

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2016.06.001

# 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算研究进展

毛慧琴, 张玉环\*, 厉青, 张丽娟

( 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094 )

**摘 要:** 生物质燃烧是全球痕量气体和颗粒物排放的重要来源, 对全球空气质量、气候变化以及人类健康有显著的影响; 生物质燃烧排放的准确估算对全球气候变化、区域空气质量评估预测研究具有重要意义。近 20 年来, 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算研究得到了长足的发展, 从以下四个方面对相关研究进展进行了系统介绍: 1) 基于燃烧面积和火辐射功率遥感产品的生物质燃烧排放估算方法; 2) 燃烧排放估算中关键参量(在燃火点、燃烧面积、火点辐射功率)获取方法及相关产品; 3) 生物质燃烧排放清单产品; 4) 对生物质燃烧排放估算未来研究方向进行了展望。

**关键词:** 卫星遥感; 生物质燃烧; 排放; 进展

**中图分类号:** X87

**文献标识码:** A

**文献编号:** 1673-6141(2016)06-0402-010

## Research Progress on Estimating Emissions from Biomass Burning Based on Satellite Observations

MAO Huiqin, ZHANG Yuhuan\*, LI Qing, ZHANG Lijuan

(Satellite Environment Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Biomass burning is an important global emission source of aerosols and trace gases, and has significant impacts on air quality, climate change and human health. Accurate estimation of trace gas and aerosol emissions from biomass burning is fundamental and important to further research about global climate change, regional air quality assessment and forecasting. Within the last 20 years, satellite-based instrumentation has been used to directly investigate the biomass burning emissions and has greatly achieved development. The research progress on estimating emissions from biomass burning based on satellite observations were introduced from four aspects: 1) two methods of emissions estimation for biomass burning using satellite products of burned areas (BA) and fire radiation power (FRP); 2) the method and products for the key variables of BA, FRP and active fire used for estimating emissions; 3) emissions inventory of biomass burning based on above two methods; 4) further work about emissions estimation for biomass burning in the near future.

**Key words:** satellite remote sensing; biomass burning; emissions; research progress

收稿日期: 2016-07-04; 修改日期: 2016-09-08

基金项目: Supported by National High Technology Research and Development Program of China (国家 863 计划, 2014AA06A508)

\* 通信联系人. E-mail: yuhuan\_rs@163.com

## 1 引言

生物质燃烧(包括农业秸秆焚烧、森林火灾、草原火灾等)是全球痕量气体和颗粒物排放的重要来源之一;根据 EDGARv3.2FT2000 排放清单,在 2000 年全球污染物排放中,生物质燃烧排放的 CO 占 51%, NO<sub>x</sub> 占 20%<sup>[1]</sup>。最新排放清单研究表明:生物质燃烧排放的一次细颗粒物占全球的 26%~73%,黑炭占 33%~41%<sup>[2-3]</sup>。生物质燃烧是重要的气候强迫因子,对局地、区域乃至全球空气质量产生影响;生物质燃烧排放的颗粒物严重影响人体健康,影响太阳辐射和云的特性,也使局地和区域能见度恶化;排放的许多痕量气体(如非甲烷有机化合物 NMOC 和氮氧化物 NO<sub>x</sub>)导致下风向 O<sub>3</sub> 的形成<sup>[4]</sup>,排放的 CO<sub>2</sub> 会对区域的碳循环产生影响<sup>[5]</sup>。因此生物质燃烧污染物排放的准确估算对区域大气化学过程和气候模拟及大气污染防治、空气质量改善具有重要意义。

生物质燃烧排放估算要考虑多个参数,包括生物荷载量、燃烧面积,及排放因子等,其中最关键的要素是生物荷载量和燃烧面积<sup>[6]</sup>,计算方法主要采用地面火情统计资料收集法、田间实验法和卫星遥感的方法。地面资料收集法以及田间实验法不仅耗时、成本高而且仅适合小范围地区,不确定性也很高;随着卫星遥感技术的发展,近年来基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算研究及业务化得到长足发展,本文从排放估算研究方法、关键参量获取、排放清单产品,以及研究展望等方面进行阐述。

