海南省大气污染源排放清单及环境影响研究*

崔建升[1]　雷团团[1,2]　伯　鑫[2]　伍鹏程[3]　屈加豹[2]　高　爽[4]　田　飞[5]　李时蓓[2#]

(1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北　石家庄 050018;2.生态环境部环境工程评估中心,北京 100012;
3.生态环境部环境规划院,北京 100012;4.南京大学环境规划设计研究院股份公司,江苏　南京 210093;
5.山东省环境保护科学研究设计院有限公司,山东　济南 250013)

摘要　基于海南省 2016 年工业环境统计数据,通过自下而上的方法建立海南省 2016 年工业大气污染源排放清单,并利用中国多尺度排放清单模型(MEIC)排放清单进行背景源补充,使用 CALPUFF 模型进行大气污染模拟。污染物排放清单结果显示,2016 年海南省 SO_2、NO_x、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}、黑碳(BC)、有机碳(OC)、挥发性有机物(VOCs)和 NH_3 的排放量分别为 1.50×10^4、5.10×10^4、4.56×10^5、2.34×10^4、2.10×10^4、3.50×10^3、1.20×10^4、4.96×10^4、6.50×10^4 t,其中 SO_2 主要排放源为化石燃料固定燃烧源(分担率 66.67%),NO_x 主要排放源为交通源(分担率 51.18%),CO、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 主要排放源为生活源(分担率分别 59.01%、81.28%和 87.62%),VOCs 主要排放源为工业溶剂使用源(分担率 75.91%),NH_3 主要排放源为农业源(分担率 93.54%)。排放量较大的区域集中在儋州市、澄迈县一带。SO_2、NO_x 年均最大浓度均出现在海口市,PM_{10}、$PM_{2.5}$ 年均最大浓度均出现在定安县。交通源对全省污染物浓度贡献突出,工业源虽然对颗粒物浓度贡献率较低,但仍需加强 $PM_{2.5}$ 治理。

关键词　排放清单　CALPUFF　空气质量　海南省　来源解析

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.06.001

Studies on air pollutant emission inventory and environmental impact in Hainan Province

CUI Jiansheng[1], *LEI Tuantuan*[1,2], *BO Xin*[2], *WU Pengcheng*[3], *QU Jiabao*[2], *GAO Shuang*[4], *TIAN Fei*[5], *LI Shibei*[2]. (1. *School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei* 050018; 2. *Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing* 100012; 3. *Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing* 100012; 4. *Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing Jiangsu* 210093; 5. *Shandong Academy of Enviromental Sciences Co., Ltd., Jinan Shandong* 250013)

Abstract: Based on the industrial environmental statistics of Hainan Province in 2016, combined with the MEIC background emission inventory, an air pollutant emission inventory of Hainan Province in 2016 was established through a bottom-up approach. CALPUFF model was used to simulate the dispersion of air pollutants. The results of emission inventory showed that the total emission of SO_2, NO_x, CO, $PM_{2.5}$, PM_{10}, BC, OC, VOCs and NH_3 in Hainan Province in 2016 were 1.50×10^4, 5.10×10^4, 4.56×10^5, 2.34×10^4, 2.10×10^4, 3.50×10^3, 1.20×10^4, 4.96×10^4 and 6.50×10^4 t, respectively. Stationary combustion sector (sharing rate of 66.67%) was the largest emission source for SO_2, while the transportation sector (sharing rate of 51.18%) was the main emission source for NO_x. The resident sector was the main emission source for CO, PM_{10} and $PM_{2.5}$ (sharing rate of 59.01%, 81.28% and 87.62%, respectiveiy), while solvent using sector (sharing rate of 75.91%) was the largest emission source for VOCs. The agriculture sector (sharing rate of 93.54%) was the main emission for NH_3. The major areas with emission were concentrated in Danzhou City and Chengmai County. Haikou City had the largest annual concentration for SO_2 and NO_x, and Ding'an County had the largest annual concentration for PM_{10} and $PM_{2.5}$. Transportation sector had made a significant contribution to the concentration of pollutants. Although industrial sector had a low contribution rate to the concentration of particulate matter, $PM_{2.5}$ governance still needed to be strengthened.

Keywords: emission inventory; CALPUFF; air quality; Hainan Province; source apportionment

排放清单是在一定的研究区域及时间内,各种　类别污染源排放到大气中的污染物的集合[1]。排放

第一作者:崔建升,男,1966 年生,博士,教授,主要从事环境监测技术研究。# 通讯作者。

*国家重点研发计划项目(No.2016YFC0208101);国家自然科学基金资助项目(No.71673107);生态环境部环境工程评估中心创新科研项目(No.2019-10)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

清单作为空气质量模型输入数据源及大气污染控制的基础，已有大量学者在不同尺度、地域、行业对排放清单作出研究[2-8]。海南省空气较为洁净，但 2016 年较 2015 年重污染天数增加[9]，海南省工业企业数量少，但近年来海南省在建设国际旅游岛的进程中主张开放发展。人口的自然增长、迁移流动和未来工业的增长必然会对海南省资源环境、空气质量带来挑战，因此开展海南省大气污染源排放清单研究对该省强化环境污染防治、优化环境空气质量意义重大。

国内大多数排放清单研究将研究对象集中在京津冀、长三角及珠三角等地区。王淑兰等[10]、伯鑫等[11]以排放清单为基础，利用 CALPUFF 模型模拟了珠三角地区城市间污染物相互输送的变化规律及 2010 年京津冀地区火电企业污染情况。QI 等[12]、ZHENG 等[13]、吴晓璐[14]分别采用自下而上的方法建立了 2013 年京津冀、2006 年珠三角及 2004 年长三角地区高分辨率大气污染物排放清单，揭示了京津冀、珠三角、长三角地区污染物排放的时空分布特征。而海南省大气研究多停留在 $PM_{2.5}$、PM_{10} 等特定污染物分析上[15-17]，多污染物的区域尺度大气污染物排放清单及环境影响研究较少，无法获取海南省环境本底情况及污染物变化规律。

针对上述问题，本研究基于 2016 年海南省工业环境统计数据，以中国多尺度排放清单模型（MEIC）排放清单（交通源、生活源、农业源）[18]作为背景源补充，建立了海南省 2016 年大气污染源物排放清单，包括 SO_2、NO_x、CO、PM_{10}、$PM_{2.5}$、黑碳（BC）、有机碳（OC）、挥发性有机物（VOCs）、NH_3，并采用 CALPUFF 模型模拟分析了海南省大气污染物浓度水平，为海南省大气污染防治提供数据支撑。

1　材料与方法

1.1　研究对象及数据来源

海南省总面积 3.54 万 km^2，海域面积约 200 万 km^2，2016 年全省地区生产总值 4 044.51 亿元，常住人口 917.13 万。本研究以海南省全省作为研究区域，以 2016 年作为研究基准年。

