

# 北京市主要大气污染源清单及火电厂排放 污染物对雾霾天气的影响

王 锦, 吉奕康

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘 要:**根据 2013 年北京市工业、农业、居民生活的统计资料,以及中国汽车工业年鉴,计算了北京市不同行业二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )及  $\text{PM}_{10}$  排放量,建立了北京市 2013 年大气污染物排放清单.结果显示:2013 年北京各类污染物的排放中  $\text{SO}_2$  为 13.596 万 t,  $\text{NO}_x$  为 81.289 万 t,  $\text{PM}_{10}$  为 67.815 万 t.其中:火力发电厂  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{10}$  排放量占北京市排放总量的 31%、14% 和 24%.如果北京市火力发电厂升级改造,自 2014 年 7 月起执行最新火电厂排放标准后,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{NO}_x$  年排放量将分别减少 50%、69% 和 40%,估算其二次转化  $\text{PM}_{2.5}$  的生成量也将减少 6.38 万 t,对雾霾天气的改善将会起到积极作用.

**关键词:**火电厂;污染物排放清单;二氧化硫和氮氧化物;雾霾;  $\text{PM}_{2.5}$

**中图分类号:**F205;X32 **文献标志码:**A

## Development of the major air pollutant emission inventory and the influence of the thermal power station on the haze weather for Beijing

WANG Jin, JI Yikang

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the statistics of industry, agriculture, living expense and 2013 China automotive industry yearbook of Beijing, this paper calculates the emission load of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{10}$  from different emission sources of Beijing and builds the air pollutant emission inventory. The results show the total emission loads of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and  $\text{PM}_{10}$  are 135.96 kilo tons, 812.89 kilo tons and 678.15 kilo tons, which the pollutant emission of the thermal power plants occupied 31%, 14% and 24% of the total emission respectively in 2013. If the thermal power plants follow the new National Pollutant Emission Standard of China and finish upgrading the environmental protection facilities in July 2014, the annual emissions will decrease 50%, 69% and 40% of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{NO}_x$  respectively compared in 2013. Furthermore, the  $\text{PM}_{2.5}$  of secondary formation will also decline 63.8 kilo tons. Therefore, it will take positive effect for the haze weather of Beijing improved.

**Key words:** thermal power stations; pollutant emission inventory;  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_x$  emissions; haze;  $\text{PM}_{2.5}$

收稿日期:2014-07-21

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014JBM073)

作者简介:王锦(1973—),女,陕西安康人,教授,博士,博士生导师.研究方向为环境工程理论与技术. email:jwang1@bjtu.edu.cn.

随着经济的快速发展,我国复合型大气污染日益凸显,细颗粒物尤其是二次气溶胶污染加重,雾霾天气日益增加,严重影响大气能见度和人体健康.2013年1月,北京市连续出现强霾天气,使得北京市的雾霾天气及涉及雾霾形成的PM<sub>10</sub>乃至PM<sub>2.5</sub>越来越引起人们的关注<sup>[1]</sup>.霾又称灰霾,是空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等非水成物组成的气溶胶系统<sup>[2]</sup>,其中大部分有害物质都富集在细颗粒物PM<sub>2.5</sub>上.雾霾天气不仅造成低能见度,对交通运输、工农业生产具有严重危害外,还会诱发呼吸道疾病、心脑血管疾病甚至癌症.由于气溶胶颗粒物粒径较小,比表面积大,在大气运输过程中不仅可以作为污染物的载体,而且其表面是大气化学反应发生的天然场所.研究表明:北京市PM<sub>10</sub>中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量分别为13.9%和2.17%;PM<sub>2.5</sub>中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的含量分别为18.9%和2.64%<sup>[3]</sup>.由此可见,SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>不仅是大气的主要污染物,其经大气化学反应生成的二次粒子也是PM<sub>2.5</sub>的主要来源<sup>[1]</sup>.

