

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0695

鲁斯唯 胡清华 吴水平 等. 2014. 海峡西岸经济区大气污染物排放清单的初步估算[J]. 环境科学学报, 34(10): 2624-2634

Lu S W, Hu Q H, Wu S P, et al. 2014. Establishment of air pollutant emission inventory in the West Coast of Taiwan Strait [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(10): 2624-2634

海峡西岸经济区大气污染物排放清单的初步估算

鲁斯唯¹ 胡清华² 吴水平¹ 王新红¹ 陈晓秋^{2,*}

1. 厦门大学环境与生态学院 厦门 361102

2. 福建省环境监测中心站 福州 350003

收稿日期: 2013-11-04 修回日期: 2014-03-21 录用日期: 2014-04-11

摘要: 以 2009 年为基准年, 结合污染源普查数据、统计年鉴及工业活动、居民生活等多个方面对海峡西岸经济区包括 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 在内的大气污染物的排放量进行了估算, 建立了海西区大气污染物排放清单。结果发现, 上述 5 类污染物基准年的排放量分别为 40.67×10⁴、55.84×10⁴、50.57×10⁴、152.26×10⁴ 和 26.18×10⁴ t。其中, SO₂、NO_x 及 PM_{2.5} 的排放主要来自电厂, 占排放总量的比例分别为 25.58%、34.89% 和 38.75%; VOCs 和 NH₃ 的主要排放源分别来自植被排放和养殖业, 其贡献量分别为 49.12% 和 47.07%。采用 GIS 对排放清单进行网格化处理, 得出 SO₂、NO_x 及 PM_{2.5} 的高排放强度区域与固定源的空间分布较为一致。此外, 结合国家和地方“十二五”发展规划, 采用情景分析方法估算了 2015 年海西区大气污染物的排放清单。与基准年相比, SO₂、NO_x 和 NH₃ 的排放量呈下降趋势, PM_{2.5} 和 VOCs 的排放量呈大幅度增加。基准年排放清单的不确定性分析显示, VOCs 排放估算的不确定度最大, 为 225%。

关键词: 大气污染物; 排放清单; 动态更新; 不确定度

文章编号: 0253-2468(2014)10-2624-11 中图分类号: X51 文献标识码: A

Establishment of air pollutant emission inventory in the West Coast of Taiwan Strait

LU Siwei¹, HU Qinghua², WU Shuiping¹, WANG Xinhong¹, CHEN Xiaoqi^{2,*}

1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102

2. Fujian Environmental Monitoring Central Station, Fuzhou 350003

Received 4 November 2013; received in revised form 21 March 2014; accepted 11 April 2014

Abstract: The emission inventories of SO₂, NO_x, PM_{2.5}, VOCs and NH₃ in the Western Taiwan Straits Economic Zone in the base year of 2009 were established based on the pollution source census, statistical yearbooks, industrial activities and residential activities. The total emissions of SO₂, NO_x, PM_{2.5}, VOCs and NH₃ were estimated to be 40.67×10⁴, 55.84×10⁴, 50.57×10⁴, 152.26×10⁴ and 26.18×10⁴ t, respectively. The power plants were the most important source and contributed to 25.58%, 34.89% and 38.75% of the total emissions of SO₂, NO_x and PM_{2.5}, respectively. However, the major source of VOCs and NH₃ was vegetation and livestock breeding, which contributed to 49.12% and 47.07% of the total, respectively. The relative high emission areas of SO₂, NO_x and PM_{2.5} were consistent with the locations of stationary sources based on GIS gridding techniques. In addition, the emission inventories in the year of 2015 were calculated using scenario analysis method based on the national and regional 12th Five-Year Plans. The emissions of SO₂, NO_x, and NH₃ showed a slight decrease while the emissions of PM_{2.5} and VOCs increase significantly (around 24.18% and 74.42%, respectively) in 2015, as compared to those in 2009. The estimate of VOCs had the highest uncertainty of around 225%.

Keywords: air pollutants; emission inventory; dynamic updating; uncertainty

1 引言(Introduction)

大气污染物的排放估算是了解大气环境污染

现状、形成和发展, 制定消除和控制污染源排放措施, 进而解决大气污染问题的首要环节。在我国大气污染逐渐恶化的背景下, 针对区域及全国尺度上

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(No. 201009004); 厦门大学山海基金(No. 2013SH011)

Supported by the Commonweal Program of Environment Protection (No. 201009004) and the Shanghai Fondation of Xiamen University (No. 2013SH011)

作者简介: 鲁斯唯(1987—) 女, E-mail: weiandrea823@gmail.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: 1024953511@qq.com

Biography: LU Siwei(1987—) female, E-mail: weiandrea823@gmail.com; * Corresponding author, E-mail: 1024953511@qq.com

的大气污染物排放清单已有报道. 例如, 王丽涛等 (2005) 估算了中国大陆 CO 的人为源排放清单; 田贺忠等 (2001) 对中国大陆 NO_x 的排放清单及生物质燃烧排放的大气污染物进行了估算; 郑君瑜等 (2009a; 2009b) 和尹沙沙等 (2010) 对珠三角地区的天然源、机动车及人为氨等进行了估算; 王平 (2012) 估算了南通市人为源 NH₃ 的排放清单; 赵斌和马建中 (2008) 建立了天津市大气污染源排放清单. 有关大气污染物排放清单的不确定性研究也有报道 (钟流举等, 2007; 魏巍等, 2011; 薛亦峰等, 2012). 在我国经济和城市化快速发展过程中, 污染源的活动水平、排放因子及土地使用类型等的改变, 都会对排放清单的时空分布产生影响. 因此, 以国家和地方发展规划为基础, 建立某一地区一定时间尺度内的大气污染物排放清单, 可在一定程度上为利用空气质量模型进行大气污染物浓度预测, 进而为达到改善空气质量的的目标提供必要的基础数据.

因此, 本研究以 2009 年为基准年, 从工业源、交通源、天然源等多个方面对海峡西岸经济区 (包含福建省全境及浙江省温州市和广东省汕头市, 以下简称“海西区”) 的大气污染物如 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 的排放量进行估算, 并结合国家和地方发展规划对 2010—2015 年的排放清单进行预测, 最后对排放清单的不确定性进行初步分析.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究方法

本研究以市县为单位, 根据活动水平数据, 查找相关排放因子, 并按公式 (1) 计算得出总排放量 (黄成, 2012).

$$E_{ij} = \sum_k A_{jk} EF_{ijk} (1 - \eta_{ij}) \quad (1)$$

式中 E 为基准年某污染物排放总量 (t); A 为排放活动水平, 如能源消耗或产品产量 (t); EF 为不同污染源、污染物排放因子 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); η 为末端治理设施的污染物去除效率; i 代表污染物种类; j 代表排放源种类; k 代表不同城市区域.

