

# 西安市污染气象特征和大气环境容量分析

张文静<sup>1</sup>, 孙 娴<sup>1</sup>, 王 琦<sup>1</sup>, 胡 琳<sup>1</sup>, 丁 琦<sup>2</sup>

(1. 陕西省气候中心, 西安 710014; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘 要:**利用 2010 年西安市环境监测资料及同期气象资料, 分析了 3 种主要污染物( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ) 的时空分布特征以及各种气象条件对城市大气污染的影响; 采用 A—P 值法计算大气环境容量。结果表明: (1) 西安市区低空大气全年以较稳定—稳定为主, 污染物浓度随稳定度频率的增大而增大; (2) 风速对污染物浓度的影响非常显著。随风速增大各污染物浓度相应减小; 而在春季大风沙尘天气里,  $\text{PM}_{10}$  浓度随风速增大而增大; (3) 降水对污染物的稀释作用很强, 降水量小于 1 mm 时浓度不降反增, 大于 10 mm 时稀释作用却相对减弱; (4) 受气象条件的综合影响, 污染物排放造成环境容量的利用率高甚至出现超负荷现象。

**关键词:**大气污染; 气象条件; 大气稳定度; 环境容量; 西安市

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)05-0257-05

## Analysis on Air Pollution Meteorological Characters and Atmospheric Environment Capacity in Xi'an City

ZHANG Wen-jing<sup>1</sup>, SUN Xian<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, HU Lin<sup>1</sup>, DING Qi<sup>2</sup>

(1. Climate Center of Shaanxi Province, Xi'an 710014, China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The spatio-temporal distribution characteristics of three pollutants ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{PM}_{10}$ ) were analyzed by using environmental monitoring and meteorological data of Xi'an in 2010. A-P method was used to calculate atmospheric environmental capacity. The results showed that: (1) the major low altitude atmosphere in Xi'an was semi-stable or stable, and the pollutant concentration increased when stability frequency increased; (2) the wind speed affected the pollutant concentration dramatically, the pollutant concentration decreased with the increase of wind speed;  $\text{PM}_{10}$  was fairly positively interrelated with wind speed in the context of the strong wind and sand dust in spring; (3) the precipitation contributed very much to dilution effect, but the precipitation less than 1 mm increased the concentration of pollutants; the precipitation more than 10 mm didn't dilute the concentration too much; (4) affected by the meteorological condition, utilization ratio of environmental capacity was overloaded due to pollutant discharge.

**Key words:** air pollution; meteorological condition; atmospheric stability; environment capacity; Xi'an City

随着经济的发展, 城市不断扩张, 城市空气污染日益严重, 灰霾天气频繁出现, 极大的影响了大气环境质量和人体健康。有关研究表明, 空气污染程度不仅取决于污染源的数量和分布、地形的简单或复杂, 更与当时气象条件密切相关。为了清楚的认识各种气象条件下的城市污染分布及污染程度, 确定城市区域的大气环境容量, 本文利用 2010 年西安市环境监测资料及同期气象资料, 对气象场影响下的城市大气污染状况及大气环境容量进行分析, 以期寻求气象与

大气污染之间的关系和变化规律, 为大气污染防治提供有价值的参考。

## 1 大气环境污染分布特征

西安位于中国大陆腹地黄河流域中部的关中盆地, 属暖温带半湿润季风气候区, 雨量适中, 四季分明, 2010 年降水量为 504.4 mm, 年平均湿度为 69.6%。以东北风和西风为主导风向。辖境东西 204 km, 南北 116 km; 总面积 9 983 km<sup>2</sup>, 其中市区面积

收稿日期: 2012-03-01

修回日期: 2012-04-16

资助项目: 陕西省气象局博士基金项目“西安市城市环境气象场分布对大气污染物影响研究”(2012B-4); 中国可持续能源项目(G-1011-13585)

作者简介: 张文静(1981—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境影响评价、大气成分预测等方面的研究。E-mail: mili313@163.com

1 066 km<sup>2</sup>。随着西安市城市化进程的加快,人口的增加,基础建设不断加快,城市下垫面发生了巨大的变化,使城市的热容量增加,能耗加大,有效蒸发减少,增温明显,从而导致城市风速减小,大气污染物浓度增加<sup>[1]</sup>。

