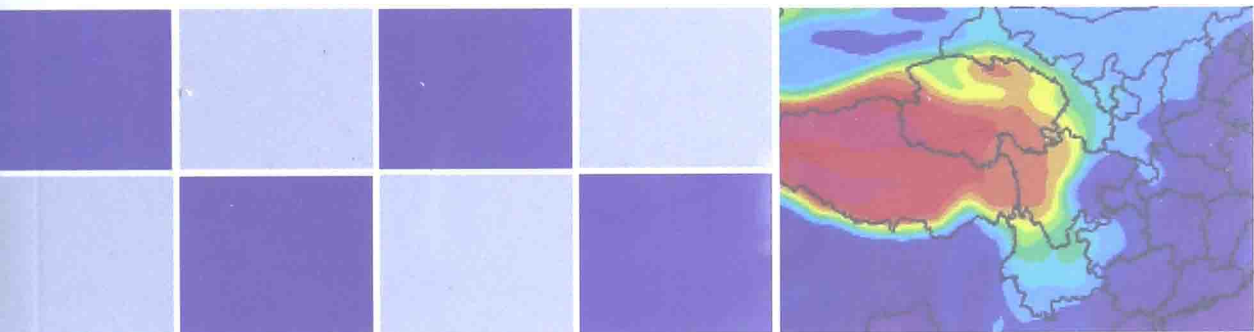


KONGQI WURAN DUI QIHOU BIANHUA DE
YINGXIANG JI FANKUI YANJIU



空气污染对气候变化的影响及 反馈研究

师华定 等著

中国环境出版社

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

空气污染对气候变化的 影响及反馈研究

师华定 等 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

空气污染对气候变化的影响及反馈研究/师华定等著.

—北京: 中国环境出版社, 2014.10

(环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书)

ISBN 978-7-5111-2075-5

I. ①空… II. ①师… III. ①空气污染—影响—
气候变化—研究—中国 IV. ①X51 ②P467

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 215566 号



出版人 王新程
责任编辑 王焱 沈建
责任校对 尹芳
封面设计 宋瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2014 年 10 月第 1 版
印 次 2014 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 15.5
字 数 366 千字
定 价 52.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书

编 委 会

顾 问 吴晓青

组 长 赵英民

副组长 刘志全

成 员 禹 军 陈 胜 刘海波

《空气污染对气候变化的影响及反馈研究》

编写组

主 笔 师华定

主要成员 高庆先 付加锋 罗 宏 张时煌

陈东升 杜吴鹏 吕连宏 王占刚

其他成员 薛 婕 马占云 白鹤鸣 马 欣

宋 飞 李文杰 周兆媛 周 颖

史华伟 王 晓 陈跃浩 严茹莎

孔珊珊 耿丽娟 裴莹莹 杨占红

汪宏清 郭秀锐 姚峰峰 赵凌美

丁抗抗 张艳艳 曾令建 宋丽丽

李 崇 李 悦 陈 媛 包 哲

李文涛 刘俊蓉 许 霜 王 蒙

王 丹 周锡饮 梁海超

序

我国作为一个发展中的人口大国，资源环境问题是长期制约经济社会可持续发展的重大问题。党中央、国务院高度重视环境保护工作，提出了建设生态文明、建设资源节约型与环境友好型社会、推进环境保护历史性转变、让江河湖泊休养生息、节能减排是转方式调结构的重要抓手、环境保护是重大民生问题、探索中国环保新道路等一系列新理念新举措。在科学发展观的指导下，“十一五”环境保护工作成效显著，在经济增长超过预期的情况下，主要污染物减排任务超额完成，环境质量持续改善。

随着当前经济的高速增长，资源环境约束进一步强化，环境保护正处于负重爬坡的艰难阶段。治污减排的压力有增无减，环境质量改善的压力不断加大，防范环境风险的压力持续增加，确保核与辐射安全的压力继续加大，应对全球环境问题的压力急剧加大。要破解发展经济与保护环境的难点，解决影响可持续发展和群众健康的突出环境问题，确保环保工作不断上台阶出亮点，必须充分依靠科技创新和科技进步，构建强大坚实的科技支撑体系。