工业源排放清单由工艺过程源、化石燃料固定燃烧源和工业溶剂使用源 3 部分组成，其中火电行业排放清单基于海南省在线监测数据（CEMS）建立，其余工业行业清单基于环境统计中规模以上企业调查数据建立（企业位置见图 1）。

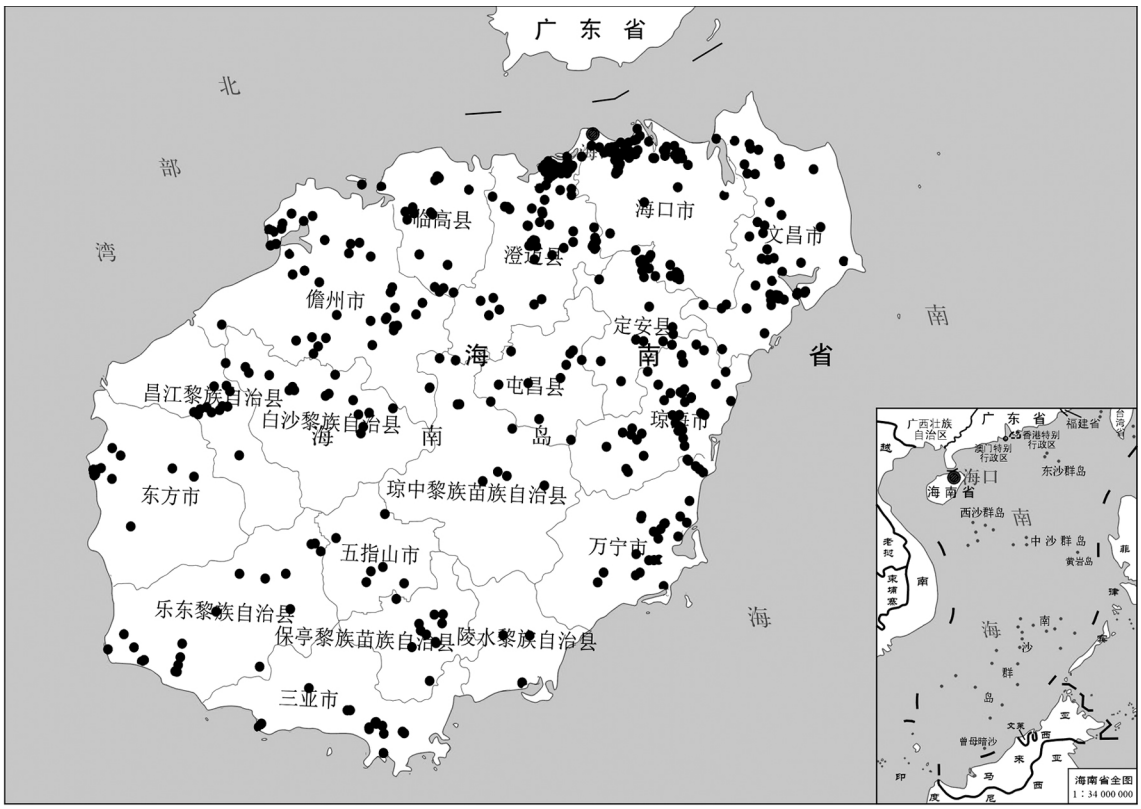


图 1　海南省工业企业分布

Fig.1　Distribution of industrial enterprises in Hainan Province

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

各源类估算方法如下：

（1）工艺过程源包括医药制造、橡胶和塑料制品、非金属矿物制品、食品制造、造纸等，工艺过程源排放量采用排放因子法[19]进行估算，公式见式（1）。其中，排放因子根据文献[20]至文献[23]获得。

$$E=A\times EF\times(1-\eta)/1\ 000 \tag{1}$$

式中：E 为污染物排放量，t；A 为排放源所对应的工业产品产量，t；EF 为污染物的排放系数，g/kg；η 为末端控制技术对污染物的去除效率，%。

（2）化石燃料固定燃烧源中，火电部分排放量来自本团队全国火电排放清单成果[24-25]，其他部分采用排放因子法估算。燃煤源 SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC、OC 排放因子采用物料平衡法获得，如式（2）至式（5）所示，非燃煤源和燃煤源的 NO_x、CO、VOCs、NH_3 排放因子参考文献[20]至文献[23]。

$$EF_{SO_2}=2\times S\times(1-Sr)\times 1\ 000 \tag{2}$$

$$EF_{PM}=Aar\times(1-ar)\times f_{PM}\times 1\ 000 \tag{3}$$

$$EF_{BC}=EF_{PM_{2.5}}\times f_{BC} \tag{4}$$

$$EF_{OC}=EF_{PM_{2.5}}\times f_{OC} \tag{5}$$

式中：EF_{SO_2} 为 SO_2 排放因子，g/kg；S 为平均燃煤收到基硫分比例（以质量分数计，下同），%；Sr 为煤炭中硫分进入底灰的比例，%；EF_{PM} 为颗粒物（$PM_{2.5}$ 或 PM_{10}）排放因子，g/kg；Aar 为平均燃煤收到灰分比例，%；ar 为燃料中灰分进入底灰的比例，%；f_{PM} 为排放源产生某粒径范围颗粒物占总颗粒物的比例，%；EF_{BC} 为 BC 排放因子，g/kg；$EF_{PM_{2.5}}$ 为 $PM_{2.5}$ 排放因子，g/kg；EF_{OC} 为 OC 排放因子，g/kg；f_{BC} 和 f_{OC} 分别是 BC 和 OC 占 $PM_{2.5}$ 比例，%。

（3）工业溶剂使用源主要包括工业喷涂、油墨印刷以及其他溶剂使用等，采用排放因子法估算其排放量（见式（6））。

$$E=Q\times EF'/1\ 000 \tag{6}$$

式中：Q 为溶剂消费量，t；EF' 为污染物排放系数，g/kg。

因未获得海南省详细的生活源、交通源、农业源等基础资料，故采用 MEIC 排放清单中的生活源、交通源、农业源作为数据补充，并根据研究区域内人口数量、土地利用类型等资料使用地理信息系统可视化软件将 MEIC 清单数据分配至网格中[26-27]。

1.2　空气质量模型参数设置

海南省地理位置特殊，海洋性气候和复杂风场变化对其影响较大，CALPUFF 模型具有生成和处理复杂三维风场及复杂地形算法的能力[28-29]，因此采用 CALPUFF 模型能更好地模拟海南省污染物扩散变化规律。CALPUFF 模型应用三维非稳态拉格朗日扩散模式（包括 CALMET 和 CALPUFF 等模块），能很好地处理长距离（50 km 以上）污染物运输，也是我国生态环境部推荐的模型之一，在区域环境影响研究中应用广泛[30-32]。

