



战略环境评价中环境空气污染 居民健康风险评估方法及应用

李 巍 谢元博 陈 娟◎著

Methods and Applications of Strategic
Environmental Assessment in Health Risk Assessment of Residents in
Exposure of Ambient Air Pollution

 科学出版社

战略环境评价中环境空气污染 居民健康风险评估方法及应用

李 巍 谢元博 陈 娟 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书针对日渐突出的环境空气污染和其对居民健康的影响问题,从将健康因素纳入战略环境评价体系入手,围绕主风险因子暴露水平模拟、居民健康风险评价、经济损失价值评估等主要模块,综合多学科技术方法,研究并构建战略环境评价中环境空气污染居民健康风险评价方法体系,并将其应用于北京市能源规划环评和京津冀、珠三角城市群大气污染防治政策环评的居民健康风险评价中,为将居民健康风险纳入战略环境评价提供理论支持和经验借鉴。

本书可作为环境科学、环境经济学、环境医学专业教学用书及科研参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

战略环境评价中环境空气污染居民健康风险评价方法及应用/李巍, 谢元博, 陈娟著.—北京: 科学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-03-048986-9

I. 战… II. ①李… ②谢… ③陈… III. ①空气污染-影响-健康-研究 IV. ①X503.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 141244 号

责任编辑: 张震 孟莹莹 / 责任校对: 张怡君

* 责任印制: 张倩 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 7 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 7 月第一次印刷 印张: 13.3/4 插页 3

字数: 246 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国城市能源规划和政策制定正面临改善环境空气质量和降低居民健康风险的双重约束，通过开展战略环境评价（strategic environmental assessment, SEA）进一步优化城市能源系统是降低大气污染暴露水平和减少居民健康危害的有效手段。

第 1 章综合概述我国环境空气污染概况和特点，结合城市居民空气污染暴露特征，揭示环境空气污染暴露下主要居民健康效应。

第 2 章系统梳理国内外环境空气污染居民健康风险评价研究进展，阐述将健康风险评价纳入战略环评的必要性和重要性。通过梳理健康风险评价在战略环评中的应用现状，揭示其存在的问题和挑战。

第 3 章研究和搭建模块化的战略环评中空气污染居民健康风险及损失评估技术框架，其主要包括三大模块：基于能源-环境情景模拟的主风险因子暴露水平模块、基于受体人群时空分布的居民健康风险评价模块、基于居民健康效应的经济损失价值评估模块。

第 4 章基于第 3 章建立的技术框架和评价模块，研究建立了主风险因子识别与筛选方法和以“政策规划情景分析”、“主要大气污染物排放预测”、“主风险因子暴露水平模拟”为主体的主风险因子暴露水平模块评价方法，以“健康终点筛选”、“健康阈值确定”、“暴露-反应关系建立”、“居民健康风险评价”、“风险特征描述”、“不确定性和敏感性分析”为主体的居民健康风险评价模块分析方法，以“健康终点经济损失价值评估”、“健康损害总体经济价值评估”为主体的经济损失价值评估模块分析方法。

第 5 章以北京市 2010~2020 年能源中远期规划为例，开展规划层次的模块化整体评价框架和集成不同模块的技术方法案例应用，通过快速影响评价矩阵（rapid impact assessment matrix, RIAM）方法进行北京市能源规划—大气环境—居民健康—经济影响关联性分析与主导因素判别，识别出 $PM_{2.5}$ 为主风险暴露因子。通过分析北京市 2010~2020 年中长期能源发展规划，结合当前节能环保政策、节能改造措施、空气清洁计划等划分三种约束情景；使用 LEAP 模型预测能源消费总量与 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 四种主要大气污染物的排放强度；结合基线大气环境数据，采用箱式模型模拟 $PM_{2.5}$ 不同情景暴露水平；通过平均增长法预测北京市不同人口结构与易感人群时空分布；结

