sup>[27]</sup>使用了与本研究同样的边界层方案,在对本研究相同的高塔 N<sub>2</sub>O 浓度进行模拟时,也发现边界层高度相对误差达 21%.由于本研究发现模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度整体都偏高,而边界层高度误差随机性较大,所以是边界层高度模拟误差导致模拟结果偏高的可能性较小.导致模拟的不确定性,可能还存在其他影响因素.本研究高塔虽然位于美国下垫面均一的玉米带(土地使用类型 40%以上为农作物(大豆和玉米),但是其北部主要以森林为主,年平均 CO<sub>2</sub> 通量为正[图 3(a)黄色区域],敏感性分析表明,下垫面的差异可以对模拟的生物 CO<sub>2</sub> 浓度增加值有很大影响,甚至可以使碳汇变成碳源,这也可能是模拟结果偏高的原因.

表 2 高塔塔度相关观测 NEE 与其所在 Carbon Tracker 格点 NEE 对比

Table 2 Comparison of NEE between EC observation and Carbon Tracker

项目	时间	6月	7月	8月	9月
斜率	白天 (10:00~15:00)	0.91 (***)	1.93 (**)	2.07(**)	1.76(***)
	夜晚 (1:00~6:00)	1.1	1.88	1.86	1.07(*)
R	白天	0.44	0.37	0.41	0.62

注:\*,\*\*,\*\*\*分别表示 $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ,  $P < 0.001$ .

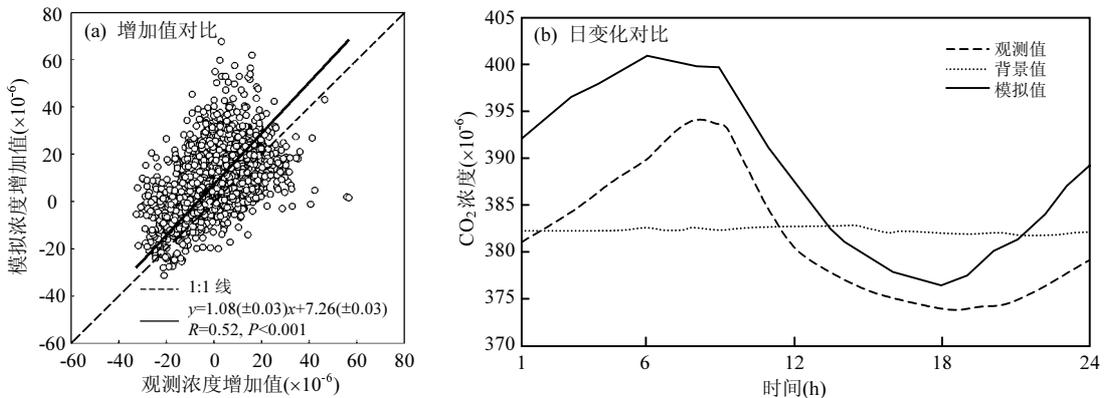


图 8 生长季模拟的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值与观测 CO<sub>2</sub> 浓度增加值和日变化的对比

Fig.8 Scatter plots for observation and modeled results in growing seasons, and diurnal variation between observation and modeled results in growing seasons

综上所述,模拟 CO<sub>2</sub> 浓度与观测结果拥有很高一致性,斜率接近于 1,结果较好,反应出 WRF-

STILT 模型较强的模拟能力,只是模拟结果略微偏高,偏高原因主要是由于使用的 CO<sub>2</sub> 化石燃料燃烧释放 CO<sub>2</sub> 通量偏高和夜晚植被 NEE 偏高导致的,模型中下垫面类型差异导致的植被 NEE 的误差也是模拟结果的潜在误差来源,不过以上结果进一步证明了使用 WRF-STILT 模型继续优化先验的 CO<sub>2</sub> 通量的可行性。