本研究使用 CALPUFF 模型 6.42 版本模拟海南省大气污染物排放对环境的影响，将工业源作为点源，交通源和生活源作为面源模拟；化学转化同时考虑无机和有机气溶胶的化学转化，更全面地模拟二次气溶胶的形成，并将 VOCs 排放分担到甲苯、二甲苯、萜烯、长链烷烃和多环芳烃 5 种物质中，因本研究未考虑天然源排放，故未进行萜烯输入[33]1578；CALPUFF 模块输出选项中勾选了源贡献，可根据各污染源所在地区及部门分析污染物浓度贡献。参数设置见表 1。本研究 CALMET、CALPUFF 等模块的参数设置，在已有研究项目中得到了应用，取得了很好的模拟效果[33]1577,[34]430-431,[35]。

表 1　CALPUFF 模型参数设置

Table 1　Parameter setting list of CALPUFF model

模块	参数	设置
CALMET	地形	90 m 美国地质勘探局（USGS）地形数据
	土地利用类型	30 m 全国土地利用数据
	气象	WRF 中尺度气象数据
CALPUFF	坐标系	通用横轴墨卡托投影（UTM）
	地形高程	90 m USGS 地形数据
	模拟范围	328 km×248 km
	水平网格分辨率	4 km
	垂直层次	10
	化学转化机制	RIVAD+ISORROPIA+CalTechSOA
	计算步长	1 h
	排气筒参数（高度、内径、烟气流速等）	中国环境评价网数据库数据

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 结果与讨论

2.1 大气污染物排放清单

2.1.1 总体排放量分析

2016 年，海南省 SO_2、NO_x、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}、BC、OC、VOCs、NH_3 年排放量分别为 1.50×10^4、5.10×10^4、4.56×10^5、2.34×10^4、2.10×10^4、3.50×10^3、1.20×10^4、4.96×10^4、6.50×10^4 t（见表 2）。SO_2 排放主要来自于化石燃料固定燃烧源，分担率为 66.67%，海南省已完成火电行业超低排放改造，而非电行业末端治理设备升级仍未完成，致使非电行业化石燃料固定燃烧源 SO_2 排放较高；NO_x 主要排放源为交通源，分担率为 51.18%；CO、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的主要排放源为生活源，分担率分别为 59.01%、81.28% 和 87.62%；VOCs 的主要排放源为工业溶剂使用源，分担率达 75.91%；NH_3 最大排放源为农业源，分担率为 93.54%。

2.1.2 工业源排放量分析

工业源 SO_2、VOCs 排放在全省大气总排放中占比较大，分担率分别为 89.33% 和 98.58%；NH_3 排放量不高，分担率仅为 2.15%。但由于海南省各区域工业发展定位不同，不同行业及地区污染物排放有很大的差异，因此掌握行业及地区排放特征很有必要。

各工业行业排放情况如表 3 所示。SO_2 的主要排放来源为造纸和火电行业，两者排放的 SO_2 占工业排放总量的 70% 以上；NO_x 主要来自造纸，火电和石油、煤炭及其他燃料加工行业的排放，3 者总分担率达 81.39%；CO 以非金属矿物制品行业的排放较为显著，分担率为 51.71%；PM_{10} 主要排放源也为非金属矿物制品行业，分担率达 62.97%；$PM_{2.5}$ 则以火电与非金属矿物制品行业排放为主，分担率分别为 44.23% 和 40.93%；VOCs 的主要排放来源为橡胶和塑料制品行业，分担率超过 40%，而海南省化工行业生产量急剧下降[36]，因此化学原料和化学制品制造行业 VOCs 排放量相对较低，分担率仅为 17.27%。

海南省各地区工业源主要大气污染物排放分布见图 2 和图 3。其中，儋州市和东方市整体规划以建设工业园区、大力发展油气开采和加工行业为主，火电，非金属矿物制品，石油、煤炭及其他燃料加工以及橡胶和塑料制品行业分布相对集中，SO_2、NO_x、CO、PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 排放量较大；澄迈县和海口市化学原料和化学制品、橡胶和塑料制品以及食品制造行业等分布相对集中，VOCs 和 NH_3 排放量较大。

表 2 海南省 2016 年大气污染物排放量

Table 2 Air pollutant emission of Hainan Province in 2016 10^4 t

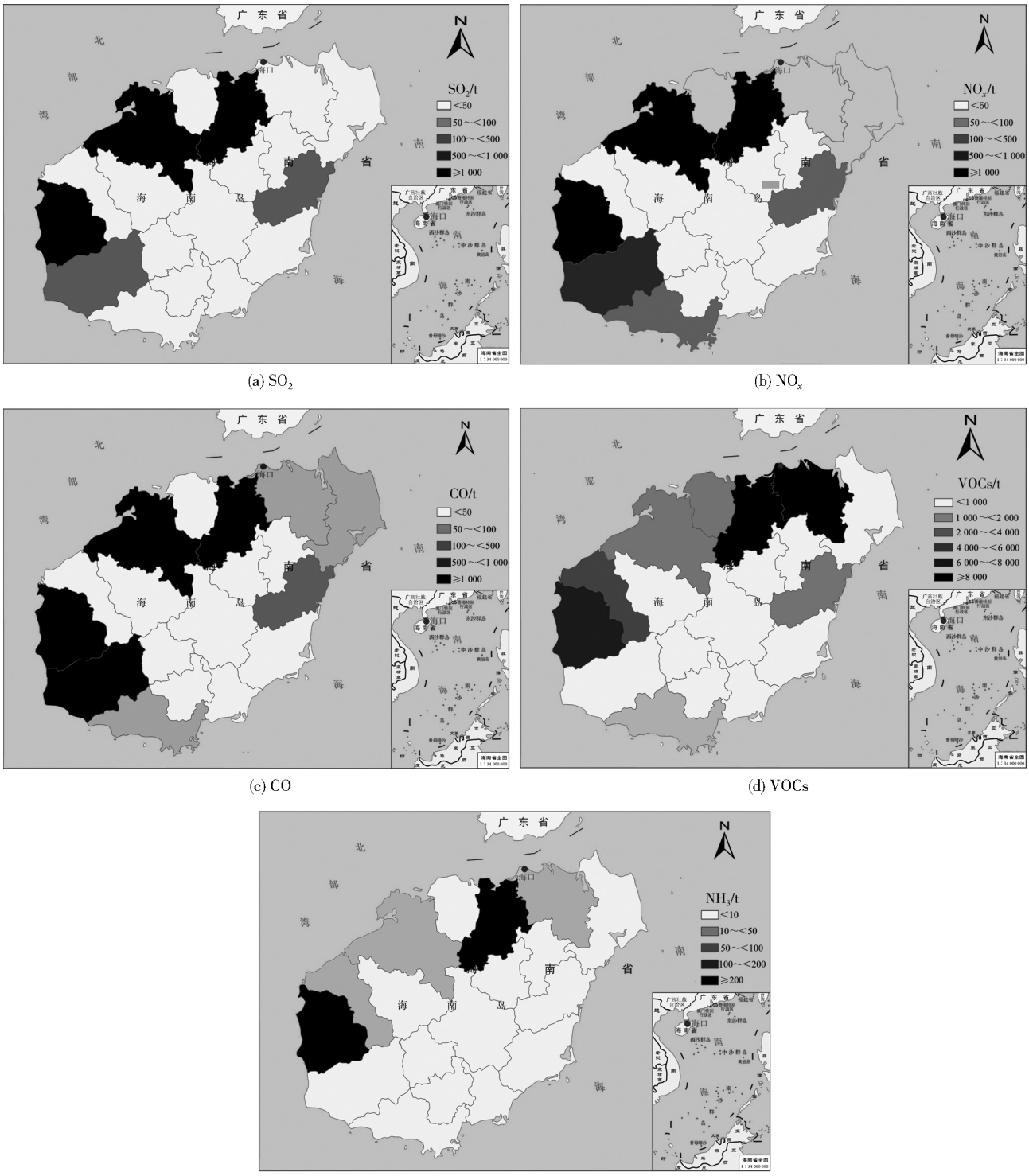
项目	SO_2	NO_x	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC	VOCs	NH_3
化石燃料固定燃烧源	1.00	1.61	2.45	0.08	0.05	0	0	0.18	0
工艺过程源	0.34	0.42	4.61	0.19	0.06	0.01	0.01	0.94	0.14
工业溶剂使用源	0	0	0	0	0	0	0	3.75	0
交通源	0.12	2.61	11.62	0.16	0.16	0.08	0.03	0.03	0.02
生活源	0.04	0.46	26.90	1.91	1.84	0.26	1.16	0.04	0.26
农业源	0	0	0	0	0	0	0	0	6.08
合计	1.50	5.10	45.58	2.34	2.10	0.35	1.20	4.94	6.50

