



# 扬尘污染控制

FUGITIVE DUST CONTROL

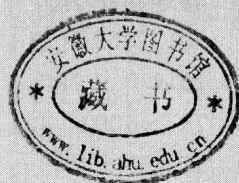
田刚 黄玉虎 樊守彬 等编著

中国环境出版社

# 扬尘污染控制

FUGITIVE DUST CONTROL

田刚 黄玉虎 樊守彬 等编著



中国环境出版社·北京

**图书在版编目 (CIP) 数据**

扬尘污染控制/田刚等编著. —北京: 中国环境出版社,  
2013. 1

ISBN 978-7-5111-1059-6

I. ①扬… II. ①田… III. ①扬尘污染—污染控制—研究  
IV. ①X513

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 155123 号

出版人 王新程  
策划编辑 黄晓燕  
责任编辑 陈雪云  
文字编辑 张维娣  
责任校对 唐丽虹  
封面设计 马 晓

---

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](mailto:bjgl@cesp.com.cn)  
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)  
010-67112735 (图书出版中心)  
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 2013 年 3 月第 1 版  
印 次 2013 年 3 月第 1 次印刷  
开 本 787 × 1092 1/16  
印 张 21.25  
字 数 450 千字  
定 价 75.00 元

---

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】

## 编写人员

主    编：田  刚  黄玉虎  樊守彬

其他编写人员：李  钢  闫  静  杨明珍  聂  磊  
                  彭应登  钟连红  秦建平  李金玉  
                  宋光武  曲  松  田  川  薄以匀  
                  蔡  煜  闫文慧

## 前 言

在全球范围内，颗粒物一直是大多数城市空气污染的主要指标之一，也是今后较长时期内我国大多数城市的首要空气污染物。近十年的数据统计结果表明，北京市空气质量不达标天数里，可吸入颗粒物（ $PM_{10}$ ）作为首要污染物的占95%以上。扬尘是城市空气 $PM_{10}$ 的重要来源，在一定的时期甚至可以成为一些城市空气 $PM_{10}$ 的最大来源。扬尘中不仅仅含有粗颗粒，还含有一定比例的细粒子（ $PM_{2.5}$ ），扬尘产生的颗粒物总量很大，因此同样也是城市空气 $PM_{2.5}$ 不可忽视的重要来源。显然，控制扬尘是改善城市空气质量的重要工作。

在各类颗粒物来源中，扬尘在物理化学性质、扩散规律、排放量计算等方面最为复杂。扬尘有固态、液态、固液混合态等多种形态，有初级扬尘、次级扬尘等不同排放行为过程，扬尘中不仅包括地壳物质，还包括有机物和元素碳等其他物质。扬尘可以是点源排放，也可以是线源和面源排放，其无组织排放的特点决定了其在扩散规律与监测等方面的复杂性，从而使其在排放量估算——颗粒物污染控制过程中极为重要的环节显得尤为困难。

不少人直观地认为，扬尘排放的仅仅是含有地壳物质的粗颗粒，实际上几乎所有产生颗粒物的人为和自然行为（如机动车、燃煤、水蚀等）都会在扬尘中留下较为明显的痕迹，因此扬尘也就成为颗粒物（ $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ ）源解析等探讨大气颗粒物污染根源工作不可绕过甚至是最难把握的重要环节。覆盖、洒水（或抑尘剂）、设立风障等主要扬尘控制措施本身也看似简单，但是量化评估这些控制措施效率并不是一个简单的工作，而量化恰恰是评估污染控制措施经济有效性的的重要依据。本书试图通过总结国内外有关科研成果，为读者提供一些较为实用的参考意见。

本书编写过程中主要参考的文献和研究成果有：美国环保局（USEPA）主持编制的 AP-42 文件，美国环保局主持编写、北京市环保局及北京市环境保护科学研究院等单位负责翻译的《颗粒物环境空气质量基准》，美国西部州长协会（WGA）主持编写的《西部大气合作组织（WRAP）扬尘手册》，北京市环境保护科学研究院等单位合作完成的国家环保公益项目《典型城市扬尘污染特征和防治技术途径研究》，美国中西部研究所（MRI）、北京市环境保护科学研究院及其他国内外有关机构完成的一系列科研成果。在编写过程中，我们曾经试图使用《无组织尘污染控制》作为本书的书名，但是为了更加贴近读者，最后选择了目前的书名。

北京市环境保护科学研究院在主持国家环保公益项目《典型城市扬尘污染特征和防治技术途径研究》以及其他大量有关扬尘的科研工作中，完成了一系列大中型的现场实验，采集分析了大量环境和污染源数据，在此向共同完成公益项目的北京市劳动保护科学研究所、呼和浩特市环境科学研究所等单位，向参加了有关实验和化验工作的姚生临、任立民、李雪峰、骆霄、毛华云、柯建明、牛瑞、邱涌涛、陈慧敏、李旭、岳秀峰、杨力鹏、张颖、杨军、刘建国、盛亮等个人表示由衷的感谢。