合已有环境流行病学研究数据建立北京市 $PM_{2.5}$ 与不同健康终点的暴露-反应关系；通过泊松回归模型进行北京市中长期各区居民不同健康终点的 $PM_{2.5}$ 暴露健康风险评价。参照已有北京市不同健康终点健康经济损失成果进行高、中、低三种程度的划分，进行北京市各区不同情景居民 $PM_{2.5}$ 暴露风险下健康损失经济价值评估。最终提出通过北京市煤炭消费总量控制、主城区清洁能源改造、工业燃煤压缩、商业和服务业燃煤设施清洁能源改造、绿色交通与交通燃油总量压缩、工业结构调整等一系列措施，实现至 2015 年人群健康风险降低 25.3 万人，经济损失降低 171 亿~205 亿元，至 2020 年人群健康风险可减少 52.4 万人，经济损失降低 340 亿~408 亿元。提出开展后续能源—环境—健康基线数据收集与预警，针对重污染天气情景，北京市主城区朝阳、海淀、丰台及郊区房山、通州、大兴、昌平等区居民尤其是老人、儿童等易感人群应减少户外活动，以避免因急、慢性支气管炎和哮喘等病就诊甚至因呼吸和心肺疾病住院的健康防护建议。

第 6 章选取京津冀和珠三角城市群开展案例研究，以 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均、最大日均监测浓度作为死亡、发病健康效应评价的基准浓度，设定《大气污染防治行动计划》（“气十条”）、《环境空气质量标准》（GB3095—2012）二级标准和一级标准（“国二”和“国一”）、世界卫生组织 $PM_{2.5}$ 浓度指导值（AQG）四种浓度控制目标作为分析评价情景（环境保护部，2012）。分别运用综合暴露-反应关系模型 IER 和环境效益图像与分析系统模型 BenMAP-CE 开展 $PM_{2.5}$ 污染的居民死亡、发病健康效应评估；采用去死因寿命表法评价 $PM_{2.5}$ 污染导致的期望寿命损失；分别采用修正的人力资本法和疾病成本法评估 $PM_{2.5}$ 污染导致的居民慢性死亡和急性发病的健康损失经济价值。结果表明，相对基准情景，京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 年均浓度在达到“气十条”、“国二”、“国一”、“AQG”的情景下，可分别实现避免死亡人数 32 100 例、37 663 例、80 305 例、95 352 例，分别获得健康效益 275.78 亿元、390.76 亿元、833.86 亿元、991.24 亿元，收益主要来自肺癌和中风死亡人数的减少。按照 0 岁以上期望寿命增加计算，可使期望寿命分别增加 0.46 岁、0.57 岁、1.22 岁、1.50 岁。 $PM_{2.5}$ 日均浓度在达到“去重污染日”（消除重污染天气）、“国二”、“国一”、“AQG”的情景下，可分别实现避免发病人数 12 652 652 例、15 239 967 例、16 666 553 例、17 028 410 例，分别获得健康效益 75.3 亿元、91.9 亿元、101.1 亿元、103.5 亿元，收益主要来自内科门诊和儿科门诊人数的减少。珠三角城市群 $PM_{2.5}$ 年均浓度在达到“气十条”、“国二”、“国一”、“AQG”的情景下，可分别实现避免死亡人数 7590 例、6953 例、28 636 例、36 701 例，分别获得健康效益 146.00 亿元、141.18 亿元、566.48 亿元、725.18 亿元，收益主要来自中风和慢性阻塞性肺

疾病死亡人数的减少。按照 0 岁以上期望寿命增加计算, 可使期望寿命分别增加 0.29 岁、0.25 岁、1.06 岁、1.41 岁。PM_{2.5} 日均浓度在达到“去重污染日”、“国二”、“国一”、“AQG”的情景下, 可分别实现避免发病人数 142 950 例、1 482 633 例、2 352 060 例、2 581 655 例, 分别获得健康效益 1.6 亿元、18.6 亿元、30.52 亿元、33.8 亿元, 收益主要来自内科门诊和急性支气管炎患病人数的减少。

从空间分布上来说, 京津冀城市群中北京市获得健康效益最大, 然后为天津市和石家庄市, 秦皇岛市和张家口市获得的健康效益相对较小。珠三角城市群中广州市获得健康效益最大, 然后为深圳市和东莞市, 珠海市获得的健康效益相对较小。

为实现更高的环境空气质量标准, 我国需进一步调整能源消费结构, 重点提高天然气能源在总体能源消费结构中的比例, 实现天然气的可持续利用和高效利用。加强对京津冀地区老人的医疗资源投入和珠三角地区中青年人的疾病防控, 针对不同地区、不同人群制定疾病防控策略。

