

DAQI WURAN KONGZHI GONGCHENG

大气污染控制工程

王敦球 / 主 审

廖雷 解庆林 魏建文 / 主 编

中国环境科学出版社

013038065

X510.6
16

大气污染控制工程

主审：王敦球

主编：廖 雷 解庆林 魏建文



X510.6
16

中国环境科学出版社·北京



北航

C1643975

0130880810

图书在版编目 (CIP) 数据

大气污染控制工程/廖雷等主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5111 - 1230 - 9

I. ①大… II. ①廖… III. ①空气污染控制—高等学校—教材
IV. ①X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 307096 号

责任编辑 刘 璐

责任校对 扣志红

封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境科学出版社

(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.com.cn>

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 2012 年 12 月第 1 版

印 次 2012 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 × 1092 1/16

印 张 16.25

字 数 383 千字

定 价 51.00 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

大气污染控制工程

主审：王敦球

主编：廖 雷 解庆林 魏建文

前 言

随着全国各地不断发布 $\text{PM}_{2.5}$ （可入肺颗粒物）数据，大气污染问题日益受到人们的关注。人的生存每时每刻都离不开空气，大气质量与人类的生存环境息息相关，所以大气污染的治理与控制非常重要。但由于大气流动性强、涉及面广，而且一旦受到污染，治理比较困难，防治污染、改善空气环境成为当今迫切的环境任务。

“大气污染控制工程”是环境工程专业的主干课程之一。本书是参照教育部高等院校环境工程专业教材委员会制定的教学基本要求，结合多年讲授“大气污染控制工程”的经验，在参考了各高校教材的基础上，为高等院校环境工程专业编写的教学参考书。

本书综述了大气污染的成因、大气污染物产生及其特性，重点介绍了大气污染控制技术原理和工程措施，包括大气扩散作用、颗粒物分布技术、气态污染物控制、设备计算和设计选型。

本书编写过程参考了大量的教材、专著和相关资料，在此对这些著作的作者表示感谢。同时，本书受到桂林理工大学教材建设基金、广西环境污染控制理论与技术重点实验室、广西高校环境工程人才小高地创新团队的资助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，实践经验不足，书中难免出现漏误之处，欢迎读者批评指正。

编者

2012 年 4 月

目 录

第一章 概论	1
第一节 大气与大气污染	1
第二节 大气污染物及其来源	3
第三节 大气污染的影响	5
第四节 大气污染防治	7
第五节 环境空气质量控制标准	8
习题	10
第二章 燃烧与大气污染	11
第一节 燃料的性质	11
第二节 燃料燃烧过程	13
第三节 烟气体积及排放量计算	16
第四节 燃烧过程硫氧化物的形成	19
第五节 燃烧过程中颗粒物的形成	20
第六节 燃烧过程中其他污染物的形成	20
习题	22
第三章 大气污染气象学	24
第一节 大气圈结构及基本结构	24
第二节 大气的热力过程	29
第三节 大气的运动和风	35
习题	39
第四章 大气扩散污染物浓度估算	40
第一节 湍流扩散理论简介	40
第二节 高斯扩散模式	40
第三节 污染物浓度估算	42
第四节 特殊气象条件下扩散模式	45
第五节 烟囱高度的设计	47
第六节 厂址选择	47
习题	49
第五章 颗粒污染物控制技术基础	51
第一节 颗粒物污染控制技术	51

第二节	颗粒粒径及其分布	51
第三节	实际颗粒群的粒径分布	52
第四节	粒径分布函数	53
第五节	颗粒粒径的测量方法	55
第六节	粉尘的其他物理性质	56
习题		58
第六章	除尘装置	61
第一节	机械除尘器	61
第二节	电除尘器	70
第三节	湿式除尘器	84
第四节	过滤式除尘器	97
第五节	除尘器的选择与发展	111
习题		113
第七章	气态污染物控制技术基础	116
第一节	气体吸收	116
第二节	气体吸附	127
第三节	气体的催化净化	137
习题		145
第八章	硫氧化物的污染控制	147
第一节	硫循环及硫排放	147
第二节	燃烧前燃料脱硫	149
第三节	流化床燃烧脱硫	149
第四节	高浓度 SO_2 尾气的回收和净化	153
第五节	低浓度 SO_2 烟气脱硫——燃烧后脱硫	154
习题		165
第九章	氮氧化物污染控制	167
第一节	氮氧化物性质及来源	167
第二节	燃烧过程中氮氧化物的形成机理	168
第三节	低氮氧化物燃烧技术	174
第四节	烟气脱硝技术	176
习题		180
第十章	挥发性有机物污染控制	181
第一节	蒸气压与挥发性	181
第二节	VOCs 污染预防	182
第三节	燃烧法控制 VOCs 污染	185
第四节	吸收(洗涤)法控制 VOCs 污染	191

