

基于 CSGD 的排放清单处理工具研究

王 堃¹, 高 超², 王晨龙¹, 童亚莉¹, 王树堂^{3*}, 王人洁⁴, 刘 媛^{5*}

- 1.北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054
- 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102
- 3.生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035
- 4.交通运输部规划研究院, 北京 100028
- 5.中国环境保护产业协会, 北京 100081

摘要: CSGD (crowd sourcing geographic data, 众源地理数据) 是通过互联网向大众或相关机构提供的一种开放地理空间数据, 具有易获取、时效性好、准确性高等特点, 在排放清单时空分配方面具有应用潜力。然而, 现有排放清单处理工具不支持 CSGD 数据直接输入且难以满足排放清单空间分配和空气质量模式所需清单格式, 因此, 亟待开发一套可以拓展该类数据在排放清单领域应用的工具。以 CSGD 中的 POI (城市设施兴趣点) 数据为主要研究对象, 基于 QGIS 平台、C++ 语言及 Python 语言, 开发了在 Windows 系统下的 ISAT (inventory spatial allocate tool, 排放清单空间分配工具) 工具及在 Windows 或 Linux 系统下的 ISAT.M 工具。结果表明: ISAT 工具以 POI 数据为基础制作出的空间分配结果与排放源排放强度的空间分布特征的一致性较好; ISAT.M 工具输出的 inline 清单可以作为 CMAQ 空气质量模式及其 DDM 敏感性分析模块的输入文件并开展模拟, 通过与 SMOKE 模型的关闭源法模拟结果对比发现, 二者在数据及空间分布上呈较好的一致性。研究显示, CSGD 数据应用于排放清单空间分配可较好地反映排放源空间分布特征, 同时由于此类数据存在信息冗杂、近郊区数据缺失等问题, 在应用过程中应注意数据清洗及数据种类的选取工作。

关键词: ISAT; 排放清单处理工具; 众源地理数据; POI

中图分类号: X51 **文章编号:** 1001-6929(2019)06-1090-09
文献标志码: A **DOI:** 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.02.13

Research on Emission Inventory Processing Tool based on CSGD Data

WANG Kun¹, GAO Chao², WANG Chenlong¹, TONG Yali¹, WANG Shutang^{3*}, WANG Renjie⁴, LIU Yuan^{5*}

- 1.Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China
- 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China
- 3.Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China
- 4.Transport Planning and Research Institute, Ministry of Transport, Beijing 100028, China
- 5.China Association of Environmental Protection Industry, Beijing 100037, China

Abstract: crowd sourcing geographic data (CSGD) is a kind of open geospatial data provided to the public or related organizations through the internet. CSGD has the potential to be applied in the space-time allocation of emission inventories due to its characteristics of easy access, good timeliness and high accuracy. However, the existed emission inventory processing tools do not support the direct input of CSGD data and are difficult to meet the inventory formats required for the space allocation of emission inventories and the air quality models. Therefore, it is urgent to develop a new set of tools to expand the application of CSGD in the field of emission inventories. In the present study, we focused on the point of interest (POI) data in CSGD, and developed an emission inventory processing tool called ISAT based on the QGIS platform, C++ and Python. ISAT included the ISAT emission inventory spatial processing tool based on the Windows system and the ISAT.M tool under the Linux system. The results proved that the spatial distribution results based on the POI data in the

收稿日期: 2018-05-09 **修订日期:** 2019-02-20

作者简介: 王堃 (1991-), 男, 山西孝义人, 研究实习员, 硕士, 主要从事大气污染控制研究, wky@mail.bnu.edu.cn.

* 责任作者: ①王树堂 (1982-), 男, 山东临沂人, 工程师, 硕士, 主要从事大气污染防治方向研究, wang.shutang@mepfeco.org.cn; ②刘媛 (1979-), 女, 湖南吉首人, 高级工程师, 硕士, 主要从事环保产业技术工作研究, liuyuan5002@163.com

基金项目: 北京市科学技术研究院萌芽计划 (No.GS201826); 国家重点研发计划重点专项 (No.2016YFC0208103); 国家自然科学基金项目 (No.21607008)

Supported by Green Shoots Plan, China (No.GS201826); National Key Research and Development Program of China (2016YFC0208103); National Natural Science Foundation of China (No.21607008)

ISAT were in good agreement with the actual emission characteristics of the emission source. The inline inventory outputted by the ISAT.M tool could be used as an input for the CMAQ air quality model and its DDM module. Moreover, the simulation results of inline inventory by ISAT.M showed high consistency with the results of Brute Force method of the SMOKE model in both the data and the spatial distribution. This study shows that the CSGD data applied to the emission inventory space allocation can reflect the spatial distribution characteristics of the emission source. At the same time, due to the information redundancy and the lack of data in the suburbs, attention should be paid to the data cleaning and data type selection during the application processes.

Keywords: ISAT; emission inventory processing tool; crowd sourcing geographic data; POI

大气污染物排放清单是空气质量预报、预警的重要基础,也是制定大气环境质量目标管理和达标规划的根本依据,它反映了污染源在一定时间跨度和空间区域内排放到大气中的各种污染物的数量,建立完善、精准、动态的污染源清单已成为空气质量管理科学决策的首要环节^[1-2]。空间分配是通过一些地理空间指标将以行政区为单位的排放清单分配到网格中的过程,准确地对排放清单进行空间分配是排放清单编制的必要环节^[1-4]。大气污染物排放清单的时空分配工作主要集中在较难统计、分布较广且排放高度较低的城市及农村居民生活源、道路交通源、典型行业的无组织排放等非点源排放。然而,现有的方法多根据人口统计、GDP 统计、路网等数据进行分配,存在精度较差,或可能由于人口集中导致排放分配到其他地区等问题,与实际情况存在较大的误差。