表 3 工业源各行业污染物排放量

Table 3 Emission of industrial sectors' air pollutant t

工业行业	SO_2	NO_x	CO	PM_{10}	$PM_{2.5}$	BC	OC	VOCs	NH_3
石油、煤炭及其他燃料加工	2 996.64	6 638.34	3 239.45	56.31	22.11	8.83	1.78	2 175.06	7.38
造纸	4 833.33	4 833.96	12 971.85	143.90	71.79	28.71	5.75	3 253.00	12.37
食品制造	66.32	106.16	91.65	2.06	0.72	0.29	0.06	749.94	0.28
医药制造	5.72	16.59	14.80	0.15	0.06	0.02	0.01	169.99	0.08
化学试剂和助剂制造	4.71	7.57	6.55	0.15	0.05	0.02	0	1 485.78	0.02
化学原料和化学制品制造	347.60	2 946.19	3 039.60	40.28	29.81	11.74	2.52	8 418.65	1 410.30
农副食品加工	140.60	231.00	200.76	5.63	1.93	0.77	0.13	59.27	0.58
橡胶和塑料制品	2.72	8.37	7.63	0.08	0.03	0.01	0.00	20 687.56	0.03
非金属矿物制品	279.41	415.77	36 510.54	1 701.65	441.14	47.45	43.03	1 693.88	3.60
酒、饮料和精制茶制造	13.24	35.03	33.15	0.42	0.15	0.06	0.01	1 069.70	0.05
其他制造	4.96	10.56	9.67	0.16	0.05	0.02	0.00	8 210.28	0.02
采矿	0.04	0.07	0.06	66.53	33.26	13.31	2.66	0.01	0
黑色金属冶炼和压延	0	1.70	1.82	0	0	0	0	409.84	0
火电	4 672.13	5 050.42	14 479.08	684.92	476.80	3.90	0.21	354.87	1.01

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) SO_2　(b) NO_x

(c) CO　(d) VOCs

(e) NH_3

图 2　海南省各市(县)气态污染物排放情况

Fig.2　Emissions of gaseous pollutants in cities (districts or counties) of Hainan Province

2.2　大气环境影响分析

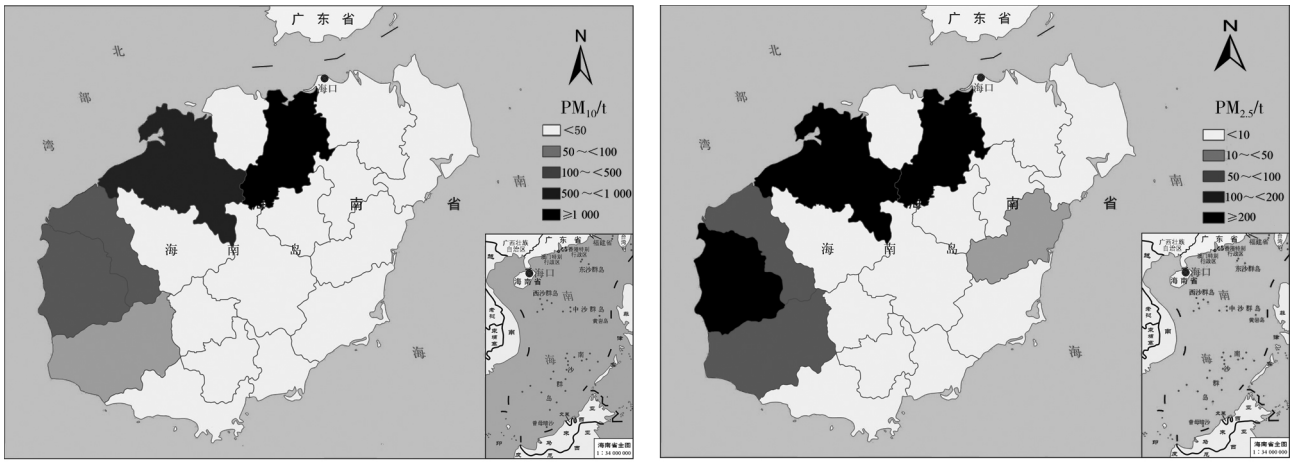
2.2.1　气象场验证

气象场的验证方法参考文献[34]，选取地面气象监测站东方站(108.617°E，19.100°N)的气象数据(气温、风速)作为模拟气象场验证资料，评估CALMET模块模拟值与监测值的准确度。气温、风速的模拟值和监测值接近(见图4)，相关系数分别为0.82、0.81，拟合效果相对较好，此验证结果与阚慧等[34]433的验证结果相近。

2.2.2　大气环境影响分析

图5展示了海南省SO_2、NO_x、PM_{10}与$PM_{2.5}$模拟年均浓度分布情况(由于火电行业的浓度贡献较

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) PM_{10}　　(b) $PM_{2.5}$

图 3　海南省各市(县)颗粒物排放情况

Fig.3　Emissions of particulate matters in cities (districts or counties) of Hainan Province