### 1.1 资料和方法

本文所使用的 2010 年污染因子浓度数据来源于西安市环保局,监测点位共 5 处,分别为开关厂、兴庆小区、纺织城、小寨、草滩。分别代表了西安市的工业区、住宅区、轻工业区、商业区和城市边界区,监测因子包括 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, 数据齐全,准确度高。所用地面气象资料为 2010 年西安市自动站的常规气象观测资料,包括每天逐时风速、风向、总云、低云等;高空资料采用中尺度气象模式 MM5 模拟取得。依据国家标准《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》(GB/T13201—91),本文采用箱式模型推导出的 A—P 值法中的 A 值法计算大气环境容量。把城市上空的大气层看作一个箱体,并假设污染物在此箱体混合层内处处相等,整个城市具有相同的面源强度,则在控制周期  $T$  时间内,整个箱体内允许排放的污染物总量为<sup>[2]</sup>:

$$Q_d = 3.1536 \times 10^{-3} \sqrt{\pi} \times u \times H \times C_s \times \sqrt{S} / 2 + 3.1536 C_s S (u_d + W_r R + 0.693 \frac{H}{T_{1/2}})$$

式中:  $Q_d$ ——某种大气污染物的允许排放量(10<sup>4</sup> t/a);  $u$ ——平均风速(m/s);  $W_r$ ——清洗比;  $R$ ——年

降水量(mm/a);  $u_d$ ——干沉降速度; SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 干沉降速度分别取 0.003 5, 0.000 7, 0.004 4 m/s<sup>[3]</sup>;  $H$ ——混合层平均高度(m);  $C_s$ ——相应的大气环境质量标准值(mg/m<sup>3</sup>);  $S$ ——区域面积(km<sup>2</sup>)。

### 1.2 时空分布

1.2.1 时间变化特征分析 根据国家环境空气质量标准(GB3095—1996),西安市为二类区(城镇规划中确定的居住区、商业交通居民混合区、文化区、一般工业区和农村地区),执行二级标准(日均浓度标准: SO<sub>2</sub> 为 0.15 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> 为 0.12 mg/m<sup>3</sup>, PM<sub>10</sub> 为 0.15 mg/m<sup>3</sup>)。2010 年西安市 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 月平均浓度变化趋势较为一致,基本呈单峰型分布,特别是 SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> 月平均浓度随季节变化的规律较明显,体现在冬季采暖及春季干旱、多风沙阶段浓度增大,其中 PM<sub>10</sub> 在 11 月、12 月出现浓度超标现象,成为影响西安市大气环境质量的主要污染物(图 1)。

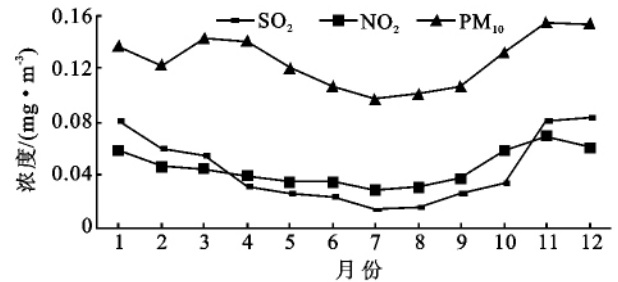


图 1 2010 年各污染物月平均浓度变化

1.2.2 空间变化特征分析 根据西安市各环境监测点监测数据,作出了各监测点监测要素月平均浓度分布图(图 2)。

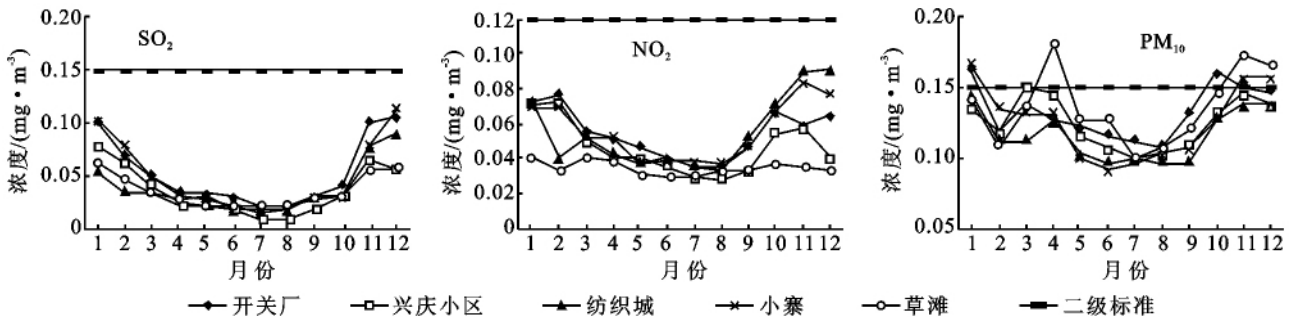


图 2 2010 年各监测点月平均浓度分布

由图 2 可见, SO<sub>2</sub> 各监测点变化趋势呈单峰型, 夏季各站点浓度最小, 尤其以草滩站点浓度最小; 冬春季浓度偏大, 尤以冬季明显。NO<sub>2</sub> 各监测点亦以夏季浓度最小, 冬春季浓度变化较大; 从全年的变化情况看, 草滩成为全年浓度最小的站点, 其次为兴庆小区。PM<sub>10</sub> 除草滩监测点 4 月份浓度变化突兀外, 其他各站点全年变化幅度较为一致, 基本呈现两头高中间低的变化趋势。