近年来,我国现代信息技术快速发展,数字城市技术已经成为城市规划、建设与管理的主要发展方向^[5-6]。同时,由于对排放源时间排放特征和空间分布特征的精准描述,数字城市数据逐渐被用于空气质量监测及预测方面,为空气质量管理提供了可贵实践,基于大数据的排放清单编制及实时动态更新成为亟待开展和研究的技术方向^[2,7-9]。CSGD (crowd sourcing geographic data,众源地理数据)是通过互联网向大众或相关机构提供的一种开放地理空间数据,并已成为地理数据获取的新方法^[10],该类数据包括公共版权数据(如交通路网)、GPS 数据、自发创建的地理数据等,具有时效性好、信息丰富、成本低、数据量大等特点^[11]。典型的众源地理数据网站,如 Google、OpenstreetMap (OSM)、高德、百度、微博等通过提供 API,允许用户在所选区域对数据进行直接读取;常用的 CSGD 包括 POI(城市设施兴趣点)数据、交通态势、城市热力图等。

POI 是电子地图的基础数据,具有分类细致、定时更新、准确性高、易于获取等特点,因此其在空间规划分析中有很大的利用空间。如 Bakillah 等^[12]通过提取 OSM 数据中与人口密度相关性较高的 POI 数据分析了小尺度下德国汉堡的人口密度;王明等^[13]利

用 POI 数据对城市的地标进行分层提取;ZHENG 等^[14]基于 POI 数据对城市的可达性进行计算;王堃等^[4]初步研究了基于 POI 数据对大气污染物排放清单进行空间分配的方法。国内外学者以 POI 等众源地理数据为基础,开展了大量在城市规划及管理中的应用和研究,并在空气质量管理领域进行了初步的实践,以期为解决传统数据精度不足、获取成本较高、无法动态反映城市活动变化的问题提供了新的技术路径。

排放清单处理工具是开展排放清单空间分配工作、空气质量模式输入数据处理的重要组成。国外学者开发了诸多以实现 GIS 功能为主的排放清单空间分配工具,如美国环境保护局资助开发了 SA-TOOLS 空间分配工具、MIMS 空间分配工具等。法国空气质量模式 Chimere2014b 以高精度土地利用数据为空间分配指标,通过模式自带的 Emissurf 模块根据不同土地利用类型、不同排放源的分布特征对排放清单数据进行空间分配^[15]。同时,美国环境保护局资助开发的 SMOKE 排放清单工具,可以将时空分配参数及排放数据作为输入,提供可满足 CMAQ 空气质量模式运行要求的高时空分辨率排放清单^[16]。然而,现有的排放清单空间分配工具需要直接输入处理后的空间分配因子,无法输入 POI 数据等众源地理数据,并且多基于 Linux 平台,存在技术门槛高、操作性较差等问题;为满足高精度模拟及敏感性分析要求,CMAQ 空气质量模式利用 PinG 模块解决次网格大点源模拟问题^[17]、利用 DDM 敏感性分析模块等满足敏感性分析要求,而该类模块要求输入包含点源烟囱信息、经纬度及排放信息的 inline 类型清单,为排放清单工具的开发提出了新的要求。

由于 POI 数据相较于其他 CSGD 具有更易获取处理且应用广泛的特点,该研究以 CSGD 中的 POI 数据为主要研究对象,通过研究 WRF 气象模式及 CMAQ 空气质量模式的网格化划分方法、CMAQ 空气质量模式的 DDM 敏感性分析模块,开发了可满足基于 CSGD 开展空间分配的 ISAT (inventory spatial allocate tool,排放清单空间分配)工具及可用于 CMAQ 空气质量模式 inline 格式排放清单制作的

ISAT.M 工具. 同时,为了验证工具的有效性,该研究利用 CMAQ 空气质量模式及其 DDM 敏感性分析模块,以清华大学编制的 MEIC (multi-resolution emission inventory for China, 中国多尺度排放清单模型) 清单及北京市工业锅炉大气污染物排放清单为输入清单,基于 SMOKE 模型和 ISAT.M 工具分别采用关闭源法和 DDM 法开展敏感性分析,以验证该工具的有效性.

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 基于 POI 数据的排放清单空间分配方法

王堃等^[4]初步建立了基于 POI 数据的大气污染物排放清单空间分配方法,并基于 CMAQ 空气质量模式验证了该方法的有效性.

对于以人类活动密切相关的民用源类,采用商业住宅类或与排放源空间分布特征相关性较强的 POI 数据点数作为空间分配指标对排放量进行空间分配,如对餐饮油烟源选用餐饮服务类 POI 点数据,对城市居民采暖源可采用商业住宅类 POI 数据,对挥发性油气产品被收集、储存、运输和销售的储存运输源可采用汽车服务类 POI 数据中的加油站数据等.

设定每个网格内的空间分配权重为 F_i , 分配得到排放量 E_i , 计算公式:

$$F_i = N_i / N_{\text{sum}} \quad (1)$$

$$E_i = F_i \times E_{\text{sum}} \quad (2)$$

式中: F_i 为第 i 个网格的空间分配权重; E_i 为第 i 个网格中分配的污染物排放量; N_i 为第 i 个网格中商业及住宅类的 POI 数据点个数; N_{sum} 为研究区域内所有网格中商业及住宅类 POI 数据点的个数; E_{sum} 为研究区域内的所有网格中污染物的排放总量, t.

