

浅析雾霾-探讨我国城市空气污染的来源和解决办法

清华大学物理系 韩征和

e-mail z.han@tsinghua.edu.cn

1) 背景,

1-1, 什么是雾霾

1-2, 当前主流观点

1-3, 北京空气污染的特点



2) 道路扬尘问题

2-1, 道路能扬起多少尘

2-2, 空气污染物和尘土的化学成分对比

2-3, 道路扬尘对身体健康的影响

2-4, 正确的减少道路扬尘的方法



3) 小结

1-1, 什么是雾霾

-正名：外行、万金油、估算法

雾 不见得与空气污染有关

霾

甲 骨 文		金 文	篆 文
		缺	
甲 2840	前 7·11	暂缺	说文解字

造字本义：阴风怒吼、暴雨瓢泼，仿佛天上掉下无数叫声恐怖的野兽霾，風雨土也。从雨貍聲。《詩》曰：“終風且霾。”

气象学上把大气中悬浮的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体，使空气混浊，水平能见度降低到**10km**以下的一种天气现象称为灰霾天气。
北京市环境保护监测中心

雾霾：一种天气现象（光学相关？ 兰天，晚霞）

Haze??

美国国家环境保护局 - 中文 (简体版)

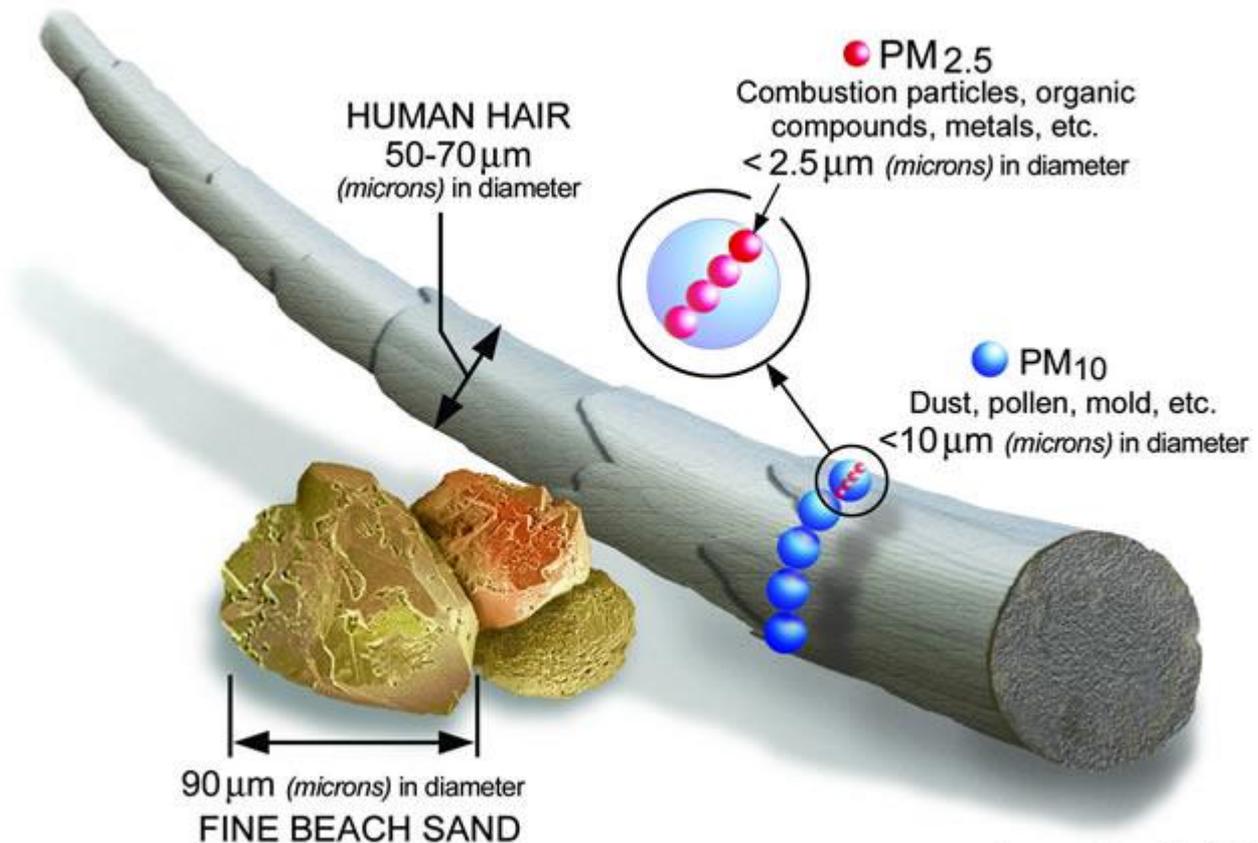


Image courtesy of the U.S. EPA

Haze is traditionally an atmospheric phenomenon where dust, smoke and other dry particles obscure the clarity of the sky.

When weather conditions block the dispersal of smoke and other pollutants they concentrate and form a usually low-hanging shroud that impairs visibility and may become a respiratory health threat.

Industrial pollution can result in dense haze, which is known as smog

Smog 有可能比haze更适用于中国目前遇到的情况

雾霾：一种天气现象
要讲空气污染，还要另外的名词

可吸入颗粒 Inhalable particles , **MP10, MP2.5**

可吸入颗粒物 (PM10) , 细颗粒物 (PM2.5)

一般而言, 粒径2.5微米至10微米的粗颗粒物主要来自道路扬尘等; 2.5微米以下的细颗粒物 (PM2.5) 则主要来自化石燃料的燃烧 (如机动车尾气、燃煤)、挥发性有机物等。 -北京市环境保护监测中心

Coarse particles (PM10)

Inhalable particles less than 10 micrometers (μm) in diameter used as a nominal surrogate for particles between 2.5 and 10 μm in diameter; **found near roadways and dusty industries**

Fine particles (PM2.5)

Inhalable particles less than 2.5 μm in diameter; generally found in smoke and haze, emitted from natural sources like forest fires and industrial combustion sources, or formed when gases react in the air.