2006年，我国发布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》（以下简称《规划纲要》），提出了建设创新型国家战略，科技事业进入了发展的快车道，环保科技也迎来了蓬勃发展的春天。为适应环境保护历史性转变和创新型国家建设的要求，原国家环境保护总局于2006年召开了第一次全国环保科技大会，出台了《关于增强环境科技创新能力的若干意见》，确立了科技兴环保战略，建设了环境科技创新体系、环境标准体系、环境技术管理体系三大工程。五年来，在广大环境科技工作者的努力下，水体污染控制与治理科技重大专项启动实施，科技投入持续增加，科技创新能力显著增强；发布了502项新标准，现行国家标准达1263项，环境标准体系建设实现了跨越式发展；完成了100余项环保技术文件的制修订工作，初步建成以重点行业污染防治技术政策、技术指南和工程技术规范为主要内容的国家环境技术管理体系。环境

科技为全面完成“十一五”环保规划的各项任务起到了重要的引领和支撑作用。

为优化中央财政科技投入结构，支持市场机制不能有效配置资源的社会公益研究活动，“十一五”期间国家设立了公益性行业科研专项经费。根据财政部、科技部的总体部署，环保公益性行业科研专项紧密围绕《规划纲要》和《国家环境保护“十一五”科技发展规划》确定的重点领域和优先主题，立足环境管理中的科技需求，积极开展应急性、培育性、基础性科学研究。“十一五”期间，环境保护部组织实施了公益性行业科研专项项目 234 项，涉及大气、水、生态、土壤、固废、核与辐射等领域，共有包括中央级科研院所、高等院校、地方环保科研单位和企业等几百家单位参与，逐步形成了优势互补、团结协作、良性竞争、共同发展的环保科技“统一战线”。目前，专项取得了重要研究成果，提出了一系列控制污染和改善环境质量技术方案，形成一批环境监测预警和监督管理技术体系，研发出一批与生态环境保护、国际履约、核与辐射安全相关的关键技术，提出了一系列环境标准、指南和技术规范建议，为解决我国环境保护和环境管理中急需的成套技术和政策制定提供了重要的科技支撑。

为广泛共享“十一五”期间环保公益性行业科研专项项目研究成果，及时总结项目组织管理经验，环境保护部科技标准司组织出版“十一五”环保公益性行业科研专项经费项目系列丛书。该丛书汇集了一批专项研究的代表性成果，具有较强的学术性和实用性，可以说是环境领域不可多得资料文献。丛书的组织出版，在科技管理上也是一次很好的尝试，我们希望通过这一尝试，能够进一步活跃环保科技的学术氛围，促进科技成果的转化与应用，为探索中国环保新道路提供有力的科技支撑。

中华人民共和国环境保护部副部长

吴晓青

2011 年 10 月

目 录

第 1 章	项目背景	1
1.1	项目研究意义	1
1.2	国内外研究进展	2
第 2 章	空气污染物和主要温室气体排放特征研究	4
2.1	研究背景	4
2.2	研究数据和方法	10
2.3	结果分析	11
2.4	本章小结	58
第 3 章	空气污染对气候变化影响研究	60
3.1	研究背景	60
3.2	数据收集与处理	67
3.3	数值模型建立	75
3.4	气溶胶气候效应评估	114
3.5	污染排放控制政策评估	126
3.6	本章小结	132
第 4 章	未来气候变化对空气污染的影响	134
4.1	研究背景	134
4.2	研究数据和方法	135
4.3	结果分析	136
4.4	本章小结	172
第 5 章	应对气候变化的污染物防控政策和措施研究	175
5.1	国内外空气污染防控和应对气候变化措施及效果分析	175
5.2	空气污染与气候变化的相互影响	204
5.3	应对气候变化措施对空气污染控制的影响	213
5.4	政策建议：应对气候变化措施必须考虑其对空气质量的影响	216
第 6 章	数据库与互馈集成系统	221
6.1	空气污染对气候变化影响综合数据库	221