对于以机动车为主的交通源,通过统计每条道路周边停车场或与机动车活动水平相关性较强的 POI 数据个数为指标,如重型货车类选用工厂类 POI 数据点,小型客车类选用停车场类 POI 数据点. 根据道路级别设定交通流量调整系数,基于“标准道路长度法”^[18]设定每个网格内的空间分配权重为 F_i , 分配得到污染物排放量 E_i ^[4], 计算公式:

$$K_{a,b} = N_a / N_{\text{avg},b} \quad (3)$$

$$L_i = \sum_{b=1}^m \sum_{a=1}^{n_b} L_{a,b} \times Q_b \times R_{a,b} \quad (4)$$

$$F_i = L_i / L_{\text{sum}} \quad (5)$$

$$E_i = F_i \times E_{\text{sum}} \quad (6)$$

式中: a 为道路编号; b 为道路类型; m 为道路类型数; n_b 为道路类型 b 中道路的个数; $K_{a,b}$ 为道路类型 b 中道路 a 的交通流量调整系数; N_a 为道路类型 b 中道

路 a 周边停车场或相关源类 POI 数据点的个数; $N_{\text{avg},b}$ 为在研究区域内道路类型 b 中所有道路的周边停车场或相关源类 POI 数据点的平均个数; L_i 为第 i 个网格中所有类型道路的标准长度, km; $L_{a,b}$ 为道路类型 b 中道路 a 的长度, km; Q_b 为不同道路的标准长度换算因子, km/km; L_{sum} 为研究区域内所有网格中所有类型道路的标准长度总和, km.

1.1.2 工具开发语言

由于实际工作中排放清单编制及网格化工作多基于 Windows 系统, 空气质量模式多基于 Linux 系统, 两项工作互相独立且由不同人员负责. 因此, 该研究基于实际情况将主体工具设计为在 Windows 系统下运行的空间分配工具, 并开发了可在 Linux 系统下运行的 CMAQ 空气质量模式排放清单输入文件制作工具, 分别命名为 ISAT 工具和 ISAT.M 工具.

ISAT 工具是该研究的主体工具, 用来实现排放清单空间分配工作, 其采用 QGIS 作为基础 GIS 平台, 采用 C++ 作为开发语言. QGIS 是目前流行的开源、免费的桌面 GIS 系统, 其基于 Qt 跨平台类库开发, 支持 Windows、Linux 等多种系统, 支持 C++、Python 语言的扩展开发, 支持 Shpfile、Tiff 等多种数据格式, 被广泛地应用于 GIS 二次开发^[19], 可为今后的应用扩展和实用推广提供技术和架构保障. C++ 被广泛地应用于大规模、复杂度高、长生存期的软件开发中^[20], 由于 ISAT 工具需要满足处理海量空间数据、结果输出高效稳定等要求, 该研究中采用 C++ 作为系统开发语言采用 64 位架构, 以最大程度地利用硬件资源, 降低软、硬件运行成本, 提高性价比.

ISAT.M 是一种在 Windows 或 Linux 系统下运行并为空气质量模式 (如 CMAQ、WRF-Chem、CAMx 等) 提供排放源输入数据的清单处理工具, 该工具主要基于 Python 开发. Python 作为一种解释型、面向对象、动态数据类型开源脚本语言, 同时其拥有 GDAL/OGR、Pyproj、Shapely 等丰富的空间数据处理函数库, 被广泛地应用于 GIS 开发领域^[21-22].

1.1.3 CMAQ-DDM 空气质量模式

CMAQ-DDM 空气质量模式选用 CMAQ v5.0.2 和 DDM 敏感性分析模块. 采用 CB05 化学机制及 AERO6 气溶胶机制. 采用 WRF 气象模式为 CMAQ 空气质量模式提供气象输入场, 选用的参数化方案为 WSM3 微物理方案、CAM 长波辐射方案、RRTMG 短波辐射方案、Noah Land Surface Model 陆面方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、MYJ 边界层方案和 Grell 3D 积云参数化方案. CMAQ 模拟采用三层模拟,

空间分辨率分别为 27 km×27 km (全国大部分区域)、9 km×9 km (京津冀地区)、3 km×3 km (北京市)。采用 Lambert 投影,坐标原点为 36.4°N、101.9°E。其中,北京市 CSGD 及排放清单基础较好作为主要研究区域,其他模拟区域为该区域提供边界场,模拟时段选取污染较为严重的采暖季,并以 2015 年 1 月作为研究时段。

1.2 研究数据

主要采用的空间分配指标有北京市高德地图 POI 数据、北京市道路交通路网数据,排放清单采用了 MEIC 清单、2012 年中国大陆地区网格化排放数据 (<http://www.meicmodel.org>),其空间分辨率为 0.25°×0.25°,包括 10 种大气污染物和温室气体,涉及民用源、农业源、交通源、工业源及电力生产源五种源类;同时,该课题组以北京市 2015 年工业锅炉台账为基础,构建了 2015 年北京市工业锅炉点源化大气污染物排放清单^[23],为该研究提供了点源化排放清单研究数据。同时,利用北京市部分路段 2015 年道路交通数据、北京市城市热力图数据作为空间分配结果的参考校验数据。

分别通过商业住宅类 POI 数据、交通路网及停车场类 POI 数据对民用源、交通源开展面源空间分配并作为面源数据。工业锅炉是目前北京市主要的工业点源之一,以 2015 年北京市工业锅炉排放清单作为点源数据。农业源是北京市氨排放的主要来源^[24-25],由于 CSGD 中缺少可以反映农业源活动水平的相关参数,因此该研究未采用 CSGD 对该类源开展空间分配研究,同时,为保证空气质量模式输入源类及污染物种类完

整,采用土地利用数据对农业源数据开展空间分配,并作为面源输入数据之一。

2 结果与讨论

2.1 系统功能设计

为满足实际工作中排放清单编制与空气质量模式运行工作多为不同平台下独立运行的需求,该研究开发了在 Windows 系统下运行的 ISAT 工具以满足排放清单编制及网格化工作要求,以及在 Windows 或 Linux 系统下运行的 ISAT.M 工具以满足将排放清单输入 CMAQ 等空气质量模式的需求。其中,研究区域划分是排放清单编制及空气质量模式模拟的基础,空间分配是高分辨率排放清单编制的主要步骤,将清单作为空气质量模式输入数据是基于数值模拟开展源解析及敏感性分析的必需环节,因此,该研究开发了具备研究区域划分、排放清单空间分配功能的 ISAT 工具及为模式提供输入清单处理功能的 ISAT.M 工具,系统功能模块结构见图 1,软件主界面及结果示意图 2。