本书提出的战略环境评价中居民健康风险与经济损失评估的模式与方法, 为将居民健康风险纳入战略环境评价提供了理论支持和经验借鉴。

本书得到中国清洁发展机制基金赠款项目(1213075)的资助。参与本书写作的有李巍、谢元博、陈娟。全书由李巍修改并总纂定稿。

清华大学、中国人民大学、北京师范大学的相关专家对本书提出了很多宝贵意见, 为编写提供了支持。另外, 书中引用了国内外知名学者的著述, 部分资料引自网络资源, 在此对参考文献的作者一并表示感谢!

能源规划、环境影响评价、居民健康风险评价原本属于独立学科, 本书的研究范畴实际上是一个多学科交叉领域, 因此涉及的知识面广, 广度和深度也较难把握。本书主要为适应战略环境评价新要求和环境科学领域研究生科研要求而著, 内容上力求自成体系、重点突出, 体现多门专业知识的综合与应用, 并在讲述基本理论的同时, 尽量注重实用性, 可作为环境科学、人口、资源与环境经济学专业教学用书, 希望能对广大环境影响评价和环境健康评价工作者有所帮助。

由于作者水平有限, 能源政策规划领域、环境科学领域、居民健康风险评价领域科学发展迅速, 数据更新很快, 因此, 本书不足与错漏之处在所难免, 恳请广大读者批评指正。

全体作者

2016年5月19日

目 录

前言

1 环境空气污染及其对居民健康的影响	1
1.1 我国环境空气污染概况和特点	1
1.1.1 SO ₂ 污染特征	2
1.1.2 NO _x 污染特征	3
1.1.3 颗粒物污染特征	4
1.2 我国居民的环境空气污染暴露特征	6
1.2.1 与环境介质相关的暴露特征（暴露参数）	7
1.2.2 与污染源相关的暴露特征	8
1.2.3 与环境健康风险相关的暴露防范特征	8
1.3 环境空气污染暴露下的主要居民健康效应	9
1.3.1 SO ₂ 暴露下的居民健康效应	11
1.3.2 NO _x 暴露下的居民健康效应	12
1.3.3 颗粒物暴露下的居民健康效应	12
2 空气污染居民健康风险评价及其在战略环评中的应用进展	14
2.1 空气污染居民健康风险评价研究进展	14
2.1.1 暴露-反应关系的建立	15
2.1.2 健康风险评价	20
2.1.3 健康损失经济价值评估	23
2.2 将健康风险评价纳入战略环评的必要性和重要性	24
2.3 战略环评中健康风险评价应用现状和存在的问题	27
2.3.1 环境影响评价中环境风险评价现状	27
2.3.2 战略环评中健康风险评价现状	30
2.3.3 存在的问题	32
3 战略环境评价中环境空气污染居民健康风险评价模块化技术体系	33
3.1 评价模块分析与框架构建	33
3.2 基于能源-环境模拟的主风险因子暴露水平模块	40

3.2.1	能源消费与主要大气污染物排放预测	41
3.2.2	主风险因子情景暴露水平模拟	41
3.3	基于受体时空分布的居民健康风险评价模块	42
3.4	基于居民健康效应的经济损失价值评估模块	45
4	战略环境评价中环境空气污染居民健康风险评价方法	48
4.1	主风险因子识别与筛选方法	48
4.1.1	能源-大气响应分析矩阵	50
4.1.2	大气污染-人群健康评价矩阵	51
4.2	风险暴露水平分析方法	56
4.2.1	情景分析法	56
4.2.2	能源消费与主要大气污染物排放预测	58
4.2.3	主风险因子情景暴露水平模拟	59
4.3	居民健康风险评价方法	61
4.3.1	健康终点的筛选	61
4.3.2	健康阈值的确定	62
4.3.3	暴露-反应关系的建立	62
4.3.4	居民健康风险评价	63
4.3.5	风险特征描述	67
4.3.6	不确定性和敏感性分析	68
4.4	居民健康效应经济价值评估方法	70
4.4.1	评估方法体系的构建	70
4.4.2	健康终点损失评估概念模型	71
4.4.3	经济价值评估方法	72
5	北京市能源规划的居民健康风险评价	77
5.1	研究区概况	77
5.1.1	北京市能源发展战略分析	77
5.1.2	北京市环境基线数据分析	79
5.1.3	北京市健康基线数据库建立	81
5.2	能源-环境-健康系统分析与主导因素判别	84