-USA EPA

表 1 空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值

空气质量分指数 (IAQI)	污染物项目浓度限值									
	二氧化硫 (SO ₂) 24 小时平均/ (μg/m ³)	二氧化硫 (SO ₂) 1 小时平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾	二氧化氮 (NO ₂) 24 小时平均/ (μg/m ³)	二氧化氮 (NO ₂) 1 小时平均/ (μg/m ³) ⁽¹⁾	颗粒物 (粒径小于等于 10μm) 24 小时平均/ (μg/m ³)	一氧化碳 (CO) 24 小时平均/ (mg/m ³)	一氧化碳 (CO) 1 小时平均/ (mg/m ³) ⁽¹⁾	臭氧 (O ₃) 1 小时平均/ (μg/m ³)	臭氧 (O ₃) 8 小时滑动平均/ (μg/m ³)	颗粒物 (粒径小于等于 2.5μm) 24 小时平均/ (μg/m ³)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	50	150	40	100	50	2	5	160	100	35
100	150	500	80	200	150	4	10	200	160	75
150	475	650	180	700	250	14	35	300	215	115
200	800	800	280	1 200	350	24	60	400	265	150
300	1 600	⁽²⁾	565	2 340	420	36	90	800	800	250
400	2 100	⁽²⁾	750	3 090	500	48	120	1 000	⁽³⁾	350
500	2 620	⁽²⁾	940	3 840	600	60	150	1 200	⁽³⁾	500
	⁽¹⁾ 二氧化硫 (SO ₂)、二氧化氮 (NO ₂) 和一氧化碳 (CO) 的 1 小时平均浓度限值仅用于实时报, 在日报中需使用相应污染物的 24 小时平均浓度限值。 ⁽²⁾ 二氧化硫 (SO ₂) 1 小时平均浓度值高于 800 μg/m ³ 的, 不再进行其空气质量分指数计算, 二氧化硫 (SO ₂)									

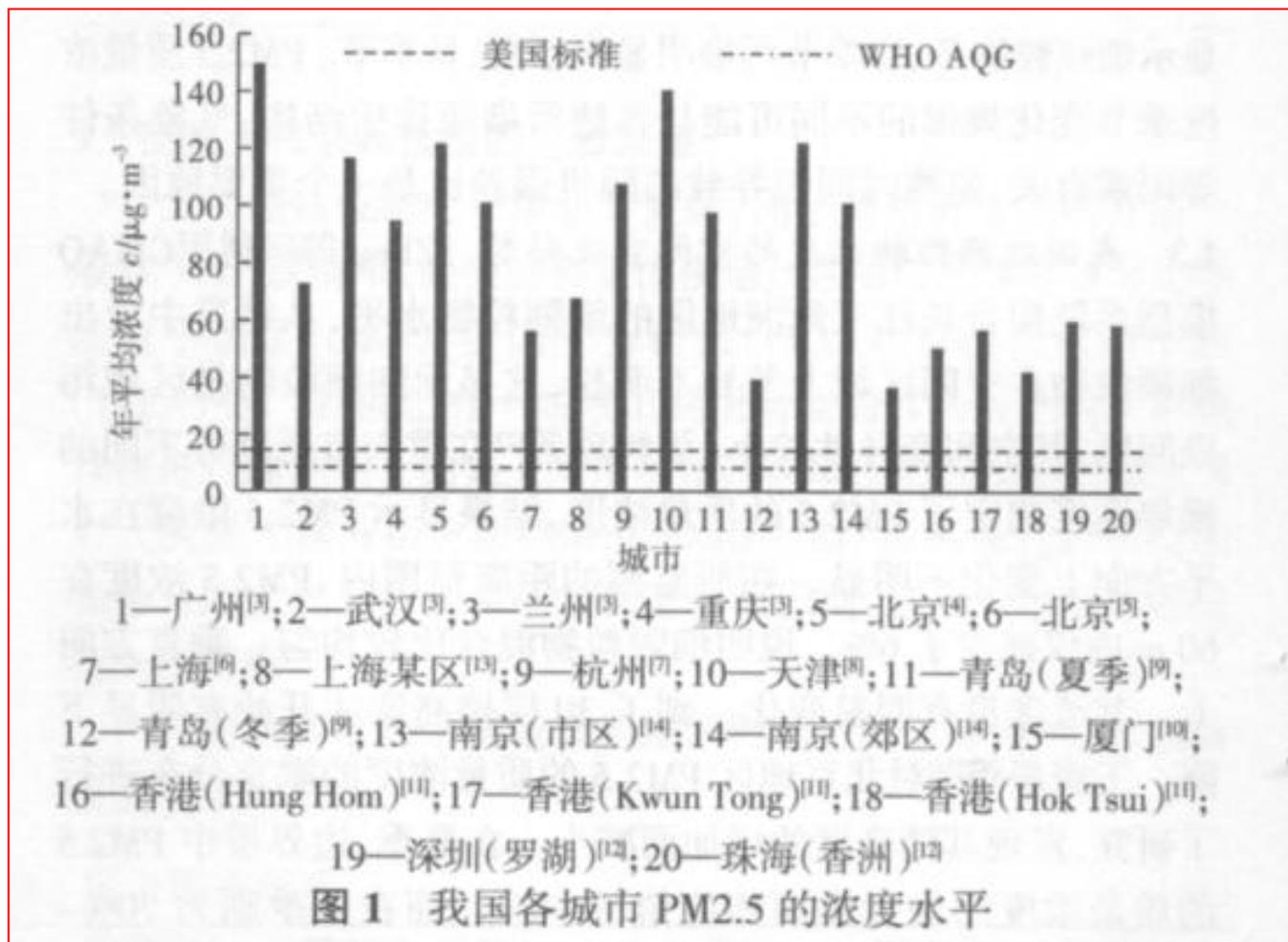
原来叫 空气污染指数

【综述】

我国大气细颗粒物水平、成分、来源及污染特征

杨春雪, 阚海东, 陈仁杰

复旦大学公共卫生学院, 教育部公共卫生安全重点实验室, 复旦大学全球环境变化研究所, 上海 200032



1-2, 当前主流观点

14年3月8日，全国人大记者会，邀请环境保护部副部长吴晓青等回答中外记者的提问。

[新华社记者]周部长说，今年我们京津冀的雾霾情况要比去年有所好转，但是我们也注意到网民纷纷吐槽，百姓没有感受到。那么雾霾的成因究竟是什么？我们是不是要等到中科院投资5个亿的烟雾箱子建成了、运行了我们才能知道。