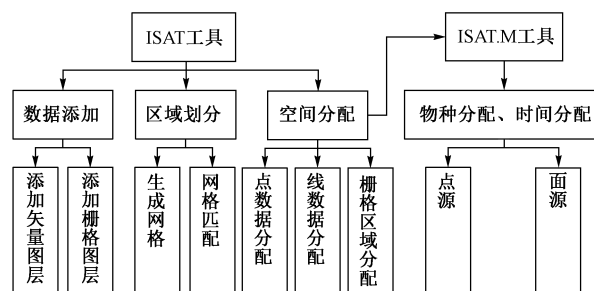


图 1 系统功能模块结构

Fig.1 Frameworks of inventory spatial allocate tool

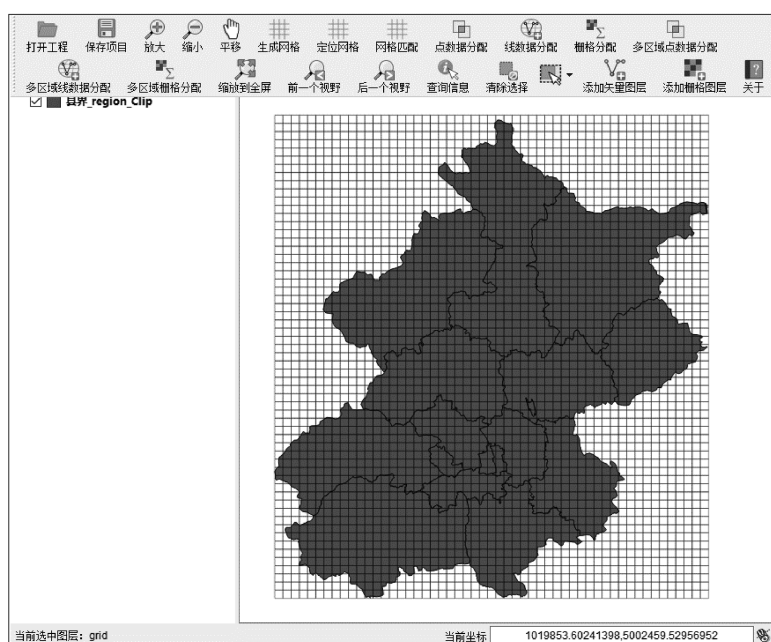


图 2 软件主界面及结果示意

Fig.2 Software main interface and result diagram

区域划分是根据研究区域范围、网格分辨率、投影坐标参数来确定的,其中,投影坐标参数多采用 Lambert 投影,并且需要通过确定研究区域的中央经线和原点纬度等信息来获得.同时,WRF 气象模式为 CMAQ 空气质量模式提供气象场,也确定了 CMAQ 空气质量模式的研究区域,而在 WRF 气象模式中,其对于地球的假设是半径为 6 370 km 的球体,该假定与常用的 WGS1984 等地理坐标系不同^[26].因此,该研究提供了生成网格功能,通过输入区域文件的 shp 矢量文件,选择 WRF 坐标系,输入研究需要的网格大小,自动计算出中央经线、原点纬度、起始 X、起始 Y 及行、列数等信息,并输出包括不同网格行列号经纬度的网格图层(见图 3).

空间分配是通过空间分配指标获得研究区域内不同网格空间分配因子的功能.由于 CSGD 存在 POI 数据点等点数据,交通态势、交通路网等线数据及城市热力图^[27-28]等栅格数据,因此该研究设定了点数据分配、线数据分配及栅格区域分配 3 个主要功能,支持矢量、栅格文件格式,空间分配方法如 1.1 节所述,输出结果为 csv 文件并包括了不同网格中的空间分配因子、经纬度及行列号等信息.其中,线数据分配功能参考 GB 50220—1995《城市道路交通规划设计规范》中对于道路类型的分类方法,最多可以输入 4 种不同道路类型的线图层数据,并且可以根据道路类型为不同数据图层设置相应的标准长度换算因子(见图 4).

ISAT.M 工具基于 Python 语言及其 Pandas、GDAL/ORG、Pyproj、Numpy、Netcdf4 等函数库,构建了可用于



图 3 “生成网格”功能界面
Fig.3 Interface of ‘grid generation’

Linux 及 Windows 系统下的模式清单文件处理模块,输入文件格式为 csv 格式文件,输出文件格式为 netcdf 格式文件,并且可根据实际需求输入多种类型排放源的物种及时间分配谱.模块通过输入 ISAT 工具生成的空间分配因子及多种污染源的时间、物种分配谱,完成高时空分辨率排放清单的空间、时间及物种分配工作,输