5.3 北京市居民主风险因子暴露水平分析	89
5.3.1 能源-环境模型建立	89
5.3.2 情景设置	89
5.3.3 排放因子筛选与建立	92
5.3.4 能源消费量与污染物排放量预测分析	93
5.3.5 北京市主风险因子暴露浓度模拟预测	96
5.4 北京市居民健康风险评价	101
5.4.1 受体人群及易感人群预测	101
5.4.2 主暴露因子健康阈值设定	102
5.4.3 暴露-反应关系建立	102
5.4.4 健康风险评价	103
5.4.5 健康风险特征描述	122
5.5 北京市居民健康风险经济损失价值评估	125
5.5.1 健康终点损失经济价值成本评估	125
5.5.2 北京市及各区健康风险损失经济价值评估	126
5.5.3 北京市本地源与外源影响分析	136
5.6 风险评价不确定性分析	137
5.7 北京市城市能源规划情景比较	139
5.8 后续监测计划与居民健康保护建议	141
6 城市群地区大气污染防治政策的居民健康效益评价	142
6.1 研究区概况	142
6.1.1 京津冀城市群区域概况	142
6.1.2 珠三角城市群区域概况	146
6.2 评价情景设定	149
6.3 京津冀城市群居民健康效益评价	149
6.3.1 死亡健康风险评价	149
6.3.2 疾病健康风险评价	164
6.4 珠三角城市群居民健康效益评价	173
6.4.1 死亡健康风险评价	173

6.4.2 疾病健康风险评价·····	185
6.5 不确定性和敏感性分析·····	193
6.5.1 不确定性分析·····	193
6.5.2 敏感性分析·····	196
6.6 情景比较与政策建议·····	197
参考文献·····	199
附录 名词术语·····	205
彩版	

环境空气污染及其对居民健康的影响

空气污染暴露会导致居民健康危害。本章重点分析我国环境空气污染形势和特点，结合居民生活习惯及方式，分析我国居民的环境空气污染暴露特征，揭示空气污染暴露下的主要居民健康效应。

1.1 我国环境空气污染概况和特点

伴随着城市化和工业化的迅速推进，城市工业、交通、居民生活、工程建设等活动强度和能源消耗不断增强，城市和区域空气污染问题日渐突出（乔玉霜等，2011）。2013年京津冀城市群、长三角城市群和珠三角城市群三大城市群以8%的国土面积，消耗了全国43%的能源（Chen et al., 2013），成为我国空气污染的重灾区。根据《2013年中国环境状况公报》（环境保护部，2014），京津冀地区13个地级及以上城市中有10个城市全年空气质量达标天数低于50%，其中重度及以上污染天数占20.7%；长三角地区重度及以上污染天数占5.9%；珠三角地区重度及以上污染天数占0.3%。京津冀地区大气污染形势最为严峻。在全国污染最严重的20个城市中，京津冀地区有11个，其中7个位于全国污染最严重城市的前10位。

按照新修订的《环境空气质量标准》（GB 3095—2012）对京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市、省会城市和计划单列市共74个城市的环境空气质量进行评价，结果表明，2013年实行新标准的74个城市平均达标天数比例为60.5%，平均超标天数比例为39.5%。10个城市达标天数比例介于80%~100%，47个城市达标天数比例介于50%~80%，17个城市达标天数比例低于50%。

对我国256个尚未执行新标准的地级及以上城市依据《环境空气质量标准》（GB3095—1996）对SO₂、NO₂和PM₁₀三项污染物年均值进行评价，结果表明，256个城市达标比例为69.5%。SO₂年均浓度达标城市比例为91.8%，劣三级城市比例为1.2%；NO₂年均浓度均达标，其中，达到一级标准的城市比例为86.3%；PM₁₀年均浓度达标城市比例为71.1%，劣三级城市比例为7.0%。