## 2 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算方法

生物质燃烧排放量 ( $M_X$ ) 估算需要获取燃烧的干物质总量 ( $FC_T$ ) 以及不同生物质的排放因子 ( $EF$ )。计算公式为

$$M_X = EF_X \cdot FC_T, \quad (1)$$

式中  $X$  为排放的物种,排放因子  $EF_X$  的获取一般采用田间实验和实验室焚烧实验测定,目前文献 [7] 获取的排放因子在全球尺度上用得最为广

泛,区域和局地的排放因子研究及获取可参考文献 [8];燃烧过程中所焚烧的干物质总量可以基于相关卫星遥感产品进行计算。近 20 年来,随着卫星遥感技术的发展,研究者们开发了系列与生物质燃烧所消耗的干物质总量估算相关的产品,包括燃烧面积<sup>[9-10]</sup>、燃烧点位,及火点辐射能量 (fire radiation energy, FRE)<sup>[11-13]</sup>;目前,基于卫星遥感的干物质总量估算方法大致分为两类:基于焚烧面积估算的方法和基于火点辐射能量的估算方法。

### 2.1 基于燃烧面积估算排放的方法

计算排放量首先要计算生物质燃烧的干物质总量,基于焚烧面积产品的干物质总量一般采用 Seiler 和 Crutzen<sup>[14]</sup> 的计算公式

$$FC_T = A \times B \times C, \quad (2)$$

式中  $FC_T$  为焚烧的总干物质质量 (kg),  $A$  为焚烧面积 (m<sup>2</sup>),  $B$  为焚烧前生物荷载量 (kg·m<sup>-2</sup>),  $C$  为燃烧效率 (%)。当前基于卫星遥感的焚烧面积产品日趋成熟,中等分辨率 (500 m) 全球产品每半天更新一次,而且产品精度在逐步提升;然而生物荷载量的估算一般基于地表分类并结合生物地球化学模式模拟的方式获取。燃烧效率  $C$  通常采用田间实验或与气温、降水建立统计关系来获取。

### 2.2 基于辐射能量估算排放的计算方法

由于生物荷载量和燃烧效率的计算涉及参数较多,存在很大的不确定性,科学家们试图采用替代的卫星资料来获取生物质燃烧及排放信息,自 90 年代末以来,基于红外遥感的火点辐射功率 (fire radiation power, FRP) 成为全球生物质燃烧排放估算的新方法。最早提出该方法的是 Kaufman<sup>[15]</sup>,计算公式为

$$FC_{T-FRE} = FRE \times \beta, \quad (3)$$

$$FRE = \int FRP, \quad (4)$$

$$FRP = 4,34 \times 10^{-19} (T_{MIR}^8 - T_{b,MIR}^8), \quad (5)$$

式中  $FC_{T-FRE}$  为焚烧的总干物质质量 (kg),  $FRE$  为火点辐射能量,是焚烧时段内释放辐射功率 (FRP)

随时间的积分, FRP 为火点像素的亮温和背景亮温差异的函数。  $\beta$  为 FRE 燃烧因子 ( $\text{kg}\cdot\text{MJ}^{-1}$ ), 可以通过田间实验和实验室焚烧测定获取。如 Wooster 等<sup>[16]</sup> 在田间搭建焚烧床和观测台, 展开了芒草焚烧实验, 并利用中红外 (mid-infrared, MIR) 相机和光谱辐射计对焚烧释放的 FRE 进行同步测定, 构建了 FRE 和燃烧的生物质量直接线性关系, 计算得到 FRE 燃烧因子为  $(0.368\pm 0.015)$   $\text{kg}/\text{MJ}$ , 而 Freeborn 等<sup>[17]</sup> 通过实验室焚烧实验获取燃烧因子为  $(0.453\pm 0.068)$   $\text{kg}/\text{MJ}$ 。

### 3 基于卫星遥感的生物质燃烧排放关键参量研究进展

从生物质燃烧估算方法可以看出, 火点识别、燃烧面积及 FRE 是其中的关键参数, 下面就这三个关键因子的计算方法及研究进展及相应的不确定性等分别进行综述。

#### 3.1 在燃火点监测识别及产品

由于在燃火点在  $4\ \mu\text{m}$  通道处热信号增强, 再结合短波及长波通道的辐射值, 使得中 - 粗分辨率星载传感器就可以检测出热异常点, 从而识别出在燃火点的位置信息。1978 年搭载 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 探测仪的 NOAA 气象系列卫星发射之后, 基于 AVHRR 数据的火点识别研究取得了开创性进展<sup>[18]</sup>; 90 年代以来, 利用 ARHRR  $3.7\ \mu\text{m}$  通道火点热释放信号作为主要因子, 开发了在燃火点监测的不同算法<sup>[19-21]</sup>, 发布了全球  $1\ \text{km}$  分辨率火点监测业务产品; 1999 年发射的 TERRA 和 2002 年发射的 AQUA 搭载的 ASTER ( $30\ \text{m}$  分辨率) 以及 MODIS ( $1\ \text{km}$  分辨率) 进一步提升了火点识别能力, 发展了火点和热异常算法 (fire and thermal anomalies algorithm), 开发了全球尺度  $1\ \text{km}$  分辨率的火点产品; 2011 年 10 月 28 日, 美国发射了新一代对地观测卫星 Suomi NPP, 其上搭载的可见光红外成像辐射仪 (VIIRS) 可以进行中红外  $4\ \mu\text{m}$  波段附近的辐射观测, 另外 VIIRS 继承了美国国防气象卫星 (DMSP) 的 OLS 传感器的微光探测能力, 提供了白天 - 夜晚波段 (day-night band,

