

珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征

郑君瑜^{1*}, 张礼俊¹, 钟流举², 王兆礼³ (1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省环境保护监测中心站, 广东 广州 510045; 3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 估算了珠江三角洲地区 2006 年大气面源污染物的排放清单, 并利用 2006 年珠江三角洲人口分布栅格数据作为代用空间分配权重因子, 建立了该地区大气面源 3km×3km 的 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 VOC 网格化排放清单。结果表明, 2006 年珠江三角洲大气面源排放的 SO₂ 为 1.12×10⁵ t, NO_x 为 5.25×10⁴ t, PM₁₀ 为 1.6×10⁵ t, VOC 为 3.14×10⁵ t。SO₂、NO_x 和 PM₁₀ 排放量较大的区域集中在广州市区、佛山、东莞和中山, 而 VOC 排放量较大的区域位于广州市区、东莞和深圳。

关键词: 珠江三角洲; 大气污染面源; GIS; 排放清单; 空间分布

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2009)05-0455-06

Area source emission inventory of air pollutant and its spatial distribution characteristics in Pearl River Delta.

ZHENG Jun-yu^{1*}, ZHANG Li-jun¹, ZHONG Liu-ju², WANG Zhao-li³ (1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Science and Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510045, China; 3. College of Architecture and Civil Engineering, South China University of Science and Technology, Guangzhou 510641, China). *China Environmental Science*, 2009, 29(5): 455~460

Abstract: The 2006 Pearl River Delta (PRD) area source emission inventories of air pollutant and 3km×3km grid cell-based emission inventories of SO₂, NO_x, PM₁₀, and VOC were established using the 2006 gridded data of population distributions as spatial surrogates. The total emissions of SO₂, NO_x, PM₁₀, and VOC from area sources of PRD were 1.12×10⁵, 5.25×10⁴, 1.6×10⁵, 3.14×10⁵ t, respectively, for the year of 2006. The large amount of emissions of SO₂, NO_x and PM₁₀ were concentrated on the cities of Guangzhou, Foshan, Dongguan and Zhongshan while VOC emissions were mostly distributed in Guangzhou, Dongguan and Shenzhen.

Key words: Pearl River Delta; air pollutant area sources; GIS; emission inventory; spatial distribution

近年来的研究表明, 珠江三角洲(简称珠三角)城市群呈现出区域性大气复合污染的特征, 大气面源排放的污染物对该地区的大气污染物总量有着重要的贡献^[1-2]。大气面源估算时难度较大, 此外排放源基础数据的获取也比较困难, 空间分配存在着很大的挑战^[3-4]。

对大气污染源污染物排放进行空间分配是空气质量模型前处理模式中关键的步骤之一。污染源空间分配的准确性将直接影响到空气质量模型模拟的准确性^[4-5]。大气污染源中点源排放污染物的空间分配可根据其经纬度坐标直接进行空间插值; 而对于大气面源, 由于排放源数量众多, 空间信息数据缺乏, 其空间分配的难度要比点源大很多, 需要借助一定的权重因子(如人口、GDP 等)和 GIS 空间分析工具进行空间分配, 所

能达到的精度受到排放清单的空间尺度和代用权重因子空间精度的限制。

近年来国内外已有不少学者开展大气面源空间分配的研究工作^[3-7]。但目前有关珠三角地区大气面源排放清单及其空间分配鲜有研究案例。现有的珠三角地区的排放清单大多是该地区各种污染源的排放总量, 尚未将点源与面源的排放量单独列出^[2, 8-9]。本研究收集了大量的珠三角地区 2006 年大气面源排放源数据, 估算了该地区 2006 年大气面源排放清单, 并以 2006 年珠三角地区人口分布栅格数据作为代用权重因子, 利用

收稿日期: 2008-10-14

基金项目: 广东省 2006 环保专项资金; 国家“863”项目(2006AA06-A305)

* 责任作者, 副教授, zheng.junyu@gmail.com

GIS 建立了该地区 3km×3km 高分辨率的网格化大气面源排放清单。

1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

研究区域包括广州、深圳、珠海、佛山、江门、东莞、中山、惠州(惠城区,惠阳县,惠东县和博罗县)和肇庆(端州区,鼎湖区,高要区和四会市) 9 个珠三角地区城市,利用 Lambert 投影,以东经 111°59'52"E,115°24'48"E 和北纬 21°27'47"N, 23°56'13"N 为空间分配的网格域,应用 GIS 建立了 3km×3km 分辨率的网格。