第五节 冷凝法控制 VOCs 污染	192
第六节 吸附法控制 VOCs 污染	195
第七节 生物法控制 VOCs 污染	196
习题	199
第十一章 城市机动车污染控制	201
第一节 机动化交通的环境影响	201
第二节 汽油发动污染物的形成与控制	202
第三节 柴油发动机污染物的形成与控制	205
习题	209
第十二章 大气污染控制和全球气候	210
第一节 温室气候和气候变化	210
第二节 臭氧层破坏问题	215
第三节 致酸前体物与酸雨	220
习题	221
第十三章 集气罩	223
第一节 净化系统的组成及系统设计的基本内容	223
第二节 集气罩的集气机理	224
第三节 集气罩的基本类型	226
第四节 集气罩性能参数及计算	229
第五节 集气罩的设计方法	229
习题	231
第十四章 案例剖析	233
第一节 罗斯托克电厂	233
第二节 FGD 系统	235
第三节 技术参数	238
第四节 投资成本和运行费用	240
第五节 运行经验	241
第六节 环境影响	242
参考文献	244
附录	246
附录一 填料特性	246
附录二 部分气体在空气中的扩散系数 (0℃, 101.33 kPa)	247
附录三 某些物质在水中的扩散系数 (20℃, 稀溶液)	247
附录四 空气物理性质	248

第一章 概 论

第一节 大气与大气污染

一、大气的组成

1. 大气与空气

按照国际标准化组织（ISO）对大气和空气的定义：大气（atmosphere）是指环绕地球的全部空气的总和。

环境空气（ambient air）是指人类、植物、动物和建筑物暴露于其中的室外空气。

2. 大气的组成

大气是由多种气体混合而成的，其组成可以分为三个部分：干燥清洁的空气、水蒸气、各种杂质（表1-1）。

表1-1 大气各成分及作用

大气的组成		主要作用	
干 洁 空 气	主要成分	N ₂	生物体的基本成分
		O ₂	维持生物活动的必要物质
	次要成分	CO ₂	植物光合作用的原料；对地面保温
		O ₃	吸收紫外线，保护地球生物
水汽		成云致雨的必要条件；对地面保温	
固体杂质		成云致雨的必要条件	

二、大气污染

1. 大气污染的概念

按照国际标准化组织（ISO）作出的定义：大气污染通常是指由于人类活动和自然过程引起某种物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到了足够的时间并因此而危害了人体的舒适、健康和福利或危害了环境的现象。

2. 大气污染的分类

（1）还原型（煤炭型）

常发生在以使用煤炭和石油为燃料的地区。主要污染物是二氧化硫、一氧化碳和颗粒

物。这些污染物在低温、高湿度的阴天，风速很小，并伴有逆温存在的情况下，一次污染物在低空积聚，生成还原性烟雾，如“伦敦烟雾”事件发生时的大气污染就是这种类型。

表 1-2 大气污染的分类

按污染范围	按污染物的性质	按燃料性质和组成成分
局部地区污染	还原型（煤炭型）	煤烟型
地区性污染		石油型
广域污染	氧化型（汽车尾气型）	混合型
全球性污染		特殊型
		沙土型

(2) 氧化型（汽车尾气型）

大多发生在使用石油为燃料的地区，污染物的主要来源是汽车排气、燃油锅炉以及石油化工生产。

主要的一次污染物是一氧化碳、氮氧化物、碳氢化合物等。这些大气污染物在阳光照射下能引起光化学反应，并生成二次污染物——臭氧、醛类、酮类、过氧乙酰硝酸酯等物质。这类物质具有强氧化性质，对人眼睛等黏膜能引起强烈刺激，如洛杉矶的光化学烟雾就属于这种类型。