对我国近五年环境空气质量达标情况进行统计,如表 1-1 所示,结果表明,我国城市环境空气质量整体呈现上升的趋势,地级及以上城市环境空气质量达标比例从 2008 年 71.6% 上升到 2012 年的 91.4%。其中,NO₂ 浓度一直保持较低水平,城市环境空气中 NO₂ 年均浓度均达到二级标准;可吸入颗粒物 PM₁₀ 达标比例最低,但五年内也有较大比例上升,由 2008 年 81.5% 上升到 2012 年的 92.0%;城市环境空气中 SO₂ 浓度达标比例也呈稳步上升态势,由 2008 年 85.2% 上升到 2012 年的 98.8%。

表 1-1 环境空气质量达标城市比例

单位: %

达标比例(二级标准)	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年
SO ₂	85.2	91.6	94.9	96.0	98.8
NO ₂	100	100	100	100	100
PM ₁₀	81.5	84.3	85.0	90.8	92.0
空气质量	71.6	79.6	81.7	89.0	91.4

注:数据来自《2008~2012 中国环境状况公报》,执行《环境空气质量标准》(GB3095—1996)。

我国城市环境空气质量总体上逐年好转,但受能源消费结构的影响,环境空气污染问题仍十分严重,空气质量不尽如人意。随着城市化进程的加快、人口的大量聚集和机动车数量的迅猛增长,传统的煤烟型大气污染正逐渐向复合型大气污染转化。城市大气污染物主要以 PM_{2.5}、O₃ 等二次污染物为主,具有快速蔓延性、污染综合性和影响区域性等复合型大气污染特征。

大型城市由于城市规模大、人口众多、生产生活活动频繁、能源消耗密集,污染物排放量大、排放强度相对集中,空气中主要污染物超标比例明显高于中小城市(张继娟和魏世强,2006)。同时,受我国能源消费结构地域分布的不同及冬季取暖的影响,我国城市大气污染还具有北方比南方严重、冬季比夏季严重的时空分布特征。下面就城市环境空气质量主要评价指标分别进行分析。

1.1.1 SO₂ 污染特征

基于我国燃煤为主的能源消费结构,煤炭中含有大量的硫元素,经过燃烧,就会转化为大气污染物 SO₂ 排放到大气中,污染环境。其中,电力、钢铁、化工等行业是主要的燃煤行业,同时也是 SO₂ 的主要产生源。据《环境统计年报》统计,2008~2012 年我国 SO₂ 排放量均在 2000 万 t 以上,其中工业源排放占 SO₂ 总排放量的 90% 左右(表 1-2)。

表 1-2 2008~2012 年全国 SO₂ 排放量

单位: 万 t

时间	合计	工业源	城镇生活源	集中式
2012 年	2117.6	1911.7	205.6	0.3
2011 年	2217.9	2017.2	200.4	0.3
2010 年	2185.1	1864.4	320.7	—
2009 年	2214.4	1865.9	348.5	—
2008 年	2321.2	1991.3	329.9	—

调查统计的 41 个工业行业中, SO₂ 排放量位于前 3 位的行业依次为电力、热力生产和供应业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 非金属矿物制品业, 3 个行业共排放 SO₂ 1237.4 万 t, 占重点调查工业企业 SO₂ 排放总量的 69.7%。

从地域分布来看, 2012 年 SO₂ 排放量超过 100 万 t 的省份依次为山东、内蒙古、河北、山西、河南、辽宁和贵州, 7 个省份的 SO₂ 排放量占全国排放量的 43.2%。各地区中, 工业和城镇生活 SO₂ 排放量最大的均是山东。按照大气污染防治重点区域(三区十群)调查统计结果, SO₂ 排放量居前 4 位的区域依次为长三角地区、山东城市群、京津冀地区和成渝城市群, 其 SO₂ 排放量占三区十群排放量的 66.4%。三区十群单位面积 SO₂ 排放强度为 7.4t/km², 是全国平均排放强度(2.2 t/km²)的 3.4 倍。三区十群中各区域的单位面积 SO₂ 排放强度均高于全国平均水平。其中, 单位面积 SO₂ 排放强度较大的区域为山东城市群和陕西关中城市群, 其污染物排放强度分别为 11.2 t/km² 和 9.5 t/km²。SO₂ 排放量和单位面积 SO₂ 排放强度均较大的区域为长三角地区、山东城市群和京津冀地区。