吴晓青 我们认为，主要有以下几点：第一，污染物排放量大是根本原因。**燃煤、工业、机动车、建筑和道路扬尘是主要的排放源**。第二，不利于扩散的气象条件是直接原因。第三，区域污染和本地污染的叠加是重要的因素。

王跃思：霾从何来？北京的车天津的油河北的煤

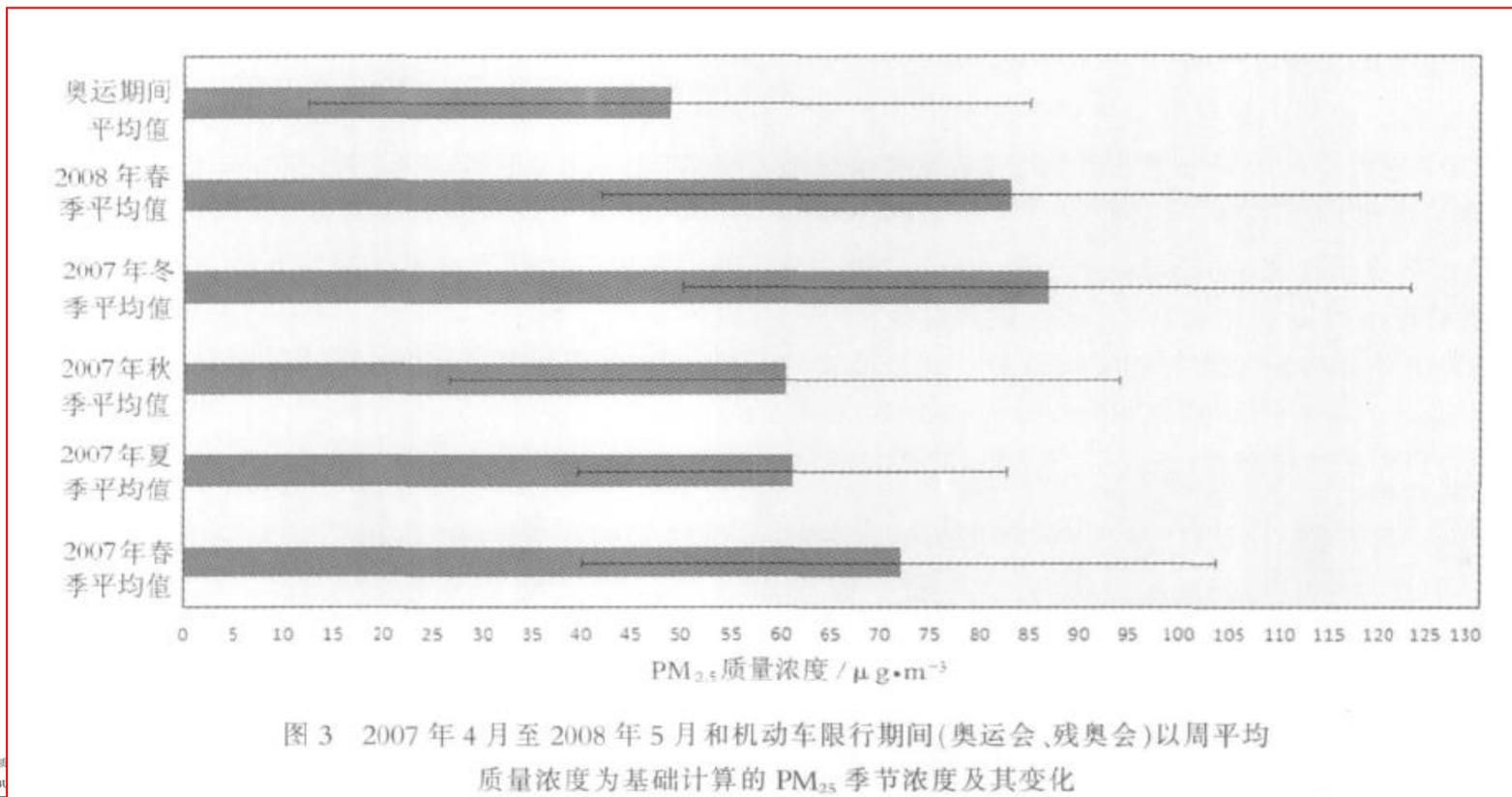
车辆减排要限行500
辆的三分之一（500
亿元）

燃煤、工业、机动车问题，都是**费钱费时**的事，相关方都很高兴，但只有老百姓担心效果如何！

1-3, 北京空气污染的特点

取暖燃煤和沙尘暴的贡献比例降低。

1) 季节性已不像过去那么明显:



北京市大气可吸入颗粒物的化学成分和来源

于扬^{1,2,3}, 岑况², NORRA Stefan^{3,4}, SCHLEICHER Nina³, 陈媛²
 YU Yang^{1,2,3}, CEN Kuang², NORRA Stefan^{3,4}, SCHLEICHER Nina³, CHEN Yuan²