# 目 录

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....               | 1   |
| 1.1 基本概念 .....                      | 1   |
| 1.2 扬尘的物理化学性质 .....                 | 10  |
| 1.3 颗粒物对生态环境的影响 .....               | 34  |
| <b>第 2 章 扬尘的扩散与监控</b> .....         | 53  |
| 2.1 扬尘的扩散规律 .....                   | 53  |
| 2.2 扬尘排放量计算 .....                   | 70  |
| 2.3 扬尘的监测 .....                     | 81  |
| 2.4 扬尘控制概述 .....                    | 94  |
| 2.5 扬尘控制技术措施 .....                  | 100 |
| <b>第 3 章 风蚀扬尘</b> .....             | 119 |
| 3.1 概述 .....                        | 119 |
| 3.2 开放区域及料堆排放量估算的基本方法 .....         | 123 |
| 3.3 开放区域风蚀扬尘 .....                  | 129 |
| 3.4 料堆风蚀扬尘 .....                    | 137 |
| 3.5 农田风蚀扬尘 .....                    | 148 |
| 3.6 次级风蚀扬尘 .....                    | 170 |
| <b>第 4 章 交通扬尘</b> .....             | 177 |
| 4.1 概述 .....                        | 177 |
| 4.2 交通扬尘排放量核算方法 .....               | 180 |
| 4.3 交通扬尘排放规律 .....                  | 189 |
| 4.4 交通扬尘排放清单 .....                  | 207 |
| 4.5 交通扬尘控制技术措施 .....                | 216 |
| 4.6 交通扬尘污染控制措施评估 .....              | 228 |
| 4.7 交通扬尘控制管理措施 .....                | 251 |
| 附录 4-1 路面尘积尘负荷、粉土含量样品采集及实验室分析 ..... | 254 |
| <b>第 5 章 材料处理扬尘</b> .....           | 264 |
| 5.1 源排放特征 .....                     | 264 |

|            |                    |            |
|------------|--------------------|------------|
| 5.2        | 散料处理 .....         | 264        |
| 5.3        | 其他材料处理处置过程 .....   | 269        |
| <b>第6章</b> | <b>施工扬尘 .....</b>  | <b>272</b> |
| 6.1        | 概述 .....           | 272        |
| 6.2        | 施工扬尘排放量核算方法 .....  | 276        |
| 6.3        | 施工扬尘排放规律 .....     | 281        |
| 6.4        | 施工扬尘排放清单 .....     | 295        |
| 6.5        | 施工扬尘控制技术措施 .....   | 298        |
| 6.6        | 施工扬尘控制管理措施 .....   | 309        |
| <b>第7章</b> | <b>农业耕作尘 .....</b> | <b>324</b> |
| 7.1        | 源排放特征 .....        | 324        |
| 7.2        | 排放量估算 .....        | 324        |
| 7.3        | 作物排放因子计算案例 .....   | 327        |
| 7.4        | 农业耕作尘控制措施 .....    | 329        |



# 第1章 绪 论

## 1.1 基本概念

### 1.1.1 扬尘的定义

扬尘 (fugitive dust) 也被称为逸散尘, 由于往往处于无组织排放 (non-ducted emissions) 状态, 因此又被称为无组织尘或无组织扬尘。所谓无组织尘, 是指在生产过程中由于无密闭设备或设备不完整, 无排气筒或烟囱, 通过非密闭的通风口排向大气的颗粒物, 以及道路、露天作业场所或废弃物堆放场所等在风力、人为活动或二者共同作用下排向大气的颗粒物, 随时间和空间变化较大。根据国家环保部颁发的《防治城市扬尘污染技术规范》(HJ/T 393—2007) 的定义, 扬尘是“指地表松散颗粒物在自然力或人力作用下进入到环境空气中形成的一定粒径范围的空气颗粒物”。根据《大气污染物排放标准》(GB 16297—1996) 的定义, 无组织排放是指“大气污染物不经过排气筒的无规则排放”。

### 1.1.2 扬尘源分类

#### (1) 按发生级次分类

扬尘中不仅包含沉降到下垫面的颗粒物在没有明显改变其物理形态 (如压实、凝聚成块状泥土) 之前以原有“单元”或有限聚集“单元” (动力学直径 $\leq 100 \mu\text{m}$ ) 的状态, 再次“直接”进入到环境空气中的颗粒物, 也包括: ①下垫面物质表层在外力作用下破损、松散而产生的颗粒物 (如料堆、裸地表面的风蚀, 土方开挖、物料装卸、车轮碾压等过程中的机械破损等); ②从其他环境中转移过来的颗粒物 (如从未铺装表面带入或物料运送过程中遗撒到道路上的泥土或物料等); ③其他非沉降产生的颗粒物, 在外力的作用下以独立单元“首次”进入到环境空气中的颗粒物。如根据美国环保局 (Axetell 等, 1997) 的估算, 产生交通扬尘的路面尘土来源中, 降尘约占 4%, 而车辆从非铺装区域挟带尘土约占 42%。

为区别大气颗粒物一次粒子、二次粒子的通用分类方法, 本书将上述所谓“首次”“再次”进入环境空气中的扬尘分为初级扬尘和次级扬尘, 即前者是指通过非沉降过程进入受风力或人为活动影响的表面, 并因风力和人为活动进入大气环境的扬尘; 后者是指空气中的颗粒物通过干湿沉降达到下垫开放表面后, 再次因自然作用或人为活动进入大气环境中的扬尘。值得提出的是, 如果通过干湿沉降达到下垫面的颗粒物因凝聚等原因而明显改变其物理形态后, 再次成为扬尘时则仍然应归类于初级扬尘 (如