$0.5\sim 0.9\ \mu\text{m}$ ) 数据, 可以获取夜间热异常信号中的可见光和近红外波段数据; 因此 VIIRS 是迄今为止火点监测最好的数据来源<sup>[22]</sup>, 基于该数据源, NOAA 开展了热异常算法研究及验证<sup>[23]</sup>, 并发布了全球  $375\ \text{m}$  分辨率实时火点监测产品。

目前很多国家都开发了火点监测业务系统, 如美国 NOAA 灾害地图系统 (Hazard Mapping Systems, <http://www.osdpd.noaa.gov/ml/land/hms.html>)、巴西空间研究所的火点监测业务系统 (Operational Fire Monitoring System, <http://www.inpe.br/queimadas/>)、南非高级火点信息系统 (Advance Fire Information System)、加拿大的野火信息系统 (Wildland Fire Information System, <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/home>) 等。我国环境保护部卫星环境应用中心也基于 MODIS 的热异常产品开发了秸秆焚烧遥感监测业务系统<sup>[24]</sup>, 并在环境保护部门门户网站实时发布火点监测结果 (<http://www.mep.gov.cn/hjzl/dqhj/jgjsjcbg/>); 世界粮农组织也建立了全球火点信息管理系统 (GFIMS, <http://www.fao.org/nr/gfims/en/>)。

#### 3.2 燃烧面积计算及产品

燃烧面积产品一般通过对比生物质燃烧过程前后的光谱反射率及植被指数的差异或结合在燃火点信息来提取<sup>[25-26]</sup>。在全球和区域尺度上, 燃烧面积一般基于中等分辨率 (大约  $1\ \text{km}$ ) 的卫星数据, 如 Pu 等通过分析  $1\sim 10$  天的 NOAA/AVHRR 数据及 AVHRR NDVI 发展了北美地区 1989~2000 年逐月燃烧面积产品<sup>[27]</sup>; Tansey 等基于 SPOT/VGT 多时相的光谱反射率差异数据获取了 2000~2007 年全球逐月燃烧面积<sup>[28]</sup>; Roy 等基于 MODIS 数据发展了基于双向反射率模式的期望值算法, 开发了全球  $1\ \text{km}$  分辨率逐月燃烧面积产品<sup>[29]</sup>。这些中等分辨率的数据可以较好地监测面积大于  $2\ \text{km}^2$  的火点, 面积小于  $2\ \text{km}^2$  的火点监测效果不理想; 在局地尺度上, 燃烧面积可以基于  $30\ \text{m}$  分辨率的 Landsat 的标准化燃烧比率 (normalized burn ratio, NBR) 产品, 通过对比生物质燃烧前后的 NBR 值进行估算<sup>[30]</sup>。

燃烧面积产品也可以通过单一卫星传感器(如 AVHRR, SPOT, ATSR 以及 MODIS) 的在燃点信息来计算。初期研究方法比较简单: 在大范围内及月时间尺度上建立有火的像素点个数和燃烧面积之间的线性关系<sup>[31]</sup>。之后研究者又进一步发展较为复杂的方法: 利用静止卫星 GOES 亚像元内火点范围 (fire size) 和火点持续时间数据, 来获取 0.5 h 一次的燃烧面积产品<sup>[32]</sup>, 相对简单的线性回归, 这种近实时产品更适于火情监测、风险评估以及空气质量预报以及决策服务。然而, 利用单一传感器来监测火点往往造成火点遗漏现象。如 GOES Imager 大概遗漏了 38% 的火点, 而且遗漏率随着火点范围的减小呈指数增长<sup>[33]</sup>; MODIS 在巴西、非洲、欧亚大陆约有 50% 的火点没有监测出来<sup>[34-36]</sup>。利用多个传感器可以弥补单一传感器的局限, 因此 Zhang 等采用多个卫星在燃点产品(包括 GOES Imager, AVHRR 和 MODIS), 计算了美国大陆 2004~2007 年燃烧面积, 结果表明监测的小火次数比单一 MODIS 提高了 24%, 各生态系统的燃烧面积误差低于 30%<sup>[37]</sup>。为了减少小火的遗漏率, 欧空局气候变化行动 (Climate Change Initiative, CCI) 科学计划研究小组基于 Envisat-MERIS 开发新的分辨率为 500 m 的燃烧面积产品, 大大提高了小火的监测能力<sup>[38]</sup>。