#### 2.4 化石燃料燃烧源的贡献

通过分析 2008 年全年结果可知,化石燃料燃烧总使得高塔 CO<sub>2</sub> 浓度全年平均增加了  $6.61 \times 10^{-6}$  (图 6e)。进一步分析不同类别化石燃料贡献(图 9),其中石油提炼和能源工业分别贡献了  $2.55 \times 10^{-6}$  和  $1.43 \times 10^{-6}$  CO<sub>2</sub>,各占化石燃料燃烧贡献的 38.6%与 21.6%。道路交通排放的 CO<sub>2</sub> 浓度增加值为  $1.11 \times 10^{-6}$ ,占 16.8%,制造业排放  $0.49 \times 10^{-6}$  CO<sub>2</sub>,占 7.4%,居民区的贡献为  $0.67 \times 10^{-6}$ ,占 10.2%。以上 5 类化石燃烧排放源排放占总排放源浓度增加值的 94.6%。通过查找 EDGAR 13 种不同类型的人为化石燃料燃烧的排放通量,发现高塔观测的 CO<sub>2</sub> 强贡献区内有明显的工业过程释放 CO<sub>2</sub>,并且农业区内为了方便机械化生产,其农业种植区内道路交通发达,所以使得道路交通也有强的浓度贡献。此外,虽然距离观测高塔 25km 有城市居民区,但居民区并不是高塔 CO<sub>2</sub> 浓度增加的主要贡献源。由于在 3.3.2 得出人为化石源 CO<sub>2</sub> 通量可能偏高,所以模拟的浓度贡献值可能偏高,其中 13 种不同化石源贡献的差异,需要进一步研究加以论证。

Mallia<sup>[22]</sup>, Boon<sup>[25]</sup>, Ahmadov<sup>[45]</sup>分别对盐湖城、伦敦、法国西南部海岸边等区域的大气 CO<sub>2</sub> 浓度进行了观测和模拟,以上研究都直接表明人为化石燃料燃烧对 CO<sub>2</sub> 浓度的贡献大小直接与下垫面人为活动有关,在城市区域每天的最大值可达到  $30 \times 10^{-6}$  以上,而在沿海区域,其影响甚至可以忽略。但是,以上的研究都未分别考虑不同化石燃烧排放源对大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加贡献值的大小。通过本研究可知,即便在农业种植区,由于高塔浓度的足迹权重覆盖面积大,所以其观测到的 CO<sub>2</sub> 同样会包含强的化石燃料燃烧的信号。当前,在估算植被 NEE 过程中,都是基于大气传输模型

和人为源排放,其中人为源释放的 CO<sub>2</sub> 通量被认为是绝对真实值(误差为 0),最后只调整 NEE 的大小,最终会导致人为源真实存在的误差被传递到估算的 NEE 结果中,因此建议加入更多的变量(如碳和氧的同位素)来进行人为源化石燃料释放 CO<sub>2</sub> 通量的优化。

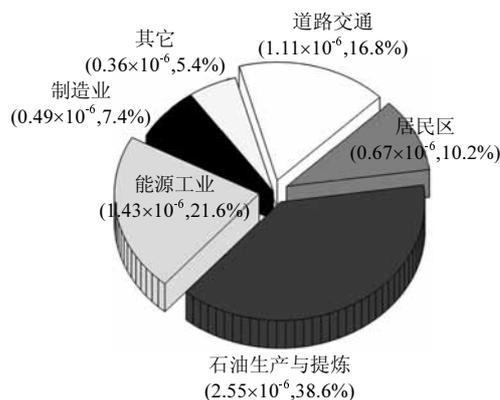


图 9 不同化石燃料燃烧源的 CO<sub>2</sub> 浓度增加量以及占化石燃料燃烧总贡献的比重

Fig.9 CO<sub>2</sub> concentration contribution (percentage) from different fossil categories

### 3 结论

3.1 美国玉米带区域高塔 100m 高度观测的 CO<sub>2</sub> 浓度的强贡献区 [footprint 大于  $-4 \log_{10} (\times 10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \mu\text{mol})$  的区域] 约为高塔周边 10° 的空间范围,而 70% 浓度增加值的贡献是气流流经观测塔前 12h 局地贡献源的影响导致的,即离高塔约 200km 以内的区域。受当地西北-东南盛行风的影响,高塔强贡献源区也为西北-东南向。