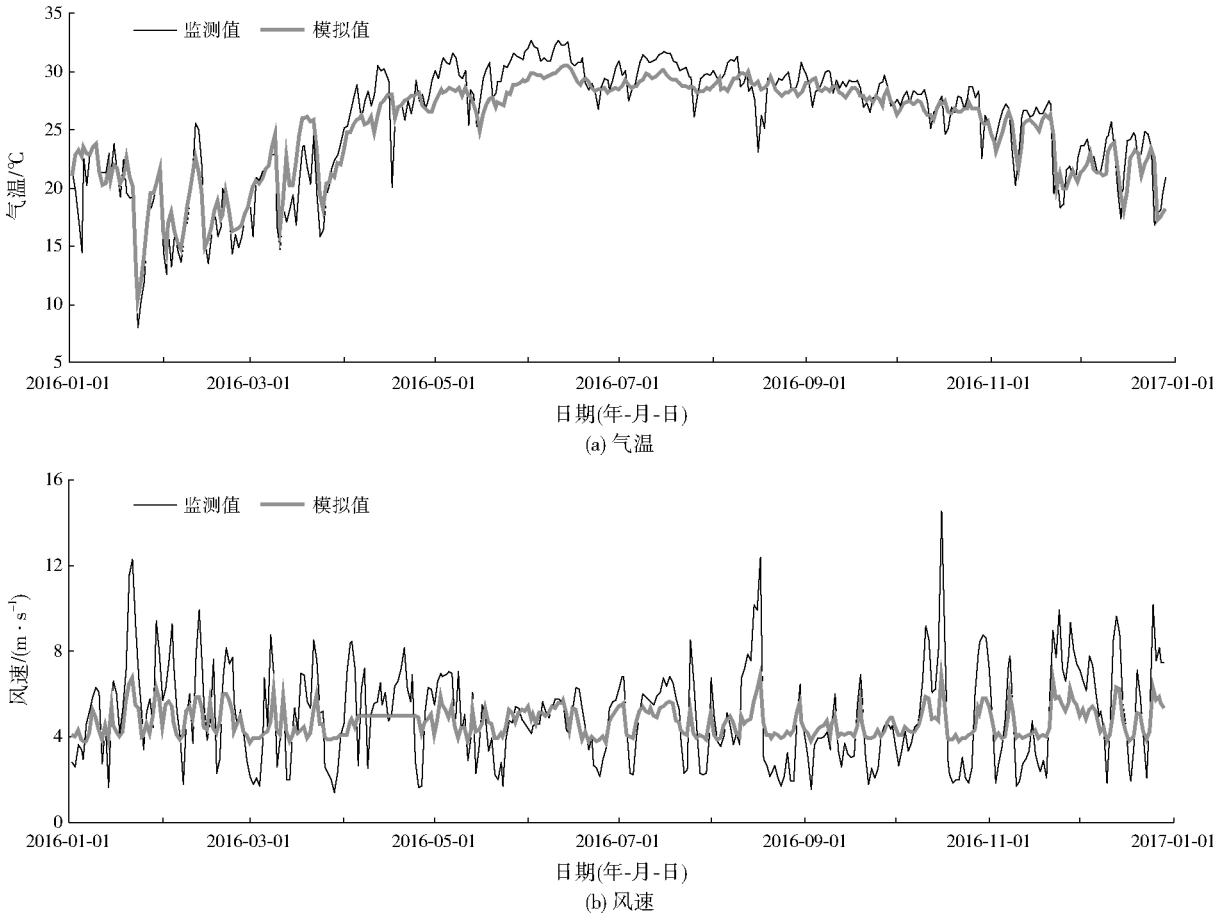
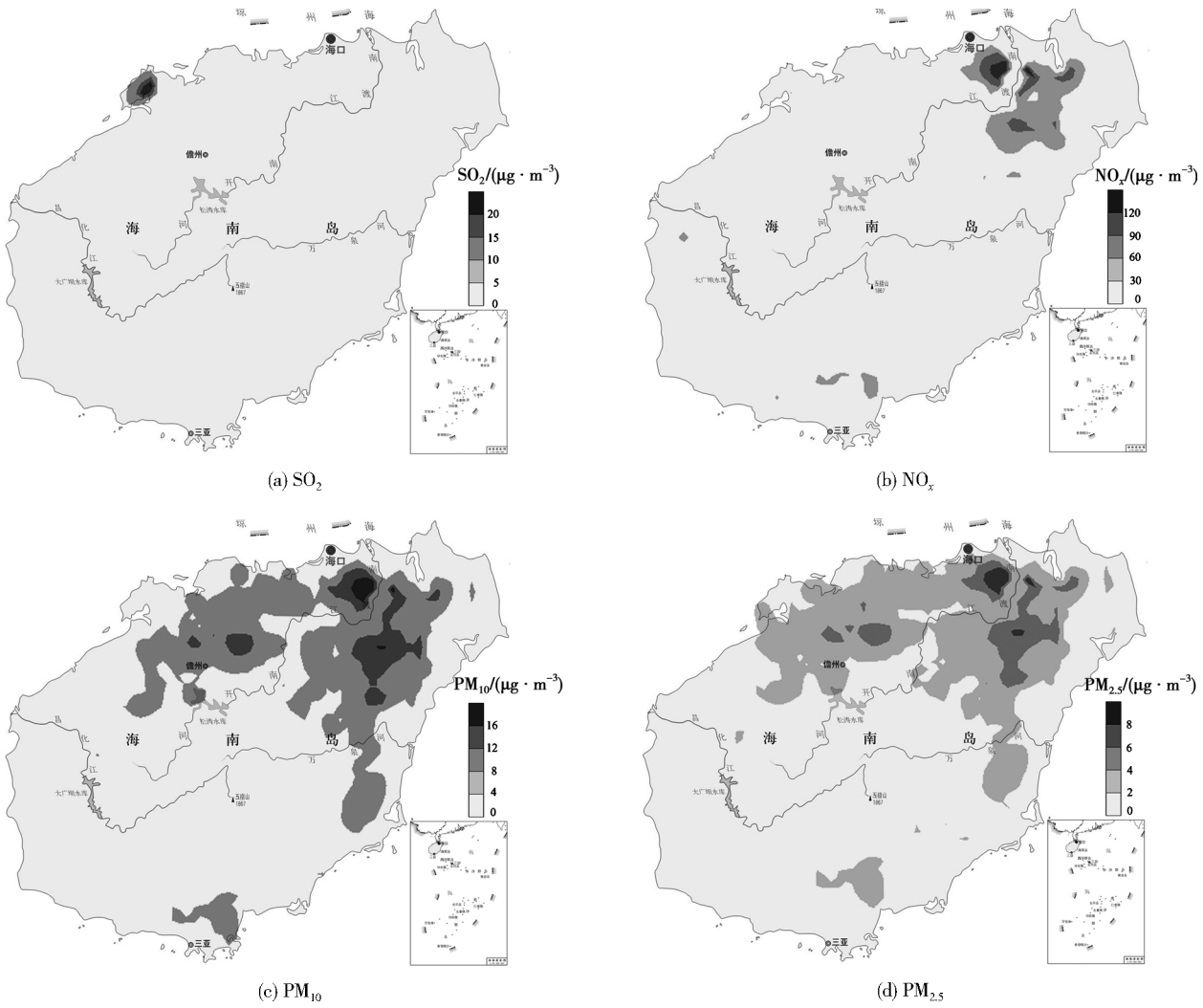