三、全球性大气污染问题

全球性大气污染问题包括温室效应、臭氧层破坏和酸雨等问题。

1. 温室效应

大气中某些气体对来自太阳的短波辐射吸收很少，而对地面向太空辐射的长波能强烈吸收，使地面及低层大气变暖，这种作用称为温室效应，这些气体即温室气体。主要有二氧化碳、氟利昂（含氯氟烃化合物）、氧化亚氮和甲烷等，二氧化碳是最重要的温室气体。

2. 臭氧层破坏

人类活动产生大量氮氧化物排入大气，超音速飞机在臭氧层高度内飞行，特别是人们生活活动产生大量氟利昂进入低层大气后溶入臭氧层，与臭氧发生化学反应而降低臭氧浓度，如使南极上空出现“臭氧空洞”。这种使臭氧逐渐耗竭的现象已引起人们极大关注。臭氧层的破坏将使过量的紫外线辐射到达地面，造成健康危害；使大气平流层温度发生变化，导致地球气候异常。根据《蒙特利尔议定书》的规定，全世界将全面禁止使用氟利昂产品。

3. 酸雨

人们把酸碱度小于 5.6 的降水称为“酸雨”。

酸雨的形成是复杂的大气化学和大气物理现象，是由自然排放和人为活动等释放到大气中的 SO₂ 或 NO_x 通过氧化反应（气相或液相反应），生成硫酸或硝酸和亚硝酸，附在凝结核上降落到地面上的。

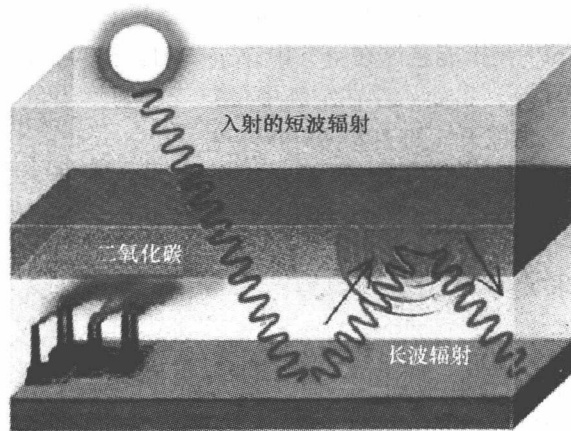


图 1-1 温室效应

第二节 大气污染物及其来源

一、大气污染物

大气污染物指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人和环境产生有害影响的那些物质。

大气污染物的种类很多，主要有两种分类方法（表 1-3）。

表 1-3 大气污染的种类

按存在的形态分	按形成过程的不同分
气体状态污染物	一次污染物
气溶胶状态污染物	二次污染物



图 1-2 大气污染物

在我国的环境质量标准中，还根据粉尘（烟尘）颗粒的大小，将其分为：

总悬浮颗粒物（TSP）：指能悬浮在空气中，空气动力学当量直径 $\leq 100\mu\text{m}$ 的颗粒物。

可吸入颗粒物（ PM_{10} ）：指能悬浮在空气中，空气动力学当量直径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的颗粒物。其中的浮尘（ $\text{PM}_{2.5}$ ）是灰霾天气的主要污染物。

目前大气质量评价中的一个通用的重要污染指标：用标准大容量颗粒采样器在滤膜上所收集到的颗粒物的总质量。

二、大气污染物的来源和发生量

1. 大气污染源

大气污染源是指向大气中排放污染物的设备、场所和生产过程。从总体看可分为自然源和人为源。由自然源造成的污染多为暂时的、局部的；由人为源造成的污染通常延续时间长、范围广。当前面临的大气污染，多与人为活动有关，称人工污染源。