1.1.2 NO_x 污染特征

氮氧化物(NO_x)种类很多, 包括一氧化二氮(N₂O)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO₂)、三氧化二氮(N₂O₃)、四氧化二氮(N₂O₄)和五氧化二氮(N₂O₅)等多种化合物, 但通常所说的大气污染物主要包括 NO 和 NO₂ (贾继东, 2012)。机动车尾气排放是空气中 NO_x 主要来源之一, 随着城市化进程的加快, 机动车保有量迅猛增长。自 20 世纪 80 年代以来, 我国机动车保有量以每年 14.4% 的速度增长, 进入 21 世纪以后, 增长速度上升为 19.4%。至 2012 年年底, 全国机动车保有量已达 2.4 亿辆, 是 2000 年的 14.8 倍。机动车保有量的大幅增加, 导致汽车尾气排放迅速增加, 我国大气污染特征也由传统的煤烟型污染逐渐转变为复合型污染。根据我国近几年环境监测数据, NO₂ 浓度均达到了环境空气质量二级浓度限值, 但在北京、上

海、广州、深圳、重庆等大城市其浓度日渐升高。据《环境统计年报》统计, 2008~2012 年我国 NO_x 排放量呈上升态势, 其中, 工业源排放占 NO_x 总排放量的 70% 以上, 机动车排放量所占比例增长迅速。2008~2012 年我国 NO_x 排放量统计如表 1-3 所示。

表 1-3 2008~2012 年全国 NO_x 排放量 单位: 万 t

时间	合计	工业源	城镇生活源	机动车	集中式
2012 年	2337.8	1658.1	39.3	640.0	0.4
2011 年	2404.3	1729.5	37.0	637.5	0.3
2010 年	1852.4	1465.6	386.8	—	—
2009 年	1692.7	1284.8	407.9	—	—
2008 年	1624.5	1250.5	374.0	—	—

注: 2008~2010 年生活源排放量中含交通源排放的 NO_x ; 自 2011 年起机动车排气情况与生活源分开, 单独统计。

调查统计的 41 个工业行业中, NO_x 排放量位于前 3 位的行业依次为电力、热力生产和供应业, 非金属矿物制品业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 3 个行业共排放 NO_x 1390.1 万 t, 占重点调查工业企业 NO_x 排放总量的 87.9%。

从地域分布上来看, NO_x 排放量超过 100 万 t 的省份依次为河北、山东、河南、江苏、内蒙古、广东、山西和辽宁, 8 个省份 NO_x 排放量占全国 NO_x 排放量的 49.7%。工业 NO_x 排放量最大的是山东, 城镇生活 NO_x 排放量最大的是黑龙江, 机动车 NO_x 排放量最大的是河北。按照大气污染防治重点区域(三区十群)调查统计结果, NO_x 排放量居前 4 位的区域依次为长三角地区、京津冀地区、山东城市群和成渝城市群, 其 NO_x 排放量占三区十群排放量的 66.4%。三区十群单位面积 NO_x 排放强度为 $8.7\text{t}/\text{km}^2$, 是全国平均排放强度 ($2.4\text{t}/\text{km}^2$) 的 3.6 倍。三区十群中各区域单位面积 NO_x 排放强度均高于全国平均水平。其中, 单位面积 NO_x 排放强度较大的区域为珠三角地区、长三角地区、山东城市群和京津冀地区, 其污染物排放强度分别为 $14.9\text{t}/\text{km}^2$ 、 $12.8\text{t}/\text{km}^2$ 、 $11.1\text{t}/\text{km}^2$ 和 $10.4\text{t}/\text{km}^2$ 。 NO_x 排放量和单位面积 NO_x 排放强度均较大的区域为长三角地区、京津冀地区和山东城市群。

1.1.3 颗粒物污染特征

我国颗粒物污染指示指标有 TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 。TSP (total suspended particulate, 总悬浮颗粒物) 是指用标准大容量颗粒采集器在滤膜上收集到的

颗粒物的总质量。 PM_{10} 是指空气动力学直径小于 $10\mu m$ 的大气悬浮颗粒物,因其易于被吸入人的呼吸道部位,因而又称为可吸入颗粒物。 $PM_{2.5}$ 是指空气动力学直径小于或等于 $2.5\mu m$ 的大气悬浮颗粒物,因其可深入到人体肺部,又称为可入肺颗粒物。