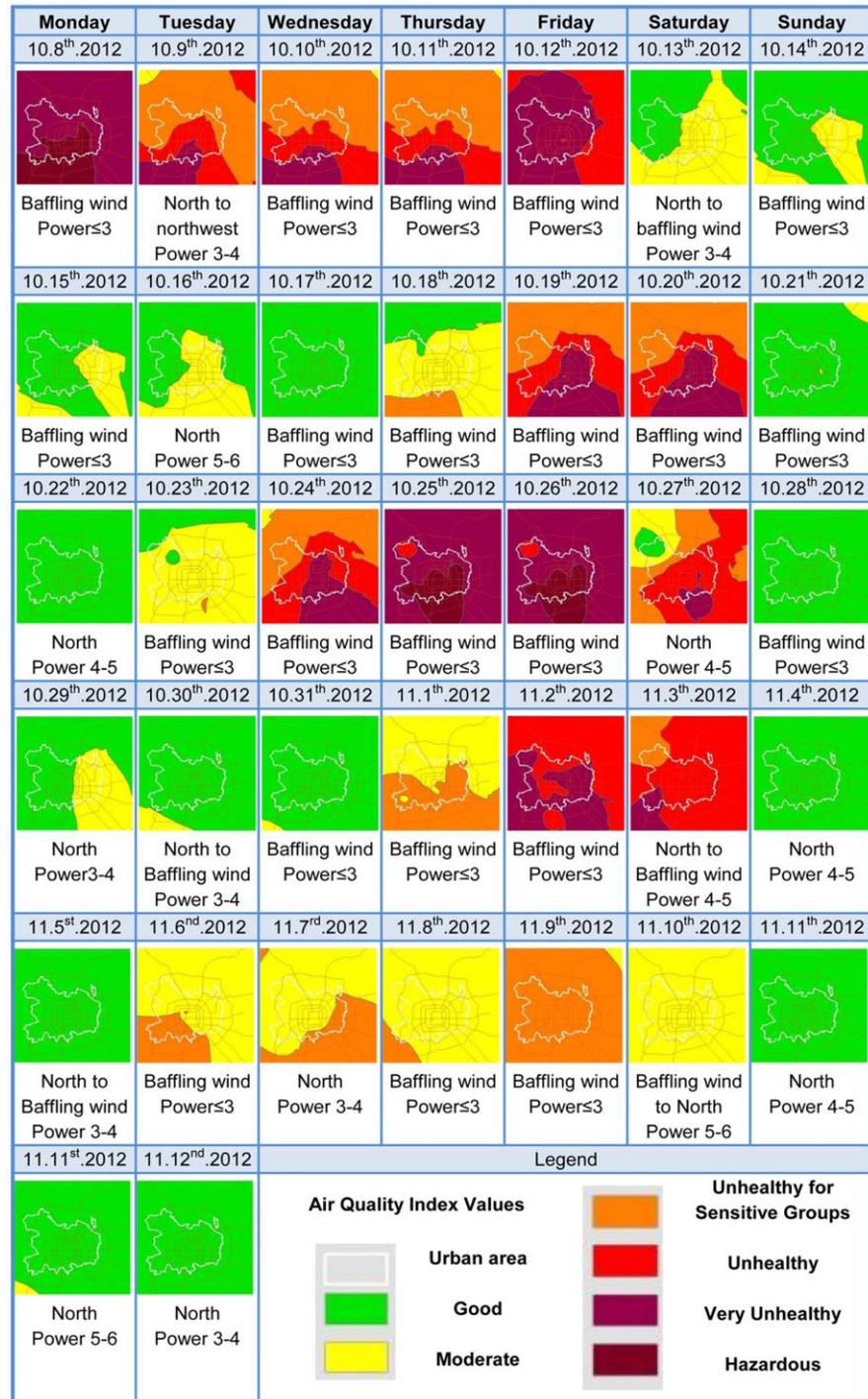
1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学/地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 卡尔斯鲁厄理工学院矿物与地球化学研究所, 德国 76131; 4. 卡尔斯鲁厄理工学院生态地理学研究所, 德国 76128

2) 大部分情况显地方局域性，

2012-10-08到2012-11-18

37天北京空气污染图

周边工业的影响不如有人说的那样大。



3) 汽车排放很严重，但车新、标准不低，国外超大城市并不严重。

监测数据并不太支持工业和车辆排放是今年3月7日北京空气严重污染的主要原因。

万柳(城区环境评价点) PM2.5 2014年3月27日 08:00			
实时浓度 (微克/立方米)	24小时均值 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
347	335	385	六级 严重污染

万柳(城区环境评价点) PM10 2014年3月27日 08:00			
实时浓度 (微克/立方米)	24小时均值 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
421	393	262	五级 重度污染

万柳(城区环境评价点) SO2 2014年3月27日 08:00			
实时浓度 (微克/立方米)	24小时均值 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
29	52	10	一级 优

万柳(城区环境评价点) CO 2014年3月27日 08:00			
实时浓度 (毫克/立方米)	24小时均值 (毫克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
2.3	3	23	一级 优

万柳(城区环境评价点) NO2 2014年3月27日 08:00			
实时浓度 (微克/立方米)	24小时均值 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
151	164	76	二级 良

万柳(城区环境评价点) 2014年3月27日 08:00 O_3			
当前小时浓度 (微克/立方米)	最大小时浓度 (微克/立方米)	空气质量分指数 (IAQI)	级别及类别
2	138	44	一级 优

还剩什么？



弱势群体？

建筑和道路扬尘

2 道路扬尘问题

建筑尘：主要通过道路扬尘

表 4 各城市 PM2.5 污染源贡献率 (%)

城市	方法	煤烟尘	机动车尾气	建筑尘	硫酸盐、硝酸盐	土壤尘	钢铁尘	其他
北京 ^[49]	CMB	16.4	5.6	3.3	9.6	18.1		27
南京 ^[50]	CMB	30.3	2.89	7.95	9.87	37.28	2.57	9.01
厦门 ^[51]	PFA		30.2			11.7		16.2
上海中心 ^[44]	Micro-SXRF	3	30			12	15	30
上海市吴淞工业区	Micro-SXRF	16	12	1		10	27	31
济南非采暖期 ^[45]	CMB	7.5	27.1	15.4	20.9	17.4	7.5	5
济南采暖期	CMB	26.3	15	16.2	15	18	2.5	2

【综述】

我国大气细颗粒物水平、成分、来源及污染特征

杨春雪, 阚海东, 陈仁杰

复旦大学公共卫生学院, 教育部公共卫生安全重点实验室, 复旦大学全球环境变化研究所, 上海 200032

2-1, 道路能扬起多少尘

问题:

1, 严重空气污染时, 每平米上空有多少 (重) 可吸入颗粒?

10^n 克, $n = -6, -3, 1, 3, 6$?

2, 整个北京市上空有多少?

300微克/立方米x1000米=0.3克

300米高: 0.1克

整个北京市上空大约90吨, 根据?