为了更好地解释各空气污染物浓度变化在各个

站点的分布情况, 本文选择节假日和工作日进行分析。节假日选择有代表性的 10 月 1—7 日和春节(2 月 13—19 日), 以兴庆小区和小寨为例; 工作日选择冬季和夏季, 以开关厂和纺织城为例。经对比分析发现, 节假日期间兴庆小区和小寨 SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 变化趋势基本一致, 小寨要略高于兴庆小区, 而 NO<sub>2</sub> 在小寨整体偏高, 特别在十一期间异常明显, 出现 10 月 6 日和 7 日均浓度高出兴庆小区 2 倍的现象。分析其原因主要与节假日期间商业区人流、车流量大, 扬尘及汽

车尾气排放有关;工作日期间冬季和夏季开关厂 SO<sub>2</sub> 均明显高于纺织城,这主要与开关厂监测点周围工业区分布比较集中有关,冬季 NO<sub>2</sub> 浓度纺织城要略高于开关厂,夏季趋势不明显,这主要与纺织城监测点周围分布的大量轻工业批发市场及客货运市场等车流集中有关,PM<sub>10</sub> 冬季和夏季均为开关厂高于纺织城,主要与开关厂附近大量工业生产排放有关。

1.3 空气污染指数

空气污染指数是将常规监测的几种空气污染物浓度简化为单一的概念性数值形式,并分级表征空气质量状况与空气污染的程度,适用于表示城市的短期空气质量状况和变化趋势<sup>[4]</sup>。

空气污染指数的确定原则:空气质量的好坏取决于各种污染物中危害最大的污染物的污染程度。是根据环境空气质量标准和污染物对人体健康和生态环境的影响来确定污染指数分级及相应的污染物浓度限值。目前,我国所用的空气指数分级及相应的污

染物浓度限值见表 1。

空气污染指数与各项污染物浓度的关系是分段线性函数,用内插法计算各污染物的分指数 I<sub>n</sub>,取各项污染物分指数中最大者代表该区域或城市的污染指数。该指数所对应的污染物即为该区域或城市的首要污染物<sup>[4]</sup>。本文通过计算确定 PM<sub>10</sub> 为西安市区首要空气污染物。表 2 给出了 2010 年西安市空气质量等级状况。

表 1 空气污染指数及相应的污染物浓度值

污染指数	污染物浓度(日均值)/(mg·m <sup>-3</sup> )			对应的空气质量级别
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	
50	0.05	0.08	0.05	I
100	0.15	0.12	0.15	II
200	0.80	0.28	0.35	III
300	1.60	0.57	0.42	IV
400	2.10	0.75	0.50	V
500	2.62	0.94	0.60	

表 2 2010 年环境空气质量状况(1—12 月)

空气质量级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I 级	—	2	1	1	1	—	1	5	1	2	—	—
II 级	21	19	23	24	29	30	30	26	28	21	21	19
III 级	9	7	5	2	1	—	—	—	1	8	9	11
IV 级及以上	1	—	2	3								1

注: I 级为优, II 级为良, III 级为轻微污染, IV 级为轻度污染,以此类推。

表 2 显示,西安市区 6—8 月空气质量优良,其余各月均有不同程度的污染。特别指出,4 月 26 日西安市空气污染严重,8:00 和 20:00 能见度仅为 6 km 和 12 km,为严重污染。根据典型日定义(地面出现最大日均浓度)本文选择 4 月 25—27 日作为典型日,结合该时段气象条件对其进行进一步分析。

2 大气污染与气象条件的关系

不同气象条件下,同一个污染源排放所造成的空气污染状况可能会相差甚远,这主要是由于在不同的气象条件下大气运动对污染物的稀释、扩散规律不同造成的。气象条件是影响污染物扩散的主要因子之一,包括风向、风速、大气稳定度、降水、太阳辐射等。

2.1 与大气稳定度的关系

边界层内气温的垂直分布与空气污染有密切的关系,而大气稳定度是反映大气温度垂直分布的重要参数。当大气层结不稳定时,热力湍流发展旺盛,对流强烈,污染物易扩散。当大气层结稳定时,湍流受到抑制,污染物不易扩散稀释,对城市空气质量将产生不利影响<sup>[5]</sup>。

根据帕斯奎尔稳定度分级法,本文计算了 2010

年全年逐日 24:00 大气稳定度,结果表明:西安市全年大气以较稳定—稳定为主;全年强不稳定时次共计 122 h,主要集中在中午 12:00—14:00;不稳定时次共计 1 522 h,主要集中在下午 15:00—18:00。