大气污染源的分类方法有两种：

（1）按空间分布

①点源。污染物集中于一点或相当于一点的小范围排放源，如工厂烟囱排放源。

②线源。交通干线两侧汽车尾气污染源。

③面源。即在相当大面积范围内有许多个污染排放源，如一个大城市内的许多污染物排放源。

（2）按产生的来源

①生活污染源。城市居民、机关和服务性行业，由于烧饭、取暖、沐浴等生活上的需要，燃烧矿物燃料，向大气排放煤烟、油烟、废气等造成大气污染。城市生活垃圾在堆放过程中厌氧分解排出的二次污染物和垃圾焚烧过程产生的废气。

②工业污染源。包括燃料燃烧排放的污染物以及工艺生产过程中排放的废气以及生产过程中排放的各类金属和非金属粉尘，是大气污染的最重要来源。由于工业企业的性质、规模、工艺过程、原料和产品等种类不同，对大气污染的程度也不同。

③交通污染源。由行驶中的汽车、火车、船舶和飞机等交通工具，排放出含有一氧化碳、碳氢化合物、铅等污染物的尾气造成大气污染。近年来，我国的公路交通也发展很快，汽车的排放废气在一些大城市也已成为主要的空气污染源。

④农业污染源。农业机械运行时排放的尾气。农田施用化学农药、化肥、有机肥时有害物质直接逸散到大气中，或从土壤中经分解后向大气排放的有毒、有害及恶臭气态污染物等。露天燃烧秸秆、树叶或者废弃物等。

⑤沙尘污染源。由于农村和城市过度开发，植被和水面遭受破坏而减少或消失，地表裸露，地面沙尘被风力或交通工具扬起，可吸入颗粒物悬浮于大气中，造成大气污染。2000年4月29日修改后的《大气污染防治法》特别加强了对这一污染源的防治。

2. 大气污染物的发生量

（1）国内外大气污染的状况

国外大气污染三个发展阶段：

①18世纪末到20世纪中，煤烟型污染，主要污染物 SO_2 、烟尘。

②20世纪50—60年代，“石油型”污染和复合型污染。

③20 世纪 70 年代以来，环境污染逐步得到控制，环境质量改善。

(2) 我国大气污染现状

当前，我国大气污染相当严重，其污染程度大致相当于发达国家 20 世纪五六十年代最严重的时期，且某些地区和某些污染物还呈发展之势，具体表现为：

①二氧化硫排放量大；②大气中总悬浮颗粒物浓度高；③酸雨危害严重。

煤烟型污染的主要污染物为降尘、总悬浮颗粒物、二氧化硫。北方高于南方，冬季高于夏季，早晚高于中午。

历史上的大气污染公害事件见表 1-4。

表 1-4 大气污染公害事件

事件名称	发生时间	发生地点	主要污染物	情况
马斯河谷烟雾事件	1932. 12	比利时马斯河谷	烟尘及二氧化硫	数千人发病，约 60 人死亡
多诺拉烟雾事件	1948. 10	美国多诺拉镇	烟尘及二氧化硫	约 6 000 人患病，17 人死亡
伦敦烟雾事件	1952. 12	英国伦敦	烟尘及二氧化硫	死亡人数较常年约多 4 000 人
洛杉矶光化学烟雾事件	20 世纪 40 年代初期	美国洛杉矶	光化学烟雾	大多数居民患病，65 岁以上老人死亡 400 人

第三节 大气污染的影响

大气污染对人体健康、动植物、器物和材料及大气能见度和气候皆有重要影响。

一、对人体的危害

对人体的危害主要通过三条途径：

①通过器官、皮肤的表面直接接触。

②食入含有大气污染物的水和食物。

③吸入被污染的空气（最危险，一个正常人每天要吸入 10 000 L 的空气）。

高浓度污染物——急性中毒；低浓度——长期接触，引起慢性支气管炎、支气管哮喘、肺气肿及肺癌等。

二、对动植物的伤害

使植物生长缓慢，发育受阻，品质变劣，产量下降，作物和森林大片死亡；使动物发生畸变、癌变，破坏遗传基因。

三、对器物和材料的危害

对机器设备、金属制品、油漆涂料、皮革制品、橡胶制品、纸制品、纺织品和建筑物的危害是严重的，并造成重大的经济损失。



图 1-3 大气污染对植物的伤害

四、对大气能见度的影响

对大气能见度或清晰度有影响的污染物，一般应是气溶胶粒子、能通过大气反应生成气溶胶粒子的气体或有色气体，包括：

总悬浮颗粒物（TSP）： SO_2 和其他气态含硫化合物，在大气中以较大反应速率生成硫酸盐和硫酸气溶胶粒子， NO 和 NO_2 在大气中反应生成硝酸盐和硝酸气溶胶粒子。