刘鸿志 《环境保护》，2013年15期
环保部副司长

雾霾影响及其近期治理措施分析

北京的空气污染主要是局域性的：六环以内的约1000平方千米的范围，污染空气的高度为300米左右。（空气体积：计算的依据）

当PM2.5的日平均浓度达300微克 / 立方米，北京市PM2.5的日排放重量达90吨，比二级空气质量标准（75微克 / 立方米）**多排放68吨**。

北京PM2.5来源构成，不考虑外地来的污染，机动车排放34%、燃烧煤炭24%、建筑工地的扬尘排放占21%、工业喷涂挥发占21%。

2007年北京道路的总长度为四千多公里，道路总面积为60（150）多平方千米。假设每平方米路面上有1克的尘土，**那么北京市道路上尘土的总重量就是60（150）吨**，

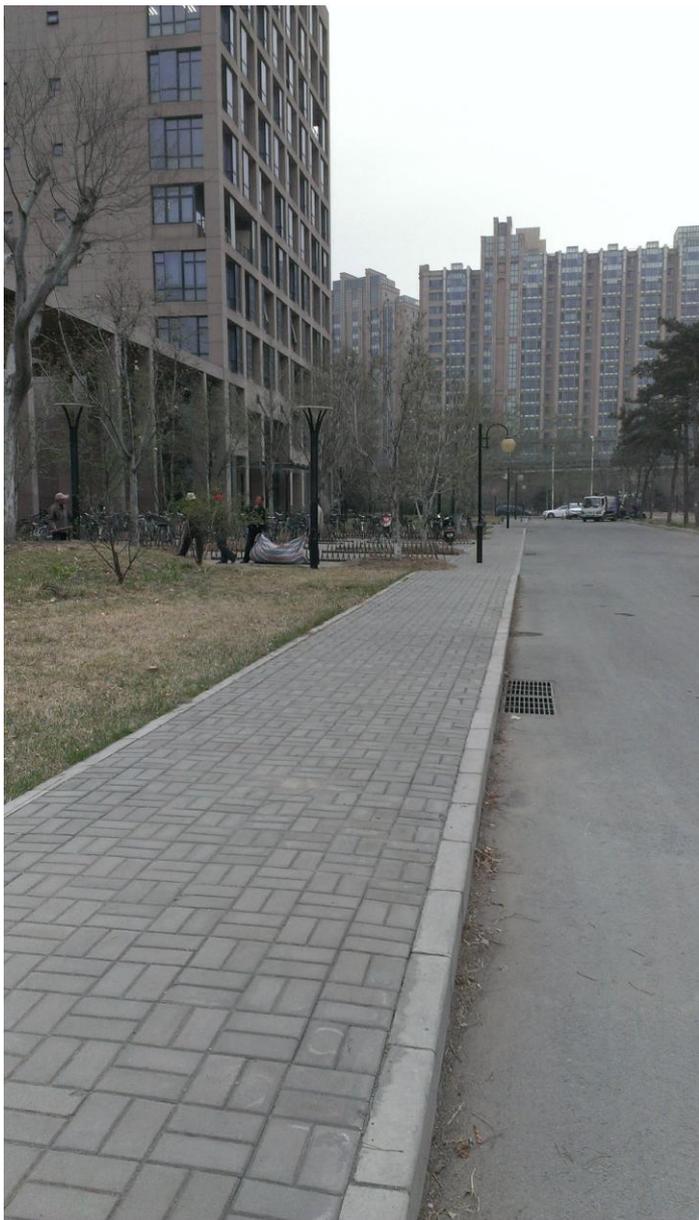
道路扬尘足以造成北京空气严重污染

过去北方也有土，为何空气污染没有现在严重？

北方大面积土地裸露，也没有大问题，土壤颗粒较大，表面有壳层保护。

过去刮大风才起土，并很快就落下了。主要是现在的土细了。

通过车轮的反复碾压和研磨，路面上的土会变成微米级的颗粒被车辆扬到空中。

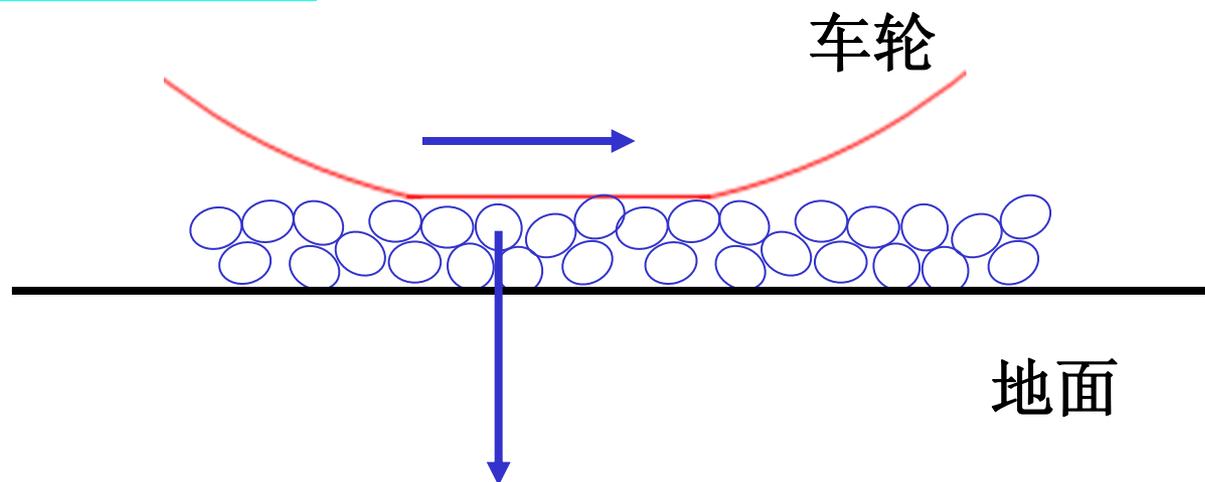


研磨

研具是使工件研磨成形的工具，同时又是研磨剂的载体，硬度应低于工件的硬度，磨料在工件与研具间不断滑动和滚动，形成切削运动。磨料包括氧化铝、氧化铁、碳化硅等。

研磨一般在低压低速条件下进行。粗研的压力不超过 0.3兆帕，精研压力一般采用0.03~0.05兆帕。粗研速度一般为20~120米/分，精研速度一般取10~30米/分。 百度百科