将大气污染源分为固定源、移动源和面源 3 大类. 其中, 固定源按照燃烧设备和行业进行划分, 主要包括发电厂和其他工业源 (薛亦峰等, 2012); 移动源包括机动车、船舶和飞机; 面源包括无组织颗粒物排放源、VOCs 排放源、人为氨排放源、生物质燃烧源和民用煤燃烧源. 进行排放清单估算的大气

污染物包括 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃.

2.1.1 固定源 固定源的地理位置相对不变, 污染物主要通过烟囱或排气筒排放, 按照燃烧设备、燃料种类和行业等划分为钢铁、电厂、建材、化工、石油、造纸、纺织及其他工业共 8 个部门. 固定源 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 及 VOCs 的排放量来源于福建省环境监测中心站在全国第一次污染源普查基础上的更新调查, 调查以实测法及排放系数法相结合. SO₂、NO_x 排放系数来源于《污染源普查产排污系数手册 (第一次全国污染源普查资料编纂委员会, 2011)》, PM_{2.5} 及 VOCs 取自张强 (2005) 及余宇帆 (2012) 的研究. 结合各污染源的能源消耗水平、末端治理情况、烟囱数量、锅炉类型等计算得到污染物排放量.

2.1.2 移动源 移动源为各类交通工具燃烧化石燃料时产生的污染物, 主要包括机动车、船舶和飞机 3 类.

1) 机动车排放

根据 2009 年海西区不同城市分车型的保有量数据和年均行驶里程的调研结果, 采用 MOBILE6.2 模型并参照珠三角地区各车型机动车排放因子的估算方法 (车汶蔚, 2010), 计算得到本地区各车型不同污染物的排放因子 (表 1), 进而估算机动车的大气污染物排放量.

表 1 基准年各车型年均行驶里程 (累计调查样本数 819) 及不同污染物的排放因子

Table 1 Annual mileage and emission factors of different air pollutants

车型	年均行驶里程/ 10 ⁴ km	排放因子/(g·km ⁻¹)			
		NO _x	VOCs	PM _{2.5}	SO ₂
小客汽油	1.94	0.96	2.71	0.03	0.31
小客柴油	1.94	1.33	0.58	0.11	0.31
大客汽油	2.78	9.51	9.89	0.24	0.7
大客柴油	2.78	16.81	2.25	3.17	0.54
小货汽油	2.04	3.15	6.45	0.05	0.35
小货柴油	2.04	2.06	0.9	1.02	0.35
大货汽油	2.71	10.19	11.24	0.07	0.7
大货柴油	2.71	18.74	2.05	3.65	0.54
摩托车	0.52	0.06	4.61	0.15	0.04
公交车	7.30	25.22	3.38	4.76	0.81
出租车	20.82	1.44	4.07	0.05	0.47

2) 船舶排放

对于船舶排放, 主要来自于船舶发动机运转时燃料燃烧所产生的气态污染物. 根据现有港口货物吞吐量、集装箱吞吐量及旅客吞吐数据, 依据李智恒等 (2011) 关于深圳港口船舶排放量与吞吐量之

间的经验方程,对海西区港口及内河船舶的大气污染物排放进行估算.除运输船舶外,捕捞渔船在作业过程中排放的大气污染物也尤为重要.将渔船污染排放按面源处理(区域为从海岸线至12海里外

的范围).根据各地区统计年鉴中渔船数量、渔船总功率及表2中的计算参数(其中 SO_2 的排放量按照燃油含硫量的2倍计算),得到渔船大气污染物的年排放量.

表2 渔船排放计算参数

Table 2 Emission factors and other parameters for fishing

排放因子		单位油耗/ ($g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$)	年累计时间/ d	日作业时间/ h	渔船燃油含硫量
$NO_x / (kg \cdot t^{-1})$	$PM_{2.5} / (g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1})$				
27.2	0.25	150	228	10	0.05%

注:年累计时间中,休渔期按4.5个月计算.

3) 飞机排放

将飞机起降过程中的污染排放视为面源.国际民航组织(ICAO)规定标准起降过程包括起飞(TK)、爬升(CB)、到达(AP)和空转(ID)标准起降循环下4种发动机不同工作状态的时间分别为0.7、2.2、4.0和26.0 min.结合美国EPA商用喷气式飞机空气污染物排放量评估报告中不同机型发动机起降过程的污染物排放因子(USEPA,1999)及海西区各机场不同机型逐时及周起降架次,即可估算机场逐时及周污染物排放量.

2.1.3 无组织颗粒物排放源 颗粒物的无组织排放指颗粒物不经过排气筒的无规则排放,如室外作业场所、料堆、施工场地的扬尘排放.机动车行驶和气象因素作用的路面尘的排放.由于尘的无组织排放种类繁多、分布广泛,按照扬尘源和工业无组织源分别计算.

1) 扬尘源

扬尘源包括交通扬尘、料堆扬尘和施工扬尘.其中,交通扬尘包括小风及静风条件下外力扰动引起的尘,受到路面负荷、车速和车型共同影响.对福州、莆田、厦门和漳州等交通运输铺装路面的负载量进行调查,得到道路细颗粒负载平均值如表3所示.利用混合排放因子减去MOBILE6.2模型对机动车因燃烧和磨损估算的排放因子,得到二次扬尘的排放因子(表3).采用美国环保局建立的AP-42交通扬尘排放模型(USEPA,2011)对海西区交通扬尘排放 $PM_{2.5}$ 进行估算.

料堆扬尘是指在码头沙石、煤灰装运过程及在建工地建筑材料暂时堆放过程中,因装卸、堆放和自然风蚀等扰动因素,导致堆放的细颗粒再悬浮形成的空中扬尘.本文参考美国EPA推荐方法进行估算(USEPA,2011).

施工扬尘包括建筑工地、市政工程及拆迁工地

产生的扬尘,一般将施工扬尘分为基本排放和可控排放两类.根据各县市2009年的统计年鉴,查询获得建筑业当年建筑施工面积和新增公路里程,再结合排放因子及施工周期(表3)计算扬尘的排放量.