大气面源主要包括工业面源、居民生活面源、含可挥发性有机污染物(VOC)产品源、垃圾焚烧源和生物质燃烧源。其中工业面源指烟囱任何高度低于 30m 的工业大气污染物排放源和工业无组织排放源;居民生活面源是指居民家用燃料燃烧产生的污染物排放源;含 VOC 产品源是指使用过程中能产生挥发性有机物的产品排放源;垃圾焚烧源是指垃圾焚烧厂焚烧垃圾产生的排放源;生物质燃烧源则主要考虑各种农作物燃烧产生的污染物排放源。研究关注的污染物为 SO₂、NO_x、PM₁₀ 和 VOC。

1.2 数据来源

珠三角地区 2006 年工业面源和垃圾焚烧源数据来源于广东省排放污染物申报登记年度统计数据,居民生活面源、含 VOC 产品源和生物质燃烧源数据则主要来源于文献[10-11]。工业面源统计了酒类生产、化学品/橡胶/塑料、造纸与纸浆工业、石油精炼、印刷、电子产品制造、食品与饮料、轻工业制造、重工业制造、采矿/矿物冶炼、非金属矿物产品等行业的企业排放源数据;居民生活面源主要统计了广东省居民家用燃煤和家用液化石油气的使用数据,然后以珠三角地区各市人口占广东省人口的比例,得到各市的居民燃煤和液化石油气使用量情况;含 VOC 产品源主要统计了广东省油漆和建筑涂料的数据,然后分别以珠三角地区各市工业产值和建筑面积所占比例,得出各市油漆和建筑涂料数据。

用来进行空间分配的珠三角地区人口栅格

数据来源于美国橡树岭国家实验室开发的 LandScan 数据库^[12]。原始数据是分辨率约为 1km×1km 的 2006 年亚洲人口分布栅格数据,本研究利用 GIS 从其中提取出了珠三角地区的人口栅格分布数据。

1.3 研究方法

1.3.1 大气面源排放清单估算方法 SO₂ 排放量的估算采用物料衡算法,计算公式如下:

$$E = \sum_{i,k} C_k \cdot A_{i,k} \cdot S_{i,k} \cdot (1 - \eta_i) \quad (1)$$

式中: E 为 SO₂ 的排放量; i 为排放源序号; k 为燃料类型; C 为基于燃料的系数,当为燃煤时, $C=16$, 燃油时, $C=20$; A 为活动水平数据,如燃料消耗量; S 为燃料含硫率; η 为去除效率。

NO_x、PM₁₀ 和 VOC 排放量的估算采用排放因子法,计算公式如下:

$$E = \sum_{i,m,k} A_{i,k} \cdot X_{i,k,m} \cdot EF_{k,m} \quad (2)$$

式中: E 为污染物的排放量; i 为排放源序号; k 为燃料类型或产品类型; m 为技术类型; n 为排放源数量; A 为活动水平数据,如燃料消耗量或产品产量; X 为使用某种技术的比例; EF 为排放因子,该因子为考虑到控制措施的综合排放因子。

本研究估算排放清单时采用的 NO_x 排放因子主要来自 Zhang 等^[13]和田贺忠^[14]的研究成果;PM₁₀ 的排放因子采用了张强^[4]和赵斌等^[15]的研究结果。VOC 的排放因子国内研究的相对较少,工业面源和生活面源 VOC 排放估算主要采用赵斌等^[15]从 UK NAEI 和 USEPA AP-42 中获取的排放因子,以及 Klimont 等^[16]和粤港清单手册^[17]中的排放因子;而含 VOC 产品中的油漆涂料源 VOC 排放因子则采用余宇帆^[18]通过专家问卷调查获得。生物质燃烧源污染物排放因子采用的是曹国良等^[19]总结的生物质燃烧排放因子。

1.3.2 大气污染源空间分配方法 采用基于 GIS 的人口权重法对珠三角地区大气面源污染物的排放进行空间分配。人口权重法是利用人口分布栅格数据作为代用权重因子对大气污染物排放源清单进行网格化分配^[20]。具体步骤如图 1 所示。