6.2 空气污染对气候变化影响共享网站平台与系统224

第7章 结 论.....231

7.1 我国空气污染和温室气体排放特征231

7.2 典型区域的空气污染对气候变化影响研究232

7.3 未来气候变化对空气污染的影响233

7.4 应对气候变化的空气污染防控对策与措施研究235

7.5 数据库与互馈集成系统235

参考文献.....236

后 记.....239

第 1 章 项目背景

1.1 项目研究意义

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》在环境重点领域研究中指出：“加强全球环境公约履约对策与气候变化科学不确定性及其影响研究，开发全球环境变化监测和温室气体减排技术，提升应对环境变化及履约能力。”可见，我国政府对全球气候变化及控制温室气体和污染物减排的高度重视。研究空气污染对气候变化的影响及相互反馈对应对气候变化和控制大气污染具有积极有效的双重作用。

气候变化是当前世界上最受关注的重大环境问题之一。我国处于气候变化的敏感带和脆弱带，是气候灾害多发地区，也是受气候变化影响最为严重的国家之一。由于我国是一个人口众多的发展中大国，正处于经济快速发展期，环境压力日益加重，气候变化问题成为制约我国经济和社会可持续发展的一个重大因素。在过去的几十年，随着我国经济的快速发展、工农业活动的加剧以及城市化进程的加快，大量的煤炭、化石燃料和生物质燃烧使得二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等温室气体的排放量快速增加，同时，大气中气溶胶等空气污染物也呈明显上升趋势，我国已成为主要的引起全球气溶胶辐射效应和气候效应不确定性区域之一。

目前我国的二氧化碳等温室气体和气溶胶等大气污染物的排放量增长迅速，对空气污染和气候变化造成了严重的影响。虽然我国现今仍是第二大温室气体排放国，但严重的是，随着我国经济和社会的快速发展，温室气体在全球排放中所占的份额将会急剧增加，它的增长量占了全世界增长量的 40%。由于我国的很多火力发电站技术陈旧、装备落后，发电厂等能源部门排放出大量的污染有害气体，大量的污染物质被排入空气，并在短期内对环境造成了影响，导致了严重的大气污染。据国际能源机构报道，由于大量燃烧煤炭，在世界 10 大污染最严重的城市中，我国的城市占了 5 个。我国 1/3 的国土遭受酸雨影响，1/3 的农村人口生活在严重污染的空气中。

我国目前面临污染物和温室气体减排的国际压力越来越大，特别是在温室气体的控制和减排方面，如果不能很好地处理温室气体和大气污染的控制与国民经济重点行业的相互协调问题，将严重影响未来我国经济的可持续发展和人民生活水平的提高。空气污染控制和温室气体排放控制作为环境监管的重要内容，越来越成为政府工作的核心内容，但目前对这一领域的研究明显缺乏，尤其是空气污染对气候变化的影响与反馈目前还没有详细的研究，不能满足未来国家空气污染控制和应对气候变化的要求。开展空气污染对气候变化的影响与反馈研究和综合评估对于我国应对气候变化、经济社会的可持续发展有着十分重要的紧迫性。

1.2 国内外研究进展

国内外许多科研结构和科学家针对气候变化问题和空气污染问题进行了大量研究。其中,早期对大气污染的认识主要着眼于空气污染及其所导致的环境和健康问题,并没有特别关注大气污染对气候及气候变化的影响。随着科学研究的进一步深入,特别是政府间气候变化专门委员会(IPCC)陆续发布的4次评估报告,使得空气污染对气候变化的可能影响,未来气候变化可能对大气环境的影响以及二者的相互反馈等问题的研究成为目前大气环境和气候变化研究领域的热门话题。