目前全球生物质燃烧面积产品很多<sup>[39]</sup>, 包括: (1) 基于 MODIS、TRIM/VIRS、ATSR 的 GFED4 逐月业务产品; (2) 基于 MODIS 的 MCD45A1 和 MCD64A1 逐月业务产品; (3) 基于 SPOT/VEGETATION 的 L3JRC、GBA 和 GBA2000 历史数据集; (3) 基于 NOAA-AVHRR 的 GBS 数据集; (4) 基于 ERS2-ATSR2 的 GLOB-SCAR (Global Burn SCARs)。可见全球的业务产品仅 GFED4 和 MODIS 两种, 而 GFED3 的火点面积产品的分辨率为 0.25 d×0.25 d, 因此 MODIS 的面积产品用得最为广泛, 该产品 NASA 在网页 <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/> 上定时发布。

### 3.3 FRE 计算及产品

由于生物质燃烧产生的高温会导致 MIR 释放的辐射相对背景值有急剧的增长, 因此星载传感器如果在大气窗 4 μm 波长附近具有中红外通道, 就可以监测到小于像素点的火点位置信息, 但是这些波长处往往容易饱和, 因此很难获取火点的强度信息, 这就导致在 MODIS 传感器发射之前干物质燃烧量的估算依赖火点个数和燃烧面积。Kaufman 等提出用遥感手段获取 FRE 的思想, 搭载在 TERRA/AQUA 上的 MODIS 基于该思想, 通过增加低增益红外通道 (low-gain infrared channels), 使得 MODIS 成为首个直接观测 FRP 的传感器<sup>[40]</sup>, FRP 随时间的积分即为 FRE。FRE 是火点强度和范围大小的综合指标, 和燃烧的干物质总量线性相关; 因此可以利用卫星观测的 FRP 直接计算生物质燃烧排放量, 同时消除基于燃烧面积和燃料荷载方法多参数 (燃烧面积、燃料荷载、燃烧效率) 引起的不确定性<sup>[41]</sup>。

FRP 的计算方法有三种: 基于 MIR 和热红外 (TIR) 通道的双光谱方法<sup>[42]</sup>; 基于中红外通道的 MODIS 算法以及 MIR 算法<sup>[43]</sup>。双光谱方法主要用于双光谱红外监测 (bi-spectral infraRed detection, BIRD) 卫星搭载的 HSRS 传感器数据进行火点识别及 FRP 的反演<sup>[44]</sup>, 由于火点的热红外信号往往比中红外通道要弱很多, 而双光谱算法为满足反演进度要求则需要两个通道的信息, 因此用该方法计算 FRP 有较大的偏差。MODIS FRP 产品算法主要通过构建 FRP 与 4 μm 波段亮温非线性关系来计算 FRP, 由于只需要用到单一的波段, 因此相比双光谱算法精度要高, MODIS 的 FRP 产品 MOD14<sup>[45]</sup> 得到广泛的应用。Wooster 等发展的 MIR 算法首先采用普朗克函数拟合火点温度和辐射能量之间的关系, 然后建立 FRP 和中红外辐射的线性关系; Meteosat 卫星 SEVIRI 的 FRP 产品就是采用了该算法<sup>[46]</sup>。

由于极轨卫星 (如 MODIS) 日采样频率低, 难以获取火点发生发展的日变化特性, 一般假定 FRP 为一个常数, 而 FRE 是 FRP 的日累积量, 因此极轨卫星的 FRP 产品会高估生物质燃烧的排

放量。因此, 研究者们利用静止卫星的 FRP 产品去获取火点的日变化曲线, 以提高极轨卫星 FRE 产品的精度, 如 Andela 等就采用高斯函数拟合 SEVIRI 的 FRP 产品获取了火点日变化曲线, 改善了 MODIS FRE 的估算精度<sup>[47]</sup>。此外, Kaiser 等采用卡曼滤波的方法同化了 Terra 和 Aqua 的 MODIS FRP, 发展了全球的 FRP 业务产品<sup>[48]</sup>。

