

黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 2011. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 31(9): 1858-1871

Huang C, Chen C H, Li L, et al. 2011. Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 31(9): 1858-1871

长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究

黄成¹, 陈长虹^{1,*}, 李莉¹, 程真¹, 王红丽¹, 王杨君², 黄海英¹, 张钢锋¹, 陈宜然¹

1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233

2. 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

收稿日期: 2010-12-02

修回日期: 2011-01-11

录用日期: 2011-01-27

摘要: 在收集整理长江三角洲地区(简称“长三角”)各城市人为大气污染源资料的基础上,采用以“自下而上”为主的方法建立了 2007 年长三角地区人为源大气污染物排放清单。清单结果显示 2007 年长三角地区的 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 等大气污染物排放总量分别达到 2391.8、2292.9、6697.1、3115.7、1510.8、2767.4 和 458.9 kt, 单位面积污染物排放强度略高于珠三角地区。电厂和其他工业燃烧设施分别贡献了约 46% 和 45% 的 SO₂ 排放, 以及 59% 和 26% 左右的 NO_x 排放。电厂及水泥建材 + 钢铁冶金等工艺过程贡献了约 21% 和 57% 的 PM₁₀ 排放, 以及 28% 和 52% 的 PM_{2.5} 排放。石油加工、化工制造和工业喷涂等工艺过程的 VOCs 无组织排放占到总量的 65%。NH₃ 的主要排放源来自畜禽养殖和氮肥施用等农业部门, 分别占到总量的 48% 和 40%。长三角地区大气污染物的空间分布结果显示, 长三角高排放地区主要集中在长江下游的沿江一带及杭州湾地区一带。现有方法测算的 PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放结果仍存在较大的不确定性, 建议在未来不断加强本地大气污染源排放的基础研究, 以进一步改善我国各典型区域的大气污染物排放清单, 为区域大气污染联防联控提供重要的科研基础。

关键词: 排放清单; 人为源; 大气污染物; 排放特征; 空间分布; 长江三角洲地区

文章编号: 0253-2468(2011)09-1858-14

中图分类号: X51

文献标识码: A

Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China

HUANG Cheng¹, CHEN Changhong^{1,*}, LI Li¹, CHENG Zhen¹, WANG Hongli¹, WANG Yangjun², HUANG Haiying¹, ZHANG Gangfeng¹, CHEN Yiran¹

1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444

Received 2 December 2010;

received in revised form 11 January 2011;

accepted 27 January 2011

Abstract: This study developed an anthropogenic air pollutant emission inventory in the Yangtze River Delta (YRD) region for the year of 2007. A “Bottom-up” approach was adopted to compile the inventory based on major emission sources in sixteen cities of this region. Results show that the emissions of SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs, and NH₃ in the YRD region for the year of 2007 are 2391.8 kt, 2292.9 kt, 6697.1 kt, 3115.7 kt, 1510.8 kt, 2767.4 kt, and 458.9 kt, respectively. Power plants and other industrial combustion sources contribute 46% and 45% of SO₂ emission, and 59% and 26% of NO_x emission. Power plants and industrial process sources of mineral products and steel manufacturing contribute 21% and 57% of PM₁₀ emission, and also take up 28% and 52% of PM_{2.5} emission. The fugitive sources of oil refining, chemical products and industrial use of paint and solvent are responsible for 59% of the total VOCs emission. NH₃ emission mainly comes from the sources of livestock feeding and N-fertilizer application, which occupied 48% and 40%, respectively. The emissions were spatially allocated into grid cells with the resolution of 4 km × 4 km. The spatial distribution of emission illustrates that high emissions mainly concentrate in the cities along the downstream of the Yangtze River and surrounding the Hangzhou Bay. The emissions of PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs and NH₃ in the study still have high uncertainties, which suggests that more fundamental studies on local emission sources are needed to improve the emission inventory in the future.

Keywords: emission inventory; anthropogenic air pollutant emission; air pollutant; emission characteristics; spatial allocation; the YRD region

基金项目: 国家科技支撑计划(No. 2009BAK43B33); 公益性科研专项计划课题(No. 2010467001); 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项经费资助项目(No. 11K05ESPCP); 上海市科委资助项目(No. 10231203802)

Supported by the Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program in the “Eleven Five-year” Plan Period(No. 2009BAK43B33), the National Non-profit Scientific Research Program for Environmental Protection(No. 2010467001), the Special Fund of State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control Project(No. 11K05ESPCP) and the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality Fund Project (No. 10231203802)

作者简介: 黄成(1980—) 男, 工程师, E-mail: huangc@saes.sh.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: chench@saes.sh.cn

Biography: HUANG Cheng (1980—), male, engineer, E-mail: huangc@saes.sh.cn; * **Corresponding author**, E-mail: chench@saes.sh.cn

1 引言(Introduction)

大气污染物排放清单是了解各地区大气污染物排放及其时空分布,精确模拟该地区环境空气质量的重要资料.针对我国目前区域性大气污染较为突出的问题,大气污染物排放清单的相关研究正逐渐受到科研和决策部门的高度重视. Akimoto(1994)和 Streets(2003)等在亚洲地区大气污染物排放清单方面开展了大量工作,此后,田贺忠(2001)、张强(2005)和王丽涛(2005)等应用类似的方法开展了全国尺度的大气污染物排放清单工作.排放清单涵盖的污染源也从早期的能源消费过程排放,逐渐延伸到机动车尾气(Hao *et al.*, 2007)、典型工业行业(雷宇等, 2008; Wei *et al.*, 2008)及生物质燃烧(曹国良等, 2005)等各类人为污染源产生的排放.现有的区域大气污染物排放清单研究方法主要以“自上而下”法为主,该方法可以帮助人们较快地掌握研究地区的大气污染物排放总量,但对排放量分解落地的分辨率相对较低,容易造成模型模拟的偏差(Liu *et al.*, 2010),同时也不利于各地落实有针对性的污染源排放控制措施.随着我国典型城市群区

域性大气污染问题的日益加剧,区域大气污染物排放清单的研究逐渐成为区域联防联控的重要基础,其中 Zheng 等(2009a; 2009b)的研究为珠三角地区的大气污染研究积累了丰富的成果.相对而言,长三角地区仍鲜有较为全面的人为源大气污染物排放清单研究.为此,本文以2007年为基准年,以长三角地区主要人为污染源为研究对象,建立该地区的大气污染物排放清单,以期为长三角地区的区域性复合型大气污染研究提供科学基础.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区域

长三角地区位于我国东部沿海一带,主要包括了江苏、浙江、上海“两省一市”的16个城市,除上海市外,江苏省包括了南京市、扬州市、泰州市、南通市、镇江市、常州市、无锡市和苏州市,浙江省包括了杭州市、湖州市、嘉兴市、绍兴市、宁波市、舟山市和台州市.研究区域西起118.25°E,东至122.42°E,南抵28.90°N,北达33.30°N.本研究将研究区域划分为11979个4 km×4 km的网格.图1所示为本研究所选择的长三角地区16个城市的区域范围.