表3 无组织颗粒物排放源主要计算参数

Table 3 Emission factors and other parameters for fugitive emission sources

排放源	排放因子/ ($g \cdot 车^{-1} \cdot km^{-1}$)	道路细颗粒 负载/($g \cdot m^{-2}$)	道路长 度/km	车流量/ 辆
高速	0.22	0.17	2359.74	61000
国道	0.43	0.42	5703.09	12894
省道	0.62	0.65	5907.10	7026
县道	1.27	1.41	8590.89	1000
乡道	2.79	3.21	20438.70	500
城市道路	1.41	1.58	6568.00	20000

排放源	排放因子/ ($kg \cdot m^{-3} \cdot 月^{-1}$)		基本施工 周期/月	可控施工 周期/月
	基本	可控		
建筑工地	0.504	1.55	12	3
市政工程	0.738	1.55	8	8
拆迁工地	25.200	12.60	1	1

2) 工业无组织源

污染控制中常用排污系数法和实测法来对工业无组织尘的排放量进行估算.由于目前缺乏详细的工艺及产量数据,按照无组织排放占有组织排放的8%的经验值,计算得到不同地区工业无组织 $PM_{2.5}$ 排放量.

2.1.4 VOCs 源

1) 燃烧面源排放

燃烧面源VOCs排放主要为民用煤、民用天然气、液化石油气的燃烧及烹调油烟排放.民用煤、天然气和液化石油气使用中的排放,可由统计年鉴中的燃料消耗数据利用排放因子法估算得到.烹调排放包括家庭烹调及餐饮业排放,参考Wang等

(2011) 估算得到的 VOCs 排放浓度及烟气排放速率 结合餐饮业数量、人口数量、家庭主要食品消费量及油脂支出等计算得到燃烧面源的 VOCs 排放量。

2) 加油站、溶剂使用与工艺过程

加油站 VOCs 的排放为在日常运行过程中因油品的泄漏和挥发而释放出 VOCs; 干洗、涂料使用、合成橡胶、合成纤维、塑料、油漆生产、植物油生产及糖酒制造过程和运输过程也会释放大量 VOCs。结合污染源普查数据与美国 EPA 报告的排放因子(表 4), 计算得到海西区加油站/油库、石油炼制/化工和工艺过程排放的 VOCs。

表 4 各人为源排放 VOCs 的排放因子

Table 4 VOCs emission factors of anthropogenic sources

排放源	单位	排放因子
民用煤	kg·t ⁻¹	0.6
天然气	g·m ⁻³	0.18
液化石油气	g·m ⁻³	66
加油站	kg·t ⁻¹	3.24
石油储藏	kg·t ⁻¹	0.123
汽油储藏	kg·t ⁻¹	0.156
运输	kg·t ⁻¹	1.604

3) 天然源 VOCs 排放

天然源 VOCs 主要来源于植物的叶片排放。将整理得到的海西区生物量、主要植被种类 VOCs 排放因子和调查区的气象数据输入美国大气科学研究中心推出的适用于全球范围内的 GloBEIS 模型即可得到天然源 VOCs 排放量。掌握植被分布情况对于天然源 VOCs 排放研究尤为重要。在现有的条件下, 福建省植被分布数据采用《福建植被》(林鹏, 1990) 及《1:1000000 中国植被图集》(侯学煜, 2001) 已有的分布数据, 同时结合适当的遥感影像资料进行分析。根据相关研究(闫雁等, 2005), 确定针叶林和阔叶林的平均叶生物量密度分别为 890 g·m⁻² 和 785 g·m⁻²; 假设针阔叶混交林由 50% 阔叶林和 50% 针叶林组成, 则平均叶生物量密度为 840 g·m⁻²。叶面积指数采用《中国森林生态系统的生物量和生产力》(冯宗炜等, 1999) 提供的数据与方法进行计算。气象资料来源于福建省气象局自动监测站的实测数据, 包括温度、光照、风速、风向、云量和太阳高度角等。本研究以珠三角地区(郑君瑜等, 2009c) 的排放因子和本地区叶生物量为基础, 参照胡泳涛等(2001) 及赵静等(2004) 的研究结果, 确定

海西区天然源 VOCs 的排放因子(表 5)。

表 5 天然源排放 VOCs 的排放因子

Table 5 VOCs emission factors of biogenic sources

植被类型	排放因子/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)		
	异戊二烯	单萜烯	其它 VOCs
针叶林	1.0	3.0	1.5
阔叶林	6.0	0.65	1.5
庄稼	0.5	0.2	1.5
灌丛	8.0	0.6	1.5
竹林	32.3	0.5	1.5

2.1.5 人为氨排放源 人为氨排放源主要包括养殖业、工业生产(合成氨及氮肥)、化肥施用、人体排放、生物质燃煤和垃圾焚烧。大气中氨排放计算采用排放因子法, 活动水平数据包括动物存栏数、化肥施用量、人口数量及产品产量, 结合排放因子(表 6) 即可估算一定控制条件下的人为氨排放量。

表 6 人为氨排放源排放因子

Table 6 Emission factors for atmospheric sources

排放源	单位	排放因子	
养殖业	牛	kg·a ⁻¹	23
	猪	kg·a ⁻¹	4.25
	羊	kg·a ⁻¹	2.9
	马	kg·a ⁻¹	17.9
	家禽	kg·a ⁻¹	0.27
化肥施用			16.81%
人体排放	kg·a ⁻¹	0.8	
工业生产	合成氨	kg·t ⁻¹	0.8
	化肥	kg·t ⁻¹	5.8
	垃圾焚烧	kg·t ⁻¹	1.2

2.1.6 生物质燃烧、民用煤燃烧 我国的生物质燃烧以秸秆(家庭使用、野外焚烧)为主, 其次是薪柴的焚烧及森林大火等。不同污染物的排放量计算以燃烧量和排放因子(表 8) 为依据。根据“中国农村能源生态系统建设项目”所采用的民用普通煤排放因子(表 7) 结合统计部门的民用煤消耗数据, 计算得到民用煤燃烧大气污染物的排放量。

表 7 生物质及民用煤燃烧污染物的排放因子

Table 7 Emission factors for biomass and coal burning

排放源类型	排放因子/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)				
	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
森林大火	0.79	1.85	13.18	6.90	1.40
秸秆露天燃烧	0.37	2.55	6.37	7.00	0.78
秸秆家庭使用	0.09	1.51	6.63	5.38	1.30
薪柴	0.32	1.46	3.33	1.92	1.40
民用煤燃烧	13.40	1.45	0.70	0.60	0.90

2.2 排放清单的动态更新方案

本研究在 2009 年海西区大气污染物排放清单的基础上,充分考虑海西区未来发展规划,结合目前已颁布的法律、法规、排放标准对大气污染物排放强度的影响,对 2010—2015 年的大气污染物排放清单进行更新和预测。首先,根据各污染源活动水

平历年地方统计年鉴数据的变化趋势预测其活动水平变化。在此基础上,结合国家颁布的各行业如钢铁工业、火电厂等新旧排放标准,参考国家和地方政府的“十二五”规划要求,对情景进行量化分析,确定各排放源各污染物的削减系数。排放清单预测所需各项基础数据来源汇总于表 8。