静止卫星的 FRP 产品由于空间分辨率低, 其火点监测阈值较高(如 SEVIRI 为 50 MW, 而 MODIS 为 30 MW), 因此静止卫星会遗漏低 FRP 的火点造成误差。Freeborn 等通过集成 MODIS 和 SEVIRI 的 FRP 产品, 构建包含两种传感器 FRP 产品频率密度分布 (frequency density (f-D) distribution) 数据库, 开发了全球 15 min 时间分辨率的 FRP 产品<sup>[49]</sup>。

目前 FRP 的业务产品有: 1) 美国 NASA 发布覆盖全球的 TERRA/AQUA MODIS 火点产品 MOD14, 每日在网页 (<http://modis-fire.umd.edu/pages/ActiveFire.php?target=GetData>) 上发布。2) 欧洲气象卫星开发组织 (EUMETSAT) 发布了基于静止卫星 Meteosat SEVIRI 传感器的 FRP-PIXEL 和 FRP-GRID 两套产品, 覆盖非洲、欧洲和南美部分大陆; 在网页 <http://modis-fire.umd.edu/pages/ActiveFire.php?target=GetData>) 上发布相关产品。3) 欧盟 MACC 科学计划研究小组 (Monitoring Atmospheric Composition and Climate-Interim Implementation) 开发的 GFAS 产品, 参考网面 [http://www.gmes-atmosphere.eu/about/project\\_structure/input\\_data/d\\_fire/](http://www.gmes-atmosphere.eu/about/project_structure/input_data/d_fire/)。

## 4 基于卫星遥感的生物质燃烧排放相关产品

### 4.1 生物质燃烧面积产品及相应的排放产品

基于卫星遥感的生物质燃烧面积产品, 结合动态植被模式、陆地生态系统模式以及植被覆盖图集, 全球生物质燃烧排放数据资料集包括: 1) 基于 MODIS 燃烧面积产品、VIRS 和 ATSR 的在燃火点数据以及生物地球化学模式的全球火排放

数据集 GFED4<sup>[50]</sup>, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , 时间跨度为 1997~2014 年, 时间分辨率为月、日、3 h 等三种; 2) 基于 MODIS 热异常和五种植被类型燃料载荷产品的 NCAR 全球火点排放清单 FINNv1, 空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , 包括 2002 年以来逐日生物质燃烧排放量<sup>[51]</sup>。3) 基于 GLOBSCAR 数据集和动态植被模式 LPJ-DGVM 的全球  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  分辨率 2000 年逐月排放数据集<sup>[52]</sup>; 4) 基于 GLOBSCAR 和 GBA 面积数据和 ISAM (Integrated Science Assessment Model) 陆地生态系统模式的燃料荷载, 全球  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  分辨率 2000 年逐月排放数据集<sup>[53]</sup>。

### 4.2 基于辐射能量数据估算的排放产品

继利用燃烧面积和燃料荷载估算生物质燃烧排放之后, 欧美等国家今年开始利用 FRE 和 FRP 估算生物质燃烧排放量。其中两个有代表性清单为: 1) 欧洲长期预报中心的 GFASv1.0 排放清单, 该清单通过实时同化 Terra 和 Aqua 星载的传感器 MODIS 的 FRP 观测, 开发了实时同化全球火点同化系统 GFASv1.0, 该系统可以订正由于云覆盖引起的观测误差, 可以滤去火山、气体火焰以及其他工业活动引起的伪 FRP 观测, 从而获得较为准确的生物质燃烧排放量。2) 美国马里兰大学的 GBBEP-Geo 排放清单。由于极轨卫星不能实现全天候的火点监测, 美国马里兰大学利用基于静止卫星 (GBBEP-Geo) 网络 (包括 NOAA 的环境业务卫星 GOES、欧洲空间组织的气象卫星 (Meteosat-09)、日本气象局的多功能传输卫星 (MTSAT) 的辐射功率产品推出了近实时全球生物质燃烧排放产品 GBBEP-Geo, 为日常的空气质量预报预警提供业务化的火点排放产品<sup>[54]</sup>。

## 5 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算展望

近 20 多年来, 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算虽然已取得了长足的进展, 尤其是 MODIS 的火点产品发挥了重要作用, 但是排放估算仍存在很大的不确定性; 这种不确定性来源于: 1) 生物质燃烧事件的随机性以及零星分布的特性, 这