图 4　气象要素模拟值与监测值对比

Fig.4　Comparison of simulated values of meteorological elements with monitored values

小[34]433-434，未将火电纳入工业源分析)，结果显示，全省 SO_2 年均质量浓度为 0.56 μg/m³，浓度高值区域主要分布在儋州市的西部地区，但 SO_2 年均质量浓度最高的城市为海口市(1.34 μg/m³)；全省 NO_x 年均质量浓度为 9.58 μg/m³，浓度高值区集中在海口市及周边地区，其中海口市 NO_x 年均质量浓度最高，为 32.8 μg/m³；全省 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度分别为 3.13、1.72 μg/m³，浓度高值区主要分布在海口市、儋州市中部、临高县西南部以及定安县北部地区，PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度最高的地区均为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) SO_2　(b) NO_x　(c) PM_{10}　(d) $PM_{2.5}$

图 5　海南省 SO_2、NO_x、PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 模拟年均质量浓度分布

Fig.5　The distribution of annual average simulation concentrations of SO_2, NO_x, PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Hainan Province

定安县(分别为 6.62、3.42 μg/m³)。二次污染物中，二次有机气溶胶(SOA)、硫酸盐、硝酸盐均集中分布在西部地区，浓度最高的地区分别为临高县、儋州市和海口市(见图 6)。

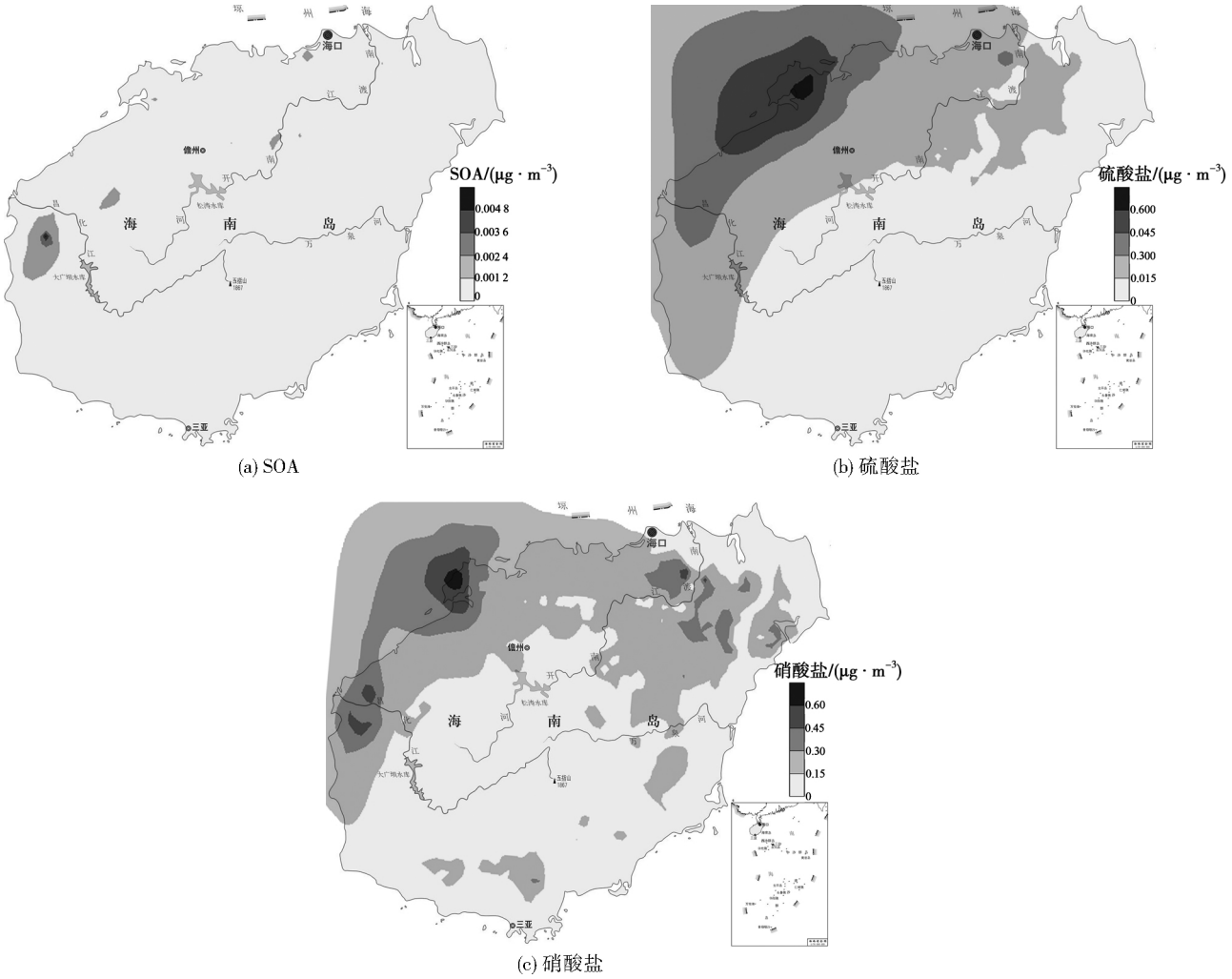
$PM_{2.5}$ 浓度贡献中，一次排放的 $PM_{2.5}$ 及二次转化的 SOA、硫酸盐、硝酸盐贡献率分别为 79.27%、0.59%、2.48%、17.66%。海南省工业化程度较低，能源消耗量远低于其他省份，因此二次无机盐浓度较其他沿海城市低。从一次排放和二次转化的污染物在 $PM_{2.5}$ 浓度中贡献率可看出，一次排放的 $PM_{2.5}$ 是海南省 $PM_{2.5}$ 的主要贡献源，其次二次无机气溶胶(硫酸盐、硝酸盐)贡献远高于 SOA，因此需加大对硫酸盐、硝酸盐等污染前体物的控制。受中部高四周低地形及区域传输的影响，海南省污染物地区浓度贡献与地区排放量分布不一致。

各地区主要污染物的污染浓度贡献情况如表 4 和表 5 所示。SO_2 浓度以交通源和工业源贡献为主，且交通源＞工业源，在海口市、儋州市和东方市等地区两者贡献率总和均在 95%以上。NO_x 浓度在各地区均以交通源贡献最为突出，其次为生活源、工业源，尤以海口市交通源贡献最为明显，贡献率达 97.8%。PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 浓度均以生活源贡献最为突出，其次为交通源、工业源，其中昌江县生活源对当地 PM_{10} 浓度贡献率最高，为 82.1%；临高县生活源对当地 $PM_{2.5}$ 浓度贡献率最高，达 71.9%。可见，海南省作为旅游城市，机动车流动量大，造成交通源对全省污染物浓度贡献突出，值得关注的是工业源虽然对颗粒物浓度贡献率较低，但对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献率远超过 PM_{10}，因此工业行业仍需加强 $PM_{2.5}$ 治理。