3.2 WRF-STILT 能够很好模拟出美国玉米带区域大气 CO<sub>2</sub> 浓度的日及季节变化特征,尤其对整个生长季的模拟一致性高,其中均方根误差为  $13.7 \times 10^{-6}$ ,观测和模拟的浓度增加值斜率为 1.08。但是模拟结果的整体略微偏高 ( $7.26 \times 10^{-6}$ ) 说明很可能是人为化石源的高估或者植被 NEE 的低估造成的。

3.3 2008 年全年平均的化石燃料燃烧的浓度贡献值为  $6.61 \times 10^{-6}$ ,其中原油生产和提炼以及能源工业分别贡献了  $2.55 \times 10^{-6}$  (38.6%) 和  $1.43 \times 10^{-6}$

(21.6%),而生长季生物质燃烧产生的 CO<sub>2</sub> 浓度贡献值为  $0.06 \times 10^{-6}$ ,相对于植被 NEE 和化石源的贡献,可以被忽略。

#### 参考文献:

- [1] Ballantyne A P, Alden C B, Miller J B, et al. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. [J]. *Nature*, 2012,488(7409):70.
- [2] IPCC (2013) Climate Change 2013: the physical science basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Fitzgerald G J, Tausz M, O'Leary G, et al. Elevated atmospheric [CO<sub>2</sub>] can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heat waves [J]. *Global Change Biology*, 2016,22(6):2269–2284.
- [4] Houghton R A. Balancing the Global Carbon Budget [J]. *Earth and Planetary Sciences*, 2007,35(35):313–347.
- [5] Quéré C L, Peters G P, Andres R J, et al. Global carbon budget 2013 [J]. *Earth System Science Data*, 2014,6(7):235–263.
- [6] IPCC, Summary for policymakers of climate change 2007: The physical science basis [R]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge:Cambridge University Press, 2007.
- [7] 于贵瑞,王秋凤,朱先进. 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*, 2011,30(1):103–113.
- [8] Chen B, Chen J M, Mo G, et al. Comparison of regional carbon flux estimates from CO<sub>2</sub> concentration measurements and remote sensing based footprint integration [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008,22(2):148–161.
- [9] Nisbet E, Weiss R. Top-Down Versus Bottom-Up [J]. *Science*, 2010,328(5983):1241–1243.
- [10] Zhang X, Lee X, Griffis T J, et al. Estimating regional greenhouse gas fluxes: an uncertainty analysis of planetary boundary layer techniques and bottom-up inventories [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014,14(19):10705–10719.
- [11] Xiao J, Zhuang Q, Baldocchi D D, et al. Estimation of net ecosystem carbon exchange for the conterminous United States by combining MODIS and AmeriFlux data [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2008,148(11):1827–1847.
- [12] Desai A R, Noormets A, Bolstad P V, et al. Influence of vegetation and seasonal forcing on carbon dioxide fluxes across the Upper Midwest, USA: Implications for regional scaling [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2008,148(2):288–308.
- [13] Tang X, Wang Z, Liu D, et al. Estimating the net ecosystem exchange for the major forests in the northern United States by integrating MODIS and Ameri Flux data [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2012,156(1):75–84.
- [14] 张 娜,于贵瑞,赵士洞,等. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟 [J]. *应用生态学报*, 2003,14(5):643–652.
- [15] Yuan W P, Liu S, Zhou G S, et al. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007,143(3/4):189–207.
- [16] Griffis T J, Lee X, Baker J M, et al. Reconciling the differences between top-down and bottom-up estimates of nitrous oxide emissions for the U.S. Corn Belt [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013,27(3):746–754.
- [17] Gerbig C, Lin J C, Wofsy S C, et al. Toward constraining regional-scale fluxes of CO<sub>2</sub>, with atmospheric observations over a continent: 2. Analysis of COBRA data using a receptor-oriented framework [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003,108(D24):4757–ACH6.
- [18] Peters W, Jacobson A R, Sweeney C, et al. An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007,104(48):18925–30.
- [19] Peylin P, Law R M, Gurney K R, et al. Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2013,10(3):5301–5360.
- [20] Piao S, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. [J]. *Nature*, 2008,451(7174):49.
- [21] 刁一伟,黄建平,刘 诚,等. 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*, 2015,39(5):849–860.
- [22] Mallia D V, Lin J C, Urbanski S, et al. Impacts of upwind wildfire emissions on CO, CO<sub>2</sub>, and PM<sub>2.5</sub> concentrations in Salt Lake City, Utah [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,120(1):147–166.
- [23] Nehr Korn T, Henderson J, Leidner M, et al. WRF simulations of the urban circulation in the Salt Lake City area for CO<sub>2</sub> modeling [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013,52:323–340.
- [24] Peylin P, Law R M, Gurney K R, et al. Global atmospheric carbon budget: results from an ensemble of atmospheric CO<sub>2</sub> inversions [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2013,10(3):5301–5360.
- [25] Boon A, Broquet G, Clifford D J, et al. Analysis of the potential of near ground measurements of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in London, UK for the monitoring of city-scale emissions using an atmospheric transport model [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(22):33003–33048.
- [26] Lin J C, Gerbig C, Wofsy S C, et al. A near-field tool for

- simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(4493):1211–1222.
- [27] Chen Z, Griffis T J, Millet D B, et al. Partitioning N<sub>2</sub>O Emissions within the US Corn Belt using an Inverse Modeling Approach [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016,30,1192–1205. doi:10.1002/2015GB005313.
- [28] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation [J]. *Monthly Weather Review*, 2004,132(1): 103–120.
- [29] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008,113(D13):1395–1400.
- [30] Dudhia J. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989,46(46):3077–3107.
- [31] Chen F, Dudhia J. Coupling an Advanced Land Surface Hydrology Model with the Penn State NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity [J]. *Monthly Weather Review*, 2001,129(4):587–604.
- [32] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes [J]. *Monthly Weather Review*, 2006,134(9):2318.
- [33] Kain J S. The Kain Fritsch Convective Parameterization: An Update [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004,43(1):170–181.
- [34] Pillai D, Gerbig C, Kretschmer R, et al. Comparing Lagrangian and Eulerian models for CO<sub>2</sub> transport – a step towards Bayesian inverse modeling using WRF-STILT-VPRM [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012,12(1):1267–1298.
- [35] Giglio L, Randerson J T, Werf G R V D. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013,118(1):317–328.
- [36] Gurney K R, Mendoza D L, Zhou Y, et al. The Vulcan Project: High Resolution Fossil Fuel Combustion CO<sub>2</sub> Emissions Fluxes for the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(14):5535–41.
- [37] European Commission (2009), Joint Research Centre/Netherlands Environmental Assessment Agency, Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.0.
- [38] Kaminski T, Rayner P J, Heimann M, et al. On aggregation errors in atmospheric transport inversions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001,106(D5):4703–4715.
- [39] Hu L, Millet D B, Baasandorj M, et al. Isoprene emissions and impacts over an ecological transition region in the U.S. Upper Midwest inferred from tall tower measurements [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2015,120:3553–3571.
- [40] Miller J B, Lehman S J, Montzka S A, et al. Linking emissions of fossil fuel CO<sub>2</sub> and other anthropogenic trace gases using atmospheric <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012,117(D8):8302.
- [41] Nassar R, Napier-Linton L, Gurney K R, et al. Improving the temporal and spatial distribution of CO<sub>2</sub> emissions from global fossil fuel emission data sets [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118(2):917–933.
- [42] Ciais P, Paris J D, Marland G, et al. The European carbon balance. Part 1: fossil fuel emissions [J]. *Global Change Biology*, 2010,16(5):1395–1408.
- [43] Liu Z, Bambha R P, Pinto J P, et al. Toward verifying fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions with the CMAQ model: motivation, model description and initial simulation [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014,64(4):419–35.
- [44] Su Y K, Millet D B, Hu L, et al. Constraints on Carbon Monoxide Emissions Based on Tall Tower Measurements in the U.S. Upper Midwest [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(15):8316–24.
- [45] Ahmadov R, Gerbig C, Kretschmer R, et al. Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO<sub>2</sub> transport models with coastal tower measurements of CO<sub>2</sub> [J]. *Biogeosciences*, 2009,6(5):807–817.

**作者简介:** 胡 诚(1989–),男,四川广安人,南京信息工程大学博士研究生,主要从事基于大气传输模型和温室气体浓度观测的区域尺度通量反演方向研究。