些特性很难在实验条件下测定描述, 因此相关的产品验证也存在很大的难度<sup>[55-56]</sup>。2) 卫星数据时空分辨率的限制, 如极轨卫星过境次数少时间分辨率, 而静止卫星空间分辨率较低; 且受云的影响, 导致火点遗漏, 尤其是尺度小和强度弱的火点。3) 不论是基于燃烧面积还是辐射能量的方法, 生物质燃烧排放估算过程中相关参数 (如排放因子  $EF$ 、燃烧效率  $C$ 、辐射能量燃烧因子  $\beta$  等) 的确定存在很大不确定性; 由于这些不确定性导致不同方法估算的排放量差异很大, 如 GFED 和 FLAMBE 两种排放清单估算的  $PM_{2.5}$  在不同区域差异明显不同, 差异在 2~3 倍之间<sup>[57]</sup>。如果没有对这些不确定性的定量估算, 则估算的排放量很难在时空尺度上进行比较, 不同的估算方法得出的排放量也没有可比性, 给气候变化以及空气质量相关领域的研究者和用户带来困惑, 因此开展生物质燃烧排放清单估算的不确定性研究及交叉对比验证是未来的研究方向之一<sup>[58]</sup>; 由于静止卫星和极轨卫星的火点产品各有优势, 因此多源卫星数据的集成、同化也是生物质燃烧排放精确估算的重要手段, 欧洲数值预报中心的火点同化系统 (GFAS) 已取得开创性的成果, 该系统下一步的目标是同化更多传感器的 FRP 产品。

为了减少排放估算的误差, 近年来研究者开展了探索性研究, 如 Ichoku 等利用 MODIS 的 FRP 产品和气溶胶光学厚度 (aerosol optical thickness, AOT) 以及 NCEP/NCAR 的再分析风场数据, 直接建立了生物质燃烧颗粒物的排放速率  $R$  和 FRP 之间的线性关系 ( $R = C_e \cdot FRP$ ), 发布了全球  $1^\circ \times 1^\circ$  网格点的排放系数  $C_e$  产品 FEERv1.0, 实现了真正意义上的 TOP-DOWN 排放估算方法。因此该排放系数在全球尺度的验证、燃烧排放的其它污染物的获取是未来需要解决的问题。

我国生物质燃烧排放估算研究工作主要通过农村统计年鉴作物产量数据、入户调查、谷草比、及田间试验等方法来估算<sup>[59-64]</sup>, 基于卫星遥感的生物质燃烧排放估算研究很少, 仅近两年北京大学开展了基于 MODIS FRP 产品的我国秸秆焚烧

排放量估研究<sup>[65-66]</sup>, 距离欧美等国的火点近实时业务产品以及多源卫星数据集成研究及应用还很远, 因此发展基于多源卫星的我国生物质燃烧排放估算算法、开发相关近实时业务产品, 实现生物质燃烧排放量实时监测和分析, 编制生物质燃烧引起的气溶胶和痕量气体排放清单是亟待开展的研究。

### 参考文献:

- [1] Olivier J G J, van Aardenne J A, Dentener F J, et al. Recent trends in global greenhouse gas emissions: regional trends 1970-2000 and spatial distribution of key sources in 2000 [J]. *Environ. Sci.*, 2005, 2(2/3): 81-99.
- [2] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(D14): D14203.
- [3] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols [J]. *Earth Sci. Rev.*, 2008, 89(1): 13-41.
- [4] Pfister G G, Wiedinmyer C, Emmons L K. Impacts of the fall 2007 California wildfires on surface ozone: Integrating local observations with global model simulations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(19): L19814.
- [5] *Climate Change 2007-Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC* [M]. ed. by Priry M L. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] van Leeuwen T T, van der Werf G R. Spatial and temporal variability in the ratio of trace gases emitted from biomass burning [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11(8): 3611-3629.
- [7] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [J]. *Glob. Biogeochem. Cy.*, 2001, 15(4): 955-966.