2.2.3　不确定性分析

本研究存在的不确定性主要如下：(1)清单中工业源活动水平数据中可能有一定数量的企业未纳入统计；(2)研究仅限考虑海南省人为源及本地污染物排放状况，未考虑天然源、外地传输等对污染物浓度

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) SOA　(b) 硫酸盐　(c) 硝酸盐

图 6　海南省二次污染物模拟年均质量浓度分布

Fig.6　The distribution of annual average simulation concentrations of secondary pollutants in Hainan Province

表 4　海南省各市(县)SO_2与NO_x模拟贡献率

Table 4　Annual average simulation concentration of SO_2 and NO_x contribution rates in cities (districts or counties) of Hainan Province

市(县)	SO_2			NO_x		
	工业源/%	交通源/%	生活源/%	工业源/%	交通源/%	生活源/%
海口市	10.4	86.6	3.0	0.6	97.8	1.6
文昌市	12.6	83.1	4.3	0.6	97.0	2.4
儋州市	78.4	18.7	2.9	14.4	79.9	5.7
琼海市	11.3	80.6	8.1	0.5	94.9	4.6
东方市	76.8	20.5	2.7	35.2	61.6	3.2
三亚市	11.1	85.9	3.0	2.1	95.5	2.3
万宁市	16.7	79.0	9.3	0.5	93.7	5.8
五指山市	29.0	64.3	6.7	1.7	94.1	4.2
临高县	57.4	36.1	6.5	5.0	87.7	7.3
澄迈县	55.8	38.6	5.6	6.3	88.1	5.6
定安县	8.6	86.2	5.2	0.5	96.7	2.8
屯昌县	21.9	70.4	7.7	1.2	93.7	5.1
白沙县	57.6	36.8	5.6	5.5	88.8	5.7
昌江县	11.3	80.6	8.1	25.0	68.1	6.9
乐东县	41.4	51.6	7.0	4.4	91.2	4.4
保亭县	8.0	87.8	4.2	0.4	96.6	3.0
陵水县	13.0	80.8	6.2	0.6	95.8	3.6
琼中县	27.4	66.8	5.8	1.6	94.1	4.3

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表5　海南省各市(县)颗粒物模拟贡献率

Table 5　Annual average simulation concentration of particulate matters contribution rates in cities (districts or counties) of Hainan Province

市(县)	PM_{10}			$PM_{2.5}$		
	工业源/%	交通源/%	生活源/%	工业源/%	交通源/%	生活源/%
海口市	0.1	45.5	54.4	3.1	46.6	50.3
文昌市	0.2	38.5	61.3	2.8	41.0	56.2
儋州市	0.1	22.0	77.9	9.5	22.0	68.5
琼海市	0.1	26.8	73.1	2.4	29.3	68.3
东方市	0.1	24.7	75.3	18.0	23.9	58.1
三亚市	0.1	47.1	52.8	4.0	48.5	47.5
万宁市	0.2	25.2	74.6	2.8	28.1	69.1
五指山市	0.1	28.3	71.6	5.5	30.6	63.9
临高县	0.1	21.2	78.7	6.1	22.0	71.9
澄迈县	0.1	21.8	78.1	7.9	22.7	69.4
定安县	0.2	35.0	64.8	1.6	37.1	61.3
屯昌县	0.1	25.5	74.4	2.9	28.1	69.0
白沙县	0.1	23.3	76.6	9.0	24.1	66.9
昌江县	0.1	17.7	82.1	17.9	18.0	64.1
乐东县	0.1	22.0	77.9	7.6	27.4	65.0
保亭县	0.2	40.0	59.8	2.5	41.9	55.6
陵水县	0.1	30.7	69.2	3.6	33.5	62.9
琼中县	0.1	29.5	70.4	32.1	4.6	63.3

的影响，因此可能会造成模拟浓度贡献的差异[37]；(3)模型模拟本身存在一定的误差。

3　结论与建议

(1) 2016年海南省大气污染物排放清单中SO_2、NO_x、CO、$PM_{2.5}$、PM_{10}、BC、OC、VOCs、NH_3年排放量分别为1.50×10^4、5.10×10^4、4.56×10^5、2.34×10^4、2.10×10^4、3.50×10^3、1.20×10^4、4.96×10^4、6.50×10^4 t。工业源SO_2、VOCs分担率较高，分别为89.33%和98.58%。儋州市和东方市SO_2、NO_x、CO、PM_{10}与$PM_{2.5}$排放量较大；澄迈县和海口市VOCs和NH_3排放量较大。

(2) 排放量与排放浓度分布不一致。定安县在各项污染物排放量均较小，但受中部高四周低地形、海陆风等气象条件及区域传输等的影响，颗粒物浓度全省最高，因此各地需加强区域联防联控，强化空气质量保障体系。

(3) 海南省SO_2浓度贡献为交通源＞工业源＞生活源，NO_x浓度贡献为交通源＞生活源＞工业源，颗粒物的浓度贡献为生活源＞交通源＞工业源，总体来说工业源对海南省颗粒物平均浓度贡献相对较小，但在颗粒物中对$PM_{2.5}$的贡献不容小视，宜发展低污染低耗能的新型工业以降低空气质量恶化的风险。

参考文献：

[1] 郑君瑜，王水胜，黄志炯，等.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，2013.

[2] 日本国立环境研究所.亚洲地区排放清单[EB/OL].[2019-05-09]. http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d4/emission.htm.

[3] 仇丽萍.城市大气污染物排放清单建立及评估[D].南京：南京大学，2015.

[4] 王锦，吉奕康.北京市主要大气污染源清单及火电厂排放污染物对雾霾天气的影响[J].北京交通大学学报，2015，39(1)：78-82.

[5] 张骥，徐媛，刘茂辉，等.天津市北辰区大气污染物小尺度精细化源排放清单[J].中国环境监测，2018，34(2)：20-27.

[6] 杨静.珠江三角洲2012年大气排放源清单建立与时空分配改进研究[D].广州：华南理工大学，2015.

[7] 李佳，张晓郁，孙庆宇.唐山市钢铁行业大气污染物排放清单建立[J].中国环境监测，2016，32(5)：30-34.

[8] 雷宇，贺克斌，张强，等.基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J].环境科学，2008，29(8)：2366-2371.

[9] 海南省生态环境保护厅.2016年海南省环境状况公报[R].海口：海南省生态环境保护厅，2017.

[10] 王淑兰，张远航，钟流举，等.珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J].中国环境科学，2005，25(2)：133-137.

[11] 伯鑫，王刚，温柔，等.京津冀地区火电企业的大气污染影响[J].中国环境科学，2015，35(2)：364-373.