表 8 各污染源排放变化预测基础数据来源

Table 8 Primary data of emission sources for forecasting

排放源类型	收集的基础数据		
	福建省	广东省汕头市	浙江省温州市
发电厂	福建省“十二五”能源发展专项规划(福建省发展和改革委员会,2011)		2000—2011 年电厂发电量
其他工业源	福建省“十二五”能源发展专项规划(福建省发展和改革委员会,2011)		国家能源发展“十二五”规划(中华人民共和国中央人民政府,2013)
机动车	1997—2011 年机动车保有量(福建省统计局,2008,2009,2010)、福建省道路水路运输“十二五”专项规划(福建省交通运输厅,2011)	1999—2011 年机动车保有量(汕头市统计局,2008,2009,2010)	2000—2011 年机动车保有量(温州市统计局,2008,2009,2010)
船舶(内河、港口)	福建省“十二五”综合交通运输专项规划(福建省人民政府,2011)	2005—2011 年水路货运量和客运量	浙江省公路水路民用机场交通运输发展“十二五”规划(浙江省交通运输厅,2011)
渔船	福建省“十二五”期间加强渔船管理控制海洋捕捞强度的实施意见(福建海洋与渔业厅,2011)	广东省“十二五”期间加强渔船管理控制海洋捕捞强度的实施意见(广东省海洋与渔业局,2011)	浙江省人民政府办公厅关于做好海洋捕捞渔船管理工作的通知(浙江省人民政府,2011)
交通扬尘	福建省高速公路“十二五”专项规划(福建省交通运输厅,2011)	—	温州市综合交通“十二五”规划(温州市人民政府,2011)
施工扬尘	1978—2011 年建筑施工面积	2001—2011 年建筑施工面积(汕头市统计局,2008,2009,2010)	2000—2011 年建筑施工面积(温州市统计局,2008,2009,2010)
燃烧面源	2000—2011 年人口数量 2003—2011 年生活能源消耗量	1990—2011 年人口数量	2004—2011 年人口数量
溶剂使用	1978—2011 年建筑施工面积	2001—2011 年建筑施工面积	2000—2011 年建筑施工面积
养殖业		2000—2011 年牛、猪、羊、家禽存栏数	
人体排放	2000—2011 年人口数量	1990—2011 年人口数量	2004—2011 年人口数量
化肥施用		2000—2011 年氮肥施用量	
化肥生产		化肥工业“十二五”发展规划(中华人民共和国工业和信息化部,2012)	
生物质燃烧	福建省“十二五”现代农业发展规划(福建省人民政府,2011)	广东省农业和农村经济社会发展第十二个五年规划纲要(广东省农业厅,2011)	温州市现代农业“十二五”规划(温州市人民政府,2011)

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 海西各城市大气污染物排放清单

2009 年海西区不同城市大气污染物排放清单

汇总于表 9。从表中数据可知,海西区 11 个城市 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 及 NH_3 的基准年排放量分别为 40.67×10^4 、 55.84×10^4 、 50.57×10^4 、 152.26×10^4 和 26.18×10^4 t。排放量最大的城市分布在沿海区

域,如福州、泉州和温州. 这与沿海地区工业经济发达、机动车数量多、人口密度大有关. 对于 VOCs, 泉州、三明和南平的排放量远高于其它地区, 泉州地区 VOCs 的主要来源是工艺原料及溶剂使用, 而三明和南平的植被面积大于其它地区, VOCs 以天然排放源为主.

表 9 2009 年海西各城市排放源大气污染物排放清单

Table 9 Emission inventory for the year of 2009 in the Western Taiwan Straits Economic Zone

地区	污染物年排放总量/10 ⁴ t				
	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
福州	7.26	12.41	9.05	10.84	2.50
厦门	1.79	5.28	3.91	6.06	0.62
莆田	2.39	1.95	1.39	2.40	1.54
三明	4.85	2.60	3.53	21.89	2.07
泉州	7.06	7.44	7.51	35.97	3.45
漳州	2.00	4.14	5.42	9.45	4.11
南平	2.52	2.41	3.51	24.60	2.83
龙岩	3.08	4.18	4.77	11.25	3.23
宁德	1.96	3.04	2.72	8.45	1.34
汕头	3.80	3.59	3.41	7.24	2.05
温州	3.96	8.80	5.34	14.12	2.44
合计	40.67	55.84	50.57	152.26	26.18

3.2 污染源贡献特征

根据本研究计算得到的排放清单得到不同类型排放源对海西地区排放总量的贡献率情况(表 10). 将各排放源划分为面源、移动源和固定源, 其排放贡献比较如图 1 所示. 可以看出, 固定源对 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 的贡献率最高. SO₂ 主要来源于电厂和建材、钢铁等行业, 分别占排放总量的 25.58%、16.30% 和 8.21%. 与其他研究(Zhang *et al.*, 2009) 相比, 虽然电厂仍然是 SO₂ 的最主要污染源, 但贡献率有所降低. 2009 年是“十一五”规划的重要转折点, 表明在此期间的一系列脱硫措施略有成效. NO_x 与 PM_{2.5} 的排放主要集中在发电厂, 分别占污染物排放总量的 34.89% 和 38.75%. 这与翟一然等(2012) 的研究结果基本吻合. 应引起注意的是, 机动车尾气排放已经成为 NO_x 的第二大排放源, 其贡献率达到总量的 33.81%. 在机动车保有量持续保持高速增长的驱动下, 机动车带来的尾气污染问题将不容忽视. 电厂作为 PM_{2.5} 最主要的一次排放源, 对排放总量的贡献率高于全国 11.1% 的平均水平(Zhang *et al.*, 2009). 根据能源统计年鉴, 福建省电力行业消耗煤比重超过全国平均水平, 这可能

是造成此结果的原因. 另外, 交通扬尘对 PM_{2.5} 的贡献也非常显著, 为 17.22%, 而建材行业的贡献不到 10%. 对于 VOCs 与 NH₃, 以面源排放为主, 其中, 植被排放对 VOCs 的贡献接近 50%, 而养殖业对 NH₃ 的排放贡献为 47.07%.