车轮施加的正压力有多大？



车轮向颗粒施加正压力和剪切力，颗粒被破碎和磨削而细化，效率可能很高。

2-2, 空气污染物和尘土的化学成分对比

我国的道路是尘土和垃圾的**集散地**，路面上（**集**）的土（以及垃圾、细菌等）的主要去向是被扬（**散**）到空中。

假如空气中可吸入颗粒主要来源于道路扬尘，颗粒中主要元素是什么？

地球地壳中的化学元素丰度表，质量百分比。

氧O	46.60%
硅Si	27.72%
铝Al	8.13%
铁Fe	5.00%
钙Ca	3.63%
钠Na	2.83%
钾K	2.59%
镁Mg	2.09%

北京西北城区春季 PM_{10} 单颗粒形貌类型及成分特征

李泽熙, 邵龙义, 侯 聪, 王 静, 王建英

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

对春季沙尘天气和非沙尘天气, 矿物颗粒根据单颗粒化学成分可以分为“富 Si”、“富 Ca”、“富 Fe”、“富 S”、“富 Na”、“富 Ti”、“富 Al”、“富 Cl”和“富 Mg”等九大类, 均以“富 Si”为主 “富 Ca”次之, 少量“富 Fe”、“富 S”颗粒, 沙尘暴天气

北京交通环境 PM₁₀ 分布特征及重金属形态分析

钱 枫, 杨仪方, 张慧峰

北京工商大学化学与环境工程学院, 北京 100048

in the different seasons

2.2 颗粒物的化学组成与分布特性

2.2.1 元素浓度分布

采用安德森 (Andersen) 撞击法分级采样器, 分 8 级收集样品, 0 ~ 7 级颗粒物粒径分别为: [9.0 ~ 10.0 μm), [5.8 ~ 9.0 μm), [4.7 ~ 5.8 μm), [3.3 ~ 4.7 μm), [2.1 ~ 3.3 μm), [1.1 ~

2.1 μm), [0.65 ~ 1.1 μm), [0.43 ~ 0.65 μm)。该文以“级”表述各粒径段, 如 0 级表示 [9.0 ~ 10.0 μm) 粒径段的颗粒, 依此类推。将分 8 级采集的 PM₁₀ 样品利用 SEM - EDS 分析, 可得不同粒级 PM₁₀ 中各元素的质量分数, 结果如表 1 所示。

表 1 不同粒径 PM₁₀ 中各元素的平均质量分数

Table 1 Mass distribution of the main components in PM₁₀ with the change of particle sizes

项目	粒径分级							
	0	1	2	3	4	5	6	7
C	40.10	39.47	36.58	32.58	33.54	34.01	40.09	39.20
O	24.72	25.19	23.64	28.74	26.45	28.90	18.80	21.80
Si	10.79	8.63	9.36	8.67	8.87	7.97	7.53	6.95
Al	3.93	2.79	5.35	4.76	3.45	2.73	3.85	3.56
Fe	3.17	5.21	4.87	5.70	2.45	2.21	3.64	1.03
Ca	8.83	6.04	4.76	4.84	4.12	2.70	2.36	1.89
K	1.56	1.27	2.37	1.23	2.67	1.09	0.97	1.41
Mg	0.70	1.58	3.02	2.03	2.23	1.09	1.03	1.15
S	0.18	0.51	0.70	1.34	3.40	3.80	5.80	4.98
Pb	0.70	0.71	0.79	1.25	1.03	1.45	1.69	2.05
Hg	1.50	2.22	1.80	2.45	2.23	2.45		

北京市冬季霾天气可吸入颗粒物的矿物学研究

郑南¹ 吉昂² 王河锦^{1,†} 徐廷婧¹ 李婷¹

1. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871; 2. 中国科学院上海硅酸盐研究所,上海 200050;
†通讯作者, E-mail: hjwang@pku.edu.cn

表 7 霾天气和正常天气 PM₁₀ 样品 XRF 元素定量分析结果

Table 7 The XRF quantitative analysis results of PM₁₀ aerosol samples collected during haze day and normal day

天气状况	样品号	元素含量/($\mu\text{g g}^{-1}$)											
		Al	Si	K	P	S	Cl	Mg	Ca	Fe	Mn	Sr	Nd
霾天气	32	10074	133404	44816	1181	31109	16842	10523	43768	17590	2909	2428	1269
正常天气	33	61906	236146	67534	1302	28648	13102	15198	35173	20184	1631	3497	2169

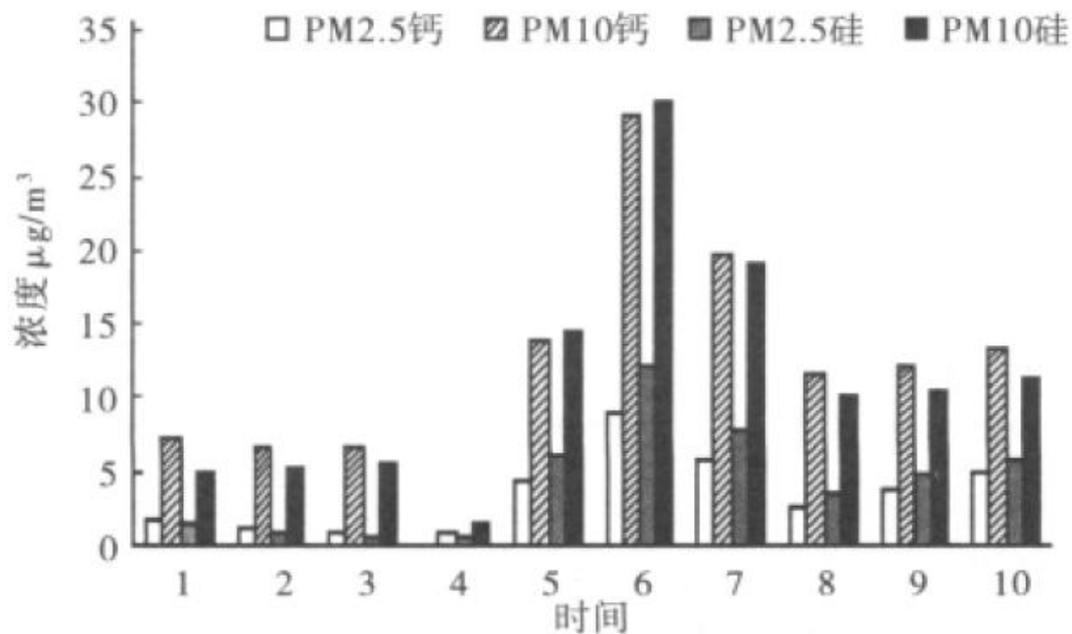
Si占PM10颗粒重量10%以上

【沙尘暴与健康研究专栏】

文章编号:1001-5914(2010)09-0763-04

北京和阿拉善盟沙尘天气 PM10 和 PM2.5 中 化学元素含量变化的研究

王巍^{1,2}, 陶辉², Kim Dae-seon³, 潘小川¹



1—5月19日;2—5月20日;3—5月21日;4—5月22日;5—5月23日;
6—5月24日;7—5月25日;8—5月26日;9—5月27日;10—5月28日