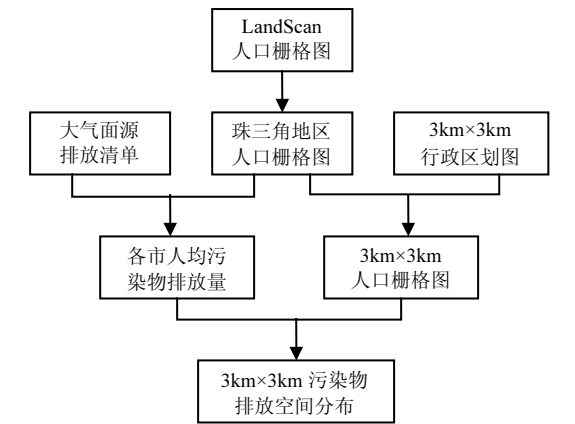


图 1 基于 GIS 的珠三角地区大气面源空间分配流程
Fig.1 Flow of air pollutant area sources spatial allocation in PRD based on GIS

首先从 LandScan 亚洲人口分布栅格数据中提取出珠三角地区人口分布栅格图.然后对珠三角地区人口分布栅格图进行栅格计算得到珠三角地区各市人口数,利用计算的大气面源排放清单得到各市人均污染物排放量.同时,将网格化的珠三角地区 3km×3km 的行政区划图和人口栅格

图进行合并,求和得到珠三角地区 3km×3km 人口栅格数据.最后利用珠三角地区 3km×3km 人口分布栅格数据和各市人均污染物排放量对各市的网格进行栅格计算,即得到各个网格的污染物排放量.

2 结果与讨论

2.1 珠三角地区大气面源排放清单

由表 1 可见,珠三角地区 2006 年大气面源 SO₂ 排放量为 1.12×10⁵t, NO_x 排放量为 5.25×10⁴t, PM₁₀ 排放量为 1.60×10⁵t, VOC 排放量为 3.14×10⁵t.由粤港联合编制的珠三角地区排放清单^[2]和作者的前期研究结果,大气面源 SO₂、NO_x、PM₁₀和 VOC 排放量占大气污染源排放总量的比重分别为 15%~16%、6%~8%、31%~37%和 37%~66%.其中 VOC 所占比重的范围较大,主要是因为 VOC 估算的不确定性较大,粤港联合编制排放清单和作者的研究在估算 VOC 排放时活动数据的来源,排放因子的选取和估算方法上都存在着一定的差异.

表 1 珠三角地区 2006 年大气面源排放清单
Table 1 Area sources emission inventory of air pollutant in PRD in 2006

污染源类别	SO ₂		NO _x		PM ₁₀		VOC	
	排放量(t)	比例(%)	排放量(t)	比例(%)	排放量(t)	比例(%)	排放量(t)	比例(%)
工业面源总量	106631.6	95.36	45951.4	87.58	150966.2	94.07	23013.3	7.34
酒类生产	1814.8	1.62	499.8	0.95	817.2	0.51	425.6	0.14
化学品/橡胶/塑料	6583.4	5.89	1048.1	2.00	1262.4	0.79	2116.2	0.67
造纸与纸浆工业	2538.3	2.27	855.8	1.63	1364.8	0.85	629.6	0.20
石油精炼	36.1	0.03	74.4	0.14	8.4	0.01	65.6	0.02
印刷	26.5	0.02	12.4	0.02	0.9	0.00	14624.5	4.66
电子产品制造	1226.7	1.10	890.0	1.70	147.2	0.09	27.4	0.01
食品与饮料	2448.9	2.19	816.1	1.56	1248.9	0.78	7.1	0.00
轻工业制造	10482.9	9.38	3509.1	6.69	4050.7	2.52	38.0	0.01
重工业制造	190.9	0.17	186.3	0.35	57.2	0.04	3096.0	0.99
采矿/矿物冶炼	12025.8	10.76	3320.9	6.33	5214.9	3.25	45.5	0.01
非金属矿物产品	69257.2	61.94	34738.6	66.21	136793.5	85.24	1937.9	0.62
生活面源总量	4628.0	4.14	3264	6.22	2168	1.35	253	0.08
含 VOC 产品源总量							270914.0	86.37
垃圾焚烧源总量	58.6	0.05	148.1	0.28	183.7	0.11	1.2	0.00
生物质燃烧源总量	496.3	0.44	3101.7	5.91	7158.8	4.46	19478.8	6.21
总 量	111814.6	100.00	52465.3	100.00	160476.7	100.00	313660.2	100.00