表 10 2009 年海西经济区各大气污染源排放贡献率

Table 10 Contributions of emission categories for the year of 2009 in the Western Taiwan Straits Economic Zone

污染源类型	排放贡献率				
	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
纺织业	8.09%	1.37%	3.33%	0.03%	
造纸业	7.34%	1.59%	3.02%	0.03%	
石油	1.12%	0.23%	0.76%	0.08%	
化工	5.97%	1.52%	3.09%	0.04%	
建材	16.30%	13.52%	9.20%	0.14%	
钢铁	8.21%	1.57%	2.41%	0.05%	
电厂	25.58%	34.89%	38.75%	0.45%	
其他工业	12.63%	2.34%	3.51%	0.07%	
机动车	5.18%	33.81%	7.03%	18.52%	
内河	0.21%	0.66%	0.02%	0	
沿海	0.83%	2.54%	0.07%	0.02%	
渔船	2.56%	5.07%	0.34%		
飞机	0.01%	0.20%			
交通扬尘			17.22%		
工业无组织尘			5.13%		
建筑施工			2.86%		
市政工程			0.37%		
拆迁工地			1.11%		
居民烹调				0.20%	
民用煤燃烧	5.86%	0.46%	0.25%	0.07%	
民用天然气				0	
民用液化石油气				0.01%	
餐饮业				0.14%	
加油站				1.60%	
石油炼制				3.32%	
溶剂使用				25.86%	
植被排放				49.12%	
人类排放					15.43%
养殖业					47.07%
工业生产					1.42%
化肥施用					35.69%
秸秆与薪材	0.02%	0.07%	0.21%	0.05%	0.12%
森林大火	0.10%	0.17%	1.31%	0.23%	0.27%
垃圾焚烧					0

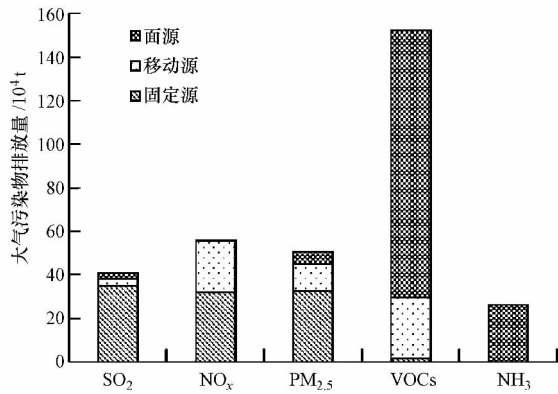


图 1 2009 年海西区不同大气污染源排放量比较

Fig. 1 Comparison of emissions from different categories for the year of 2009

3.3 排放清单空间分配结果

以 0.1° 为分辨率对排放清单进行空间分配, 得到单位网格内的排放量(图 2)。从图中可以明显看出 SO₂、NO_x 及 PM_{2.5} 高强度排放区域呈点状分布, 说明其主要来自工业和人口较为集中的城市区域; 而 SO₂ 受工业、电厂燃煤排放的影响, 高强度排放网格点明显多于 NO_x 和 PM_{2.5}。对于 VOCs, 泉州地区的排放强度整体较高, 与该地区较为集中的石化企业有关。虽然三明和南平两地 VOCs 的排放总量也较为靠前, 但由于两地地域较广, 整体上高排放网格点并未聚集成片。NH₃ 的强排放区域集中于人口高度集中的城区(如厦门、汕头等)及养殖业发达漳州

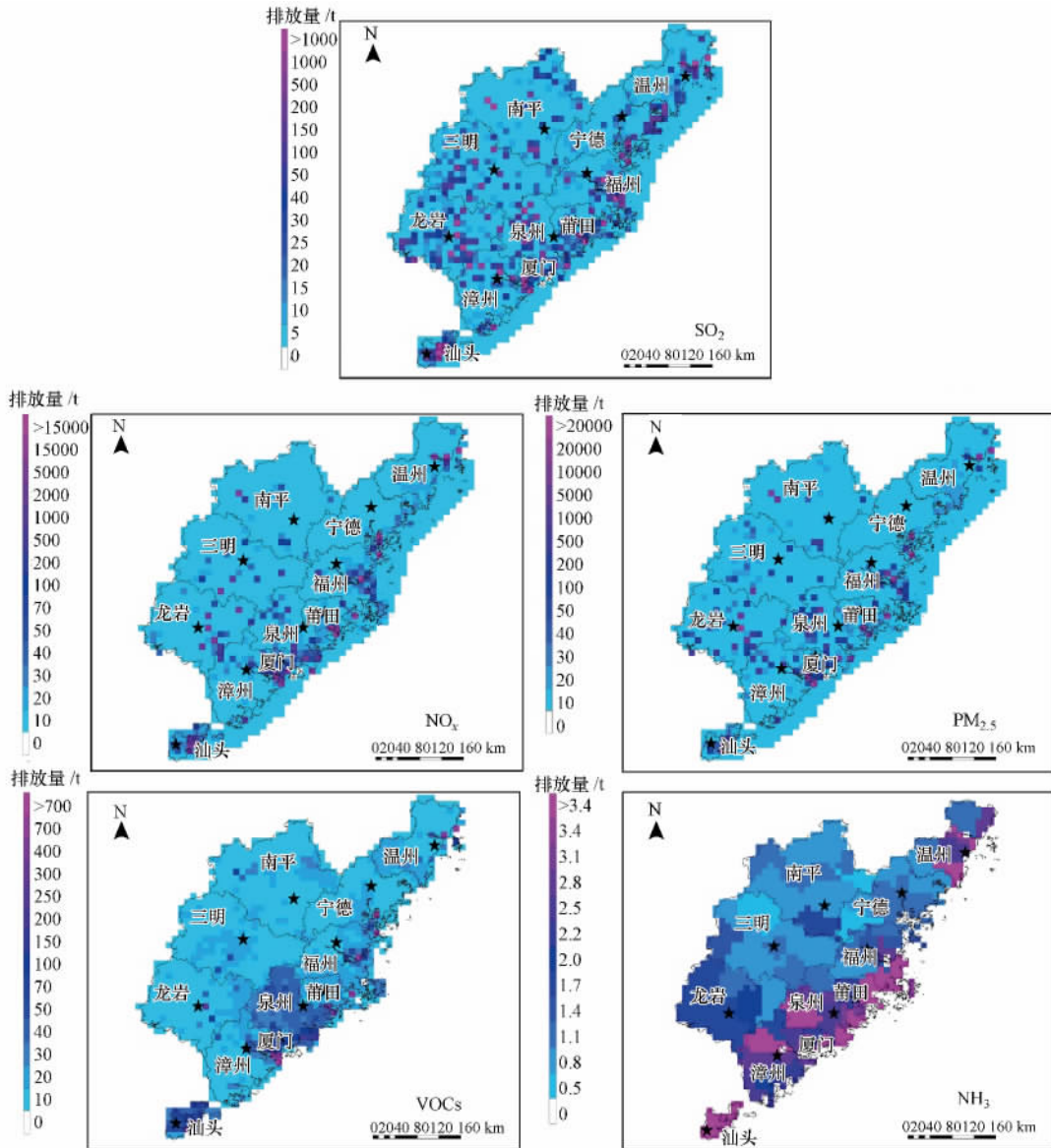


图 2 2009 年海西地区大气污染源网格化排放清单空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of air pollutant emissions with 0.1°×0.1° spacing in 2009

和龙岩. 了解大气污染物排放的空间分布差异, 有利于进一步制定科学有效的大气污染减排措施.