大多数通过湿沉降落到地表上的颗粒物，以及一定时间以前通过干湿沉降落到地表上的颗粒物)。而次级扬尘和初级扬尘往往是同时发生的，如道路扬尘、农业耕作扬尘等。

了解次级扬尘排放量和其在各类扬尘中的权重，对于制定扬尘控制措施是有现实意义的，因为它提供了我们是否有必要通过工程技术措施将沉降到地表的颗粒物及时清除掉的依据。目前有关沉降后又再次“直接”进入到环境空气中的颗粒物（次级扬尘）在不同扬尘排放总量中所占比例的研究尚不够深入和细致。

### (2) 按作用力分类

按照扬尘产生的作用力可以将扬尘分为自然（风蚀）扬尘和人为（机械）扬尘。

自然扬尘或称风蚀尘一般是指在风力的作用下，裸露地面（如农业撂荒地以及其他人为活动形成的裸地）、砂石坑、料堆、河道荒滩、屋顶、植物叶面等开放表面上的松散颗粒物，被扬逸到空气中而形成的一定粒径范围的空气颗粒物，而广场、道路等人为活动频繁的场所，自然状态时其表面的颗粒物在一定风力的作用下（非行人、车辆原因）也可以产生自然扬尘。自然扬尘包括初级自然扬尘和次级自然扬尘。初级自然扬尘是指由于风蚀作用（如裸露地面、沙漠、料堆）、化学腐蚀（如二氧化硫对建筑物等裸露面的腐蚀）、其他自然力（如干湿变化等原因造成的土壤表层的扰动）、人为活动（裸露地面上行人或行车，以及针对料堆、砂石坑、裸露地面的生产活动）等原因，造成的开放表面破损、松散而产生的较细颗粒物或因非降尘原因沉积的呈松散状态的颗粒物（如道面上遗撒的粉尘等）在风力下所形成的扬尘。

人为活动对开放表面的破坏（增大扬尘排放潜力）程度，往往要远大于风力等其他自然力。次级自然扬尘是指空气中的各类颗粒物通过干湿沉降落到下垫开放表面后，被风扬起再次“直接”进入到空气的颗粒物，如上述广场、屋顶都是次级自然扬尘的污染源。由于次级风蚀尘的来源、组成、排放等都较为复杂，缺乏研究成果，迄今没有一个得到普遍认可的评价和计算方法，因此在扬尘排放清单（一种含有时空分布的排放量统计数据库）中往往被忽略或没有被区分出来。裸露地面扬尘排放量计算采用的是根据典型样本检测数据导出的经验公式，如果计算公式应用地点和典型样本的颗粒物沉降环境不同时，可能会出现一定的偏差。在计算交通扬尘（仅指因车辆行驶导致的扬尘）排放量时，需要实测路面尘负荷，次级扬尘已包含其中。而屋顶、广场等硬化下垫面的次级扬尘排放量的计算，仍然需要更多的研究工作。

人为扬尘是指在人类生活或生产过程中所产生的扬尘，如在建筑、交通、采矿、农业耕种、谷物处理等过程中，通过各类工具、设备、器械的机械力作用，引起作业表面物质的击发、粉碎、磨损，并借助自然风力而产生的扬尘。在城市（含城市周边的郊区）扬尘的排放中，人为扬尘是扬尘排放的主体，其排放量与自然扬尘可相差一个数量级以上。由于人为扬尘排放强度高、排放量大，通常产生于人口较为集中的敏感地区，因此也是扬尘控制的主要目标。

### (3) 按照排放空间分类

按照扬尘排放源的空间状态，大致可以分为点源、线源、面源三个典型的污染源。点源主要涉及粉尘或颗粒物的人为作业点，其大部分为固定污染源的点状排放，如独立进行的物料装卸、物料破碎、物料筛分等作业过程所产生的扬尘。线源主要包括公

路机动车辆行驶于道路时所产生的交通扬尘。扬尘面源主要包括裸露地面、沙漠等自然排放源,以及建筑工地、露天采矿区、农业耕作、渣土堆放场、储煤及其他散料储料场等复合的人为作业系统。将污染源分为点源、线源、面源,最大的优点是有助于扬尘的现场监测和排放量计算。

从另外一个角度分类,扬尘排放源可分为工艺源和开放源。工艺扬尘源与工业操作有关,如石料的切割破碎,其排放特性和材料的性质有关。开放扬尘源,是指由风力或机械力作用在开放区域物质表面导致颗粒物无组织排放的污染源。开放源包括:建筑及道路的施工和拆除、材料处置(倾倒、运输、转移、堆放)、铺装及未铺装的道路和停车场、农业耕作,以及农田、开放性区域(裸地、沙化土地、未铺装表面等)、料堆等裸露表面的风蚀。

#### (4) 按照行业分类

按照扬尘排放源的行业属性分类是最常见的分类方法,也是本书中用于描述各类扬尘的主要用语,表 1-1 为行业扬尘分类表。综合分类最大的优点在于可以分清扬尘污染的责任主体,有利于扬尘的监控和控制措施的落实。从表 1-1 可以看出,扬尘来源于自然和人类活动的方方面面。