随着人类生产生活等活动排放的空气污染物对气候的显著影响使气候系统更加复杂,弄清气候变化原因并进行气候变化预测相当困难。全世界的科学家在这方面进行了大量的工作。IPCC成立以后,先后出版了4次评估报告和一系列特别报告。IPCC第3次和第4次评估报告均指出气候变化原因和气候变化预测仍存在着相当大的不确定性,在众多影响因素中,最不确定、亟待解决的是大气气溶胶的作用,特别是大气气溶胶的间接辐射强迫作用,所以,作为主要大气污染物的气溶胶对气候变化的影响起到了极其重要的作用。在学术界除了IPCC组织编写的评估报告之外,其他国际组织也从各自所管辖的领域开展了相关研究。比如UNEP就在黑炭气溶胶和臭氧前体物方面开展了评估,非政府间气候变化专门委员会(NIPCC)也发布了自己的评估报告。在所有的研究报告中大气气溶胶的气候效应问题均是热点和难点,也是最为急迫需要开展的研究课题。目前IPCC正在组织第5次评估报告的撰写,编写大纲已经得到IPCC全会的通过,正在组织编写专家队伍,气溶胶等大气污染物的气候效应问题也必将继续得到科学家和评估报告编写者的极大重视。

近年来,国内许多科研机构开展了与空气污染和气候变化相关研究,其中中国气象局、中国科学院、中国环境科学研究院等单位的技术力量和研究基础较为雄厚。2006年国家“973”项目“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”的启动标志着中国大气气溶胶观测和研究进入了一个新的里程,其他关于温室气体和气溶胶等大气污染物的地基网络观测、卫星遥感观测与模式模拟也广泛发展起来。另外,中国环境科学研究院等单位针对我国重点行业温室气体排放进行了统计,初步建立了温室气体排放数据库,还利用卫星反演和模式模拟方法研究了黑炭、沙尘等气溶胶的气候效应,为本项目的顺利开展提供了借鉴和研究基础。

虽然我国已经开展了很多关于大气污染控制和减缓温室气体排放方面的研究,但是将两者有机结合起来的研究还很少。另外,在排放机理和定量化模式方面的研究还比较缺乏和不成熟,特别需要科研工作者的进一步重视和加强。相关研究表明,在控制大气污染的同时,温室气体的排放量很大程度上会减少,这对于改善大气环境和应对气候变化具有双重效果。

在利用数值模拟技术研究空气污染物对气候变化影响方面,很多科学家也进行了大量尝试。近二三十年来很多学者密切关注城市、区域以及全球范围的大气污染物的输送、转化、沉降及其对气候和生态环境的影响。除建立监测网站进行观测分析研究外,还借助计算机数值求解大气污染物输送/扩散方程来研究各种尺度的大气污染物输送与沉降规律及其对气候变化的影响。20世纪80年代以来出现了一批区域污染物输送模式,这些模式分

别研究了欧洲、北美和东亚等地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、大气气溶胶等的分布、输送和沉降。在对区域大气输送模式研究过程中,不少学者对大气污染的特征行为及大气环境过程进行了较系统的研究,污染物的化学过程、反应机理、影响转化的因素、区域下垫面的影响、干沉积、下垫面对扩散的影响以及模型的数值解等均是主要的研究内容。大气质量数值模拟技术系统广泛应用于对各种大气污染物在不同尺度下的不同类型污染过程进行模拟,已经成为大气环境研究中不可缺少的组成部分。目前应用较为广泛的区域环境质量模型包括简单的扩散模式(如工业多源模式 ISC3 等),建立在质量平衡理论上的箱式模式(如多维多箱模型等),针对特定污染问题研究的欧拉数值模型(如空气流域模型 UAM 等),综合的多污染物、多尺度空气质量模式(如 CAM_x 、Models-3 等)以及一些大气环流与化学完全在线耦合大气-化学模式(如 RAMS-Chem、MM5-Chem、WRF-Chem 等)。

在气候模式方面,关于气溶胶等大气污染物气候效应的研究,借助数值方法对污染物的源、汇、输送、微物理和化学转化等过程进行描述是研究和模拟空气污染物气候效应的基本方法,它们推动了大气环流模式(GCM)和区域气候模式(RegCM)以及三维化学输送模式(CTM)的迅速发展。很多数值模拟方法在气溶胶光学特性研究中日趋成熟。Steiner 和 Chameides (2005)、Qian 等 (2003)、Kinne 等 (2003)、Giorgi 等 (2002) 等国际学者分别针对中国和东亚地区大气气溶胶的气候效应进行了模拟研究,不同模拟结果间存在一定差异,对不同地区气候因子和气溶胶气候效应的模拟不同模式系统有一定的差别。