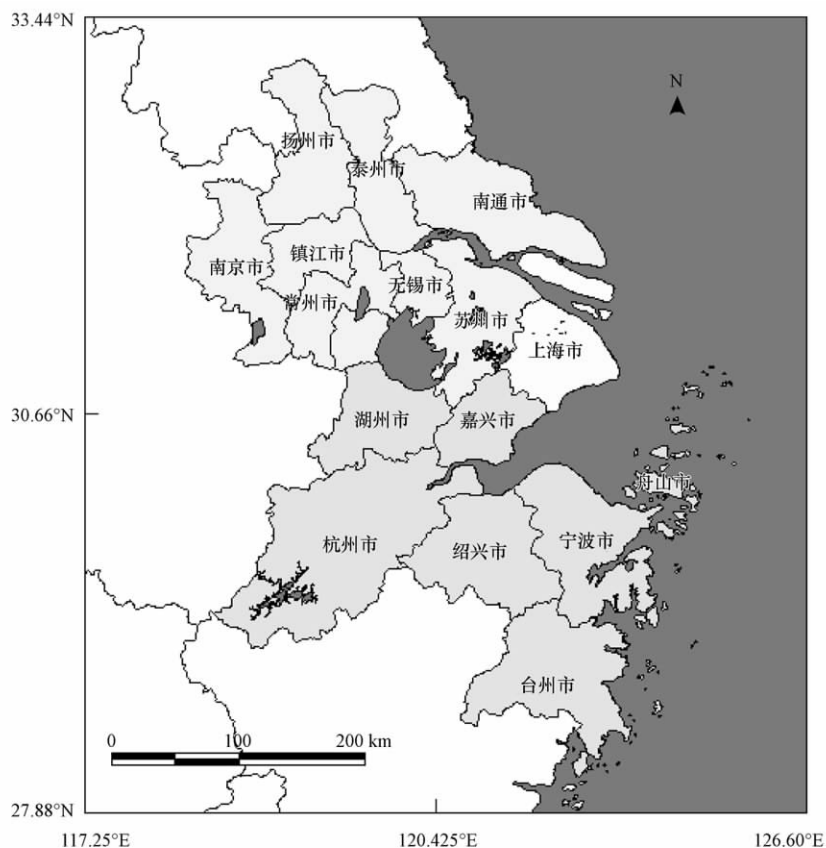


图1 长三角地区的研究区域

Fig. 1 Research domain for the Yangtze River Delta region

2.2 技术流程

本研究考虑的排放源主要涉及与人为活动相关的工业、交通、生活及农业等各个部门,工业部门主要包括电厂、工业锅炉、工业炉窑和其他非燃烧过程排放;交通部门主要考虑道路机动车及道路扬尘等;生活部门主要考虑民用燃料燃烧、建筑涂料挥发及油气逸散排放等;农业部门主要包括畜禽养殖、化肥施用及秸秆燃烧产生的排放。关注的主要污染物为 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 NH_3 , 其中既包括常规污染物,也包括对臭氧和灰霾具有重要贡献的前体污染物。

研究首先通过收集上述污染源 2007 年的活动量(如燃料消耗量、产品生产量、机动车行驶里程、涂料使用量等)和各类污染物的排放系数,计算长三角各地区的大气污染物排放量,然后利用 GIS 技术根据各类污染源的地理信息资料,对污染物排放进行落地,最后生成网格化的排放清单。

2.3 污染源排放系数与活动水平调查

2.3.1 燃料燃烧设施排放

长三角地区与燃烧相关的排放源主要包括电厂、工业锅炉、工业窑炉及民用小煤炉等燃烧设施。针对燃烧设施的排放,本研究主要采用“自下而上”的方法开展测算,即根据单台设施的燃料类型、燃料消费量、技术类型及末端治理技术等相关信息逐一计算其污染物排放量(E),计算方法如式(1)所示。各城市工业部门主要燃烧设施的数据源自 2007 年污染源普查资料及国家重点源环境统计资料,燃烧设施的调研信息主

要包括地理信息(包括经度和纬度)、燃料类型、燃料消费量、含硫率、灰份、燃烧方式、额定出力、末端治理设施及其效率等参数,对于未安装末端治理设施的设施,其末端治理效率设为 0。根据调查结果,长三角地区较大规模电厂和锅炉等燃烧设施的脱硫设备安装率达到 40%。燃煤设施基本均安装了除尘设备。其中,电厂和锅炉的脱硫效率分别设定为 90% 和 80%,各种除尘设备的去除效率参考自张强(2005)的研究结果。商业和民用部门燃料消费量取自各城市统计年鉴,且未考虑燃烧设施的技术类型,并假定其燃煤排放装有除尘设备。

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

式中 A 为排放源的活动量,即燃料消耗量(单位视燃料类型而定); EF 为不同污染源在不同技术下的污染物排放系数; η 为末端治理设施的污染物去除率; i, j, k 分别代表污染物、污染源及燃烧设施技术类型。其中, SO_2 的排放系数根据物料平衡方法计算,计算方法如式(2)所示。 NO_x 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 和 NH_3 等排放系数直接引自相关文献,其中,煤炭燃烧产生的主要污染物兼顾了不同的燃烧技术,而其他燃料产生的污染物排放系数均为经验系数。表 1 所示为燃料燃烧设施在未考虑末端治理技术情况下的污染物排放系数。

$$EF_{\text{SO}_2} = 2 \times C_s \times P \times 1000 \quad (2)$$

式中 C_s 为燃料的含硫率, P 为硫的转化率。

表 1 燃料燃烧设施污染物排放系数

Table 1 Emission factors of fueled combustion sources

燃料类型	排放源	技术类型	单位	排放系数				
				NO_x^a	CO^b	PM_{10}^c	$\text{PM}_{2.5}^c$	VOCs^d
煤炭	电厂	< 100 MW, 带低氮燃烧技术	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	10.50				0.15
		100 ~ 300 MW, 无低氮燃烧技术	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	8.85				0.15
		100 ~ 300 MW, 带低氮燃烧技术	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	5.85				0.15
		> 300 MW, 带低氮燃烧技术	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	5.55				0.15
		层燃炉	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		8.00	13.88	5.25	0.15
		煤粉炉	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$		2.00	46.00	12.00	0.15
	锅炉	手工炉排	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	3.80	124.00	5.40	1.89	0.18
		自动炉排	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	4.00	15.00	5.40	1.89	0.18
		循环流化床	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	7.50	2.00	28.08	5.40	0.18
	窑炉	水泥立窑	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	1.70	155.70	5.40	1.89	0.18
		新干法窑	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	15.30	17.80	5.40	1.89	0.18
		其他转窑	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	18.50	17.80	5.40	1.89	0.18
		石灰窑	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	1.70	155.70	5.40	1.89	0.18
		砖窑	$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	4.70	150.00	5.40	1.89	0.18
商用燃烧设施		$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	3.75	75.00	3.50	2.00	0.60	
居民燃烧设施		$\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	1.88	75.00	8.82	6.86	0.60	
焦炉煤气	工业燃烧设施	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	1.35	1.30	0.20	0.20	0.00044	
	生活燃烧设施	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	0.74	1.30	0.20	0.20	0.00044	

续表 1

燃料类型	排放源	技术类型	单位	排放系数				
				NO _x ^a	CO ^b	PM ₁₀ ^c	PM _{2.5} ^c	VOCs ^d
天然气	电厂		g·m ⁻³	4.10	1.30	0.12	0.12	0.18
	其他工业燃烧设施		g·m ⁻³	2.09	1.30	0.12	0.12	0.18
	生活燃烧设施		g·m ⁻³	1.46	1.30	0.12	0.12	0.18
液化天然气	工业燃烧设施		kg·t ⁻¹	2.63	0.36	0.08	0.08	0.19
	生活燃烧设施		kg·t ⁻¹	0.88~1.58	0.36	0.08	0.08	0.19
柴油	电厂		kg·t ⁻¹	7.40	0.60	0.50	0.50	0.13
	其他工业燃烧设施		kg·t ⁻¹	9.62	0.60	0.50	0.50	0.15
	生活燃烧设施		kg·t ⁻¹	5.77	0.60	0.50	0.50	0.15
燃料油	电厂		kg·t ⁻¹	10.06	0.60	0.85	0.62	0.13
	其他工业燃烧设施		kg·t ⁻¹	5.84	0.60	1.03	0.67	0.15
	生活燃烧设施		kg·t ⁻¹	3.50	0.60	1.20	0.90	0.15

注: a. 数据源于文献(田贺忠等, 2001; Zhang *et al.*, 2007); b. 数据源于文献(王丽涛等, 2005); c. 数据源于文献(张强, 2005); d. 数据源于文献(Bo *et al.*, 2008).

2.3.2 工业非燃烧过程排放 工业部门除燃烧设施产生的污染物排放外, 还有大量来自工艺过程各个环节的无组织排放, 如水泥制造、钢铁冶炼、原油加工等长三角地区典型的工业生产过程, 可能产生大量的颗粒物或 VOCs 逸散排放. 由于工艺过程排放来源相当复杂, 本研究采用式(1)所示的排放系数法进行测算, 活动量数据取自长三角地区各城市统计年鉴的工业产品产量或原料消耗量. 目前, 国内有关工艺过程污染物排放系数的研究仍相对较

少, 因此, 本研究选取的排放系数以国外的研究成果为主, 并且考虑了当前针对各类污染源主流的末端治理技术. 尽管如此, 本研究所列举的排放系数大部分为国外较早期的研究成果, 与国内现有的工业企业生产水平存在一定的差异, 建议在今后的研究中深入开展本地的污染源排放研究, 以加强排放系数的可靠性和代表性. 表 2 所示为工业非燃烧过程的大气污染物排放系数及相关文献.