[12] QI J，ZHENG B，LI M，et al.A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region，China[J]. Atmospheric Environment，2017，170：156-168.

[13] ZHENG J Y，ZHANG L J，CHE W W，et al.A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region，China and its uncertainty assessment[J].Atmospheric Environment，2009，43(32)：5112-5122.

[14] 吴晓璐.长三角地区大气污染物排放清单研究[D].上海：复旦大学，2009.

(下转第665页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3　结　论

（1）2017 年嘉兴市人为源 SO_2、NO_x、CO、VOCs、NH_3、TSP、PM_{10}、$PM_{2.5}$、BC 和 OC 排放总量分别为 15 224、60 663、102 600、93 256、26 266、118 923、70 367、19 024、941、1 622 t。

（2）各县（市、区）排放的重点污染物不同。SO_2 和 CO 排放量港区最大，NO_x 排放量平湖市最大，VOCs 和 OC 排放量海宁市最大，NH_3 和颗粒物排放量桐乡市最大，BC 排放量南湖区最大。

（3）对于大气污染中普遍关注的 6 种污染物，化石燃料固定燃烧源中的电力供热是 SO_2 的最大排放源，移动源中的柴油车是 NO_x 的最大排放源，工艺过程源中的水泥生产是 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的最大排放源，工艺过程源中的石油化工是 VOCs 的最大排放源，农业源中的氮肥施用是 NH_3 的最大排放源。

（4）SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 和 VOCs 排放的重点源主要集中在各县（市、区）的工业园区或工业集聚区，而 NH_3 的排放空间分布相对比较分散。

参考文献：

[1] USEPA.Air emissions inventories[EB/OL].[2019-07-01].https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/2017-national-emissions-inventory-nei-data.

[2] 伏晴艳.上海市空气污染排放清单及大气中高浓度细颗粒物的形成机制[D].上海：复旦大学，2009.

[3] 王锦，吉奕康.北京市主要大气污染源清单及火电厂排放污染物对雾霾天气的影响[J].北京交通大学学报，2015，39(1)：78-82.

[4] 牟莹莹，郑新梅，李文青，等.南京市工业源大气污染物排放清单的建立[J].环境科学与技术，2017，40(3)：204-210.

[5] 叶贤满，徐昶，洪盛茂，等.杭州市大气污染物排放清单及特征[J].中国环境监测，2015，31(2)：5-11.

[6] 徐冰烨，俞洁，沈叶民.近 10 年浙江省城市环境空气质量变化趋势及影响因素分析[J].环境污染与防治，2017，39(6)：610-615.

[7] 吴建，程文，晁娜.浙江省人为源 VOCs 排放清单[J].上海环境科学，2015，34(2)：60-66.

[8] 吴建，程文，王卫军.浙江省部分地区大气工业污染源排放清单的建立[J].上海环境科学，2015，34(4)：150-153.

[9] 郝欢，万梅，戎宇，等.嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单[J].环境科学，2018，39(11)：4892-4900.

[10] 贺克斌，王书肖，张强，等.城市大气污染物排放清单编制技术手册[M].北京：清华大学出版社，2017.

[11] 顾震宇，滕富华，陆建海，等.浙江省重点行业 VOCs 污染排放源排放量计算方法[R].杭州：浙江省环境保护科学设计研究院，2015.

[12] 关于印发《浙江省工业涂装工序挥发性有机物排放量计算暂行方法》的通知：浙政发〔2017〕19 号[A].

编辑：陈锡超　（收稿日期：2019-07-03）

（上接第 659 页）

[15] 唐晓兰，程水源.海南岛大气污染物扩散特征[J].环境工程，2016，34(7)：93-97.

[16] 周家茂，赵由之，刘随心，等.三亚冬季大气 $PM_{2.5}$ 及碳气溶胶特征与来源分析[J].地球环境学报，2012，3(5)：1060-1065.

[17] 黄春，胡超，唐蓉.海南省废弃物处理温室气体排放估算研究[J].环境科学与管理，2015，40(2)：5-7.

[18] 清华大学.中国多尺度排放清单模型[EB/OL].[2019-05-12].http://www.meicmodel.org/.

[19] 贺克斌.城市大气污染物排放清单编制技术手册 2017[R].北京：清华大学，2017.

[20] 杨强，黄成，卢滨，等.基于本地污染源调查的杭州市大气污染物排放清单研究[J].环境科学学报，2017，37(9)：3240-3254.

[21] 赵斌，马建中.天津市大气污染源排放清单的建立[J].环境科学学报，2008，28(2)：368-375.

[22] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室.第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册[R].北京：国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室，2007.

[23] 潘月云，李楠，郑君瑜，等.广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J].环境科学学报，2015，35(9)：2655-2669.

[24] 崔建升，屈加豹，伯鑫，等.基于在线监测的 2015 年中国火电排放清单[J].中国环境科学，2018，38(6)：2062-2074.

[25] 伯鑫，屈加豹，田军.全国火电排放清单研究[M].北京：中国环境出版集团，2018.

[26] 伍鹏程.临沂市主要大气污染物人群健康效应研究[D].北京：首都经济贸易大学，2018.

[27] 宗亚楠，李王锋，毛磊，等.基于 CAMx 模型的福州市 $PM_{2.5}$ 来源解析[J].环境科学与技术，2018，41(增刊 1)：251-256.

[28] 田飞，伯鑫，薛晓达，等.基于复杂地形-气象场的二噁英污染物沉降研究[J].中国环境科学，2019，39(4)：1678-1686.

[29] HAO J M，WANG L T，SHEN M J，et al.Air quality impacts of power plant emissions in Beijing[J].Environmental Pollution，2007，147(2)：401-408.

[30] 伯鑫，丁峰，徐鹤，等.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述[J].环境监测管理与技术，2009，21(3)：9-13，47.

[31] 伯鑫，马继，李时蓓，等.CALPUFF 大气模型多线程计算及业务系统[R].海口：中国环境科学学会，2016.

[32] 伯鑫，吴忠祥，王刚，等.CALPUFF 模式的标准化应用技术研究[J].环境科学与技术，2014，37(增刊 2)：530-534.

[33] 高爽，伯鑫，马岩，等.基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟[J].环境科学，2019，40(4).

[34] 阚慧，伯鑫，屈加豹，等.2015 年海南省火电行业大气环境影响研究[J].中国环境科学，2019，39(1).

[35] 伯鑫，王刚，田军，等.AERMOD 模型地表参数标准化集成系统研究[J].中国环境科学，2015，35(9)：2570-2575.

[36] 海南省统计局.2017 年海南省统计年鉴[M].北京：中国统计出版社，2018.

[37] JONATHAN I L，JOHN D S，DENNIS H，et al.Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois：model sensitivity and implications[J].Atmospheric Environment，2002，36(6)：1063-1075.

编辑：徐婷婷　（收稿日期：2019-06-01）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net