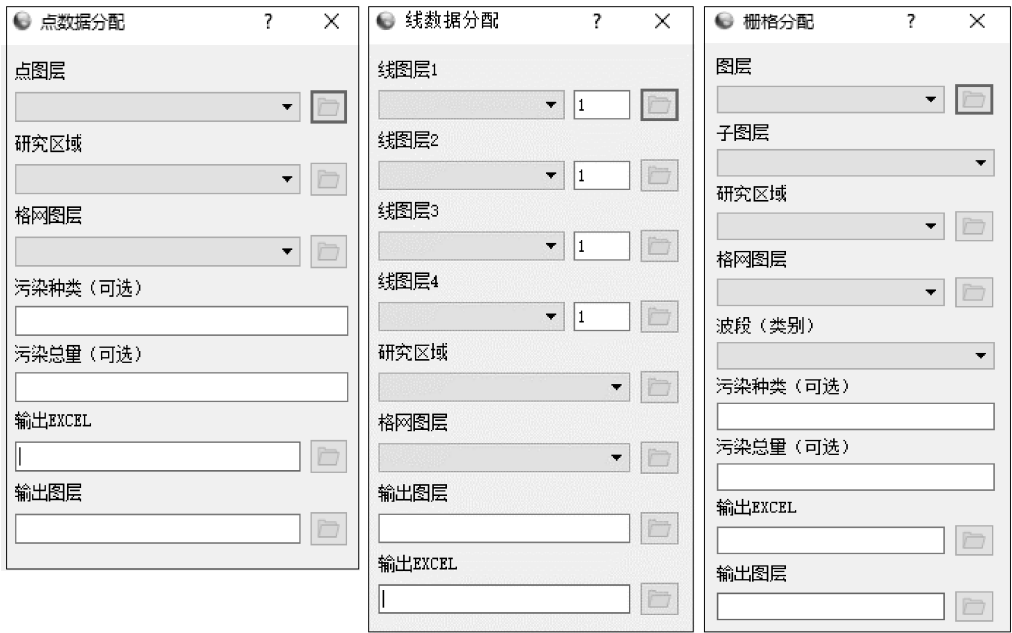


图 4 空间分配功能界面
Fig.4 Interface of spatial allocation

出包括点源的烟囱信息 (stack_groups)、排放量 (emission) 文件,以及面源的网格化排放文件. 该研究涉及的 Python 主要函数库及功能如表 1 所示. 由于 CMAQ 排放清单文件空间占用量大,多在 Linux 平台下参与数值模拟计算,因此该模块与 ISAT 工具不同,其主要以 Python 代码的形式在 Linux 平台中运行.

表 1 该研究涉及的 Python 主要函数库及功能

Table 1 Python Library and its function in this study

函数库	功能
Pandas	基于 numpy 函数库的数据分析工具,用于排放清单数据处理
Pyproj	用于确定点源所在网格及其他投影机计算
Netcdf4	用于生成 netcdf 格式的 CMAQ 排放清单输入文件

综上,ISAT 工具主要应用于排放清单网格化、空间分配及空气质量模式输入清单处理方面. ISAT.M 工具目前适用于 CMAQ 空气质量模式,支持 CB05 大气化学机制及 AERO6 气溶胶机制,同时在空间分配过程中需要适当选择空间分配文件的类型及分辨率以减少计算量,如 POI 数据等适用于电子地图数据较为充裕

的城区,其对于郊区有一定的局限性.

2.2 ISAT 工具空间分配效果验证

POI 数据反映了与人类活动相关源的空间分布情况,与 POI 数据类似,城市热力图数据通过统计移动终端设备(如手机)连接互联网并分享所在的地理位置与信息,反映用户城市不同人口活动强度. 该研究以北京市城六区为例,通过对比利用商业及住宅类 POI 数据所获得的污染源空间分布特征与城市热力图分布情况,考察 POI 数据是否能更好地对现实情况进行反映,以及所开发工具的有效性.

基于北京市城市热力图数据及基于 ISAT 工具和北京市商业及住宅类 POI 数据分别获得北京市城六区人类活动源空间分配数据(见图 5). 由图 5 可见,城市热力图数据对于城区尤其是城区边缘的人类活动有良好的反映,POI 数据与城市热力图数据所获得的空间分配因子在空间分布上具有良好的一致性,结果表明利用 ISAT 工具获得的空间分配结果能够反映人类活动源强度的空间分布情况.

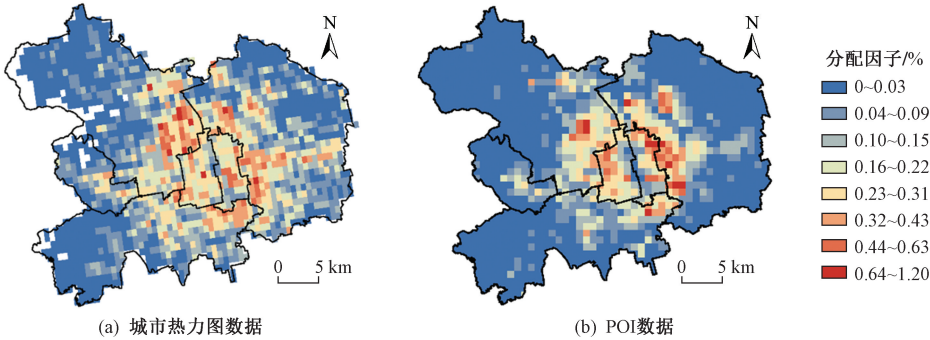


图 5 采用城市热力图数据和 POI 数据的人类活动源空间分配数据

Fig.5 Population distribution data using urban thermal map data and POI data

该研究进一步基于 ISAT 工具利用商业及住宅类 POI 数据及工厂类 POI 数据计算北京市部分省道的交通流量调整系数 K [见式(3)],并与 2015 年北京

市部分省道不同车型车流量数据进行相关性分析(见图 6). 由图 6 可见,基于 ISAT 工具,利用商业及住宅类 POI 数据和工厂类 POI 数据所获得的交通流

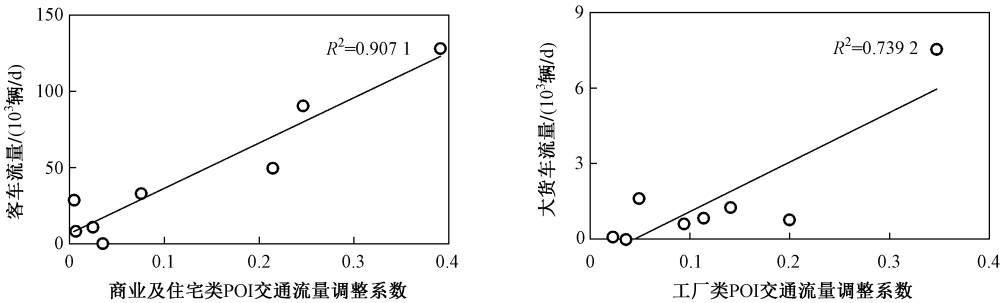


图 6 商业及住宅类 POI 数据及工厂类 POI 数据所得交通流量调整系数及其与客车和大货车流量的相关性

Fig.6 Correlation between the traffic flow adjustment coefficient obtained from POI data of commercial and industrial categories and the traffic flow of passenger cars and heavy tracks