表 2 工业非燃烧过程污染物排放系数

Table 2 Emission factors of non-combustion process in industries

工艺过程	活动量	单位	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	参考文献
植物油炼制	产品产量	kg·t ⁻¹						2.45		USEPA, 2002
啤酒	产品产量	kg·m ⁻³						0.20		Klimont <i>et al.</i> , 2002
酒精	产品产量	kg·m ⁻³						20.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
原油加工	原油加工量	kg·t ⁻¹	1.58	0.22				2.65		Klimont <i>et al.</i> , 2002
炼焦	焦炭产量	kg·t ⁻¹	2.01	0.02	0.64	2.75	1.75	2.10	0.09	USEPA, 2002
合成氨	产品产量	kg·t ⁻¹	0.03		7.90			4.72	2.10	USEPA, 2002
硫酸	产品产量	kg·t ⁻¹	7.00							USEPA, 2002
尿素	产品产量	kg·t ⁻¹				1.74	1.50		9.69	USEPA, 2002
涂料生产	产品产量	kg·t ⁻¹						15.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
油墨生产	产品产量	kg·t ⁻¹						30.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
塑料制造	产品产量	kg·t ⁻¹						2.20		Bo <i>et al.</i> , 2008
合成纤维	产品产量	kg·t ⁻¹						73.40		Bo <i>et al.</i> , 2008
轮胎制造	产品产量	kg·tyre ⁻¹						0.29		Klimont <i>et al.</i> , 2002
合成橡胶	产品产量	kg·t ⁻¹						15.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
水泥制造	产品产量	kg·t ⁻¹				8.05	3.40			雷宇等, 2008
砖瓦制造	产品产量	kg·t ⁻¹				0.13	0.04			Zhang <i>et al.</i> , 2009
炼铁	产品产量	kg·t ⁻¹	0.30	0.09	40.50	0.72	0.45			USEPA, 2002
炼钢	产品产量	kg·t ⁻¹			9.00	0.67	0.60	0.06		USEPA, 2002
钢铁加工	产品产量	kg·t ⁻¹				3.58	1.70			USEPA, 2002
铁合金生产	产品产量	kg·t ⁻¹				3.61	2.79			USEPA, 2002
铝制品	产品产量	kg·t ⁻¹				2.63	2.08			USEPA, 2002

续表 2

工艺过程	活动量	单位	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	参考文献
工业喷涂	涂料使用量	kg·t ⁻¹						730.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
油墨印刷	油墨使用量	kg·t ⁻¹						300.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
金属表面清洗	溶剂使用量	kg·t ⁻¹						900.00		Klimont <i>et al.</i> , 2002
工业溶剂使用	溶剂使用量	kg·t ⁻¹						300.00		USEPA, 2002

2.3.3 道路交通源 长三角地区是中国机动车保有水平最高的地区之一,本研究中长三角各城市机动车保有量取自各城市相关统计年鉴,各城市机动车污染物排放量采用 IVE 模型测算 (ISSRC, 2004). 本研究将车辆类型分为轻型客车、轻型货车、出租车、重型客车、公交巴士、重型货车、摩托车等 7 类,各类车辆根据燃料类型、燃料喷射方式、车重分类、排放控制技术及行驶里程进行详细划分. 为获取各类车型的详细技术分布,本研究分别调研了南京、杭州和上海等长三角地区典型城市的车辆技术、燃料类型、排放标准等技术分布. 调查结果显示,2007 年长三角地区轻型车辆以汽油为主要燃料,占到车辆总数的 94% 以上,重型车辆以柴油为主要燃料,占车辆总数的 90% 左右,现阶段车辆控制水平以国 2 标准为主,分别占轻型车和重型车总数的 50% 和 40%. 上述城市的车队技术信息经整理后分别作为江苏、浙江和上海各城市的车队技术文件输入模型用于排放测算. 模型所需的行驶工况文件取自上海市的已有研究成果 (Wang *et al.*, 2008). 环境温湿度参数调研自各城市的统计年鉴,车用油品质量和在用车检查与维护 (I/M) 水平根据长三角地区 2007 年的整体状况进行设定. 各车型行驶里程是机动车排放测算的重要参数,本研究调研了南京、杭州和上海等主要城市各车型的行驶里

程,并利用各城市的汽油消耗量进行验证. 根据调查结果,长三角地区客车、货车、出租车、公交车和摩托车的单车年平均行驶里程分别约为 1.8×10^4 、 3.3×10^4 、 11.5×10^4 、 6.5×10^4 和 0.7×10^4 km 左右.

道路扬尘排放也是交通部门的主要污染源之一. 道路扬尘排放系数 (EF_{dust}) 主要采用 USEPA 的有关方法,根据道路承载的车辆平均质量、道路的泥沙承载量及颗粒物粒度乘数等因素进行测算 (USEPA, 2002), 测算方法如式 (3) 所示.

$$EF_{\text{dust}} = k \left(\frac{SL}{2} \right)^{0.65} \left(\frac{W}{3} \right)^{1.5} \left(1 - \frac{P}{4N} \right) \quad (3)$$

式中 k 为不同粒度范围的粒度乘数 ($g \cdot km^{-1}$), SL 为路面的泥沙承载量 ($g \cdot m^{-2}$), W 为驶过路面的车辆的平均重量 (t), P 为超过 0.254 mm 的降水天数 (取 111 d), N 为天数 (取 1 年 365 d).

2.3.4 VOCs 逸散排放源 除工业部门外,长三角地区其他 VOCs 逸散排放源主要有建筑家居涂料使用、日用品溶剂挥发、油气逸散排放等. 其中,油气逸散排放包括了油库储运过程及加油站卸油、储存、加注等各阶段的 VOCs 排放 (Bo *et al.*, 2008). 计算所需的活动量数据主要取自各城市统计年鉴,各类污染源排放系数如表 3 所示.

表 3 VOCs 逸散排放源排放系数

Table 3 Emission factors of fugitive VOCs emission sources

排放源	活动量	单位	排放因子	参考文献
建筑家居涂料使用	涂料使用量	kg·t ⁻¹	0.36	Klimont <i>et al.</i> , 2002
居民溶剂使用	溶剂使用量	kg·人 ⁻¹	0.20	Klimont <i>et al.</i> , 2002
车辆维护	汽车保有量	kg·车 ⁻¹	1.11	Klimont <i>et al.</i> , 2002
垃圾填埋	填埋量	kg·t ⁻¹	0.23	Klimont <i>et al.</i> , 2002
油库储存				
原油	储存量	kg·t ⁻¹	0.12	Bo <i>et al.</i> , 2008
汽油	储存量	kg·t ⁻¹	0.16	Bo <i>et al.</i> , 2008
浸没式卸油过程损失	汽油消耗量	kg·t ⁻¹	1.16	Bo <i>et al.</i> , 2008
储罐呼吸损失	汽油消耗量	kg·t ⁻¹	0.16	Bo <i>et al.</i> , 2008
车辆加注过程				
加注过程损失 (无控制)	汽油消耗量	kg·t ⁻¹	1.74	Bo <i>et al.</i> , 2008
溢出损失	汽油消耗量	kg·t ⁻¹	0.11	Bo <i>et al.</i> , 2008

2.3.5 氨的人为排放源 已有研究表明,氨在酸雨、二次气溶胶、灰霾等大气复合型污染问题中发挥着重要的作用(Wu *et al.*, 2008). 本研究以长三角地区各城市统计年鉴为数据来源, 主要对长三角

地区的畜禽养殖、氮肥施用、污水处理、垃圾处置、合成氨工业生产及人体排出等典型的人为氨排放源进行测算. 测算选用的氨排放因子及其资料来源如表 4 所示.