表 1-2、表 1-3 分别为北京市环科院等(田刚等,2012)统计计算的 2006 年北京市、呼和浩特市扬尘排放量清单(简表)。从两表中可以看出,两个城市的扬尘主要来源于施工扬尘和交通扬尘,均占总扬尘量的 90% 以上,料堆和裸地扬尘比例较小,并且随着城市管理和绿化水平提高,还将逐步减少。从两个城市扬尘排放清单可以看出,交通扬尘和施工扬尘比例差别很大,北京市施工扬尘排放比例最大,呼和浩特市交通扬尘排放比例最大,其主要原因为:由于北京市城市建设飞速发展,施工量巨大,2006 年北京市城区房屋建筑在施面积达到 6 570 万  $\text{m}^2$ ,呼和浩特市在施面积为 282 万  $\text{m}^2$ ,北京市为呼和浩特市的 23 倍,而当年的常住人口相差却不到 10 倍;呼和浩特市由于路面破损、道路两侧裸土风蚀水蚀等导致路面尘负荷较高,北京市城市管理较规范,路面质量及保洁较好,道路路面清洁。从总体数据上看,呼和浩特市路面尘负荷为北京市的 3~8 倍,但呼和浩特市道路车流量远低于北京市同等级道路,因此呼和浩特市道路扬尘排放量与北京市相当,但因扬尘排放总量较小而导致其比例较高。

可见,扬尘排放和城市的生产模式、管理水平、自然条件等因素紧密相关。

### 1.1.3 扬尘基本特点

#### (1) 扬尘的成分和形态

尽管扬尘来源复杂,但是其化学组成却较为明确和简单。不管是因开放性表面破损而产生的扬尘,还是表面上原有的松散颗粒物产生的扬尘,以及来源于干沉降的次级扬尘,其化学组成与其被扬起前不会有明显的区别。在一个很大区域或一个国家范围内,扬尘主要由土壤尘和地壳物质组成。然而,扬尘可以来自于堆积的开放料堆或沉积在道路、地面上的颗粒状物质,如铺装道路的扬尘中既包括地壳物质,也包括轮胎的破损颗粒。

空气中的颗粒物包括无机粒子、金属化合物、元素碳、有机物以及地壳化合物,颗粒物可以呈液态,也可以呈固态,一些粒子也能以固体为核心,周围形成一层

表 1-1 扬尘源行业分类

| 序号 | 扬尘分类 |                | 扬尘产生的主要环节  |
|----|------|----------------|--|
| 1  | 施工扬尘 | 拆除工程           | 墙体破碎、建筑物推倒、物料运送与装卸、拆除物堆放                                 |
|    |      | 建筑工程           | 土方挖转运、物料运送与装卸、裸露地面、易扬尘物料堆放、材料切割、打孔、剃凿、现场清理、垃圾转运、混凝及沙石灰拌料 |
|    |      | 市政工程           | 土方挖转填、物料运送与装卸、裸露地面、易扬尘物料堆放、现场拌料、道路铺设、道路刨洗、管道铺设           |
|    |      | 园林绿化           | 土地平整、筛土、物料运送与装卸、裸露地面                                     |
|    |      | 其他有关工程         | 混凝土搅拌站、河道整治、隧道开挖   |
| 2  | 道路扬尘 | 铺装道路           | 行车扬起路面浮尘, 轮胎与路面摩擦、车辆制动系统、自然扬尘                            |
|    |      | 未铺装道路          | 行车扬起路基粉尘, 轮胎与路面摩擦、车辆制动系统、自然扬尘                            |
| 3  | 裸露面  | 裸露地面           | 因风蚀、人为等原因表面破坏后风力扬起的粉尘                                    |
|    |      | 料堆             | 因风蚀、人为等原因表面破坏后风力扬起的粉尘                                    |
|    |      | 其他裸露面          | 屋顶、广场、植物叶面等开放表面的次级扬尘                                     |
| 4  | 农业   | 农业耕作           | 耕地、耙地、播种、收割、物料运送等操作尘                                     |
|    |      | 撂荒地            | 因风蚀、人为等原因表面破坏后, 风力扬起的粉尘, 次级扬尘                            |
| 5  | 矿产业  | 砂石开采           | 砂石挖掘、装卸, 运输等操作尘, 裸露砂石坑、料堆等风蚀尘                            |
|    |      | 其他矿            | 爆破、挖掘、装卸、运输等操作尘, 裸露矿体、料堆等风蚀尘                             |
| 6  | 其他   | 谷物加工、建材加工、生物碎片 |  |

表 1-2 2006 年北京市扬尘排放清单 (简表)

| 污染源类型 | 排放量/(t/a) |                  |                   | 排放比例/% |                  |                   |
|-------|-----------|------------------|-------------------|--------|------------------|-------------------|
|       | TSP       | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | TSP    | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> |
| 交通扬尘  | 136 000   | 26 000           | 6 400             | 57.34  | 34.93            | 38.16             |
| 施工扬尘  | 97 000    | 47 549           | 10 117            | 40.89  | 63.88            | 60.32             |
| 料堆扬尘  | 3 679     | 767              | 237               | 1.55   | 1.03             | 1.41              |
| 裸地扬尘  | 516       | 119              | 17                | 0.22   | 0.16             | 0.10              |
| 合计    | 237 195   | 74 435           | 16 771            | 100.00 | 100.00           | 100.00            |