受我国能源消费结构、地形气候等社会自然因素的影响,大气中颗粒物来源广泛,仍是影响环境空气质量的主要污染物。我国北方大部分城市植被覆盖度低,地表裸露,大风夹带着地表土壤颗粒,形成沙尘,使空气中TSP浓度大大升高。20世纪90年代末至21世纪初,中国沙尘天气泛滥,严重影响人们的正常生活。随着我国荒漠化防治工作的不断推进及绿化造林工程的有序实施,沙尘天气得到较好的遏制。

近几年灰霾天气频发,引起了全社会对细颗粒物污染的广泛关注。2013年1月和12月,涉及我国中东部130多万平方千米的区域受到了严重的灰霾污染。两次灰霾污染过程均具有污染范围广、持续时间长、污染程度重、污染物浓度累积迅速的特点,且污染过程中首要污染物均为 $PM_{2.5}$ 。其中,1月份灰霾污染过程持续17天,造成74个城市共发生677天次的重度及以上污染天气,污染较重的区域主要为京津冀及周边地区,特别是河北南部地区,石家庄、邢台等为污染最重城市。12月份灰霾污染过程持续9天,造成74个城市共发生271天次的重度及以上污染天气,污染较重的区域主要为长三角地区、京津冀及周边地区和东北部分地区,长三角地区为污染最重地区。

空气中TSP主要来源有人为源和自然源,人为源主要为能源消费、工业生产过程中产生和排放的烟(粉)尘;自然源主要由土壤、扬尘、沙尘经风力作用扩散输送到大气环境中。 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 来源比TSP更加复杂,主要也可分为人为源和自然源两类。人为源主要为工业生产、能源消费、汽车尾气排放等产生和排放的颗粒物及燃料燃烧排放的残留物中各种重金属粒子、灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物粒子等经过一系列光化学反应形成的二次污染物。自然源主要是土壤扬尘、火山喷发烟尘及流星燃烧产生的细小微粒和宇宙尘埃等。根据我国近几年环境监测数据,颗粒物浓度超标相对严重,颗粒物仍然是大气环境中的主要污染因子。2012年,我国新修订的环境空气质量标准,增加了 $PM_{2.5}$ 的浓度要求,表明了颗粒物污染防治从大颗粒物到细颗粒物的转变。

据《环境统计年报》统计,2008~2012年我国烟(粉)尘排放量呈下降趋势,其中工业源排放占烟(粉)尘总排放量的80%以上。2008~2012年我国烟(粉)尘排放量统计如表1-4所示。

表 1-4 2008~2012 年全国烟(粉)尘排放量 单位: 万 t

时间	合计	工业源	城镇生活源	机动车	集中式
2012 年	1234.3	1029.3	142.7	62.1	0.2
2011 年	1278.8	1100.9	114.8	62.9	0.2
2010 年	1277.8	1051.9	225.9	—	—
2009 年	1371.3	1128.0	243.3	—	—
2008 年	1486.5	1255.6	230.9	—	—

注: 自 2011 年起不再单独统计烟尘和粉尘; 机动车烟(粉)尘排放量指机动车颗粒物排放量。

调查统计的 41 个工业行业中, 烟(粉)尘排放量位于前 3 位的行业依次为非金属矿物制品业, 电力、热力生产和供应业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 3 个行业共排放烟(粉)尘 659.3 万 t, 占重点调查统计工业企业烟(粉)尘排放量的 68.9%。