表 4 氨的人为源排放系数

Table 4 Emission factors of anthropogenic ammonia emission sources

排放源	活动量	单位	排放因子	参考文献
畜禽养殖				
奶牛	年末存栏数	kg·头 ⁻¹	21.93	Zhang <i>et al.</i> , 2010
其它牛	年末存栏数	kg·头 ⁻¹	7.31	Zhang <i>et al.</i> , 2010
猪	年末存栏数	kg·头 ⁻¹	4.61	Zhang <i>et al.</i> , 2010
羊	年末存栏数	kg·头 ⁻¹	2.24	Zhang <i>et al.</i> , 2010
马	年末存栏数	kg·head ⁻¹	5.66	Zhang <i>et al.</i> , 2010
禽类	年末存栏数	kg·head ⁻¹	0.41	Zhang <i>et al.</i> , 2010
氮肥施用	氮肥施用量	kg·kg ⁻¹	16.81	董艳强等, 2009
污水处理	污水处理量	kg·m ⁻³	0.0032	尹沙沙等, 2010
垃圾处置	垃圾处置量	kg·t ⁻¹	0.56	尹沙沙等, 2010
人体排出	人口数	kg·人 ⁻¹	0.05	EEA, 2006

2.3.6 生物质燃烧 生物质燃烧也是长三角地区的主要大气污染源之一. 本研究的生物质燃烧排放主要考虑了家庭使用和野外焚烧两方面, 长三角地区各城市的生物质燃烧量根据长三角地区的主要农作物产量, 结合其谷草比、焚烧比例等参数计算所得(董艳强等, 2009). 排放系数引自曹国良等(2005)的相关研究成果.

2.4 排放量的空间分配方法

基于污染源的类型及其分布特点, 本研究采用不同的落地方法进行处理. 对于电厂、工业锅炉、工业炉窑等固定燃烧设施, 根据其经纬度信息进行定位, 并采用“自下而上”的方法, 分配到对应的网格中. 对于小型工业企业及工业无组织排放, 统一作为面源处理, 首先通过计算获得长三角地区各个区县的面源污染物排放总量, 然后采用“自上而下”的方法, 根据长三角地区的国内生产总值(GDP)分布资料, 将排放量分配到 4 km × 4 km 的网格中, GDP 分布资料来自全国 1 km × 1 km 分辨率的 GDP 分布数据(RESDC, 2003). 道路交通污染源排放主要根据长三角地区的交通路网进行分配. 首先根据道路类型分别计算获得各城市城区道路和郊区道路的污染物排放量, 然后分别利用城区和郊区道路的 GIS 分布, 将排放量分配到网格中. 考虑到其他污染物排放量主要与人口密度的分布有关, 因此, 本研究均采用“自上而下”的方法, 依据长三角地区详细

的人口密度分布信息, 对各类污染源排放进行分配计算, 人口分布数据取自 2006 年美国橡树岭国家实验室提供的 30" × 30" 分辨率人口密度分布数据(ORNL, 2007), 再分配到 4 km × 4 km 的网格中.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 长三角地区各城市人为源大气污染物排放清单

表 5 所示为 2007 年长三角地区 16 个城市人为源大气污染物排放的测算结果. 据测算, 长三角区域的 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放总量分别为 2391.8、2292.9、6697.1、3115.7、1510.8、2767.4 和 458.9 kt. 其中, 上海、苏州、无锡、宁波等城市的大气污染物排放相对较高. 这些城市相互间的距离均在 200 km 范围内, 根据已有的研究可以预见, 在特定的气象条件下, 长三角区域各城市之间的相互影响将十分突出, 各个城市的大气污染问题将很难仅仅依靠自身的努力而得到根本解决(Chen *et al.*, 2007; Streets *et al.*, 2007).

国家“十一五”规划期间, 长三角地区电厂已开始陆续实施电厂烟气脱硫工程, 2007 年末, 长三角地区约有 40% 的发电机组完成脱硫设施安装, 若按照 90% 的脱硫效率测算, 约减少了区域 SO₂ 排放 153 kt. 到 2010 年末, 长三角地区若按计划完成所有电厂的烟气脱硫, 还可进一步降低 SO₂ 排放 79 kt.

表 5 2007 年长三角地区各城市人为源大气污染物排放清单

Table 5 City-specific air pollutant emission inventory in the YRD region in 2007

省份	城市	相对上海距离 /km	污染物年排放总量/kt						
			SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
江苏省	苏州市	85	281.7	368.6	1205.1	389.2	208.1	483.3	26.3
	南通市	98	139.4	90.5	308.9	111.6	56.8	87.7	71.1
	无锡市	117	261.4	183.7	488.0	347.5	167.8	191.7	26.8
	常州市	158	145.4	90.7	455.4	211.6	98.8	73.2	16.3
	泰州市	200	18.2	52.5	148.7	64.9	31.2	62.8	32.9
	镇江市	220	131.6	103.3	128.5	208.3	96.4	45.9	14.3
	扬州市	234	43.9	110.4	164.8	81.8	48.3	58.1	50.7
	南京市	272	221.0	144.2	739.7	255.9	129.7	153.2	24.1
浙江省	嘉兴市	85	120.9	114.3	203.3	219.7	97.4	58.0	36.7
	湖州市	137	81.3	71.5	144.2	190.0	83.2	53.7	20.1
	宁波市	150	254.8	211.0	284.0	211.6	111.6	150.3	25.4
	舟山市	157	4.2	15.7	18.6	10.4	6.1	17.9	1.7
	绍兴市	163	135.0	105.0	213.5	196.8	88.2	287.3	21.3
	杭州市	164	126.2	134.5	482.5	282.0	129.3	391.6	29.6
	台州市	267	28.1	117.1	156.5	69.1	38.5	66.0	19.0
	上海市	0	398.8	380.0	1555.5	265.5	119.2	586.9	42.6
合计	-	2391.8	2292.9	6697.1	3115.7	1510.8	2767.4	458.9	

3.2 长三角地区主要人为源排放分担率

图 2 所示为长三角地区各类人为源的排放分担情况. 2007 年, 长三角地区 SO₂ 的主要排放源为电厂、工业锅炉及其他工业部门燃烧(分散燃烧)排放, 分别占排放总量的 46%、18% 和 28%. 到 2010 年, 长三角地区电厂 SO₂ 排放将得到进一步削减, 预计电厂分担率将降为 19% 左右. NO_x 的主要排放源为电厂、工业锅炉和其他工业燃烧设施(分散燃烧)排放, 分别约占 59%、8% 和 18%, 机动车排放约占到 12%. PM₁₀ 的主要排放源一部分来自电厂及其他工业燃烧设施(分散燃烧)排放, 分别占到总量的 21% 和 9%. 此外, 水泥建材和钢铁冶炼等工艺过程中产生的无组织排放也占有相当大的比例, 分别达到 45% 和 12%. 道路扬尘约占总量的 8%. PM_{2.5} 排放分担率与 PM₁₀ 相近, 电厂烟气经除尘处理后, 其中的 PM_{2.5} 所占比例将提高至 28%, 而水泥建材等工业无组织排放以粗颗粒为主, 其 PM_{2.5} 分担率相比 PM₁₀ 降为 39%. 长三角地区的 VOCs 排放源相对复杂, 主要来自工业生产过程的无组织排放, 如石油加工、化工制造、工业涂料与溶剂使用等工艺过程, 分别占 6%、40%、19%. 此外, 机动车排放约占总量的 12%, 民用涂料与溶剂挥发、油气逸散排放分别占 VOCs 排放总量的 12.6%、2.0%. NH₃ 排放主要来自农业部门, 其中, 畜禽养殖和化肥施用排放分别占总量的 48% 和 40%, 此外, 合成氨及其氮肥生产等工业部门排放约占 4%, 废水处理与垃圾填埋产生

的挥发排放约占 3%.

另需指出的是, 秸秆燃烧排放仅占 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放总量的 0.1%、0.7%、1.6%、2.6%、3.5% 和 2.2%. 但长三角地区的秸秆燃烧排放通常集中在 5 月至 6 月的春季和 9 月至 10 月的秋季, 短时间、大范围内产生的集中排放对区域的环境空气质量具有非常不利的影响, 已成为影响跨区域甚至跨国界污染输送的重要污染源 (Wang *et al.*, 2007; Oltmans *et al.*, 2010), 应当引起足够的关注.