量调整系数 K 可分别与客车流量和大货车流量建立良好的相关性关系,对回归系数进行显著性检验得到 $P < 0.05$ (通过 t 检验),该方法可有效地反映同等道路等级下、不同道路之间不同车型的活动强度关系。

该研究以 MEIC 清单中的民用源为例,基于 ISAT 工具和 POI 数据将其分配至 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 网格(见图 7)。由图 7 可见,使用 ISAT 工具分配后的中心城区民用源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放主要集中在北京市东三环国贸区域、中关村地区等热点区域,近郊区北五环上地区域、东五环管庄区域、西五环苹果园等建成区的排放分配

结果也较高。因此,基于 ISAT 工具使用 POI 数据可以对以城市居民排放源为主的中心城区民用源排放有较好的空间分配结果,但对近郊建成区的排放分配结果较高,其主要原因在于 MEIC 清单中的民用源包括城市居民源和农村居民源,而 POI 数据主要反映写字楼、住宿楼等城市设施的空间分布,因此使用该数据对近郊区开展民用源空间分配会导致农村居民源的排放量过多地分配至 POI 数据密集的建成区,造成这些区域的结果偏高。

因此,ISAT 工具可以利用 POI 数据开展民用源

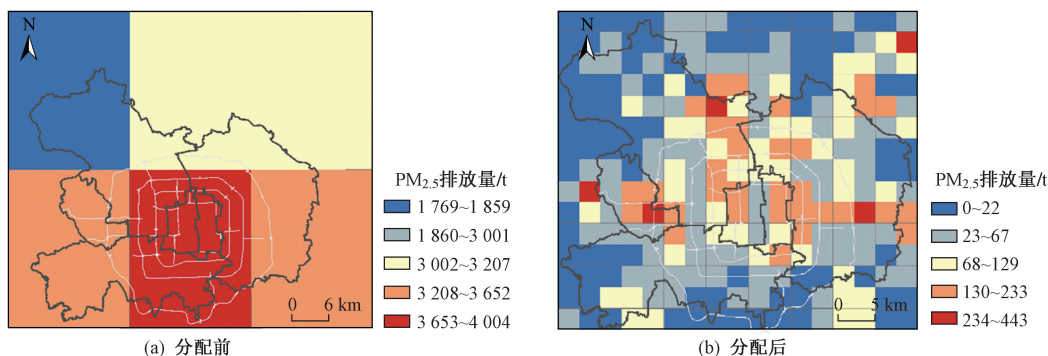


图 7 基于 ISAT 工具对 MEIC 清单中民用源进行空间分配前、后情况

Fig.7 Results of spatial allocation of residential emissions in MEIC inventory based on ISAT tool

及交通源排放清单的空间分配。同时,在使用 POI 数据进行空间分配时,应适当选择与排放源空间分布特征相近的数据集,以获得与实际排放相吻合的空间分布,如餐饮源使用餐饮服务类 POI 数据,城市居民燃烧源选用商业及住宅类 POI 数据,小型客车类选用停车场类 POI 数据点等。对于农村居民源的空间分配,现阶段有研究采用农村平房数据进行分配和计算^[29],CSGD 中的农村居住点在该方面有一定的应用潜力,然而由于 MEIC 清单产品中未单独提供农村居民源排放数据,因此该研究暂未开展相关研究。

2.3 基于 ISAT.M 工具的 CMAQ-DDM 空气质量模式运行效果验证

关闭源法是指通过关闭某一地区或源类的污染源来计算这一地区对目标区域的污染贡献,DDM 法是利用模式相同的公式结构,将敏感性分析公式与模式主程序耦合进行敏感性分析的方法。ISAT.M 工具可将 ISAT 工具所生成的网格化排放清单文件及点源排放文件作为输入文件,并输出 CMAQ 及其 DDM 敏感性分析模块可以直接使用的 inline 格式排放清单。

该研究耦合 2012 年 MEIC 清单和 2015 年北京市工业锅炉点源排放清单,采用 SMOKE 模型和 ISAT.M 工具分别为 CMAQ 空气质量模式提供排放清

单,并以北京市工业锅炉点源排放清单作为敏感性分析研究对象,分别利用关闭源法和 DDM 法开展北京市工业锅炉的环境影响敏感性分析,并对结果进行对比以验证 ISAT.M 工具的有效性。由于该研究主要为验证 ISAT.M 工具的有效性,并且 2 个清单时间上的不一致性会对敏感性分析结果带来一定的不确定性,因此仅对比不同工具数值模拟结果的一致性,对敏感性分析结果未展开讨论。

图 8、9 为基于 SMOKE 模型的关闭源法和基于 ISAT.M 工具的 DDM 法得到的北京市工业锅炉大气污染物排放对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 贡献的逐网格结果对比及空间分布对比。在数据一致性方面,2 种方法所得数据