电力是一种经济、使用便捷、能大量生产、迅速传输的优质二次能源<sup>[4]</sup>.据统计,2012年,北京市能源消耗总量为6 995.40万t标准煤,其中,原煤消费量为2 365.54万t,电力消费量为853.68亿kW·h<sup>[5]</sup>.2011年,北京市火电发电量258.12亿kW·h,占北京市发电总量的97.15%<sup>[6-7]</sup>.生产电能的过程中,火电厂会排放出大量的烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>.烟尘主要包括降尘和飘尘.随着社会经济的发展和生活水平的提高,人们对生活环境的要求越来越高,尤其对大气环境质量的要求更高,因而火电厂大气污染物的排放问题倍受关注.

本文作者针对北京市主要大气污染物SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和PM<sub>10</sub>建立了污染源排放清单.估算了2014年7月1日起新的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011),要求已建电厂环保设施升级改造后北京市火电厂各污染物排放减少量,以及占北京污染源排放总量的比例,并且分析了污染物减少对雾霾天气的影响.

## 1 污染源排放计算方法

目前国内外建立污染源排放清单的主要方法包括:物料衡算法、排放因子法、在线监测法(CEMS)、多源参数检测法、单元检测法和污染源排放估算模型法等.根据大气污染物的排放模式,污染源可分固定源和移动源.根据北京市各类污染排放源的特征

和相应基础资料进行分析后,确定固定污染源为工厂、电厂、冶金、化工和矿业等,移动污染源为汽车、火车和飞机等.

### 1.1 固定源核算方法

1)烟尘排放量计算方法为<sup>[8-9]</sup>

$$G_{sd} = B_{\text{coal}} A d_{\text{fh}} (1 - \eta) / (1 - C_{\text{fh}}) \quad (1)$$

式中: $B_{\text{coal}}$ 为耗煤量,kg; $A$ 为煤的灰分,%; $d_{\text{fh}}$ 为烟尘中灰分占燃煤灰分量的百分量,%; $\eta$ 为除尘系统的除尘效率(未装除尘器时为0); $C_{\text{fh}}$ 为烟尘中可燃物的百分量,%,与煤种有关.

2)燃料燃烧时SO<sub>2</sub>排放量计算分3种情况:

①对于煤炭,煤炭中硫的成分可分为可燃硫和非可燃硫,可燃硫约占全部的80%,其计算公式为

$$G_{\text{so}_2} = 1.6 B_{\text{coal}} S (1 - \eta) \quad (2)$$

②对于液体燃料,其计算公式为

$$G_{\text{so}_2} = 2 B_{\text{oil}} S (1 - \eta) \quad (3)$$

式中: $G_{\text{so}_2}$ 为二氧化硫产生量,kg; $B_{\text{oil}}$ 为燃油量,kg; $S$ 为油的全硫分含量,%; $\eta$ 为脱硫设备的脱硫效率,如果没有脱硫设备,则 $\eta = 0$ .

③对于气体燃料,其计算公式为

$$G_{\text{so}_2} = 2.857 V C_{\text{H}_2\text{S}} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: $V$ 为气体燃料的消耗量,Nm<sup>3</sup>; $C_{\text{H}_2\text{S}}$ 为气体燃料中H<sub>2</sub>S的体积,%.

3)燃料燃烧NO<sub>x</sub>排放量的计算方法为<sup>[9]</sup>

$$G_{\text{NO}_x} = 1.63 B_{\text{coal}} (\beta n + 10^{-6} V_y O_{\text{NO}_x}) \quad (5)$$

式中: $G_{\text{NO}_x}$ 为燃料燃烧生成的氮氧化物(以NO<sub>2</sub>计量),kg; $B_{\text{coal}}$ 为燃料消耗量,kg; $\beta$ 为燃料中氮向燃料型NO的转变率,%,与 $n$ 有关; $n$ 为燃料中氮的含量,%; $V_y$ 为1kg燃料生成的烟气量,m<sup>3</sup>/kg; $O_{\text{NO}_x}$ 为燃烧室生成温度型NO<sub>x</sub>的质量分数,mg/m<sup>3</sup>,通常取 $70 \times 10^{-6}$ ,即93.8 mg/m<sup>3</sup>.