表 1-3 2006 年呼和浩特市扬尘排放清单 (简表)

| 污染源类型 | 排放量/(t/a) |                  |                   | 排放比例/% |                  |                   |
|-------|-----------|------------------|-------------------|--------|------------------|-------------------|
|       | TSP       | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> | TSP    | PM <sub>10</sub> | PM <sub>2.5</sub> |
| 交通扬尘  | 115 000   | 22 000           | 5 400             | 91.50  | 86.28            | 87.31             |
| 施工扬尘  | 4 793     | 2 350            | 499               | 3.81   | 9.22             | 8.07              |
| 料堆扬尘  | 5 305     | 1 012            | 267               | 4.22   | 3.97             | 4.32              |
| 裸地扬尘  | 591       | 136              | 19                | 0.47   | 0.53             | 0.31              |
| 合计    | 125 689   | 25 498           | 6 185             | 100.00 | 100.00           | 100.00            |

液膜。扬尘为固态，在施工扬尘、矿业扬尘、裸露地面风蚀尘等扬尘中地壳物质含量占有绝对优势的比重，而交通扬尘、农田风蚀尘中，虽然也是以地壳物质为主，但情况往往更为复杂一些。

### (2) 扬尘的基本危害

扬尘可以导致环境空气中颗粒物浓度的增加，特别在扬尘源附近，低空排放的扬尘会造成局地环境颗粒物浓度大幅度上升。扬尘可以随着空气流动进入人类活动的房间后沉积或通过静电吸附在窗台、桌面、地面上，通过干湿沉降降落在汽车、室外广场，可以污染户外活动人员皮鞋和衣领的清洁，沉降到植物叶面的扬尘颗粒物可以阻碍植物的生长，较小粒径的扬尘颗粒物可以通过呼吸进入人体而影响人体健康。

研究表明，在同样环境质量浓度条件下，空气中的颗粒物直径越小，对人体健康的危害则越大，扬尘（不包括次级扬尘）与汽车尾气、二次粒子等其他粒子直径较小的颗粒物比较，平均直径要大得多，因此在相同质量浓度条件下扬尘对人体的危害性也相对较小。

### (3) 扬尘的排放和扩散

扬尘排在空间、时间、强度上有很大的不确定性，往往呈多点、分散的无规则排放，现场监测的工作量大、难度高。因此控制扬尘最大的难点主要是难以准确地核算排放量，以及难以准确地把握其排放和扩散规律。以上两点，特别是扬尘排放量核算方法和公式一直是扬尘研究的重点、难点领域。除沙尘暴外，初级扬尘的扩散距离往往不超过几十千米，大气半衰期为几分钟到几小时，因此扬尘不容易但不是不可能产生城市之间的传输，主要影响的是本地的空气环境。

### (4) 扬尘的控制和监管

尽管扬尘产生的环节较多，涉及的领域较广，但是其控制技术却较为简单，无非是润湿（洒水）、清扫、遮盖、阻挡等简单的工程手段。但是，由于其具有排放、扩散复杂的特点，因此监管却非常困难。扬尘控制监管最大的困难是，现场监测成本太高、难以量化地评估其排放情况和控制效果。

## 1.1.4 扬尘对大气环境质量的影响

人为源和大风天气下天然源的扬尘排放强度往往较大，属于低空排放，会明显地升高污染源附近空气监测子站的颗粒物监测浓度数据，并较大地影响城市空气环境考核指标。美国 70 多个  $PM_{10}$  未达到国家环境空气质量标准（NAAQS）的区域多数集中在西部，扬尘排放对环境颗粒物具有明显分担率（WGA, 2004）。根据美国环境保护局（USEPA, 2001）编制的《1990—1999 年全美空气污染趋势报告》的结论（表 1-4），美国 1990—1999 年（ $PM_{2.5}$  为 1998 年的数据）期间：①  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  排放总量分别约下降了 15%、8%；② 扬尘对  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  排放总量的贡献率分别为 62%~69%、41%~45%（不含农业和畜牧业扬尘，笔者注），贡献率随时间变化无明显规律，削减率与排放总量基本同步；③  $PM_{2.5}$  排放总量与  $PM_{10}$  排放总量的比值基本不变，约为 27%。

表 1-4 1990—1999 年美国颗粒物初级污染源排放清单

|  | 1990 年 | 1992 年 | 1994 年 | 1996 年 | 1998 年 | 1999 年 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PM <sub>10</sub> 排放总量/万 t                  | 2 529  | 2 472  | 2 608  | 2 239  | 2 361  | 2 148  |
| 扬尘 PM <sub>10</sub> 贡献率/%                  | 65     | 69     | 69     | 64     | 67     | 62     |
| PM <sub>2.5</sub> 排放总量/万 t                 | 694    | 664    | 694    | 626    | 640    | —      |
| 扬尘 PM <sub>2.5</sub> 贡献率/%                 | 41     | 44     | 46     | 41     | 45     | —      |
| PM <sub>2.5</sub> 总量/PM <sub>10</sub> 总量/% | 27     | 27     | 27     | 28     | 27     | —      |