- [8] Akagi S K, Yokelson R J, Wiedinmyer C, et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2010, **10**(11): 27523-27602.
- [9] Giglio L, Randerson J T, van der Werf G R, et al. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(3): 1171-1186.
- [10] Stroppiana D, Pincock S, Pereira J M C, et al. Radiometric analysis of SPOT-VEGETATION images for burnt area detection in Northern Australia [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **82**(1): 21-37.
- [11] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, Kaufman Y J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2003, **87**(2): 273-282.
- [12] Roberts G, Wooster M J, Perry G L W, et al. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2005, **110**(D21): D21111.
- [13] Wooster M J, Zhukov B, Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2003, **86**(1): 83-107.
- [14] Seiler W, Crutzen P J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning [J]. *Clim. Change*, 1980, **2**(3): 207-247.
- [15] Kaufman Y J, Remer L A, Ottmar R D, et al. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment [A]. In *Global Biomass Burning* [M]. ed. by Levin J S. Cambridge: The MIT Press, 1991: 685-696.
- [16] Wooster M J, Roberts G, Perry G L W, et al. Combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(D24): D24311.
- [17] Freeborn P H, Wooster M J, Hao W M, et al. Relationships between energy release, fuel mass loss, and trace gas and aerosol emissions during laboratory biomass fires [J]. *J. Geophys. Res.* 2008, **113**(D1): D01301.
- [18] Matson M, Holben B. Satellite detection of tropical burning in Brazil [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1987, **8**(3): 509-516.
- [19] Giglio L, Kendall J D, Justice C O. Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1999, **20**(10): 1947-1985.
- [20] Li Z, Nadon S, Cihlar J. Satellite-based detection of Canadian boreal forest fire: Development and application of the algorithm [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2000, **21**(16): 3057-3069.
- [21] Lasaponara R, Cuomo V, Machiatto M F, et al. A self-adaptive algorithm based on AVHRR multitemporal data analysis for small active fire detection [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2003, **24**(8): 1723-1749.
- [22] Csiszar I, Schroeder W, Giglio L, et al. Active fires from the Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite: Product status and first evaluation results [J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, **119**(2): 803-816.
- [23] Schroeder W, Oliva P, Giglio L. 1995 The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2014, **143**: 85-96.
- [24] Li Qing, Zhang Lijuan, Wu Chuanqing, et al. Satellite-remote-sensing-based monitoring of straw burning and analysis of its impact on air quality [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, **25**(1): 32-37 (in Chinese).

- 厉青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析 [J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(1): 32-37.
- [25] Key C H. Ecological and sampling constraints on defining land scape fire severity [J]. *Fire Ecol.*, 2006, 2(2): 34-59.
- [26] Roy D P, Jin Y, Lewis P E, et al. Prototyping a global algorithm for systematic fire affected area mapping using MODIS time series data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 97(2): 137-162.
- [27] Pu R, Li Z, Gong P, et al. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America from NOAA/AVHRR data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2007, 108(2): 198-208.
- [28] Tansey K, Grégoire J M, Defourny P, et al. A new, global, multi-annual (2000-2007) burnt area product at 1 km resolution [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35(1): L01401
- [29] Roy D P, Lewis P E, Justice C O. Burned area mapping using multi-temporal moderate spatial resolution data-A bi-directional reflectance model-based expectation approach [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2002, 83(1/2): 263-286.
- [30] Epting J, Verbyla D, Sorbel B. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2005, 96(3): 328-339.
- [31] Giglio L, van der Werf G R, Randerson J T, et al. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, 6(4): 957-974.
- [32] Zhang X, Kondragunta, S. Temporal and spatial variability in biomass burned across the USA derived from the GOES fire product [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2008, 112(6): 2886-2897.
- [33] Schroeder W, Prins E, Giglio L, et al. Validation of GOES and MODIS active fire detection products using ASTER and ETM+ data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2008, 112(6): 2711-2726.
- [34] Morisette J, Giglio L, Csiszar I, et al. Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 2005, 26(19): 4239-4264.
- [35] Morisette J T, Giglio L, Csiszar I, et al. Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms [J]. *Earth Interactions*, 2005, 9: 141-161.
- [36] Csiszar I, Morisette J T, Giglio L. Validation of active fire detection from moderate-resolution satellite sensors: The MODIS example in Northern Eurasia [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44(7): 1757-1764.
- [37] Zhang X Y, Kondragunta S, Quayle B. Estimation of biomass burned areas using multiple-satellite-observed active fires [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, 49(11): 4469-4482.
- [38] Chuvieco E, Yue C, Heil A, et al. A new global burned area product for climate assessment of fire impacts [J]. *Global Ecol. Biogeogr.*, 2016, 25(5): 619-629.
- [39] Mouillot F, Schultz M G, Yue C, et al. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-a review: Analysis of user needs and recommendations for future developments [J]. *Int. J. App. Earth Obs.*, 2014, 26: 64-79.
- [40] Kaufman Y J, Kleidman R G, King M D. SCAR-B fires in the tropics: properties and remote sensing from EOS-MODIS [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(D24): 31955-31968.
- [41] Ichoku C, Giglio L, Wooster M J, et al. Global characterization of biomass-burning patterns using satellite measurements of fire radiative energy [J]. *Remote. Sens. Environ.*, 2008, 112(6): 2950-2962.
- [42] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1981, 11: 221-229.