3.4 排放清单动态更新结果

在海西区基准年大气污染物排放清单的基础上, 结合 2010—2015 年各行业发展控制水平、政策规划措施等因素(表 8), 对 2010—2015 年海西区 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 NH_3 的排放清单进行了推估(图 3). 以现有政策为基础, 结合行业规划及相关经济规划指标, SO_2 和 NO_x 的排放量呈逐年降低的趋势. 与基准年相比, 2015 年 SO_2 和 NO_x 的排放量分别降低了 20.56% 和 4.42%. 在“十二五”能源发展规划中, 预期一次能源消费总量年均增长 4.3%, 但在非化石能源消费比重增长 2.8% 和单位国内生产总值能耗下降 16% 的驱动下, 再加上电厂为 SO_2 、 NO_x 最主要的污染源, 新颁布的更加严格的火电厂排放标准(GB 13223—2011), 钢铁工业的新排放标准(GB 28662—2012) 及水泥工业排放标准的征求意见稿也已发布等因素的综合作用下, 对 SO_2 和 NO_x 的降低也起到一定的作用. 与基准年相比, 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放量呈大幅度增长趋势, 增幅分别为 24.18% 和 74.42%. 其中, 交通扬尘排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献率显著增加, 溶剂使用及机动车为人为排放 VOCs 的两大污染源. 据预测(何山, 2012), “十二五”期间中国汽车保有量将增加 69.6%, 从一定程度上说明了人为 VOCs 排放量大幅度增加的原因. NH_3 在排放总量上略有下降, 有利于完成“十二五”规划

中氨氮排放指标. 从海西区估算结果来看, 若要在“十二五”结束时达到保持或改善空气质量的目标, 污染减排的形势仍然严峻.

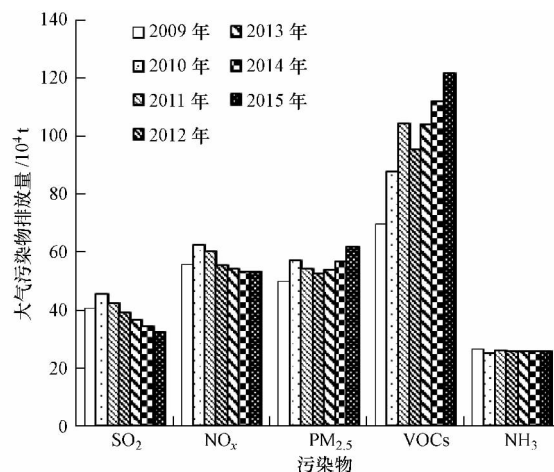


图 3 海西区 2009—2015 年各大气污染物排放总量

Fig. 3 Annual trends of air pollutants emissions from 2009 to 2015

3.5 同类研究结果比较

将本研究基准年计算结果与 2007 年报道的研究数据(黄成, 2012) 进行比较发现(表 11), SO_2 和 NO_x 有较为明显的下降, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 NH_3 的增加趋势明显. SO_2 下降主要得益于“十一五”规划中加大了清洁能源的使用, 并对燃煤电厂进行强制脱硫控制. 由福建省统计年鉴可知, 2007—2009 年清洁能源如天然气、风力发电占能源消费总量的比重从 0.1% 上升到 0.3%, 而石油消费从 21.4% 下降到

表 11 海西区大气污染物排放清单的比较

Table 11 Comparison of air pollutant emissions between 2007 and 2009

城市	污染物年排放总量/ 10^4 t									
	SO_2		NO_x		$\text{PM}_{2.5}$		$\text{VOCs}^{1)}$		NH_3	
	2007 年	2009 年	2007 年	2009 年	2007 年	2009 年	2007 年	2009 年	2007 年	2009 年
福州市	11.30	7.26	12.72	12.41	3.39	9.05	12.23	5.54	3.50	2.50
厦门市	2.20	1.79	6.94	5.28	0.72	3.91	6.53	5.53	0.96	0.62
莆田市	3.76	2.39	2.72	1.95	0.36	1.39	2.35	2.26	1.29	1.54
三明市	7.97	4.85	7.52	2.60	7.04	3.53	5.56	6.68	2.59	2.07
泉州市	9.49	7.06	9.62	7.44	4.21	7.51	12.17	32.31	2.08	3.45
漳州市	3.98	2.00	10.43	4.14	1.56	5.42	5.74	4.45	4.95	4.11
南平市	4.71	2.52	4.05	2.41	3.79	3.51	8.63	2.91	3.22	2.83
龙岩市	10.80	3.08	12.14	4.18	8.73	4.77	3.41	2.41	3.64	3.23
宁德市	1.83	1.96	5.15	3.04	2.78	2.72	7.01	1.70	1.94	1.34
汕头市	2.16	3.80	2.56	3.59	0.96	3.41	4.27	6.15	1.28	2.05
温州市	8.15	3.96	14.69	8.80	3.84	5.34	11.73	7.52	1.59	2.44
合计	66.35	40.67	88.54	55.84	37.38	50.57	79.63	77.48	27.04	26.18

注: 1) VOCs 排放量不包括天然源排放部分.

18.3%。PM_{2.5} 增加的原因可能与近年来大量进行市政施工、道路修建等活动有关。以福建省为例, 2007年至2009年, 建筑施工面积增加了22.24%, 竣工面积增加了23.71%, 公路通车里程增加了2.97%。在扣除天然源VOCs的贡献外(占49.12%), 2009年人为VOCs的排放量与黄成(2012)报道的2007年人为VOCs的排放量估算值相当。人为NH₃排放量也基本没有变化。另外, 本研究使用的排放因子数值略大, 这也可能是导致PM_{2.5}估算量偏大的原因之一。从地域差别来看, 龙岩市SO₂及NO_x排放量呈大幅度下降, 这与龙岩市进行的产业结构调整, 如关停包括造纸厂、水泥厂等120多家高污染企业(中华人民共和国环境保护部, 2007), 以及安装脱硫设备等措施有重要关系。

3.6 不确定性分析

在排放量估算的过程中, 活动水平、排放因子、燃料质量、控制技术的去除效率等因素会影响结果的不确定性, 具体表现在统计数据来源不一致、排放因子的取舍及没有实测数据或数据来自间接推估等。为了检验排放清单计算结果的可靠性, 需要对排放清单的不确定性进行分析。参考TRACE-P清