国内外相关部门已经开展了一定的大气污染控制以及空气污染对气候变化的影响和反馈研究,这对于本项目的顺利开展提供了较好的借鉴作用,但仍存在一定的缺陷与不足,本项目旨在充分吸收国内外研究经验,充分利用其研究成果,完成预定的各项目标和任务。

第 2 章 空气污染物和主要温室气体 排放特征研究

2.1 研究背景

2.1.1 国内外研究进展

2.1.1.1 污染排放数据国内外研究对比分析

目前，世界上有多种不同版本的大气污染物排放清单，包括官方正式发布的和研究机构的研究成果。清单的编制根据不同的目的，覆盖了不同的地区，针对不同的时间阶段考虑了不同的污染物，具有不同的网格精度。有些清单覆盖全球范围，有些涵盖多种污染物，有些只针对具体的某个区域或某类污染物（见表 2-1）。但是，目前还没有一个清单能包含所有污染物和所有污染源，而且已有的数清单多数是在发达国家建立的，而发展中国家仍然缺乏建立排放清单的可靠信息，尤其是对于像中国和印度这些快速发展的经济体更是如此。

表 2-1 国际上著名排放清单特征

名称	最新版本	时间尺度	空间尺度	网格精度	污染物种类
全球大气研究排放数据库（EDGAR）	2009 年 EDGAR4.1	2000 年	全球	1°×1°	GHG、臭氧前体物、SO ₂
全球环境历史数据库（HYDE） ^①	2011 年 HYDE3.1	1890—2000 年	全球	1°×1°	GHG、臭氧前体物、SO ₂ 、NH ₃
美国国家污染物排放清单（NEI）	最新版本是 2008 年	1999 年，2002 年， 2005 年	全美国	4 km×4 km	SO ₂ 、NO _x 、VOC、NH ₃ 、CO、PM ₁₀ 、PM _{2.5} 和 188 种有毒大气污染物（HAPs）
欧盟污染物排放清单（CORINAIR）	最新是 2011 年	1980—2011 年	欧洲 30 个国家	50 km×50 km、 0.5°×0.5°	SO _x 、NO _x 、NH ₃ 、CO、NMVOC、PM _{2.5} 、PM ₁₀ 、TSP、9 种重金属、26 种 POPs

① <http://themasites.pbl.nl/en/themasites/hyde/introduction/index.html>.

(1) 美国

20 世纪 90 年代初,美国国家环保署(EPA)就建立起了全国性大气污染物排放清单数据库,每三年更新发布一次,目前的最新版本是 2008 NEI(National Emission Inventory)^①。美国国家污染物排放清单数据库只包含大气污染物排放量数据,主要统计的污染物包括:①主要大气污染物:臭氧前体物和 PM_{2.5},具体为 NO_x、SO_x、VOCs、CO、原 PM₁₀、可过滤的 PM₁₀、原 PM_{2.5}、可过滤的 PM_{2.5}、NH₃;② 188 种有毒大气污染物(HAPs):清洁大气法案(CAA)中规定的污染物。统计范围包括点源、面源和移动源。美国国家排放清单数据库的绝大部分数据是由国家和地方环保部门上报提供,对各种数据源数据上报表格的形式和数据审核都制定了相应的规则^②。

(2) 欧洲

欧洲自 1980 年起进行排放清单的编制工作,于 90 年代形成了 CORINAIR 大气污染物排放清单。目前欧洲排放清单编制工作由欧洲空气污染物长距离输送监测和评价项目(European Monitoring and Evaluation Programme, EMEP)下属的排放清单与预测中心(Emission Inventories and Projections, CEIP)负责,各国清单编制都依照欧盟环境署(EEA)发布的排放清单指南(Emep/eea Emission Inventory Guidebook)。清单包含了 5 种气态污染物、9 种重金属、26 种 POPs 和 PM_{2.5}、PM₁₀、TSP 三个粒径段颗粒物,空间上覆盖欧洲 30 个国家,网格精度为 50 km×50 km 和 0.5°×0.5°两种,时间跨度为 1980—2011 年,并且以 5 年为步长预测了直至 2050 年的排放量^③。