图 3 所示为长三角地区各城市 SO₂、NO_x、PM₁₀、VOCs 和 NH₃ 等主要污染物的排放量排序及其污染源贡献. 由图 3 可知, 上海、苏州、宁波、无锡和南京等城市是长三角地区 NO_x 排放量最高的几个城市, 其 NO_x 排放主要来自电厂及其他工业燃料燃烧排放, 上述地区的机动车 NO_x 排放贡献也相对较大. PM₁₀ 排放最高的几个城市为苏州、无锡、杭州、上海和南京等, 大部分城市的 PM₁₀ 排放主要来自水泥建材等工业生产过程的, 苏州、无锡和南京等城市钢铁行业的 PM₁₀ 排放贡献也相对较高. 上海、苏州、杭州和绍兴等城市的 VOCs 排放量较大, 主要来自化工行业, 上海、南京、宁波等城市的炼化企业 VOCs 排放贡献也比较明显. NH₃ 排放较高的城市依次为南通、扬州、上海、嘉兴和泰州, 畜禽养殖和氮肥施用产生的挥发排放均为其 NH₃ 排放的主要来源.

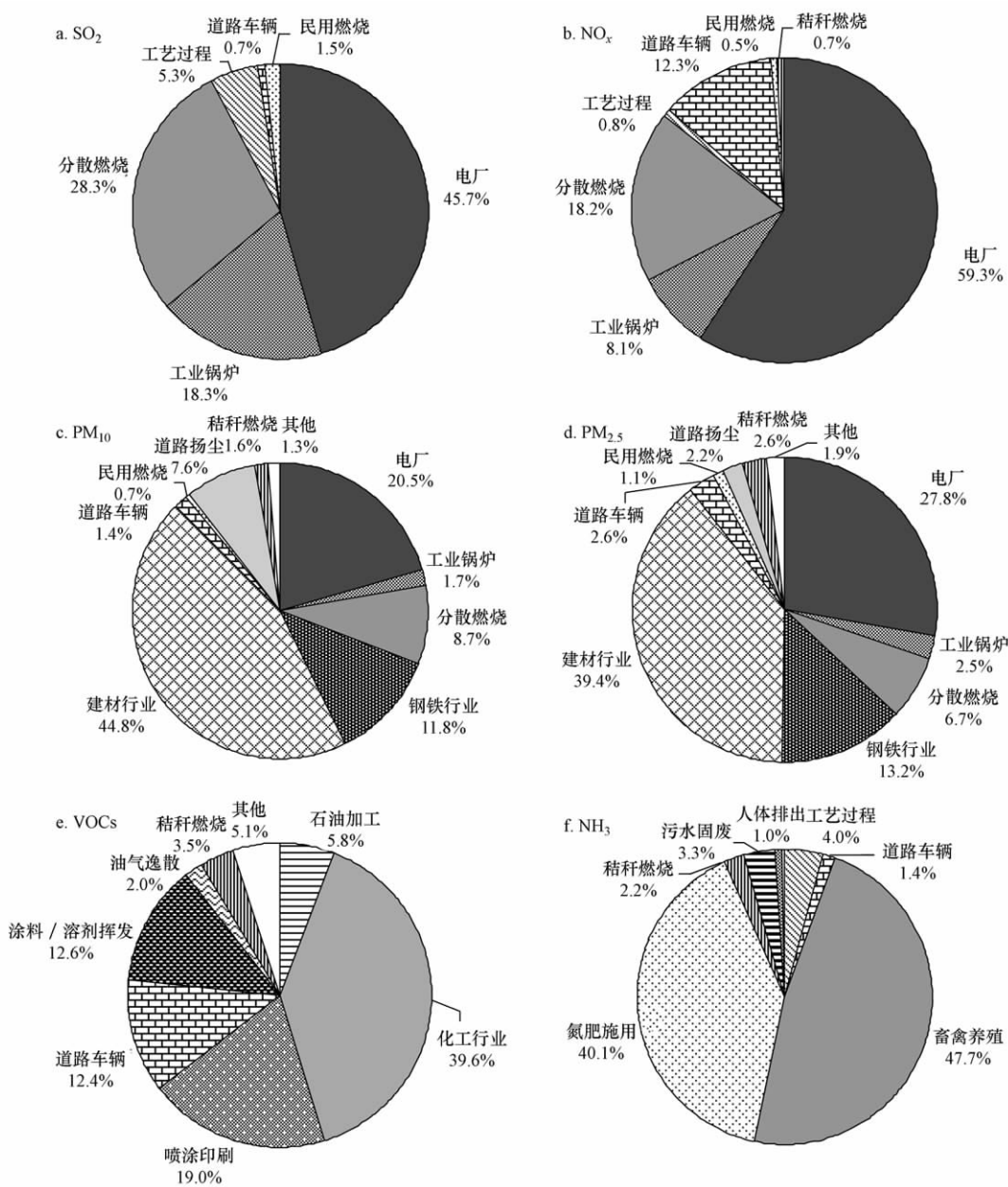
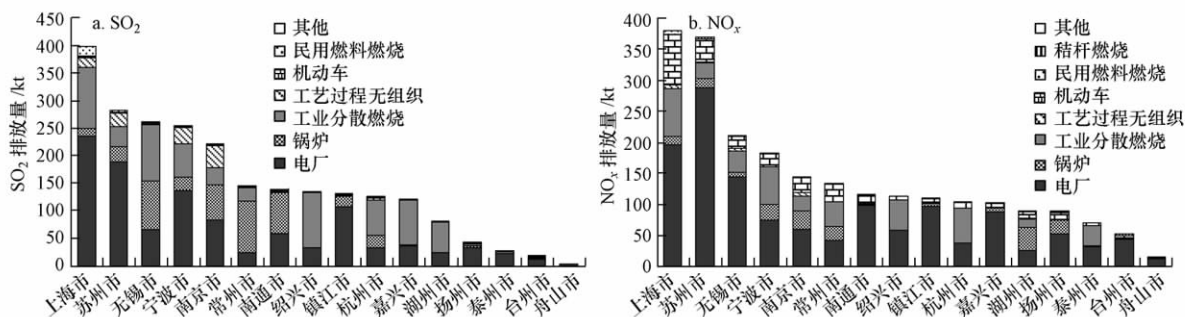


图 2 2007 年长三角地区各人为源排放分担率

Fig. 2 Emission contributions of source categories in the YRD region in 2007



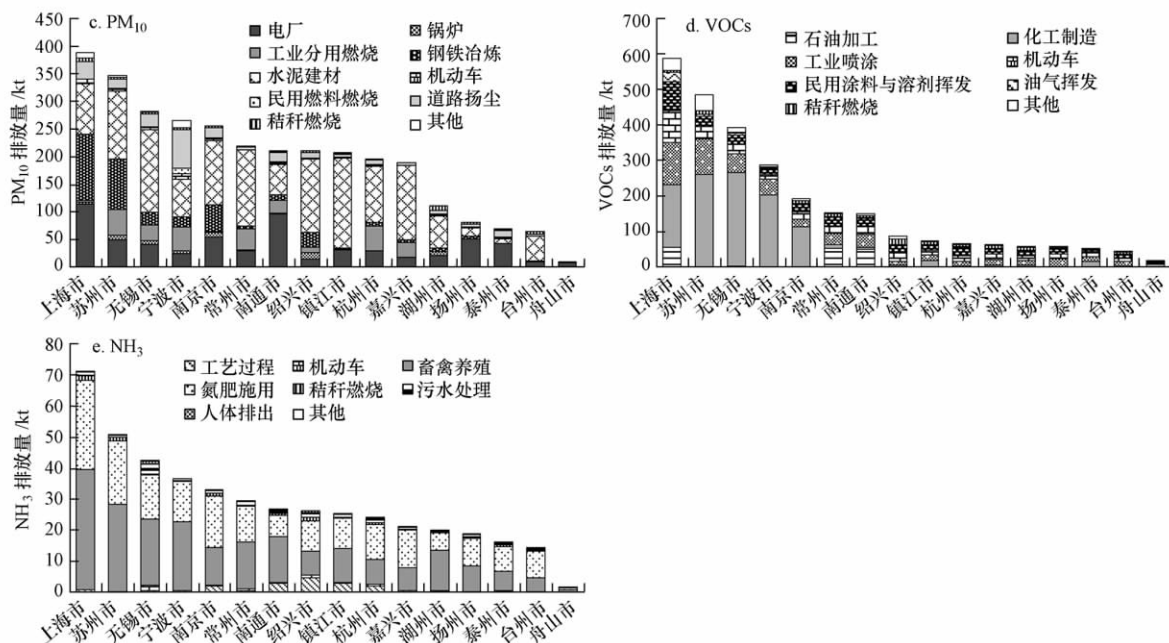


图3 长三角地区各城市主要污染源排放量与排放分担情况

Fig. 3 Emission contributions of source categories of the cities in the YRD region

3.3 长三角地区人为源大气污染物排放的空间分布

根据长三角地区各类污染源的地理分布特征, 分别将各类大气污染物排放分配入已建立的 4 km × 4 km 网格中, 结果见图 4. 由图 4 可知, 长三角地区的 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 等大气污染物排放主要分布在上海、苏州、无锡、嘉兴、杭州、绍兴和宁波等距上海 200 km 范围以内的长三角东部地区, 排放量最为集中的地区分别为途径南京、镇江、常州、无锡、苏州和上海北部地区的长江下游一带, 以及围绕杭州湾的宁波、绍兴、杭州、嘉兴及上海南部地区. 由于 NH₃ 的排放主要来自农业部门, 其分布特征有别于其他污染物, 在南通、嘉兴、扬州、泰州及上海城郊地区的排放强度相对较高.