单(Streets *et al.*, 2003)的误差估算方法, 根据数据来源的可靠程度将活动水平和排放因子进行等级划分, 对相对标准偏差赋值, 范围为5%~500%(Streets *et al.*, 2003)。

通过式(2)计算得到各排放源的不确定度如图4所示。不同排放源的不确定度差异较大, 不确定度最高的排放源为植被排放VOCs, 为450%。造成此结果的原因是海西区植被信息较少, 且数据获得日期距今久远。工业无组织尘排放PM_{2.5}及石油炼制排放VOCs等不确定度也在200%以上。再通过误差传递法计算得到的SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs及NH₃的总体不确定度分别为29%、34%、40%、225%及60%。因此, 活动水平数据的更新及排放因子的本地化是保证排放清单准确度的重要保障。

$$CV = \frac{U}{E} = 1.96 \times \sqrt{(1+C_a^2)(1+C_f^2)} - 1 \quad (2)$$

式中, CV为排放量的相对标准偏差; E为排放源的排放量; U为排放源的不确定度; C_a为排放源活动水平的相对标准偏差; C_f为排放源排放因子的相对标准偏差。

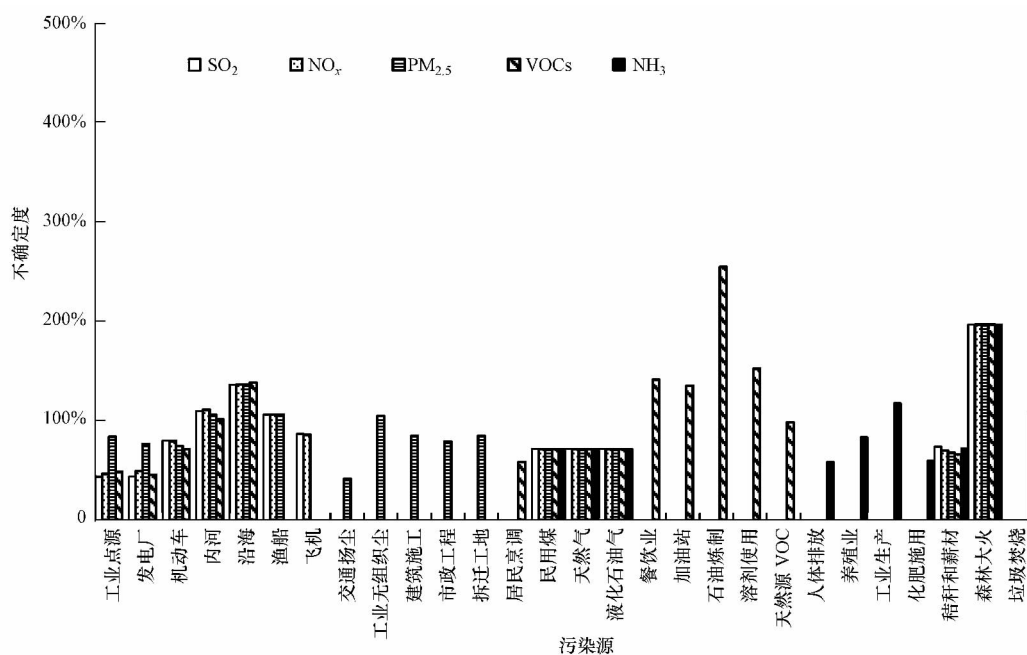


图4 95%置信度下各污染源排放的不确定度

Fig. 4 Uncertainty in pollutant emission estimates (95% confidence intervals)

4 结论(Conclusions)

1) 基准年(2009年)海西区SO₂、NO_x、PM_{2.5}、

VOCs及NH₃的排放总量分别为40.67×10⁴、55.84×10⁴、50.57×10⁴、152.26×10⁴和26.18×10⁴t, 沿海城市排放量大。

2) 海西区大气 SO_2 、 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自电厂, 而植被排放与养殖业分别是 VOCs 和 NH_3 的主要贡献源。

3) 受固定源位置的影响, SO_2 、 NO_x 及 $\text{PM}_{2.5}$ 的高排放网格点多呈点状分布, 而 NH_3 的高排放网格点则较为成片, 且经济发达的沿海区域较内陆山区具有更高的排放强度。

4) 排放清单动态更新显示, 海西区 SO_2 、 NO_x 排放量呈逐年降低趋势, 主要受电厂脱硫、脱硝污染控制措施的影响, 但因为机动车保有量增加、建筑业发展导致的溶剂使用量增大等因素, $\text{PM}_{2.5}$ 及 VOCs 呈显著增加趋势。

5) 高时间分辨率的活动水平及本地化的排放因子等数据是降低排放清单不确定度的关键。

责任作者简介: 陈晓秋(1963—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事环境监测方面的工作。E-mail: 1024953511@qq.com。

参考文献(References):

车汶蔚. 2010. 珠江三角洲高时空分辨率机动车污染排放清单开发及控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学. 13-23

第一次全国污染源普查资料编纂委员会. 2011. 污染源普查技术报告(上册)[M]. 北京: 中国环境科学出版社

翟一然, 王勤耕, 宋媛媛. 2012. 长江三角洲地区能源消费大气污染物排放特征[J]. 中国环境科学, 32(9): 1574-1582

冯宗炜, 王效科, 吴刚. 1999. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京: 科学出版社.

福建海洋与渔业厅. 2011. 福建省“十二五”期间加强渔船管理控制海洋捕捞强度实施意见[OL]. 2013-08-22. http://www.fujian.gov.cn/zwgk/zxwj/szfwj/201112/t20111214_435040.htm

福建省发展和改革委员会. 2011. 福建省“十二五”能源发展专项规划[OL]. 2013-07-21. <http://www.fjdpc.gov.cn/show.aspx?id=47002>

福建省交通运输厅. 2011. 福建省道路水路运输“十二五”专项规划[OL]. 2013-02-2. http://www.fjjt.gov.cn/ztl/fjjt125/zxgh125/201108/t20110825_62715.htm

福建省交通运输厅. 2011. 福建省高速公路“十二五”专项规划[OL]. 2013-08-22. http://www.fjjt.gov.cn/ztl/fjjt125/zxgh125/201108/t20110825_62713.htm

福建省人民政府. 2011. 福建省“十二五”综合交通运输体系发展专项规划[OL]. 2013-05-04. http://www.fujian.gov.cn/zwgk/ghxx/zxgh/201105/t20110530_362221.htm