由欧盟联合研究中心和荷兰环境评估局的 Livier 等于 1995 年开发的全球大气研究排放数据库(Emission Database for Global Atmospheric Research, EDGAR),是一个全球性的大气污染排放清单,也被全球科学界和世界各地的决策者广泛使用。该清单空间尺度覆盖了全球范围,包括 CO₂ 等人为温室气体和其他大气污染物,提供了 1990 年之前的 20 年的历史排放数据,目前已经更新至 EDGAR4.1 版^④。

(3) 亚洲

亚洲地区的大气污染排放清单的编制工作基本处于起步阶段,目前很多国家的成果主要停留在科研层面,基本上没有官方正式发布的国家排放清单。

第一个亚洲排放清单是由 Kato 和 Akimoto(1992)、Akimoto 和 Narita(1994)等研究开发的,但是覆盖的污染物种类较少。由 Downing 等(1997)在世界银行资助的 IIASA 项目(International Institute for Applied Systems Analysis)的研究中,建立了以 1990 年和 1995 年为基准年的亚洲二氧化硫排放清单,并对 2000—2030 年的排放数据进行了估计^⑤。全球大气研究排放数据库 EDGAR 中也包括了亚洲排放清单。2003 年美国 Argonne 国家重点实验室的 David G.Streets 等开发了一个 2000 年亚洲地区包括东亚、东南亚、南亚的 22 个国家和地区的气态及一次气溶胶排放清单,此清单包含了所有的主要气态污染物(二氧

① <http://www.epa.gov/ttn/chief/eiinformation.html>.

② <http://www.epa.gov/ttn/chief/eiinformation.html>; 王鑫,傅德黔,李锁强.美国国家污染物排放清单[J].中国统计,2007(2): 60-61.

③ <http://www.ceip.at>.

④ <http://www.mnp.nl/edgar>.

⑤ P S Monks, et al. Atmospheric composition change - global and regional air quality[J]. Atmospheric Environment, 2009 (43): 5268-5350.

化硫、氮氧化物、一氧化碳、甲烷、挥发性有机物的物种和两种关键的颗粒物，即黑炭和有机碳。这些排放量在亚洲区域进行了 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的空间网格化分。随后，开发了精度更高的排放清单，目前最新版本已更新至 2006 年，网格精度为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ ^{①②}。T.ohara 等于 2007 年建立了 1980—2020 年亚洲区域排放清单 REAS Version 1.1（Regional Emission inventory in Asia），涵盖了多种污染物，整合了 1980—2003 年的历史排放量、2000 年的现状排放量和 2010—2020 年的未来排放趋势，是亚洲目前最完整的综合性排放清单^③。

表 2-2 亚洲地区排放清单的特征

开发者	时间/空间范围	污染物种类	网格精度
美国 Argonne 国家实验室 David G Street 等	2000 年/亚洲排放；2006/ 亚洲排放	SO ₂ 、NO _x 、CH ₄ 、VOC、NH ₃ 、 CO、有机碳等	$1^{\circ}\times 1^{\circ}/0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
T Ohara 等	1980—2003 年、2000 年、 2010—2020 年/亚洲排放	SO ₂ 、NO _x 、CO、NMVOC、 炭黑（BC）和有机碳（OC）	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
Downing 等	1990 年，1995 年， 2000—2030 年亚洲排放	SO ₂	—

（4）中国

我国大气污染物排放清单编制工作相对滞后，目前尚未建立一套全国尺度的综合性大气污染物排放清单编制规范，也没有启动综合污染物排放清单的编制工作。在国家层面上，我国目前只有以 2004 年为基准年的二噁英排放清单，这是 2007 年我国向 POPs 公约秘书处递交《中华人民共和国履约〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家行动计划》中给出的，是目前唯一的官方清单^④。对于其他污染物，我国仅是每年开展对 SO₂ 和烟尘、粉尘的排放量统计，涵盖污染物包括 SO₂ 和颗粒物两种污染物，对颗粒物而言，更是缺乏粒径分布的信息和其中关键化学组分的信息；涵盖的排放源种类不齐全，仅包括工业活动和电力、民用燃煤等人类活动，不涉及移动源和生物质燃料的排放；缺乏及时更新的排放因子信息；缺乏必要的质量保证和质量控制（QA/QC）。这些差距使我国的污染物排放统计数据远远不能满足国家层面空气质量管理的需