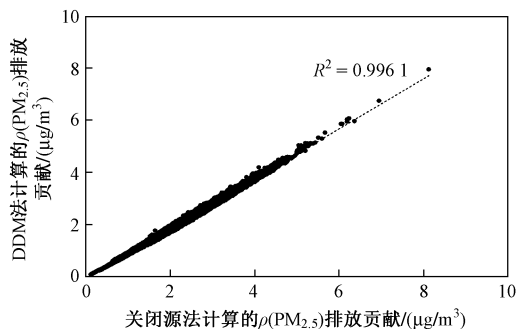


图 8 DDM 法与关闭源法的计算结果比较

Fig.8 Comparison of the DDM and Brute Force method

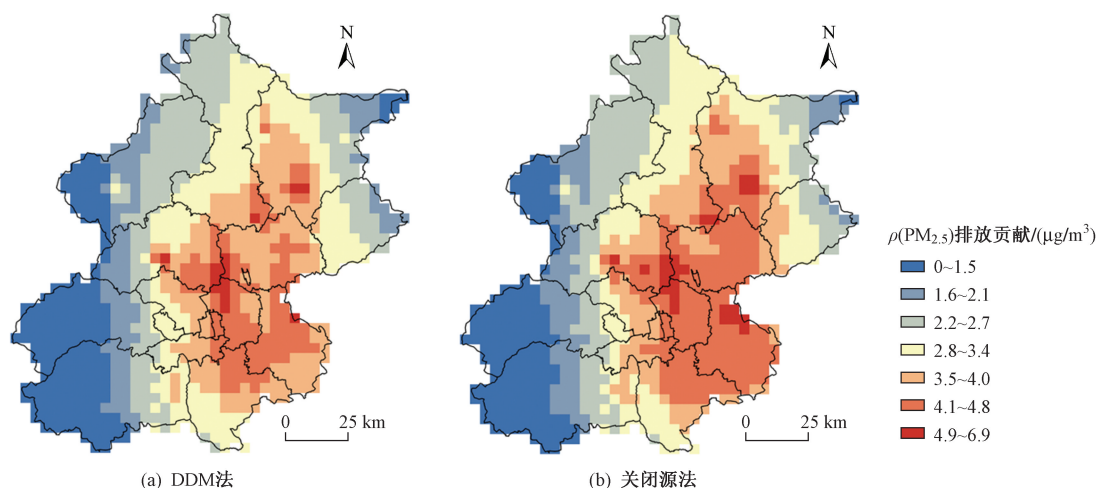


图9 DDM法与关闭源法计算结果的空间分布对比

Fig.9 Comparison of the spatial distribution of DDM and Brute Force method

相关系数在 0.99 以上,斜率约为 0.95,具有显著的相关性和一致性(见图 8);在空间分布方面,2 种方法空间分布结果相近,关闭源法估算结果的高值区域较 DDM 法分布更为广泛(见图 9),该结果与王丽涛等^[30-31]研究结果相似。

3 结论与建议

a) 该研究以 CSGD 中的 POI 数据为主要研究对象,开发了在 Windows 平台下运行的 ISAT 工具,以及在 Windows 或 Linux 平台下运行的 ISAT.M 工具,并通过采用 WRF 气象模式假定的地球模型,以实现排放清单编制、空气质量模式运行过程中网格区域的一致性,满足不同平台下的工作需求。

b) 该研究以北京市为例,基于 ISAT 工具利用 POI 数据对人类活动源及道路机动车源等面源排放强度的空间分布进行分配,并与城市热力图及交通流量数据进行对比以验证其有效性,结果表明 ISAT 工具的空间分配结果与排放源空间分布具有较好的一致性。

c) ISAT.M 工具可以生成满足 CMAQ 及其 DDM 等模块输入要求的 inline 格式数据。该研究以 MEIC 清单及北京市工业锅炉大气污染物排放清单为基础,通过对比基于 SMOKE 模型的关闭源法及基于 ISAT.M 工具的 DDM 法的敏感性分析结果,验证了这 2 种方法数据的一致性及空间分布的相关性,并发现关闭源法估算的结果高于 DDM 法。

d) POI 数据是 CSGD 的主要组成部分,该类数据具有信息丰富、易于获取、时效性强等优点,但也面临信息冗杂、近郊区数据缺失较为严重等问题。因此,将 CSGD 应用于排放清单空间分配工作,需选取与排放源空间分布特征相近的数据种类,开展冗余数

据去除等数据清洗工作,并注意近郊区数据缺失带来的不确定性。除 POI 数据之外,CSGD 中的交通态势数据、城市热力图等数据不仅在空间上可以反映道路机动车及人类活动的空间分布特征,而且该类数据能够实时更新以反映排放源排放强度的时间变化。因此,在后续研究中应深入开展对该类数据在排放清单时空分配方面的应用。

参考文献(References):

- [1] 郑君瑜.区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M].北京:科学出版社,2014:6.
- [2] 王书肖,邱雄辉,张强,等.我国人为源大气污染物排放清单编制技术进展及展望[J].环境保护,2017(21):21-26.
WANG Shuxiao, QIU Xionghui, ZHANG Qiang, *et al.* Developing anthropogenic air pollutant emission inventory in China: progress and outlook[J]. Environmental Protection, 2017(21): 21-26.
- [3] 杨柳林,曾武涛,张永波,等.珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J].中国环境科学,2015,35(12):3521-3534.
YANG Liulin, ZENG Wutao, ZHANG Yongbo, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta Region [J]. China Environmental Science, 2015, 35(12): 3521-3534.
- [4] 王堃,高佳佳,田贺忠,等.基于 POI 兴趣点的排放清单空间分配方法[J].中国环境科学,2017,37(6):2377-2382.
WANG Kun, GAO Jiajia, TIAN Hezhong, *et al.* An emission inventory spatial allocation method based on POI data [J]. China Environmental Science, 2017, 37(6): 2377-2382.
- [5] MAYER-SCHNBERGER V, CUKIER K. Big data: a revolution that will transform how we live, work, and think [M]. London: John Murray, 2013:13-23.
- [6] 王爽,李炯.基于城市网络空间的 POI 分布密度分析及可视化[J].城市勘测,2015(1):21-25.
WANG Shuang, LI Jiong. Analysis and visualization of POI distribution density based on urban network space [J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2015(1): 21-25.