总体来看, 长三角地区的大气污染物排放大量集中于人口相对密集、工业相对发达的区域, SO₂、PM₁₀ 等一次污染物及 NO_x、VOCs 和 PM_{2.5} 等二次污染前体物在这些区域集中排放, 使得这些区域在不利的天气条件下, 极易发生高浓度的区域性复合型大气污染, 影响整个区域的环境空气质量.

3.4 排放清单的不确定性与对比研究

3.4.1 排放清单的不确定因素评估 本研究所建立的排放清单主要基于长三角地区各城市的污染源实地调查资料, 其中, 电厂、锅炉和窑炉等污染源的地理位置、能源消耗等活动水平数据来自实际调

查结果, 可信度较高. 工业产品产量、民用燃料消费量、机动车保有量、涂料使用量、氮肥施用量及畜禽养殖数等资料来自各城市的相关统计数据, 也具有一定的可靠性, 但这些污染源的排放落地依据的是人口和 GDP 分布数据. 因此, 若评估单个网格的实际污染物排放量, 其不确定性仍然较大, 必须通过掌握详细的污染源信息, 才有助于进一步完善大气污染排放清单.

排放因子是影响排放测算结果准确性的重要因素, 本研究中燃烧设施排放的 SO₂、NO_x 等常规污染物排放因子在国内已有较好的研究基础, 计算过程考虑了燃料特性(硫分、灰分等)、燃烧方式等本地调查所得的基础资料, 可靠性相对较高. 此外, 机动车排放来自长三角地区的研究成果, 与实测结果具有一定的可比性(Wang *et al.*, 2008). 相对而言, 国内在 PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 等污染物方面的污染源基础研究仍相对较少, 其排放因子仍以美国和欧洲的研究成果为主, 与本地的实际情况往往存在比较大的差别, 不确定性较大. 可见, 加快开展基于本地污染源排放的基础研究, 建立以我国污染源技术特点为基础的排放因子数据库, 对于核准大气污染物排放清单具有非常重要的意义.

本研究测算的长三角区域排放清单尚未涵盖火车机车、船舶、飞机及工程机械等非道路移动源, 建筑工地、堆场等扬尘排放源, 以及部分尚未可知

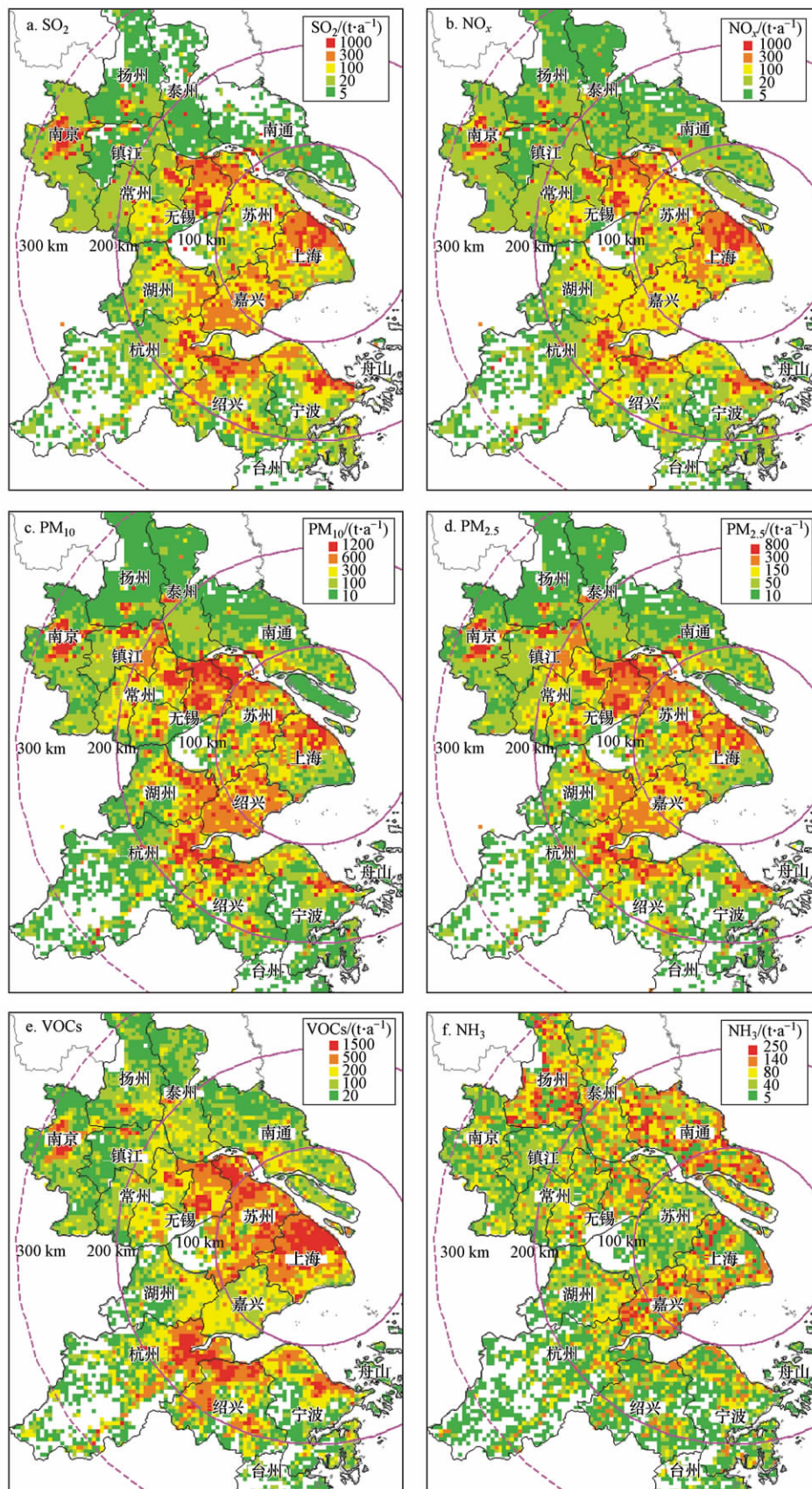


图 4 2007 年长三角地区人为源大气污染物排放空间分布

Fig. 4 Spatial allocation of air pollutant emissions in the YRD region in 2007

的人为污染源,使得现有排放清单存在一定的低估.

3.4.2 长三角排放清单的不同研究结果比对 为反映本研究清单结果与相关研究之间的差异,选取2006年亚洲INTEX-B排放清单与本研究进行比对研究(Zhang et al., 2009).取两项研究结果与长三角地区对应网格中的排放结果进行比较,本研究区域的SO₂、NO_x、PM₁₀和VOCs排放量分别高出INTEX-B对应区域排放量的-3.8%、7.0%、58.1%

和23.8%,具体如图5所示.总体来看,SO₂、NO_x排放主要与工业部门能源消费相关,两者计算的结果较为接近,而PM₁₀和VOCs排放则涉及到大量本地源的无组织排放,计算结果总体高于INTEX-B的研究结果.从对应网格排放结果的关系来看,各项污染物排放的总体分布较为相近,能够较为准确地反映长三角地区的排放分布特征.