求。在城市和地区层面，北京、上海、广东等地区为了满足地区空气质量控制和管理需要，参考欧美发达国家的排放清单编制方法，编制了一些地区排放清单。但是由于关注尺度的不同和数据获取能力的因素，这些地区排放清单的编制经验很难在全国范围内进行直接推广。

2010 年，国家发展改革委气候司组织编制了国家 2005 年温室气体排放清单，建立了中国温室气体清单数据库，并启动了广东、湖北、辽宁、云南、浙江、陕西、天津 7 个省市作为试点，编制 2005 年温室气体排放清单。

① 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): 8809-8820.
② Streets D G, Waldho S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO[J]. Atmospheric Environment, 2000 (34): 363-374.
③ T Ohara, H Akimoto, X Yan, et al. An Asian emission inventory for the period 1980—2020[J]. Atmos.Chem.Phys.Discuss., 2007 (7): 6843-6902.
④ 吕亚辉, 黄俊, 余刚, 等. 中国二噁英排放清单的国际比较研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (6): 71-74.

表 2-3 部分城市排放清单研究

机构	时间/空间范围	污染物种类	网格精度
华东师范大学	上海市 1 300 多个工业点源	SO ₂	—
清华大学 ^①	1999 年/北京市城八区	PM ₁₀ 、SO ₂ 、NO _x 等	1 km×1 km
上海市环境监测中心 ^②	2003 年/上海港	NO _x 、SO ₂ 、PM、HC、CO ₂	1 km×1 km

2.1.1.2 排放计算方法

(1) 污染物排放量估算方法

空气污染物排放量的估算方法主要有四种，分别是直接估算法、物质平衡法、工程计算法、间接估算法。直接估算法是通过测量污染物的浓度与其体积流量估算而得，最常应用于工厂烟囱排放口的排放量估算。物质平衡法是通过物质输入与输出间的平衡关系进行估算。工程计算法是利用物质成分特性及理论公式进行估算。间接估算法，也称为排放因子估算法，是利用排放因子和活动水平进行估算。直接估算法理论上应该是最可靠的，但是由于成本较高，实际上也只能是有限的测量，针对重要排放源才能进行实地测量。物质平衡法与工程计算法在实际应用中需要有排放源输入物质的相关活动操作参数才能准确计算。相比较而言，最方便和最常用的是排放因子法。

全球排放清单普遍都采用排放因子法估算，源分辨率一般到经济部门，空间分辨率一般到国家。区域排放清单主要关注国家和区域尺度的 SO₂、NO_x 等致酸物质、臭氧前体物、颗粒物等，一般用于区域大气污染研究和区域空气质量管理。区域排放清单一般综合使用排放因子法和污染源监测数据等，源分辨率一般到工业部门，空间分辨率一般到省、州级。局地排放清单主要关注影响城市空气质量的 SO₂、NO_x、颗粒物常规污染物，一般用于城市空气质量管理。局地排放清单大多基于污染源调查法获得，源分辨率和空间分辨率可达到终端排放设备。为了满足区域大气污染研究和区域空气质量需求，发达国家大多根据自己的实际情况构建了一套排放清单编制方法，并在此基础上建立了国家一级的排放清单，用于空气质量模拟和政策分析^③。

(2) 源分类方法

美国国家排放清单包括点源、面源、移动源（行驶源和非行驶源）三大类污染源。该清单的编制，使用了基于源分类编码（Source Classification Code, SCC）的源分类体系（U.S. Environmental Protection Agency, 2008）。该分类编码是一套 8 个码的污染源分类代码，共分为 4 个层级。在欧洲，国际应用系统分析研究所（International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA）在 RAINS 模型的系统中开发了 RAINS-PM 模型（Lukewille et al., 2001），提出在满足控制决策需要的颗粒物排放清单中，对排放源的分类需要基于 5 个原则（Klimont, 2002）。

目前，我国排放源分类多是按照行业和产品分类，以珠江三角洲为例，尽管污染源申

① 贺克斌，余学春，陆永祺. 城市大气污染物来源特征[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16 (6): 269-271.