光化学烟雾，由一次和二次污染物反应生成亚微米（ $\text{PM}_{2.5}$ ）的气溶胶粒子，又称灰霾。造成局部地区空气变浊，能见度低，交通事故增多，还使太阳光直接照射到地面的数量减少。

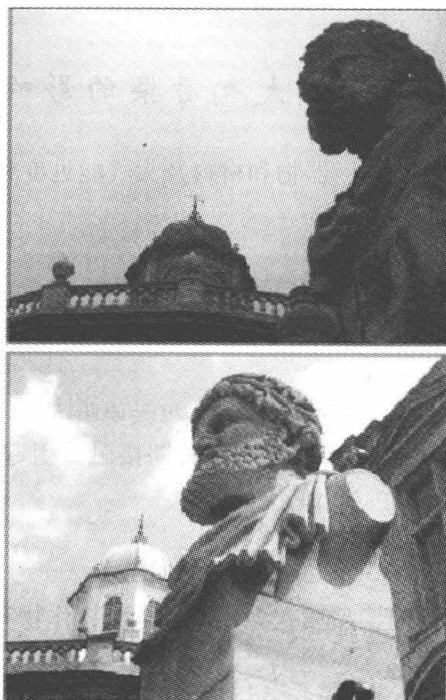


图 1-4 大气污染对器物 and 材料的危害

五、对气候自然生态的影响

(1) 城市的“热岛效应”：在大工业城市的上空，因工厂废热大量排入天空，使近地面气温比四周郊区高，形成局部地区环流，即工业区热空气上升，郊区冷空气从底层吹入城市，使热量和各种大气污染物长时间在城市上空循环，不易沿下风向扩散，从而加剧了大气污染。

(2) 出现“拉波特效应”：大工业城市的下风向地区，由于工厂向天空排放大量的烟尘和其他污染物，烟尘对水蒸气有凝结作用，促使下风向雨量增加。

(3) 出现酸雨：大气中的硫氧化物、氮氧化物、碳氧化物会发生化学变化形成酸雨。

(4) 对大气层的危害主要表现在全球变暖和臭氧层变薄。

第四节 大气污染防治

一、大气污染综合防治的含义

所谓大气污染综合防治，实际上是为了达到区域环境空气质量控制目标，对多种大气污染控制方案的技术可行性、经济合理性、区域适应性和实施可能性等进行最优化选择和评价，从而得出最优的控制技术方案和工程措施。

大气污染综合防治的基本点是防与治的综合，大气污染要纳入区域环境综合防治之中，才能真正获得解决。

二、大气污染控制的措施

实施大气污染综合防治的目的，就是使环境空气质量达标，其控制的措施主要有六方面：

(1) 进行区域环境规划，实施总量控制

区域排污总量控制：原国家环保局提出的 2000 年削减 12 种主要污染物的排放总量，其中包含了二氧化硫、烟尘和工业粉尘三项空气污染物。区域排污总量不应超过区域环境容量。

对老工业区和经济已发展的区域等，经济新开发区域进行大气环境规划；进行环境影响评价；根据地形分布、气候特征进行排放源合理布局。

(2) 提倡清洁生产，发展无污染和少污染的生产工艺

改变燃料结构，采用清洁能源：考虑二氧化硫和烟尘的排放；燃气和燃轻油是比较清洁的；改变燃烧方式：节能、高效、低排放的燃煤设备；改变煤的燃烧方式：型煤；城市燃料气化；发展废热利用，集中供热与热电联用。

(3) 进行废气治理，实施达标排放

安装并运行废气净化装置，是控制环境质量的基础，也是实行环境规划与管理等项综合防治措施的前提。各种净化装置的结构原理、性能特点和设计计算等，是本节的重要内容，将在以后各章节中详细介绍。