### 1.2 机动车排放核算方法

机动车排放指道路类型汽车的尾气及车体排放.道路类型包括城市主干路、高速路、国道、省道等.机动车类型可分为摩托车、小型客车、大型客车、小型货车、大型货车等.根据《城市机动车排放空气污染测算方法》<sup>[10]</sup>得出机动车某种污染物年排放量

$$Q_{jw} = 10^{-6} P_j M_j f_{jw} \quad (6)$$

$$Q_w = \sum_{j=1}^n w Q_{jw} (n = 1, 2, 3 \dots 28) \quad (7)$$

式中: $Q_{jw}$ 为 $j$ 类型车 $w$ 污染物的年排放量,t/a; $Q_w$ 为所有车类型 $w$ 污染物年排放量,t/a; $n$ 为车类型总数; $P_j$ 为统计年份 $j$ 类型车保有量,辆; $M_j$ 为 $j$ 类

型车年平均行驶里程, km/a;  $f_{jw}$  为  $j$  类型车  $w$  污染物的排放因子, g/(km·辆).

中国机动车年均行驶里程按照不同车型分别为: 小型客车  $5 \times 10^4$  km, 大型客车  $4 \times 10^4$  km, 小型货车  $4 \times 10^4$  km, 大型货车  $3 \times 10^4$  km, 其他车型为  $1.2 \times 10^4$  km<sup>[11]</sup>. 表1为不同类型机动车不同污染物的排放因子.

表1 不同车型机动车不同污染物的排放因子

Tab.1 Emission factors of motor vehicle

车型	CO	NO <sub>x</sub>	TSP(总悬浮物)	PM <sub>10</sub>
大客车	106.0	21.0	0.203 0	0.146 0
小客车	26.7	1.3	0.021 4	0.015 3
大货车	10.0	20.0	4.960 0	4.820 0
小货车	53.0	6.0	0.074 9	0.053 7
其他	12.0	13.0	4.000 0	4.000 0

## 2 数据分析

通过计算, 2013年北京市不同污染源SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及PM<sub>10</sub>排放清单如表2所示. 火力发电厂执行新标准前后, 不同污染源的污染物所占比例如图1所示.

表2 2013年北京市各行业主要大气污染物排放清单

Tab.2 Main atmospheric pollutants list of Beijing in 2013 万 t

行业	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>
火电厂	11.266	6.738	16.582
供热	9.269	5.544	13.643
采矿业	1.667	0.740	3.855
制造业	8.563	7.114	24.825
机动车	49.560	0	6.100
其他	0.954	0.574	2.810
总量	81.289	20.710	67.815

根据表2计算结果可知: 机动车对NO<sub>x</sub>的贡献率最大, 占61%; 其次是火力发电厂, 占14%. SO<sub>2</sub>主要来源于火力发电厂及供热设备运行过程中消耗的煤炭资源. 制造业及火电厂是PM<sub>10</sub>的主要排放源, 其中制造业的贡献率为37%, 火力发电厂的贡献率为24%. 如果北京市火力发电厂升级改造后, 自2014年7月起将执行2011年公布的新火电厂排放标准, 其年排放量SO<sub>2</sub>为3.369万t、PM<sub>10</sub>为9.949万t、NO<sub>x</sub>为3.466万t, 相比于旧标准其排放量分别减少50%、40%和69%, 如图2所示.