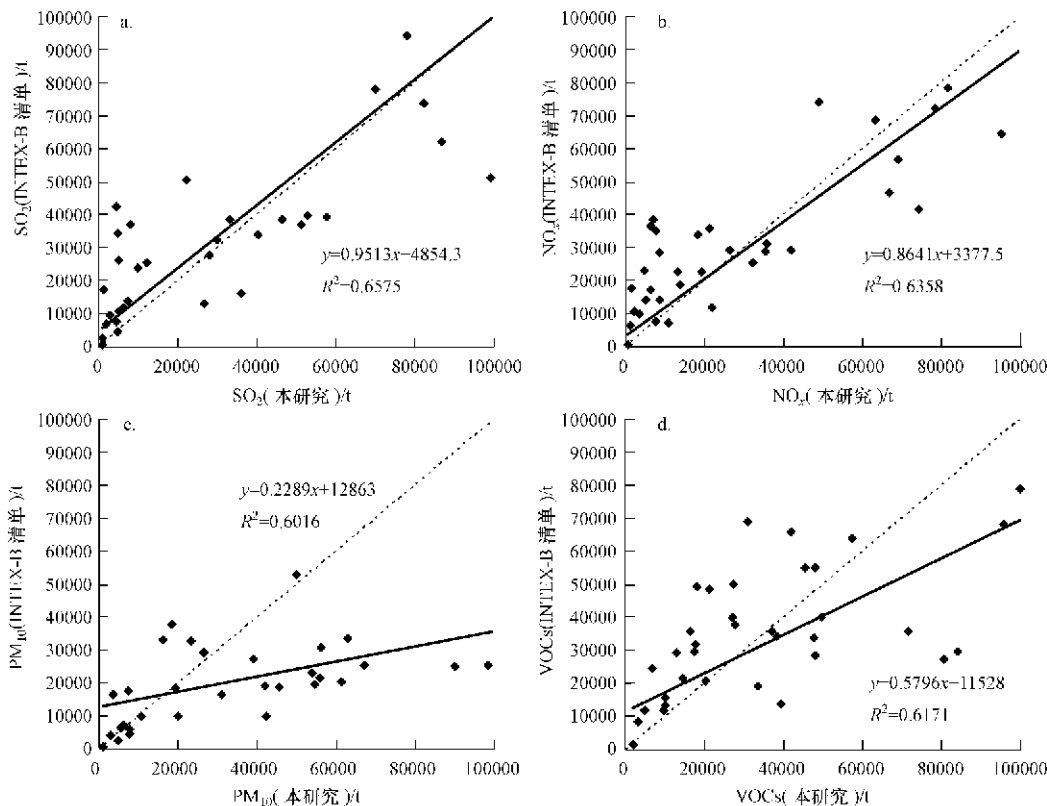


图5 2006年INTEX-B亚洲大气污染物排放清单与本研究的对应比较

Fig. 5 Comparison of 2006 INTEX-B Asian emission inventory and this study

为进一步比较本研究的大气污染物排放清单测算结果,图6选取了NO_x、PM_{2.5}和VOCs等主要前

体污染物排放结果与相关研究的排放清单结果进行比较.考虑到其他文献较少涉及长三角地区的排

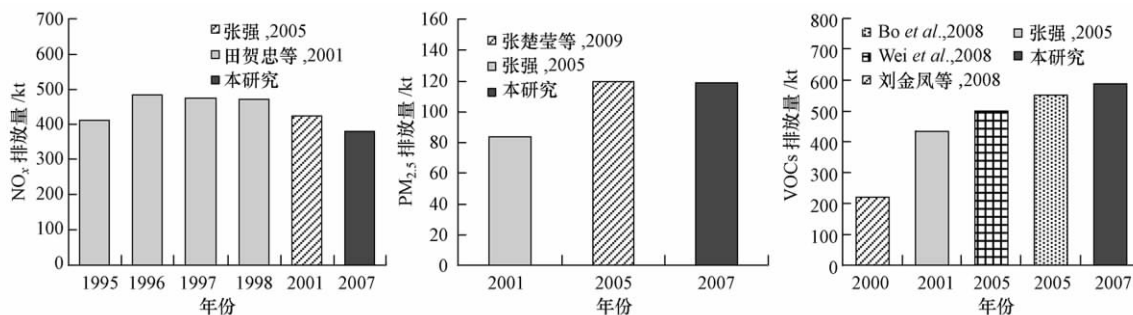


图6 上海市人为源大气污染物排放清单结果与其他研究的比较

Fig. 6 Comparison of Shanghai anthropogenic emission inventory and other studies

放清单,本次比较仅提取了上海市的结果进行同比。由图6可见,本研究的各项污染物测算结果与其他研究相比差异较小,特别是与近期的研究成果比较接近,说明本研究的测算结果从总体上客观反映了长三角地区人为源大气污染物的排放水平。此外,图中列举的研究均为全国尺度的排放清单研究成果,在空间分布上以 $36\text{ km} \times 36\text{ km}$ 的分辨率为,很难详细描述长三角或其他典型区域的排放分布特征。相对而言,本研究构建了以城市为基础的排放清单,进一步细化了污染源的空间分辨率,提高了排放清单的精度,有助于区域尺度数值模型的精确模拟,从而为区域大气污染研究提供坚实的基础资料。

3.4.3 长三角与珠三角地区大气污染物排放清单的比较 为了解长三角地区的大气污染物排放水平,本研究选取同为我国发达城市群的珠三角地区,比较 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs及 NH_3 等主要污染物的单位面积排放强度及其污染源组成,珠三角地区的排放清单数据来自Zheng等2006年的研究成果(Zheng *et al.*, 2009b; Yin *et al.*, 2010)。通过比较可以发现,长三角地区除颗粒物外的其他污染物排放强度与珠三角地区总体相近, SO_2 和VOCs略高于珠三角地区,但 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放强度则要远高于珠三角地区,是珠三角地区的2.5倍以上,说明长三角地区的一次颗粒物来源相对珠三角地区更广。

从污染源的排放分担率来看,两大区域的 SO_2 和 NO_x 排放均主要来自电厂和工业源。相对而言,长三角地区的电厂和工业 NO_x 排放强度均高于珠三角地区,这主要是由于长三角地区整体能源消费量普遍较高,据统计2007年长三角地区“二省一市”能源消费总量相当于广东省的2.5倍,单位面积排放强度相当于广东省的2倍(国家统计局,2008a)。此外,长三角地区是我国十分重要的炼化和钢铁生产地,与之相关的石油加工、化工品制造、水泥、钢铁等高能耗、高污染的工业企业对长三角地区的PM和VOCs排放具有非常重要的贡献。国家统计数据表明,2007年长三角地区“二省一市”的原油加工量及乙烯、水泥、生铁和钢产量分别相当于珠三角地区的2.0倍、1.8倍、2.6倍、7.8倍和6.3倍(国家统计局,2008b)。相对而言,长三角地区的机动车保有量和排放水平与珠三角地区比较接近,但其地域面积相当于珠三角的2.7倍,因此,长三角地区的机

动车排放强度总体上低于珠三角地区;另一方面,长三角地区的工业污染物排放体量过大,也使长三角地区的机动车排放分担率显得并不突出。尽管如此,机动车尾气仍是长三角地区各城市,特别是城区大气污染的重要来源之一。总体来看,长三角地区是目前我国工业和交通最为集中的地区之一,由大规模的工业源排放和道路机动车尾气所构成的复合型污染特征将成为长期制约长三角区域大气环境的重要因素。因此,进一步加大工业污染源排放的控制和管理,加快产业结构调整 and 逐步淘汰高能耗、高污染企业应当成为长三角区域大气污染联防联控的重点工作。此外,在机动车保有量保持持续快速增长的前提下,不断提升机动车污染控制水平,将是一项长期的和必要的工作。

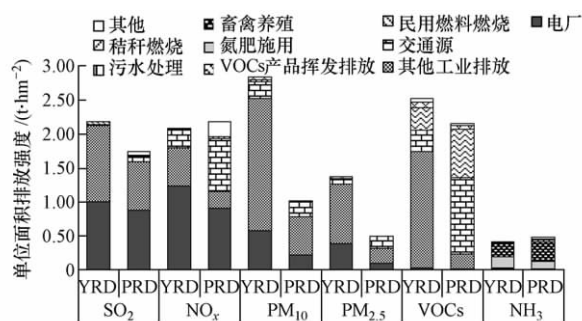


图7 长三角地区(YRD)珠三角地区(PRD)人为源大气污染物排放强度与污染源贡献比较

Fig. 7 Comparison of anthropogenic air pollutant emissions and source contributions between the Yangtze River Delta (YRD) and the Pearl River Delta (PRD) region