这里需要提醒读者的是：①“在颗粒物排放量中的分担率”不等同于“在环境质量浓度里的分担率”，尽管二者有正相关性；②扬尘特别是初级扬尘以粗颗粒为主，并不等同于相对其他颗粒物排放源，扬尘排放的细颗粒就少得多，也不意味着在环境细颗粒中扬尘的分担率很低，因为扬尘的排放总量很大。

冯银厂等（2005）在乌鲁木齐市 5 个采样点分别采集了环境空气中的颗粒物样品，使用化学质量受体模型和二重源技术解析了 PM<sub>10</sub> 来源，结果表明：扬尘（不含建筑水泥尘）对 2002 年乌鲁木齐市环境 PM<sub>10</sub> 质量浓度的分担率为 30%。抚顺市 2002 年城市扬尘非采暖期、采暖期在环境可吸入颗粒物中的分担率分别为 35%、19%（卢广平，2005）。天津市 2000—2002 年城市扬尘非采暖期、采暖期在环境可吸入颗粒物中的分担率分别为 33%、28%（刘彩霞，2006）。张兵等（2008）收集了牡丹江市 2000—2008 年期间的 PM<sub>10</sub>、降尘数据，采用扩散模型进行分析后的结论为，牡丹江市区空气 PM<sub>10</sub> 中，城市扬尘所占比例为 28%。韩博等（2009）于 2005 年采集了无锡市区 PM<sub>10</sub> 源和受体样品，使用化学质量受体模型和二重源解析技术对无锡市 PM<sub>10</sub> 来源进行了解析，结果表明：城市扬尘是无锡市环境空气中 PM<sub>10</sub> 的主要来源，其分担率约为 51%。张文婷等（2010）对贵阳施工扬尘的研究结果为，2002 年贵阳城区建筑扬尘的 PM<sub>10</sub> 排放量占城区无组织扬尘排放的 28%，建筑扬尘对整个城区大气年均 PM<sub>10</sub> 浓度的贡献率接近 12%。有研究认为（Huang 等，2010），北京市工业无组织、道路、施工、裸地扬尘等合计排放的 PM<sub>10</sub> 约占全市排放总量的 55%，通过对北京市 2002 年 11 月的气象、环境等数据进行模拟计算后认为，上述扬尘对当月大气环境 PM<sub>10</sub> 质量浓度的贡献率约 45%（含外地污染源），约占本地污染源贡献率的 62%。

国内研究者（Pusheng 等，2006；Xiaohui 等，2007）所进行的一个研究以我国北方 6 个城市为试点，将沉积在窗台、平顶楼面上的灰尘作为城市复合尘源，并定义其为“再悬浮尘”（resuspended dust），结合土壤尘、水泥尘、燃煤飞灰（取自除尘设备）等单一尘源，分别取样（取样时间为 2000—2002 年）后利用再悬浮装置分离 PM<sub>10</sub>，对照取自不同季节环境空气中的颗粒物样品，利用化学物质平衡模型法研究了各尘源对城市环境空气颗粒物的贡献率后指出，再悬浮尘（并未包括所有扬尘，笔者注）是上述 6 个城市环境 PM<sub>10</sub> 的首要污染源，具体结果见表 1-5。从表 1-5 中可以看到，除了燃煤飞灰是乌鲁木齐、济南冬季环境 PM<sub>10</sub> 的首要污染源外，其他 4 个城市各个季节、6 个城市全年平均的再悬浮尘均是城市环境 PM<sub>10</sub> 的首要污染源，6 个城市全年的平均贡献率为 37%。

根据笔者的理解，上述被定义为再悬浮尘的沉积灰尘实际上是以干沉降为主的环

境降尘，其最初来源应该包括所有可以实现干沉降的城市环境空气颗粒物的污染源，当然主要来自于从城市道路、城市施工活动、城市裸地及其他暴露等污染源，因风或人为活动产生的扬尘，可以间接地代表城市扬尘（但不是全部扬尘）。需要提醒的是，此研究中所定义的“再悬浮尘”与本书中前面所述的“次级扬尘”是两个不同的概念。

表 1-5 北方 6 个城市环境  $PM_{10}$  的 CMD 源分析结果 单位:%

|    | 乌鲁木齐            |                  | 银川 |     | 太原 |     | 安阳 |     | 天津 |     | 济南 |     |
|----|-----------------|------------------|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|
|    | RD <sup>a</sup> | CFA <sup>a</sup> | RD | CFA | RD | CFA | RD | CFA | RD | CFA | RD | CFA |
| 年均 | 30              | 28               | 59 | 23  | 32 | 18  | 37 | 18  | 34 | 16  | 30 | 19  |
| 冬季 | 11              | 59               | 49 | 28  | 30 | 20  | 36 | 28  | 33 | 25  | 30 | 41  |
| 春季 | 48              | 13               | 67 | 21  | 35 | 15  | 41 | 12  | 39 | 5   | 54 | 17  |
| 夏秋 | 38              | 15               | 52 | 16  | 23 | 18  | 33 | 5   | 28 | 18  | 40 | 11  |