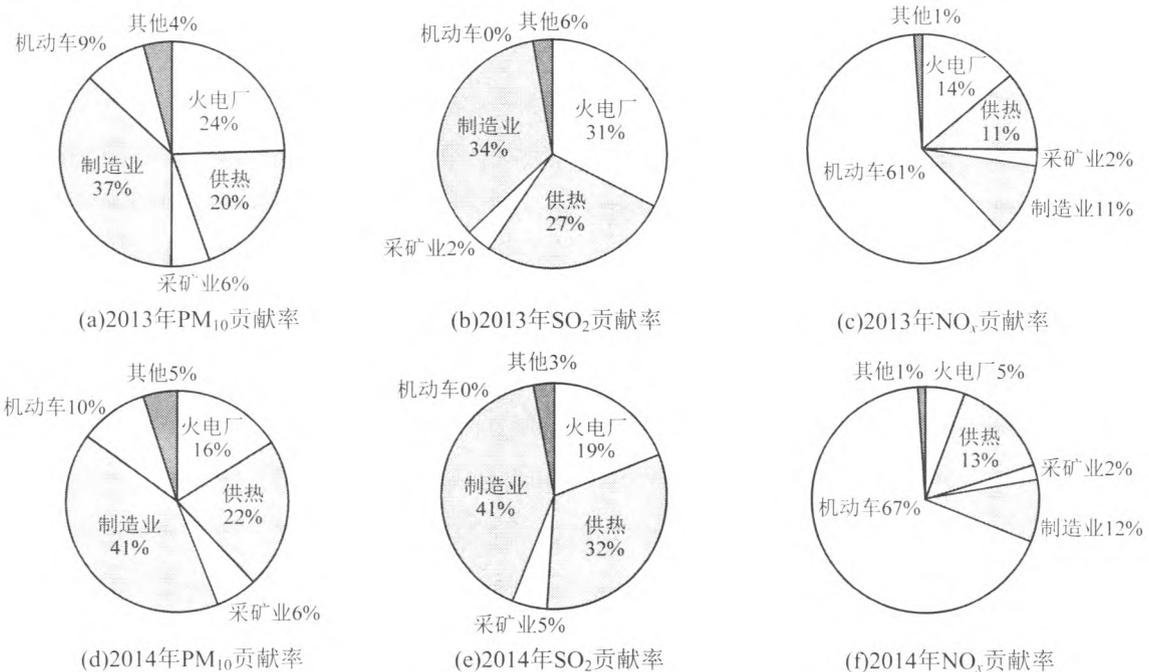


图1 2013—2014年北京市不同排放源的贡献率

Fig.1 Different sources contribution in 2013—2014

PM<sub>2.5</sub>即致霾粒子通常是指动力学当量直径小于或等于2.5 μm的粒子, 主要成分是元素氮、有机碳化合物、硫酸盐和硝酸盐等. 其他包括钠、镁、钙、铝和铁等地壳中含量丰富的元素, 也有铅、锌、镉和铜等, 主要源自于人类污染的重金属元素. 虽然自然

过程也会产生PM<sub>2.5</sub>, 但主要来源还是人为排放, 如煤、汽油、柴油的燃烧, 焚烧垃圾、道路粉尘、工业污染、森林火灾及花粉细菌等. 与PM<sub>10</sub>相比, PM<sub>2.5</sub>不仅更加细小, 而且组成更加复杂, 含有大量有毒、有害物质, 包括3万种以上的化合物, 几乎包含元素周

期表中所有元素<sup>[12]</sup>.此外,大气中的各种气态污染物也可以通过气-粒转化,产生二次 PM<sub>2.5</sub><sup>[13]</sup>.例如,在城市大气中,汽车尾气和燃煤排放的大量气态 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 等初级空气污染物可通过气-粒转化过程生成二次 PM<sub>2.5</sub><sup>[14]</sup>.其中 SO<sub>2</sub> 的转化率在春、夏、秋、冬分别为 11%、56%、31%、21%;NO<sub>x</sub> 的转化率则分别为 70%、65%、68%、73%.在光照较强的夏季,二次 PM<sub>2.5</sub> 占 PM<sub>2.5</sub> 的比例可达 50%~90%<sup>[15]</sup>.其中,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 为 18.9%,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为 2.64%<sup>[3]</sup>.