工业面源中的非金属矿物产品行业为大气 面源中最大的 SO₂、NO_x 和 PM₁₀ 排放源,排放量

分别占大气面源排放总量的 61.94%、66.21%和 85.24%。这是因为非金属矿物产品行业主要包括了水泥、砖瓦石材材料、玻璃制品、陶瓷和耐火材料制品制造等,生产过程中需消耗大量的燃料,且会带来大量的颗粒物排放,此外还存在工艺无组织排放等。该行业的生产企业在珠三角地区较多,大多属于大气面源。含 VOC 产品源为大气面源中最大的 VOC 排放源,排放量占大气面源 VOC 排放总量的 86.37%,主要来自含 VOC 的产品在使用过程中的挥发。而垃圾焚烧、

生物质燃烧和居民生活面源排放的污染物占大气面源污染物排放总量的比重均较小。其中居民生活面源,尽管排放源的数量众多,但由于近些年来珠三角地区经济发展迅速,居民生活水平得到很大提高,家用燃料主要是液化石油气、天然气和煤气等较清洁的燃料,故导致污染物的排放量较低。

2.2 珠三角地区大气污染面源空间分布及特征

珠三角地区大气面源 SO₂、NO_x、PM₁₀ 及 VOC 的空间分布如图 2 所示。

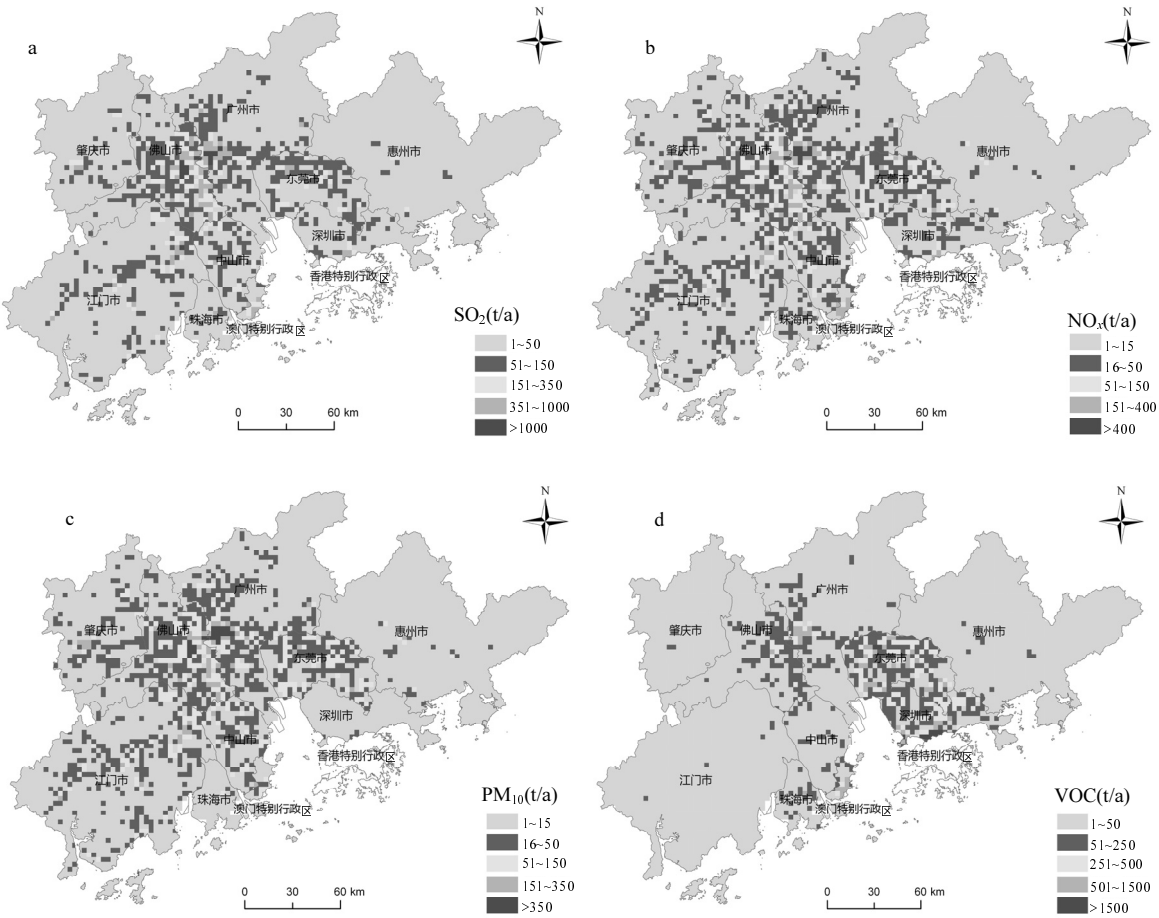


图 2 珠三角地区大气面源 SO₂、NO_x、PM₁₀ 及 VOC 排放空间分布

Fig.2 Spatial distribution of SO₂, NO_x, PM₁₀ and VOC emissions from area source in PRD region