4 结论(Conclusions)

1) 本研究通过收集汇总长三角各城市的工业污染源基础信息、城市能源消费、车辆构成及农业部门基础资料,建立了2007年长三角区域大气污染物排放清单。据测算,长三角地区16个城市的 SO_2 、 NO_x 、CO、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs和 NH_3 排放总量分别达到2391.8、2292.9、6697.1、3115.7、1510.8、2767.4和458.9 kt。从排放强度上看,长三角地区的大气污染物排放水平略高于珠三角地区,特别是 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放相当于珠三角地区的2.5倍以上。

2) 长三角地区的人为源排放主要分布在途经南京、镇江、常州、无锡、苏州和上海北部地区的长江下游一带,以及围绕杭州湾的宁波、绍兴、杭州、嘉兴及上海南部地区,高排放区相距均在100~200 km范围内,在不利的气象条件下,各地区相互间的

污染影响将十分明显。

3) 从排放分担率来看,长三角电厂完成烟气脱硫工程以后,SO₂排放将得到较大的削减。NO_x、VOCs和颗粒物排放将成为“十二五”期间乃至更长一段时期内长三角地区的大气污染控制重点,电厂、机动车及钢铁、石化、水泥等传统工业企业对上述污染物具有非常重要的贡献,应是下一阶段长三角地区各城市大气污染控制的重点和关键。

5 建议(Suggestions)

现有方法在测算PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs和NH₃等二次污染的重要前体物上仍然存在比较大的不确定性,可能是造成臭氧和细颗粒等复杂污染现象模拟不准的主要原因(Liu *et al.*, 2010)。建议加强大气污染源排放的基础研究,有针对性地开展典型污染源的排放因子数据库。同时,建议进一步完善大气污染源的相关信息,加强排放清单在指导大气污染源管理方面的应用价值。

责任作者简介: 陈长虹(1954—),男,教授级高工,上海市环境科学研究院大气所所长,长期从事城市和区域大气环境研究。先后获上海市科学技术进步二等奖和三等奖,发表论文近70余篇。E-mail: chencl@saes.sh.cn.

参考文献(References):

Akimoto H, Narita H. 1994. Distribution of SO₂, NO_x, and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution [J]. *Atmospheric Environment*, 28: 213-225

Bo Y, Cai H, Xie S D. 2008. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8: 7297-7316

曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 2005. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. *中国环境科学*, 25(4): 389-393

Cao G L, Zhang X Y, Wang D, *et al.* 2005. Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. *China Environmental Science*, 25(4): 389-393 (in Chinese)

Chen D S, Cheng S Y, Liu L, *et al.* 2007. An integrated MM5-CMAQ modeling approach for assessing trans-boundary PM₁₀ contribution to the host city of 2008 Olympic summer games-Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 41(6): 1237-1250

董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 2009. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. *环境科学学报*, 29(8): 1-7

Dong Y Q, Chen C H, Huang C, *et al.* 2009. Anthropogenic emissions and distribution of ammonia over the Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29(8): 1-7 (in Chinese)

European Environment Agency (EEA). 2006. EMEP/CORINAIR

emission inventory guidebook-2006 [R]. No. 1112006. Denmark: European Environment

国家统计局. 2008a. 中国能源统计年鉴 2008 [M]. 北京: 中国统计出版社

National Bureau of Statistical of China. 2008a. China Energy Statistical Yearbook 2008 [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)

国家统计局. 2008b. 中国统计年鉴 2008 [M]. 北京: 中国统计出版社

National Bureau of Statistical of China. 2008b. China Statistical Yearbook 2008 [M]. Beijing: China Statistics Press (in Chinese)

Hao C, Xie S D. 2007. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005 [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 8963-8979

International Sustainable Systems Research Center (ISSRC). 2004. IVE (International Vehicle Emission) Model Users Manuals [OL]. 2010-05-06. <http://www.gssr.net/ive>

Kilmont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* 2002. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Atmospheric Environment*, 36: 1309-1322

雷宇, 贺克斌, 张强, 等. 2008. 基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J]. *环境科学*, 29(8): 496-500

Lei Y, He K B, Zhang Q, *et al.* 2008. Technology-based emission inventory of particulate matters (PM) from cement industry [J]. *Environmental Science*, 29(8): 2366-2371 (in Chinese)

刘金凤, 赵静, 李涪涪, 等. 2008. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 28(6): 496-500

Liu J F, Zhao J, Li T T, *et al.* 2008. Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory [J]. *China Environmental Science*, 29(8): 2366-2371 (in Chinese)

Liu X H, Zhang Y, Cheng S H, *et al.* 2010. Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part I performance evaluation and seasonal variation [J]. *Atmospheric Environment*, 44: 2415-2426

Oak Ridge National Laboratory (ORNL). 2007. LandScan global population 2006 database [OL]. 2009-07-01. <http://www.ornl.gov/landscan/>

Oltmans S J, Lefohn A S, Harris J M, *et al.* 2010. Enhanced ozone over western North America from biomass burning in Eurasia during April 2008 as seen in surface and profile observations [J]. *Atmospheric Environment*, 44(35): 4497-4509

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), doi: 10.1029/2002JD003093

Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 41: 480-492

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

Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* 2001. Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China [J]. *China*

- Environmental Sciences ,21(6) : 493-497 (in Chinese)
- U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) . 2002. Compilation of air pollutant emission Factors ,AP-42 ,5th ed. [OL]. 2005-09-16. <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- Wang H K ,Chen C H ,Huang C , *et al.* 2008. On-road vehicle emission inventory and its uncertainty analysis for Shanghai , China [J]. Science of the Total Environment ,398(1/3) : 60-67
- 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
- Wang L T ,Zhang Q ,Hao J M , *et al.* 2005. Anthropogenic CO emission inventory of Mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae , 25(12) : 1580-1585 (in Chinese)
- Wang Q Q ,Shao M ,Liu Y , *et al.* 2007. Impact of biomass burning on urban air quality estimated by organic tracers: Guangzhou and Beijing as cases [J]. Atmospheric Environment , 41 (37) : 8380-8390
- Wei W ,Wang S X ,Chatani S , *et al.* 2008. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment ,42: 4976-4988
- Wu S Y ,Hu J L ,Zhang Y , *et al.* 2008. Modeling atmospheric transport and fate of ammonia in North Carolina—Part II: Effect of ammonia emissions on fine particulate matter formation [J]. Atmospheric Environment ,42: 3438-3440
- 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
- Yin S S ,Zheng J Y ,Zhang L J , *et al.* 2010. Anthropogenic ammonia emission inventory and characteristics in the Pearl River Delta region [J]. Environmental Science ,31(5) : 1146-1151 (in Chinese)
- 张楚莹,王书肖,赵瑜,等. 2009. 中国人源颗粒物排放现状与趋势分析[J]. 环境科学,30(7) : 1881-1887
- Zhang C Y ,Wang S X ,Zhao Y , *et al.* 2009. Current status and future prospects of anthropogenic particulate matter emissions in China [J]. Environmental Science ,30(7) : 1881-1887(in Chinese)
- 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
- Zhang Q. 2005. Study on regional fine PM emissions and modeling in China [D]. Beijing: Tsinghua University(in Chinese)
- Zhang Q ,Streets D G ,He K B , *et al.* 2007. NO_x emission trend for China ,1995—2004: the view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research ,112(D22306) ,doi: 10. 1029/2007JD008684
- Zhang Q ,Streets D G ,Carmichael G R , *et al.* 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B emission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics ,9: 4081-4139
- Zhang Y ,Dore A J ,Ma L , *et al.* 2010. Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain [J]. Environmental Pollution ,158: 490-501
- Zheng J Y ,Shao M ,Che W W , *et al.* 2009a. Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta , China [J]. Environmental Science & Technology ,43: 8580-8586
- Zheng J Y ,Zhang L J ,Che W W , *et al.* 2009b. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region , China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment ,43: 5112-5122
- 中国科学院资源环境科学数据中心(RESDC) . 2003. 全国 1 km × 1 km GDP 分布数据 2003 [OL]. 2009-10-12. <http://www.resdc.cn/UA/>
- Resource and Environmental Science Data Center (RESDC) . 2003. National 1 km × 1 km GDP data ,2003 [OL]. 2009-10-12. <http://www.resdc.cn/UA/>(in Chinese)