图 1 北京沙尘天气出现前后 PM10 和 PM2.5 中
钙、硅含量变化

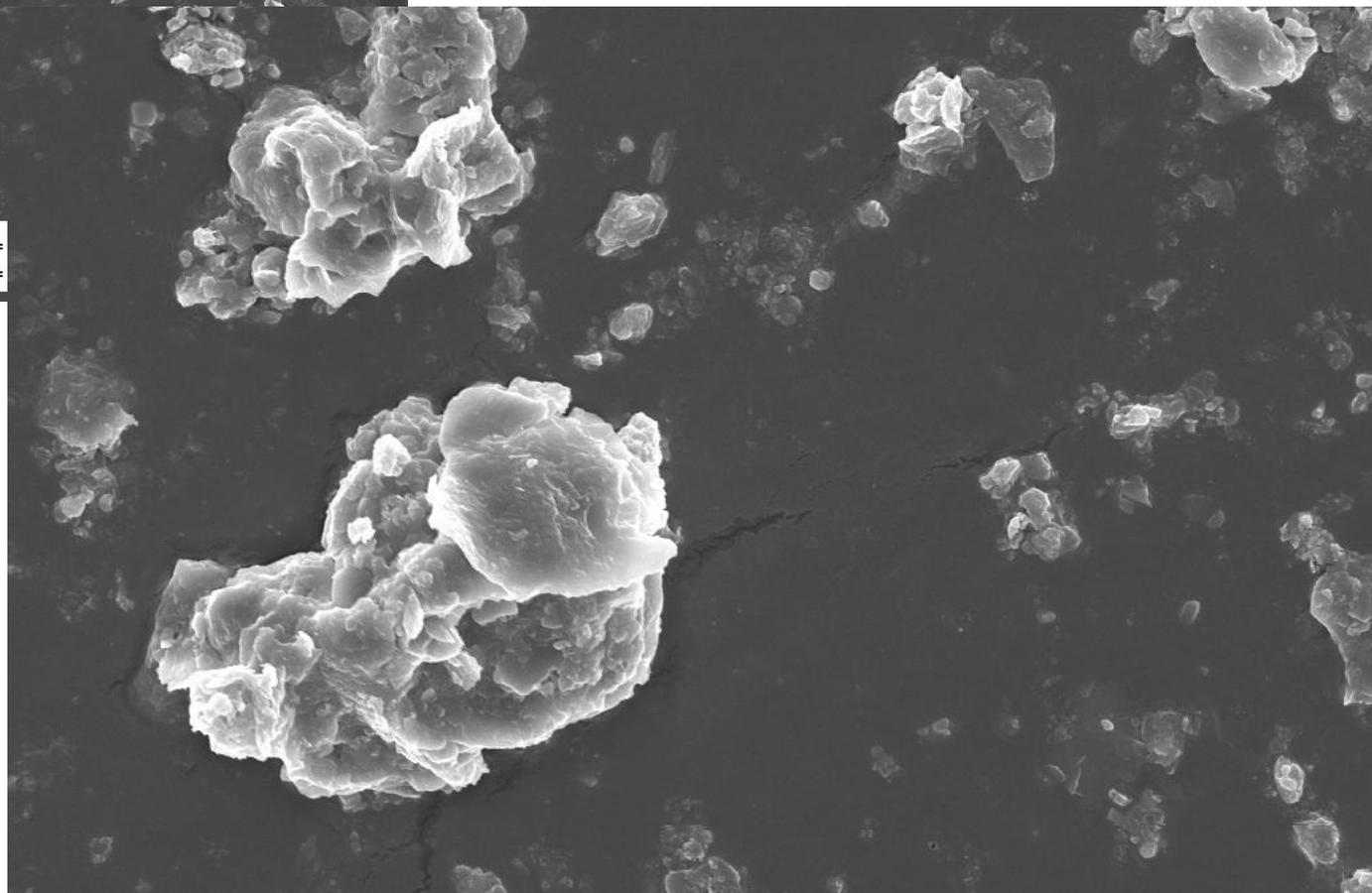
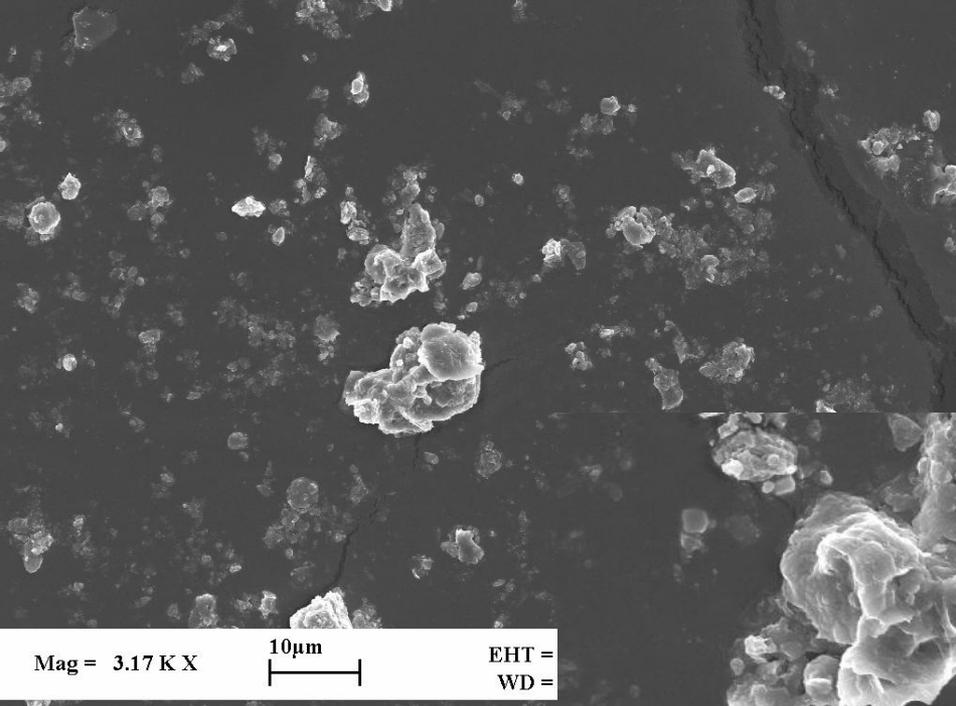
大多数文献没有硅的数据