注：a. RD 为再悬浮尘；CFA 为燃煤飞灰。

胡敏等（2011）总结了 2000 年以来我国近 30 个城市大气可吸入颗粒物源解析研究后认为，土壤风沙尘与道路扬尘是我国城市大气颗粒物最重要的贡献源，在我国北方城市（如北京、天津、沈阳、安阳、太原、济南、乌鲁木齐等）土壤风沙尘与道路扬尘之和可达  $PM_{10}$  的 30%~50%，个别城市（如银川）高达 60% 以上；南方城市情况稍好，如南京、广州、杭州等城市的土壤尘与道路扬尘对城市  $PM_{10}$  质量浓度的分担率为 5%~34%；建筑水泥尘在不同城市之间的变化幅度很大，在北方城市如天津、沈阳、济南、太原等，通常占  $PM_{10}$  质量浓度的 3%~13%，个别南方城市如广州、杭州等对  $PM_{10}$  的贡献可达 22%；从季节来看，春季是扬尘源比例最高的季节。

北京市环科院等（田刚等，2012）调研统计了 15 个城市的扬尘排放情况，在各城市空气环境  $PM_{10}$  总量中，扬尘的分担率如图 1-1 所示。从图 1-1 中可以看出：在 15 个被调研的城市中，扬尘源对城市大气  $PM_{10}$  的贡献率，银川最高为 65%，广州最低为 21%。北方和南方城市扬尘贡献率存在较大差异，扬尘对北方城市颗粒物的分担率相对较高，为 28%~65%，而南方城市相对较低，为 21%~48%。这主要是由于南方与北方气候和自然条件的差异，干燥的北方城市比湿润的南方城市更易扬尘，因此扬尘污染更加突出。北方扬尘污染较重的城市主要分布在甘肃、北京、陕西、内蒙古、河北、天津等地。值得指出的是，因时间、资料来源、扬尘源定义等因素，图 1-1 所示数据可能与正式公布和其他公开发表的资料有一定的误差。

### 1.1.5 扬尘对大气细粒子的影响

杨绍晋等（1987）于 1983 年 12 月、1984 年 6 月在京津地区由北向南选择了 10 个典型实验点分别进行了为期 10 天的连续采样，采样仪器为安德逊分级（八级撞击式）采样器，然后利用中子活化分析及质子激发 X 荧光分析测定了 145 个样品中的 45 种元素含量，研究了不同粒径颗粒物中元素浓度的分布规律。该研究将 2.1  $\mu m$  定义为粗细颗粒物的分界线，表 1-6 为不同检测地点大气中可吸入颗粒物中粗、细粒子的比例情况。从表 1-6 中可以看出，对于实验所涉及的同—个区域来讲，冬季大气可吸入颗粒

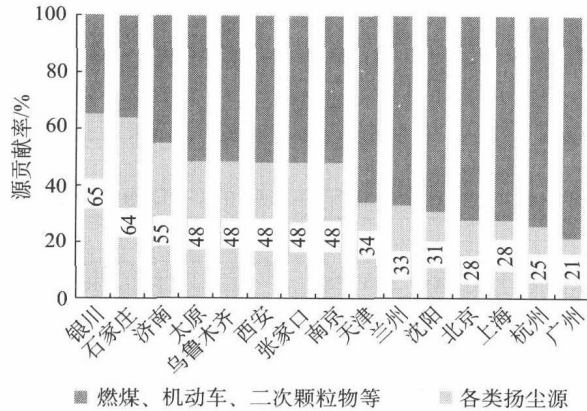


图 1-1 我国部分城市颗粒物源解析结果

物中直径小于  $2.1 \mu\text{m}$  细粒子的比例均大于夏季, 这说明由于冬季燃煤量增加, 高温燃烧排放的细颗粒及二次污染物大幅度增加, 而对人体健康危害较大的各种毒物也主要富集在细颗粒上, 而夏季风沙、扬尘等对可吸入颗粒物的贡献更加突出。该研究还将不同元素浓度在粗、细颗粒中的分布特征分成三种类型: ①主要富集在大于  $2.1 \mu\text{m}$  的粗颗粒中的有 Al、Mg、Ba、Ca、Fe 等, 这类元素多来自于风沙和土壤的自然来源, 其化学性质系非挥发性, 粒径分布特征很相似, 元素浓度随粒径减小而急剧下降, 在粒径大于  $2.1 \mu\text{m}$  的颗粒中, 一般占 70%~90%; ②主要富集在粒径小于  $2.1 \mu\text{m}$  的细颗粒中的有 As、Br、Cu、Zn、Pb 等, 这类元素主要来自各种燃料的人为来源, 其中大部分被认为对人体健康可能是有害的, 其浓度随粒径减小而迅速增大, 在粒径小于  $2.1 \mu\text{m}$  的颗粒中占 70%~90%; ③在粗、细颗粒中分布相似的主要有 K、Cs、Mn、Rb, 这类元素的粒径分布特征是双峰型, 说明其有两种主要来源。综观全地区, 北京、天津和廊坊大气颗粒物中元素浓度的粒径分布趋势大致相似, 但在塘沽沿海地区, 元素 K、Na、Rb、Cs 的浓度粒径分布与城区相比有明显的差别。