② Dong-qing Yang, Stephanie H Kwan. An Emission Inventory of Marine Vessels in Shanghai in 2003[J]. Environ.Sci.Technol. 2007, 41 (15): 5183-5190.

③ 雷宇. 中国人为源颗粒物及关键化学组分的排放与控制研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.

报的行业分类参考了美国的方法，但也只是分 20 个行业、98 大类产品。由于每类源中又存在千差万别的工艺，而且我国的许多行业工艺类型复杂，还存在一些在发达国家很少见到的、污染排放较高的落后生产工艺，例如土砖窑、水泥立窑等。因此，我国目前的分类方法无法满足高精度源排放清单的源分类需求，而我国活动水平和控制措施应用率等数据的稀缺，以及复杂排放源的构成情况又决定了我国不能直接借用欧美国家现成的源分类系统。

(3) 活动水平

在使用排放因子法估算排放量的过程中，活动水平的可获得程度直接影响着源分类的结构和精细程度。表 2-4 列出了描述几类主要排放源活动特征的关键信息。

表 2-4 描述排放源活动特征的关键信息

源类型	燃烧源	工艺源	移动源
排放单位地理信息	排放单位所在区域	排放单位所在区域	路网信息
产污设备信息	锅炉信息	炉窑信息	车辆类型
生产工艺信息	燃料种类	主要工艺类型	燃料种类
排放量的时间分布信息	运行时间	运行时间	行驶时间
排放点位置信息及排放方式	经纬度、高度	经纬度、高度	路网信息
控制措施信息	污控设备效率	污控设备效率	净化装置效率

欧美国家在排放清单的编制过程中充分应用了这些信息，并且对这些信息的获取和处理过程使用了标准化的处理流程。如美国给国家排放清单制定了标准的输入格式（NEI Input Format, NIF）（U.S. Environmental Protection Agency, 2007c），为国家排放清单在空间和时间尺度上的一致性提供了基础。在标准化的活动水平处理流程中，欧美国家开发了一系列软件工具和数据库工具进行数据的收集和处理。对固定源的活动水平信息，包括信息调查内容、推荐的获取途径、信息汇报格式等以及某些通过在线监测直接得到的排放信息，设定了数据格式规范和标准。根据这些信息获取规范及数据标准可制作相应的 QA/QC 软件，用以对活动水平信息的数据进行质量监控。对道路交通源活动水平信息，包括各类机动车的保有量和单车年均行驶里程，国外排放清单规范一般采用一定的数学统计方法（如加权平均或概率分布估计）将每类机动车各单车行驶里程的数据集转化为该类机动车的单车平均行驶里程，再结合保有量可获得该类机动车的总行驶里程。最后将各类机动车的总行驶里程进行加和获得以行驶里程为表现形式的道路交通源活动水平。

目前我国的活动水平信息主要是依靠国家统计途径，利用各级统计数据获取各类人为生产、生活的活动量，尚缺乏系统、规范的渠道对描述排放源活动特征的关键信息进行收集和整理，因此欧美国家用于活动水平处理的软件和方法不能直接用于我国的排放清单编制工作，需要建立适用于我国统计系统的活动水平收集、整理方法。

(4) 排放因子

美国国家环保局和欧洲环境署的排放因子数据库是目前国际上较为普遍被引用的。其中，美国的排放因子数据库所涵盖的污染源类别较多。美国国家环保局从 20 世纪 60 年代开始就对各类污染源组织了大量的测试，在此基础上编写了一套相当庞大的大气污染物排放因子手册 AP-42，于 1968 年首次出版，其后又陆续更新。目前，最新的 AP-42 已更新