福建省人民政府. 2011. 福建省“十二五”现代农业发展规划[OL]. 2013-08-21. http://www.fujian.gov.cn/zwgk/ghxx/zxgh/201108/t20110801_377636.htm

福建省统计局. 2008. 福建统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社

福建省统计局. 2009. 福建统计年鉴 2009[M]. 北京: 中国统计出版社

版社

福建省统计局. 2010. 福建统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社

广东省海洋与渔业局. 2011. 广东省“十二五”期间加强渔船管理控制海洋捕捞强度的实施意见[OL]. 2013-06-02. <http://www.gdofa.gov.cn/uploads/1321498327.doc>

广东省农业厅. 2011. 广东省农业和农村经济社会发展第十二个五年规划纲要[OL]. 2013-09-20. http://zwgk.gd.gov.cn/006939908/201202/t20120209_303473.html

何山, 官淑琪, 胡树华. 2012. “十二五”期间我国汽车产量预测及其市场扩展特征研究[J]. 开发研究, (2): 40-43

侯学煜. 2001. 1:1000000 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社

胡泳涛, 张远航, 谢绍东, 等. 2001. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. 环境科学, 22(6): 1-6

黄成. 2012. 海峡西岸地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 32(8): 1923-1933

李智恒, 何龙. 2011. 船舶污染物排放清单估算方法研究[J]. 广西轻工业, (5): 79-80

林鹏. 1990. 福建植被[M]. 福州: 福建科学技术出版社

汕头市统计局. 2008. 汕头统计年鉴 2008[M]. 北京: 中国统计出版社

汕头市统计局. 2009. 汕头统计年鉴 2009[M]. 北京: 中国统计出版社

汕头市统计局. 2010. 汕头统计年鉴 2010[M]. 北京: 中国统计出版社

Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000[J]. Journal of Geophysical Research, 108(D21), 8809, doi: 10.1029/2002JD003093

田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 2001. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 21(6): 493-497

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). 1999. Evaluation of Air Pollutant Emissions from Subsonic Commercial Jet Aircraft [OL]. Michigan: EPA. 2013-01-05. <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/aviation/r99013.pdf>

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2011. Emission factor documentation for AP-42 [OL]. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards. 2013-08-20. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/bgdocs/b13s0201.pdf>

王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 2005. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. 环境科学学报, 25(12): 1580-1585

王平. 2012. 南通市人为源大气氨排放清单及特征[J]. 环境科学与管理, 37(10): 85-88

Wang X Y, Shi J W, Bai Z P, et al. 2011. Measurement of VOCs emissions from cooking in the Northeast Area of China [A] // Proceedings of the MACE 2011: Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering[C]. Hohhot: IEEE. 3212-3215

魏巍, 王书肖, 郝吉明. 2011. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 32(2): 305-312

温州市人民政府. 2011. 温州市综合交通“十二五”规划[OL]. 2013-07-11. <http://www.wenzhou.gov.cn/module/download/>

- download.jsp? filename = 120203102958880. pdf
- 温州市人民政府. 2011. 温州市现代农业“十二五”规划 [OL]. 2013-07-11. http://www.wenzhou.gov.cn/art/2011/11/30/art_4244_194473.html
- 温州市统计局. 2008. 温州统计年鉴 2008 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 温州市统计局. 2009. 温州统计年鉴 2009 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 温州市统计局. 2010. 温州统计年鉴 2010 [M]. 北京: 中国统计出版社
- 薛亦峰, 闫静, 宋光武, 等. 2012. 大气污染物排放清单的建立及不确定性 [J]. 城市环境与城市生态, 25(2): 31-33
- 尹沙沙, 郑君瑜, 张礼俊, 等. 2010. 珠江三角洲人为氨源排放清单及特征 [J]. 环境科学, 31(5): 1146-1151
- 余宇帆. 2012. 珠江三角洲地区典型工业 VOCs 源排放成分谱研究 [D]. 广州: 华南理工大学. 11-19
- 张强. 2005. 中国区域细颗粒物排放及模拟研究 [D]. 北京: 清华大学. 37-47
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14): 5131-5153
- 赵斌, 马建中. 2008. 天津市大气污染源排放清单的建立 [J]. 环境科学学报, 28(2): 368-375
- 赵静, 白郁华, 王志辉, 等. 2004. 我国植物 VOCs 排放速率的研究 [J]. 中国环境科学, 24(6): 654-657
- 浙江省交通运输厅. 2011. 浙江省公路水路民用机场交通运输发展“十二五”规划 [OL]. 2013-07-22. <http://www.zjdpce.gov.cn/module/download/downloadfile.jsp? classid = 0&filename = 1211071712173943814.doc>
- 浙江省人民政府. 2011. 浙江省人民政府办公厅关于做好海洋捕捞渔船管理工作的通知 [OL]. 2013-06-19. http://www.zj.gov.cn/art/2013/1/4/art_13012_68529.html
- 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 2009a. 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, 29(4): 815-821
- 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 2009b. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征 [J]. 中国环境科学, 29(5): 455-460
- 郑君瑜, 郑卓云, 王兆礼, 等. 2009c. 珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 29(4): 345-350
- 中国科学院《中国植被图》编辑委员会. 2001. 1:1000000 中国植被图集 [M]. 北京: 科学出版社
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2007. 现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划 [OL]. 2013-09-20. <http://www.ndrc.gov.cn/fzgh/ghwb/115zxgh/P020070928509232490884.pdf>
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2008. 可再生能源发展“十一五”规划 [OL]. 2013-09-20. <http://www.sdpc.gov.cn/nyjt/nyzywx/W020080318390887398136.pdf>
- 中华人民共和国工业和信息化部. 2012. 化肥工业“十二五”发展规划 [OL]. 2013-09-20. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293877/n13434815/n13434832/n14473959.files/n14450227.pdf>
- 中华人民共和国环境保护部. 2007. 福建省龙岩市调整产业结构关停 120 多家企业 [OL]. 2013-09-19. http://www.zhb.gov.cn/zhxx/gzdt/200711/t20071122_113278.htm
- 中华人民共和国中央人民政府. 2006. 农业部发布《全国畜牧业发展第十一个五年规划》 [OL]. 2013-04-22. http://www.gov.cn/gzdt/2006-09/13/content_387510.htm
- 中华人民共和国中央人民政府. 2013. 国务院关于印发能源发展“十二五”规划的通知 [OL]. 2013-09-26. http://www.gov.cn/zwzk/2013-01/23/content_2318554.htm
- 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 2007. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究 [J]. 环境科学研究, 20(4): 15-20
- 闫雁, 王志辉, 白郁华, 等. 2005. 中国植被 VOC 排放清单的建立 [J]. 中国环境科学, 25(1): 110-114