- [43] Wooster M J, Zhukov B, Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2003, **86**(1): 83-107.
- [44] Zhukov B, Lorenz E, Oertel D, et al. Spaceborne detection and characterization of fires during the bi-spectral infrared detection (BIRD) experimental small satellite mission 2001-2004 [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2006, **100**(1): 29-51.
- [45] Justice C O, Giglio L, Korontzi S, et al. The MODIS fire products [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2002, **83**(1): 244-262.
- [46] Roberts G J, Wooster M J. Fire detection and fire characterization over Africa using Meteosat SEVIRI [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2008, **46**(4): 1200-1218.
- [47] Andela N, Kaiser J, van der Werf G, et al. New fire diurnal cycle characterizations to improve fire radiative energy assessments made from MODIS observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, **15**(15): 8831-8846.
- [48] Kaiser J W, Heil A, Andreae M O, et al. Biomass burning emission estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power [J]. *Biogeosciences*, 2012, **9**(1): 527-554.
- [49] Freeborn P H, Wooster M J, Roberts G, et al. Development of a virtual active fire product for Africa through a synthesis of geostationary and polar orbiting satellite data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2009, **113**(8): 1700-1711.
- [50] Giglio L, Randerson J T, van der Werf G R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) [J]. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 2013, **118**(1): 317-328.
- [51] Wiedinmyer C, Akagi S K, Yokelson R J, et al. The Fire Inventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning [J]. *Geosci. Model Dev.*, 2011, **4**: 625-641.
- [52] Hoelzemann J J, Schultz M G, Brasseur G P, et al. Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2014, **109**(D14): D14S04.
- [53] Jain A K, Tao Z, Yang X, et al. Estimates of global biomass burning emissions for reactive greenhouse gases (CO, NMHCs, and NO<sub>x</sub>) and CO<sub>2</sub> [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(D6): D06304.
- [54] Zhang X, Kondragunta S, Ram J, et al. Near-real-time global biomass burning emissions product from geostationary satellite constellation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, **117**(D14): D14201.
- [55] Yokelson R J, Burling I R, Urbanski S P, et al. Trace gas and particle emissions from open-biomass burning in Mexico [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, **11**(14): 6787-6808.
- [56] Ichoku C, Ellison L. Global top-down smoke-aerosol emissions estimation using satellite fire radiative power measurements [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2014, **14**(13): 6643-6667.
- [57] Reid J S, Hyer E J, Prins E M, et al. Global monitoring and forecasting of biomass-burning smoke: description and lessons from the Fire Locating and Modeling of Burning Emissions (FLAMBE) program [J]. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 2009, **2**(3): 144-162.
- [58] Freeborn P H, Wooster M J, Roy D P, et al. Quantification of MODIS fire radiative power (FRP) measurement uncertainty for use in satellite-based active fire characterization and biomass burning estimation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, **41**(6): 1988-1994.
- [59] Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(4): 389-393 (in Chinese).
- 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 389-393.

- [60] Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of emissions of pollutants from open burning crop residue [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, **24**(4): 800-804(in Chinese).
- 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 800-804.
- [61] Lu Bing, Kong Shaofei, Han Bin, et al. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007 [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 186-194(in Chinese).
- 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 186-194.
- [62] Wang Shuxiao, Zhang Chuying. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. *Science Paper Online*, 2008, **5**: 329-333(in Chinese).
- 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布 [J]. *中国科技论文在线*, 2008, **5**: 329-333.
- [63] Zhao Jianning, Zhang Guilong, Yang Dianlin. Estimation of carbon emission from burning of grain crop residues in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(4): 812-816(in Chinese).
- 赵建宁, 张贵龙, 杨殿林. 中国粮食作物秸秆焚烧释放碳量的估算 [J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(4): 812-816.
- [64] Li Feiyue, Wang Jianfei. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(14): 1-7(in Chinese).
- 李飞跃, 汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算 [J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(14): 1-7.
- [65] Liu M, Song Y, Yao H, et al. Estimating emissions from agricultural fires in the North China Plain based on MODIS fire radiative power [J]. *Atmos. Environ.*, 2015, **112**: 326-334.
- [66] Li J, Li Y, Bo Y, et al. High-resolution historical emission inventories of crop residue burning in fields in China for the period 1990-2013 [J]. *Atmos. Environ.*, 2016, **138**: 152161.

作者简介: 毛慧琴 (1974-), 女, 汉族, 湖南武冈人, 博士, 高级工程师, 主要从事大气污染影响方面的研究。