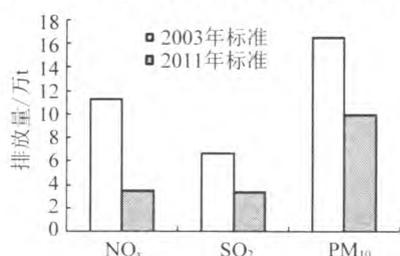


图2 新旧标准北京市火电厂排污量对比

Fig.2 Comparisons of Beijing thermal power station pollutant emissions in 2003 and 2011

水平能见度小于 10 km 的空气普遍浑浊的现象称为霾或灰霾,是由大量极细微的干尘粒等均匀的浮在空中造成的<sup>[16]</sup>.空气中的有机氮氢化合物、灰尘等粒子也能使大气浑浊,因能见度恶化导致视野模糊<sup>[17-18]</sup>.而雾霾天气是近年来出现的新的一种天气现象,是雾和霾的混合物.简单说雾霾天气,就是指细粒子气溶胶在高湿条件下引发的低能见度,而空气中的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 不仅其本身能污染大气,降低能见度,形成雾霾天气,而且经过大气化学反应能够形成二次 PM<sub>2.5</sub>,从而进一步增加了雾霾天气发生的频率.执行新标准后,不仅北京市火电厂 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的一次排放量将分别减少 50%、40% 和 69%,并且根据相关文献研究结果,SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 在春、夏、秋、冬不同季节二次转化为 PM<sub>2.5</sub> 中硫酸盐、硝酸盐的数值也将有所减少<sup>[13]</sup>.执行新标准后,SO<sub>2</sub> 对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献减少 1.002 万 t,NO<sub>x</sub> 对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献减少 5.382 万 t.

因此,按春、夏、秋、冬北京市火电厂 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 二次转化率均值估算,新排放标准实施对 PM<sub>2.5</sub> 的减排量将降低 6.38 万 t.通过对比不同标准下北京市火力发电的排污量,可以发现,排放标准的提高,将会大大减少火力发电的污染物排放量.同时也会减少二次形成的 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>,从而对改善北京地区的雾霾天气状况起到积极作用.

### 3 结论

1)2013 年北京人为源共排放 SO<sub>2</sub> 613.596 万 t,

PM<sub>10</sub> 67.815 万 t,NO<sub>x</sub> 81.289 万 t;火力发电厂对各污染物的贡献分别为 SO<sub>2</sub> 为 31%,PM<sub>10</sub> 14%,NO<sub>x</sub> 为 4%;机动车对各污染物的贡献率分别为 SO<sub>2</sub> 0%,PM<sub>10</sub> 9%,NO<sub>x</sub> 61%.由此可见,机动车是北京市 NO<sub>x</sub> 的主要排放源.

2)火力发电厂是北京市 SO<sub>2</sub> 的主要排放源.北京已建火电厂升级改造,2014 年执行新《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)后,其年排放量分别为 SO<sub>2</sub> 3.369 万 t、PM<sub>10</sub> 为 9.949 万 t、NO<sub>x</sub> 为 3.466 万 t.相比于旧标准,其排放量分别减少 50%、40% 和 69%,其对 PM<sub>2.5</sub> 的年排放量也将降低 6.38 万 t.