(4) 加高排放烟囱的高度，充分利用大气自然净化能力

(5) 绿化大地（植树造林），充分利用植物净化能力

第五节 环境空气质量控制标准

一、环境空气质量控制标准的种类和作用

大气环境质量控制标准是为控制和改善大气质量，保护人体健康和生态环境，限制大气环境中的污染物含量而制定的，是执行《环境保护法》和《大气污染防治法》、实施环境空气质量管理及防治大气污染的依据和手段。

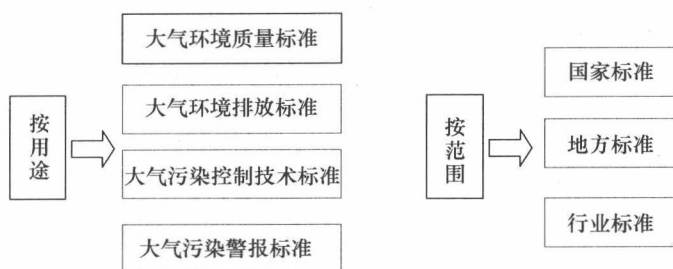


图 1-5 环境空气质量控制标准分类

二、环境空气质量标准

《环境空气质量标准》（GB 3095—1996）（代替 GB 3095—82）是原国家环境保护局于 1996 年 1 月 18 日批准并于 1996 年 10 月 1 日实施的。

该标准规定了环境空气质量功能区划分、标准分级、污染物项目、取值时间及浓度限值，采样与分析方法及数据统计的有效性规定。本标准适用于全国范围的环境空气质量评价。

该标准将环境空气质量分为三级：

一级标准：为保护自然生态和人群健康，在长期接触情况下，不发生任何危害影响的空气质量要求。

二级标准：为保护人群健康和城市、乡村的动、植物，在长期和短期接触情况下，不发生伤害的空气质量要求。

三级标准：为保护人群不发生急、慢性中毒和城市一般动、植物（敏感者除外）正常生长的空气质量要求。

该标准将环境空气质量功能区分为三类：

一类区：为国家规定的自然保护区、风景游览区、名胜古迹和疗养地等。

二类区：为城市规划中确定的居民区、商业交通居民混合区、文化区、名胜古迹和广大农村等。

三类区：为特定工业区。

其中一类区由国家确定，二、三类区以及适用区域的地带范围由当地人民政府划定。

一类区一般执行一级标准，依此类推。

三、工业企业设计卫生标准

我国于 1979 年重新修订公布了《工业企业设计卫生标准》(TJ 36—79)，规定了“居住区大气中有害物质的最高容许浓度标准”。一些污染物在国家没有制定其大气环境质量标准时，可以使用这一标准。

在生产岗位上，为了保护长期进行生产劳动的工人不受职业病的危害，该标准还规定了“车间空气中有害物质的最高容许浓度标准”。

四、大气污染物排放标准

大气污染物排放标准是以实现环境大气质量标准为目标，对污染源排入大气的污染物所规定的允许排放量或排放浓度，以便直接治理污染源，防止污染。

该标准是控制污染物的排放量和进行净化设计的依据，是控制大气污染的关键，同时也是环境管理部门的执法依据。

五、空气污染指数及报告

空气污染指数 (API) 是一项可以定量和客观地评价空气环境质量的指标，是将若干项主要大气污染物的监测数据参照一定的分级标准，经过综合换算后得到的量纲为 1 的相对数。

表 1-5 空气污染程度级别的划分

等级	API 值 (x)	空气质量
一级	$x < 50$	优
二级	$50 < x < 100$	良
三级	$100 < x < 200$	轻度污染
四级	$200 < x < 300$	中度污染
五级	$x \geq 300$	重度污染

表 1-6 空气污染指数分级浓度限值

空气污染指数	污染物浓度/(mg/m^3)				
API	PM_{10} (日均值)	SO_2 (日均值)	NO_2 (日均值)	CO (小时均值)	O_3 (小时均值)
50	0.050	0.050	0.080	5	0.120
100	0.150	0.150	0.120	10	0.200
200	0.350	0.800	0.280	60	0.400
300	0.420	1.600	0.565	90	0.800
400	0.500	2.100	0.750	120	1.000
500	0.600	2.620	0.940	150	1.200

空气污染指数计算公式如下：