从地域分布来看, 烟(粉)尘排放量超过 50 万 t 的省份依次为河北、山西、内蒙古、辽宁、黑龙江、新疆、山东和河南, 8 个省份烟尘排放量占全国烟(粉)尘排放量的 53.0%。各地区中, 工业烟(粉)尘排放量最大的是河北, 城镇生活烟(粉)尘排放量最大的是黑龙江, 机动车烟(粉)尘排放量最大的是河北。按照大气污染防治重点区域(三区十群)调查统计结果, 三区十群中, 烟(粉)尘排放量居前 4 位的区域依次为京津冀地区、长三角地区、山东城市群和辽宁中部城市群, 其烟(粉)尘排放量占三区十群排放量的 66.0%。三区十群单位面积烟(粉)尘排放强度为 $3.7\text{t}/\text{km}^2$, 是全国平均排放强度 ($1.3\text{t}/\text{km}^2$) 的 2.8 倍。三区十群中各区域的单位面积烟(粉)尘排放强度均高于全国平均水平。其中, 单位面积烟(粉)尘排放强度较大的区域为辽宁中部城市群、京津冀地区和山西中北部城市群, 其污染物排放强度分别为 $6.8\text{t}/\text{km}^2$ 、 $6.1\text{t}/\text{km}^2$ 和 $5.2\text{t}/\text{km}^2$ 。烟(粉)尘排放量和单位面积烟(粉)尘排放强度均较大的区域为京津冀地区、山东城市群和辽宁中部城市群。

1.2 我国居民的环境空气污染暴露特征

我国居民通过呼吸、饮食、皮肤接触等方式暴露于环境污染中。环境污染对健康的影响不仅与环境污染物的浓度和毒性相关, 还与人的环境暴露行为模式密切相关, 了解我国人群环境暴露行为模式特点, 对于提高环境健康风险评估准确性, 引导社会各界关注、防范环境健康风险具有重要意义。

人群环境暴露行为模式包括四个方面: 一是人体生理特征, 如身高、体重、呼吸量等; 二是人接触空气、水等环境介质中污染物的时间、频率、途

径和方式；三是人居环境中污染源分布情况；四是人对于暴露风险的防范行为。基于此，人群暴露特征可分为与环境介质相关的暴露特征、与污染源相关的暴露特征和与环境健康风险防范相关的暴露特征。其中与环境介质相关的暴露特征包括时间活动模式、摄入量参数和生理特征等；与污染源相关的暴露特征，可分为传统型的污染源和现代型的污染源。传统型污染源主要关注固体燃料使用和不安全饮用水情况，现代型污染源主要关注居住在所调查的 7 大类高风险企业^①周边 1km 范围内及交通主干道 50m 范围内的人数比例；与环境健康风险防范相关的暴露特征主要关注与室外空气相关的外出戴口罩情况、与室内空气相关的开窗通风及做饭时采用通风设施的情况、与水相关的人们喝开水的情况。

考虑城市能源消费造成的环境污染多以大气污染的形式表征，这里仅考虑人群环境空气污染暴露下的暴露特征。

研究（环境保护部，2013）表明，我国人群环境暴露行为模式特征与国外存在较大差异，同时，不同地区、城乡、性别和年龄人群暴露特征也存在较大差异。

1.2.1 与环境介质相关的暴露特征（暴露参数）

污染物对人体健康的毒性往往与单位体重的暴露剂量有关，所以与环境介质相关的暴露特征往往通过身体特征、摄入量及暴露频率和时间三方面的参数来表征，即暴露参数。在身体参数方面，就全国而言，东部地区居民的身体特征参数均最高，西部最低。在呼吸量方面，男性高于女性，城市居民高于农村居民，东部和中部地区居民高于西部地区居民。身体特征及摄入量是决定其与环境介质暴露的主要因素之一，假设在其他参数条件完全相同的情况下，单位体重的呼吸量越大，则人群与空气的暴露剂量越高。

在空气暴露时间方面，中国人群平均室外暴露时间为 3.7h/d，低于美国，但高于日韩，且存在性别和年龄差异，其中男性（3.9h/d）略高于女性（3.5h/d），而 45~59 岁年龄段人群的室外暴露时间最长（3.9h/d），80 岁以上人群最短，平均仅为 2.5h/d。人群室内暴露时间是 20.0h/d。人群于室内空气的暴露时间远高于室外，是室外暴露时间的 5 倍多。

根据《中国人群环境暴露行为模式调查报告（成人卷）》，利用综合暴露系数的概念反映暴露行为模式特征，综合暴露系数越大，则说明相同污染物浓度下，人体的暴露剂量越高。调查结果显示，中国人群与环境介质相关

^①石油、石化、炼焦、焦化类企业；有色金属冶炼或再生类企业；有机酸、肥料、农药制造类企业；皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业类企业；造纸或印染类企业；垃圾焚烧厂和火力发电厂。