由图 2 可见,SO₂、NO_x 和 PM₁₀ 呈现出相似的空间分布,排放量较大的区域集中在广州市区、佛山、中山和东莞,其次是深圳、珠海、江门和肇庆,排放量较小的区域则位于惠州。主要因

为广州市区、佛山、中山和东莞的工业比较集中,人口较密集,能源消耗量大,且主要消耗的能源为煤炭。深圳和珠海的 PM₁₀ 排放量的空间网格分布与 SO₂ 和 NO_x 相比,排放量较大的网格数明显

减少,分析原始数据可知,深圳和珠海地区的工业企业使用的燃料中燃料油所占的比重较大,而燃料油燃烧排放的颗粒物比燃煤要少很多,故导致深圳和珠海的 PM_{10} 排放相对较少.VOC 排放主要来自油漆涂料、印刷和造纸等工艺生产过程,而燃料(如煤炭)燃烧排放的 VOC 很少,所以导致了珠三角地区 VOC 排放的空间分布特征与 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 排放的空间分布特征差别较大.其中 VOC 排放比较集中的区域位于广州市区、东莞和深圳,这些地区工业生产和建筑行业中使用了许多油漆涂料,且印刷和轻工业等企业较多.

2.3 讨论

2.3.1 大气面源排放清单估算的不确定性 在污染物源排放清单估算分析过程中不可避免的会出现因关键数据缺乏(如排放因子、活动水平)以及数据代表性不足等而导致源清单估算的不确定性.排放源清单不确定性的范围可以通过定性分析,以及基于自展模拟和蒙特卡罗模拟的定量分析的手段来评价^[21].本研究同时运用这 2 种方法对珠三角地区大气面源排放源清单的不确定性范围进行评价.在估算珠三角地区大气面源 SO_2 排放时,工业面源由于获取了各个工厂的燃料类型、燃料消耗量和燃料含硫率数据,故采用了物料衡算法,其结果的不确定性来自活动数据,为-15%~20%.而居民生活面源在估算 SO_2 时使用的是燃料的平均含硫率,因此不确定性较工业面源 SO_2 排放大,约为-50%~75%.对于 NO_x 、 PM_{10} 和 VOC 的估算,采用的是排放因子法,估算的不确定性来源于活动水平数据和排放因子.本研究通过分析广东省环境保护监测中心站测量的工业污染源 NO_x 和 PM_{10} 的排放因子并结合专家判断法,得出 NO_x 的不确定性范围为-42%~57%, PM_{10} 的不确定性范围为-60%~80%,VOC 的不确定性范围为-75%~120%.

2.3.2 大气面源空间分配及局限性 大气面源空间分配的关键是选择合适的权重因子以代表污染源排放的分布情况.而选用的权重因子经常受到数据获取的限制,难以达到预期的精度,需要基于所能获得的基础数据和欲达到的网格精度,合理的进行选择.本研究采用的是人口权重法,选

用人口作为权重因子,可以很好的代表居民生活面源和含 VOC 产品源的空间分布情况.这是因为居民生活面源排放与人口数正相关,而含 VOC 产品的使用大部分集中在居民生活区,故可认为含 VOC 产品源与人口数也正相关.对于工业面源,由于工业部门的排放量并不与网格内的人口数成正相关,因此在排放量的空间分配上以人口作为权重因子会造成一定的误差.工业面源排放与工业产值存在正相关,若能获得较详细的工业产值数据,将提高工业面源空间分配的准确性.然而目前我国统计工业产值时最小区域为各县的工业产值,无法达到本研究网格所需的精度(3km×3km),故难以得到高精度的网格排放分布.Kluizenaar 等^[6]在对爱尔兰地区工业面源进行空间分配时采用了工厂雇佣的工人数作为权重因子,而工业排放源的空间分布与在这些工厂中工作的人数分布成正相关,故可得到较为准确的空间分布.但我国有关工厂工人的统计数据大多精确到各市,达不到空间分配所需的精度.垃圾焚烧和生物质燃烧排放以人口为权重进行分配也存在着一定的误差.但综合考虑各种因素及局限条件,为了达到高分辨率的空间排放分布,本研究采用的人口权重法是利用现有掌握的数据对珠三角地区大气面源进行空间分配的最合适的方法,可较好的反映珠三角地区大气面源的空间分布特征.