- [7] HSIEH H P, LIN S D, ZHENG Y. Inferring air quality for station location recommendation based on urban big data [C/OL]//ACM. Proceedings of the 21th SIGKDD conference on knowledge discovery and data mining. Sydney: ACM, 2015 [2015-08-11]. http://59.80.44.46/users.wpi.edu/~yli15/courses/DS595CS525Spring17/includes/11_Env_Infering.pdf.
- [8] ZHENG Yu, LIU Furui, HSIEH H P. U-Air: when urban air quality inference meets big data [C/OL]//ACM. Proceedings of the 19th SIGKDD international conference knowledge discovery and data mining. Chicago: ACM, 2013 [2013-08-11]. <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/U-Air-KDD-camera-ready.pdf>.
- [9] ZHENG Yu, YI Xiuwen, LI Ming, *et al.* Forecasting fine-grained air quality based on big data [C]//ACM. SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining. Sydney: ACM, 2015: 2267-2276.
- [10] HEIPKE C. Crowdsourcing geospatial data [J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2010, 65(6): 550-557.
- [11] 单杰, 秦昆, 黄长青, 等. 众源地理数据处理与分析方法探讨 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2014, 39(4): 390-396.
- SHAN Jie, QIN Kun, HUANG Changqing, *et al.* Discussion on the processing and analysis method of crowding source geographic data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(4): 390-396.
- [12] BAKILAH M, LIANG S, MOBASHERI A, *et al.* Fine-resolution population mapping using OpenStreetMap points-of-interest [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2014, 28(9): 1940-1963.
- [13] 王明, 胡庆武, 李清泉, 等. 基于位置签到数据的城市分层地标提取 [J]. 计算机学报, 2016, 39(2): 405-413.
- WANG Ming, HU Qingwu, LI Qingquan, *et al.* Extracting hierarchical landmark from check-in data [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(2): 405-413.
- [14] ZHENG Songpan, CHEN Yuzhong, YU Zhiyong, *et al.* Urban impedance computing model based on points of interest [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2016, 50(6): 1189-1195.
- [15] INERIS LMD. Documentation of the chemistry-transportation model [EB/OL]. Paris: INERIS LMD, 2014-07-07 [2014-07-07]. <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/docs/CHIMEREdoc2014b.pdf>.
- [16] The University of North Carolina at Chapel Hill. SMOKE v2.3 Users's Manual [M]. North Carolina: The University of North Carolina at Chapel Hill, 2006: 2-3.
- [17] GODOWITCH J M. Simulations of aerosols and photochemical species with the CMAQ plume-in-grid modeling system [EB/OL]. North Carolina: The University of North Carolina at Chapel Hill, 2004-10-18 [2015-10-20]. https://www.cmascenter.org/conference/2004/abstracts/poster/godowitch_abstract.pdf.
- [18] 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 815-821.
- ZHENG Junyu, CHE Wenwei, WANG Zhaoli. Traffic flow and road network -based spatial allocation of regional mobile source emission inventories [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 815-821.
- [19] SHERMAN G E. Desktop GIS: mapping the planet with open source tools [M]. North Carolina: Pragmatic Bookshelf, 2008: 67-69.
- [20] 吴迪. 基于开源软件的 C++ 关键语言特性实证研究 [D]. 南京: 南京大学, 2016: 2-4.
- [21] 何丽娟, 甘淑, 陈应跃. 基于 Python 语言的空间数据处理 [J]. 价值工程, 2014(36): 207-209.
- HE Lixian, GAN Shu, CHEN Yingyue. Programming language python for data processing [J]. *Value Engineering*, 2014(36): 207-209.
- [22] 王路希, 邓吉秋, 李娜, 等. 基于 Python 的开源 GIS 应用开发 [J]. 科技创新与生产力, 2015(6): 51-53.
- WANG Luxi, DENG Jiqiu, LI Na, *et al.* The development and application of open-source GIS based on python [J]. *Applied Technology*, 2015(6): 51-53.
- [23] YUE T, GAO X, GAO J, *et al.* Emission characteristics of NO_x, CO, NH₃, and VOCs from gas-fired industrial boilers based on field measurements in Beijing City, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 184: 1-8.
- [24] 张双, 王阿婧, 张增杰, 等. 北京市人为源氨排放清单的初步建立 [J]. 安全与环境学报, 2016, 16(2): 242-245.
- ZHANG Shuang, WANG Ajing, ZHANG Zengjie, *et al.* On creating an anthropogenic ammonia emission inventory in capital Beijing [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(2): 242-245.
- [25] ZHOU Y, CHENG S, LANG J, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 106: 305-317.
- [26] WANG W, BRUYERE C, DUDA M, *et al.* User's guide for the advanced research WRF (ARW) modeling system version 3.3 [R]. Colorado: National Center for Atmospheric Research Technical Note, 2011: 115-116.
- [27] 吴志强, 叶锺楠. 基于百度地图热力图的城市空间结构研究: 以上海中心城区为例 [J]. 城市规划, 2016, 40(4): 33-40.
- WU Zhiqiang, YE Zhongnan. Research on urban spatial structure based on Baidu heat map: a case study on the central city of Shanghai [J]. *City Planning Review*, 2016, 40(4): 33-40.
- [28] 于丙辰, 陈刚. 基于腾讯区域热力图的庐山核心景区客流研究 [J]. 国土与自然资源研究, 2017(2): 83-89.
- YU Bingchen, CHEN Gang. Research on visitor flows of lushan core scenic area using Tencent regional heatmap [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2017(2): 83-89.
- [29] 赵文慧, 姜磊, 张立坤, 等. 北京平原区平房冬季燃煤量及污染物排放估算 [J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 859-867.
- ZHAO Wenhui, JIANG Lei, ZHANG Likun, *et al.* Estimation of coal consumption and related contamination emission in the plain area around Beijing during winter season [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3): 859-867.
- [30] 王丽涛, 张普, 杨晶, 等. CMAQ-DDM-3D 在细颗粒物 (PM_{2.5}) 来源计算中的应用 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1355-1361.
- WANG Litao, ZHANG Pu, YANG Jing, *et al.* Application of CMAQ-DDM-3D in the source analysis of fine particulate matter (PM_{2.5}) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(5): 1355-1361.
- [31] NAPELENOK S L, COHAN D S, HU Y, *et al.* Decoupled direct 3D sensitivity analysis for particulate matter (DDM-3D/PM) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(32): 6112-6121.