季节	元素总质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)		元素排序
	日均值	变化范围	
春季	36.98	11.81~ 82.09	Ca, Al, Fe, K, S, Mg, Na, Ti, Zn, P
夏季	10.32	5.43~ 17.20	Ca, S, Fe, K, Al, Na, Mg, Pb, P, Zn
冬季	11.65	6.72~ 20.74	S, Ca, Fe, K, Al, Na, Se, Mg, P, Zn

北京地区空气中 PM_{10} 的元素组分及其变化

王庚辰, 谢 骅, 万小伟, 任丽新
(中国科学院 大气物理研究所, 北京 100029)

清华园内马路中间取的样品



化学符号	大陆上地壳
O	46.60%
Si	27.72%
Al	8.13%
Fe	5.00%
Ca	3.63%
Na	2.83%
K	2.59%

清华园内马路中间取的样品
能谱分析结果

以上数据说明，可吸入颗粒的相当大的部分来自尘土

Element	Weight %
O	45.67
Si	38.02
Al	2.82
Fe	1.49
Cu	0.84
Zn	0.78
K	0.53
Ca	0.5
Mg	0.43

Element	Weight %
O	47.98
Si	15.99
Al	5.85
Fe	4.56
Ca	4.46
K	1.73
Mg	1.35
Cu	0.85
Zn	0.58
Ti	0.37

Element	Weight %
O	37.1
Si	22.46
Al	7.55
Fe	5.89
Ca	3.94
Ti	2.69
Mg	1.58
Na	1.57
Cu	1.23
Zn	0.77
K	0.71

Element	Weight %
O	46.61
Si	17.24
Al	5.95
Fe	3.44
Ca	2.83
Na	1.83
Cu	1.42
K	0.98
Mg	0.8
Zn	0.79
Ti	0.27

2-3, 道路扬尘对身体健康的影响

不提病毒和细菌

北京市环保局正式公布2013年全年空气质量状况, PM2.5 年均浓度值为89.5微克/立方米。超过美国环保局制定的PM2.5年平均浓度限制 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的6 倍。

15L/min, 900L/h, 21600L/d, : 7700M³/year, 90微克x7700: 0.7克, 每人每年可吸入PM2.5颗粒0.7克。这个数大不大?

0.3cm³, 1微米厚, 可覆盖30平米

成人约有3~4亿个肺泡, 总面积近100平方米,

矽肺的发病机制尚未明了, 有人认为支配尘肺发病的重要因素就是粉尘进入肺内的剂量。病理解剖材料证明, 有色金属和金属矿山粉尘作业工人肺内沉积矿尘在4克以内时, 是不会引起矽肺病变的。当达5、6、7克左右时可分别患I、II、III期矽肺。煤矿作业工人肺内沉积10克粉尘时可为正常肺, 20克、30克、50克可分别患I、II、III期煤工尘肺。

粉尘浓度与矽肺发病关系动态观察方法简介,

广东职业病防治 1977/03 张东辉

第二节 生产性粉尘国家卫生标准

粉尘卫生标准是劳动卫生标准的一个组成部分，是国家强制性职业卫生标准。卫生部在 2007 年 4 月 12 日发布了《工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分：化学有害因素》(GBZ2.1-2007)，并于 2007 年 11 月 1 日实施。该标准是根据职业性有害物质的理化特性、国内外毒理学及现场劳

可吸入颗粒中Si约占10%

表 5-1 工作场所空气中粉尘容许浓度

序号	粉尘种类	时间加权平均容许浓度 (mg/m ³)	
		总粉尘	呼吸性粉尘
1	煤尘(游离 SiO ₂ 含量 < 10%)	4	2.5
2	水泥粉尘	4	1.5
3	矽尘		
	10% ≤ 游离 SiO ₂ 含量 ≤ 50%	1	0.7
	50% < 游离 SiO ₂ 含量 ≤ 80%	0.7	0.3
	游离 SiO ₂ 含量 > 80%	0.5	0.2
4	大理石粉尘	8	4

2-4, 正确的减少道路扬尘的方法

截至昨天(20140226), 本市空气重污染应急橙色预警已持续六天。对城市主要道路进行降尘、吸扫作业, 无疑是压尘、减缓污染进一步恶化的一大应急举措。

昨天下午, 北京青年报记者乘坐市环卫集团司机苗巍的洒水作业车, 进行了一次降尘作业的跟车体验。



他负责的路段是六里桥至木樨园的西南三环主路，全长约12公里。上午在车流中完成**一次洒水作业**，苗巍花了近两个小时。

仅2月24日9时至25日9时，全市环卫专业作业单位共出动人员22696人次、出动作业车辆2867车次，开展机械清扫降尘、喷雾压尘作业，喷雾降尘用水量7786吨，对全市1.5亿平方米道路开展清扫保洁作业。

每平方米路面洒了5克水

苗巍的洒水作业车那天洒了60吨水
设路宽50米，每平方米洒了500克水。

只有**1%**的路面洒了水，全洒要用近**100万吨**

不可行（北京人均月用水**3吨**），
也没有用



方法：

减少来源，

减少裸露面积，控制垃圾撒落、倾倒，提高路面相对高度。

清扫

使用机动吸尘车清扫北京所有的马路，尤其是城乡结合部和大规模正在建筑区。

清扫效果： 很快能明显改善空气质量，至少减排20%以上。

代价： 北京道路长度4000（8000）公里。每辆吸尘车管10公里，需要400（800）辆。每辆一百万人民币，不到10个亿。

既然这么简单，为什么没有办？

小结

- 1) 估算法对万金油们可能还是有用的;
- 2) 道路扬尘有可能是造成我国城市空气严重污染的主要原因;
- 2) 道路扬尘对人们身体健康的危害有可能被低估;
- 4) 使用机动吸尘车清扫北京所有的马路可明显改善北京的空气质量, 代价也不算高。

谢谢, 希望大家讨论。