表 1-6 可吸入颗粒物中粗细粒子比例

单位: %

| 地点 | 粗颗粒 ( $2.1 \sim 11 \mu\text{m}$ ) |      | 细颗粒 ( $< 2.1 \mu\text{m}$ ) |      |
|----|-----------------------------------|------|-----------------------------|------|
|    | 冬季                                | 夏季   | 冬季                          | 夏季   |
| 北京 | 51.6                              | 58.7 | 48.4                        | 41.3 |
| 天津 | 49.1                              | 56.8 | 50.9                        | 43.2 |
| 塘沽 | 38.3                              | 56.4 | 61.7                        | 43.6 |
| 廊坊 | —                                 | 61.5 | —                           | 38.5 |

初级扬尘难以形成  $\text{PM}_{2.5}$  并不意味着扬尘在城市大气的  $\text{PM}_{2.5}$  中所占比例一定就会很小。根据朱先磊等 (2005) 利用多环芳烃 (PAHs) 和部分无机元素及离子作为示踪剂, 对北京市大气细颗粒物的来源进行研究后认为, 在七类主要污染源 (扬尘、建筑尘、燃煤、机动车、有机物、二次硫酸及硝酸盐、生物质燃烧) 中, 扬尘对北京大气中  $\text{PM}_{2.5}$  污染贡献率最高为 21.4% (含建筑尘), 其次是燃煤为 16.4%。如果去掉



27.5%的未知源,在已知源中,扬尘对北京城市大气 $PM_{2.5}$ 的污染贡献率达到30%;该研究采用机动车PAHs源成分谱进行拟合,解析出机动车直接排放对 $PM_{2.5}$ 的年贡献率为5.6%,远低于利用机动车排放/交通尘成分谱获得的15.5%的解析结果(唐孝炎,2002),说明机动车/扬尘排放中道路扬尘占有较大比重。

陈灿云等(2006)于2004年夏季对广州市四个不同功能区进行了一个月的大气 $PM_{2.5}$ 监测并分析了其化学成分,通过化学质量平衡模型研究表明,地面扬尘对广州大气 $PM_{2.5}$ 的贡献率为15%~24%。李伟芳等(2010)于2006年8—12月,在天津市中心城区采集细粒子并测定其中水溶性无机离子和元素的质量浓度,应用因子分析与多元线性回归技术解析 $PM_{2.5}$ 来源的结果表明,土壤尘和建筑粉尘对天津市空气中 $PM_{2.5}$ 的贡献率合计为20.9%。宋宇等(2002)对北京市气态细粒子的来源分析研究表明,在连续降雪的天气里扬尘对大气细粒子的贡献率较小,但在春季等干燥天气里,扬尘对大气细粒子贡献率较大。

美国环境保护局(USEPA,2004)对《1990—1999年全美空气污染趋势报告》(USEPA,2001)的总结表明(表1-7),1999年美国不同污染源初级 $PM_{2.5}$ 的总排放量为629万t,其中扬尘排放的 $PM_{2.5}$ 数量占到50%以上,为330万t,也说明了扬尘是环境空气 $PM_{2.5}$ 不可忽视的重要组成。根据Chan等(1999)在澳大利亚的布里斯班进行的细粒子研究,大气环境细粒子的来源中,扬尘约占25%。Hien等(2001)对胡志明市大气环境颗粒物来源的有关研究结果见表1-8,从中可以看出扬尘是当年该城市大气细粒子的重要来源(取样时间为1996—1998年)。

总之,尽管扬尘产生的颗粒物以粗颗粒为主,但是粗颗粒沉降性能较好,能够较快地在自然环境中清除,而扬尘产生的细颗粒可以在空间停留更长的时间,加之扬尘排放总量较大、空气干燥等因素,扬尘可能会在城市大气细颗粒中表现出较高的贡献率,特别是在干旱地区。如果考虑到次级扬尘产生的 $PM_{2.5}$ ,扬尘在城市大气细颗粒中所占的比率将会更高。

表 1-7 1999 年美国不同污染源初级  $PM_{2.5}$  排放量

| 污染源     | 年排放量/万 t | 主要成分         | 说明                                      |
|---------|----------|--------------|---|
| 道路机动车排放 | 21       | 有机物,元素碳      | 柴油车 72%,汽油车 28%                         |
| 非道路运输排放 | 37       | 有机物,元素碳      | 非道路车辆 57%,汽油车 20%,船 10%,铁路 6%           |
| 化石燃料燃烧  | 36       | 地壳元素,微量金属    | 固定源(如发电厂) 33%,工业 39%,商业和团体 25%,居民 3%    |
| 工业生产过程  | 35       | 地壳物质,有机物,金属等 | 冶炼 29%,矿石开采与加工 27%,化工 11%,其他 33%        |
| 生物质燃烧   | 120      | 有机物,元素碳      | 控制燃烧 47%,居民木材 28%,农业 7%,野火 18%          |
| 废物处理    | 48       | 有机物,微量金属     | 露天焚烧 91%,其他 9%                          |
| 扬尘      | 330      | 地壳物质         | 铺装道路 19%,非铺装道路 40%,施工 15%,农业 7%,畜牧业 18% |
| 风吹尘     | —        | 地壳物质         | 裸露地面等                                   |
| 其他      | 2        | 有机物,元素碳      | 火灾等                                     |
| 总计      | 629      |              |   |