3 结论

3.1 珠三角地区 2006 年大气面源排放量 SO_2 为 $1.12 \times 10^5 \text{ t}$, NO_x 为 $5.25 \times 10^4 \text{ t}$, PM_{10} 为 $1.6 \times 10^5 \text{ t}$, VOC 为 $3.14 \times 10^5 \text{ t}$.其中非金属矿物产品行业为大气面源中最大的 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 排放源,含 VOC 产品源为大气面源中最大的 VOC 排放源,排放量分别占大气面源排放总量的 61.94%、66.21%、85.24%和 86.37%.

3.2 珠三角地区大气面源排放 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 排放呈现相似的空间分布特征,其中排放量较大的区域集中在广州市区、佛山、中山和东莞.VOC 排放的空间分布特征与 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} 差异较大,其中 VOC 排放较集中的区域位于广

州市区、东莞和深圳。

3.3 深圳和珠海的 PM_{10} 排放量较大的网格数与 SO_2 和 NO_x 相比明显减少,主要是受到使用的燃料结构的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 珠江三角洲空气质量管理及监察负责小组.珠江三角洲空气质量管理计划中期回顾研究报告 [R]. 2007.
- [3] 范引琪,李春强.城市面源 SO_2 允许排放总量的网格分配方法 [J]. 气象科技, 2005,33(6):516-519.
- [4] 张 强.中国区域细颗粒物排放及模拟研究 [D]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2005:99-104.
- [5] Dong Y K, Jung W K. Development of a speciated, hourly and gridded air pollutants emission modeling system-A case study on the precursors of photochemical smog in the Seoul Metropolitan area, Korea [J]. Journal of Air and Waste Manage Assoc., 2000,50:340-347.
- [6] Kluizenaar Y D, Aherne J, Farrell E P. Modelling the spatial distribution of SO_2 and NO_x emissions in Ireland [J]. Environmental Pollution, 2001,112:171-182.
- [7] Jian D, David M R. Modeling spatial variation in area source emissions [J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 2000,5(1):7-14.
- [8] 刘 欣.珠江三角洲大气质量模拟和总量控制研究 [D]. 北京:北京大学环境学院, 2004.
- [9] 胡健林.珠江三角洲污染源排放清单研究 [D]. 北京:北京大学环境学院, 2005.
- [10] 中国国家统计局.2007 长江和珠江三角洲及港澳特别行政区统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [11] 中国国家统计局.广东统计年鉴 2007 [M]. 北京:中国统计出版社, 2007.
- [12] Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Landsat global population 2006 database [DB/OL]. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., 2007.
- [13] Zhang Q, Streets D G, He K B, et al. NO_x emission trend for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research-Part D-Atmospheres, 2007,112, D22306, doi: 10.1029/2007JD008684.
- [14] 田贺忠.中国氮氧化物排放现状、趋势及综合控制对策研究 [D]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2003.
- [15] 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.
- [16] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002,36:1309-1322.
- [17] 广东省环境保护监测中心站,香港特别行政区政府环境保护署.珠江三角洲地区空气污染物排放清单编制手册 [R]. 2005.
- [18] 余宇帆.基于专家判断的排放源清单的不确定性分析与案例研究 [D]. 广州:华南理工大学环境科学与工程学院, 2008.
- [19] 曹国良,张小曳,王 丹,等.中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单 [J]. 中国环境科学, 2005,25(4):389-393.
- [20] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. J. Geophys. Res., 2003,108(D21):8809.
- [21] 钟流举,郑君瑜,雷国强,等.大气污染物排放清单不确定性定量分析方法与案例研究 [J]. 环境科学研究, 2007,20(4):15-19.

作者简介: 郑君瑜(1968-),男,四川南部县人,副教授,博士,主要从事大气污染控制策略和环境暴露风险评估研究.发表论文 20 余篇.

关于《中国环境科学》网上投稿的通知

《中国环境科学》编辑部为提高稿件处理的网络化水平和采编工作的效率,及时让作者了解稿件的处理情况,自 2008 年 3 月 1 日起已开通网上投稿查稿系统,请登陆网址: <http://www.zghjcx.com.cn> 点击“作者在线投稿”进行注册后再按要求投稿,点击“作者在线查稿”进行查询.本刊不再接受纸件投稿和电子版稿件的 E-mail 投稿.特此通知.

《中国环境科学》编辑部