### 参考文献 (References):

- [1] 周涛,汝小龙.北京市雾霾天气成因及治理措施研究[J].华北电力大学学报:社会科学版,2012(2):12-16. ZHOU Tao, RU Xiaolong. Further research and management policies of pollution haze weather in Beijing[J]. Journal of North China Electric Power University: Social Sciences, 2012(2):12-16. (in Chinese)
- [2] 丁珏,刘丽颖.雾霾天气颗粒污染物的特性及吸收气态污染物过程的分析[J].上海环境科学,2009,28(1):11-14. DING Jue, LIU Liying. An analysis on characteristics of particulate pollutants and the process of absorbing gaseous pollutants in hazy weather[J]. Shanghai Environmental Sciences, 2009, 28(1):11-14. (in Chinese)
- [3] 宋燕,徐殿斗,柴之芳.北京大气颗粒物 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性阴离子的组成及特征[J].分析实验室,2006,25(2):80-85. SONG Yan, XU Diandou, CAI Zhifang. Determination and characterization of anionic species of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Beijing[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2006, 25(2):80-85. (in Chinese)
- [4] 缪宛新.火电厂可持续发展的评价模型及案例分析[D].保定:华北电力大学,2007. MIAO Wanxin. Case study and evaluation model of the sustainable development of the coal-fired plant[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007. (in Chinese)
- [5] 北京市统计局.北京统计年鉴[ED/OL].[2014-07-21]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2014-tjnj/CH/index.htm>. Beijing Municipal Bureau of Statistics NBS Survey Office in Beijing. Beijing statistical yearbook [ED/OL]. [2014-07-21]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2014-tjnj/CH/index.htm>. (in Chinese)
- [6] 中国电力企业联合会.中国电力工业统计资料汇编 2011

- [M]. 北京:中国电力联合会出版社,2012.  
China Electricity Council. Chinese power industry statistics in year 2011 [M]. Beijing: China Electricity Council Press, 2012. (in Chinese)
- [7] 中电联统计信息部. 2011 年全国电力工业统计快报 [M]. 北京:中电联统计信息部,2012.  
Statistics of China Electricity Council. Journals of statistics in national power industry 2011[M]. Beijing: Statistics of China Electricity Council, 2012. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局. 环境统计报表填报指南[M]. 北京:中国环境科学出版社,2008.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Guidance of environmental statistics surveys [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 排污申报登记使用手册 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2004.  
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Manual for pollution load declaration[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004. (in Chinese)
- [10] HJ/T 180—2005,城市机动车排放空气污染测算方法 [S].  
HJ/T 180—2005, Method for examination of air pollution from vehicle emission in urban area[S]. (in Chinese)
- [11] 胡斌祥,朱华,覃维献. 我国汽车技术发展模式的排放清单[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2002, 24(2):99-102.  
HU Binxiang, ZHU Hua, TAN Weixian. A detailed list for exhaust in development models of automobile technology in China[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2002, 24(2):99-102. (in Chinese)
- [12] 王跃思. PM<sub>2.5</sub>霾污染及调控[R]. 北京:北京国际能源专家俱乐部,2013.  
WANG Yuesi. Regulate and control of pollution haze and PM<sub>2.5</sub>[R]. Beijing: Beijing Energy Club, 2013. (in Chinese)
- [13] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter[J]. Science, 1997, 277:116-119.
- [14] Chart C K, Yao X. Air pollution in mega cities in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(1):1-42.
- [15] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等. 北京大气细粒子 PM<sub>2.5</sub>的化学组成[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2002, 42(12):1605-1608.  
YANG Fumo, HE Kebin, MA Yongliang, et al. Chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> species in Beijing ambient air [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2002, 42(12):1605-1608. (in Chinese)
- [16] 王润清. 雾霾天气气象学定义及预防措施[J]. 现代农业科技, 2012(7):44-46.  
WANG Runqing. Definition of pollution haze in meteorology and prevention measures [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(7):44-46. (in Chinese)
- [17] 段再明. 解析山西雾霾天气的成因[J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(5):539-541.  
DUAN Zaiming. Analysis of the causes of fog and haze in Shanxi[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(5):539-541. (in Chinese)
- [18] 李东海,何彩霞. 浅谈雾霾天气的识别及预警策略[J]. 安徽农学通报, 2011, 17(18):165-166.  
LI Donghai, HE Caixia. Talks about the difference of pollution haze and warning strategies[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(18):165-166. (in Chinese)