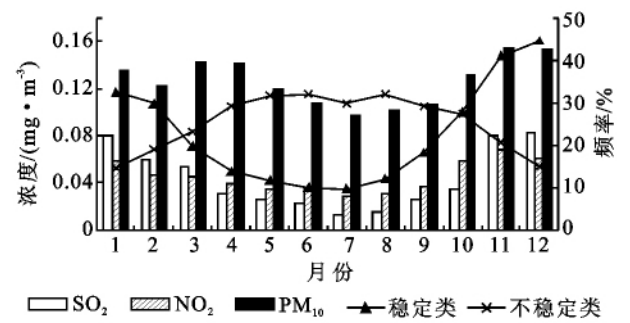


图 3 2010 年大气稳定度与污染物浓度变化情况

大气稳定度的频率随月份变化比较明显,稳定类在春夏季节频率较低,冬季频率最高,到 12 月份出现极大值,7 月份出现极小值;不稳定类在冬季频率最低,1 月份出现极小值,而夏季出现频率最高,6 月份出现极大值。如图 3 所示,2010 年 3—9 月间西安市大气不稳定类概率约 29.6%,稳定类概率约 13.6%,以不稳定类为主,而污染物的浓度随不稳定度频率的增加而减小,以 SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 变化较为明显,1 月、2 月、

10—12 月西安市大气以稳定类为主,此间各污染物的浓度相对较高,污染相对严重。

## 2.2 与风速的关系

风对污染物浓度的影响是非常显著的,在风力作用下排放到大气中的污染物质会逐渐被扩散和稀释<sup>[6]</sup>。本文利用西安市 2010 年地面逐时风速实测资料统计得出春、夏、秋、冬四季静风和小风( $0.3 \text{ m/s} \leq V < 1.5 \text{ m/s}$ )频率分别为 50.7%,47.9%,69.2%,65.6%(秋季因缺测 54 个时次造成频率偏高),秋、冬季静风和小风的频率在一年中偏大。在静风和小风条件下,空气扰动小,同样污染源排放的污染物质不易被扩散,造成在同等条件下,空气中污染物浓度略大。为了定量说明各污染物浓度变化与风速之间的关系,本文计算了各污染物浓度与日均风速之间的相关系数。结果显示,在  $\alpha=0.01$  的置信水平下, $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  与风速呈显著负相关(相关系数分别为  $-0.324$ ,  $-0.241$ ), $\alpha=0.1$  时, $\text{PM}_{10}$  与风速呈负相关(相关系数为  $-0.042$ )。此外春季是陕西一年当中沙尘天气较多的时期,文章着重对春季进行了相关分析,发现  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  与风速呈负相关(相关系数分别为  $-0.09$ ,  $-0.19$ ),而  $\text{PM}_{10}$  则与风速呈正相关关系(相关系数

为 0.15),分析其原因主要与春季北方沙尘天气自北向南带来大量颗粒物有关。

## 2.3 与降水之间的关系

降水对空气中的污染物质有一定的冲洗作用。经统计,2010 年有降水出现的天数中,降水对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  的稀释影响分别能够达到 62%、55.7%和 68.3%,有较强的稀释作用。本文将 2010 年降水分为 4 个等级,即  $0.1 \leq R < 1$ ,  $1.0 \leq R < 5.0$ ,  $5.0 \leq R < 10$ ,  $10 \leq R$ ,分别与降水当天污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  浓度和此后一天的浓度差值进行比较(表 3)。发现 1 mm 以下的日降水对污染物的稀释作用不明显,甚至出现浓度反弹现象;日降水在 1~5 mm 之间时对  $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  稀释作用很强, $\text{NO}_2$  次之;日降水在 5~10 mm 之间时对  $\text{PM}_{10}$  稀释作用最强;日降水量大于 10 mm 时反而对各污染物的稀释作用都相对减弱。出现这种现象的原因需要综合考虑其他影响污染的气象因子的作用,例如 7 月 15 日降水量为 28.7 mm,7 月 16 日未出现降水,各污染物浓度均增加。7 月 15 日气压为 961.5 hPa,相对湿度 99%,气温 22.2℃,风速 1.6 m/s,7 月 16 日气压降低、湿度减小、气温升高、风速减小,造成白天蒸发量大,大气扩散能力减弱,污染加重。

表 3 降水对污染物浓度稀释影响

污染物	$0.1 \leq R < 1$			$1.0 \leq R < 5.0$			$5.0 \leq R < 10$			$10 \leq R$		
	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_2$	$\text{PM}_{10}$
降水天数/d	14	14	14	35	35	35	13	13	13	17	17	17
24 h 浓度增加天数/d	9	9	8	9	11	9	4	6	2	7	8	6
24 h 浓度减少天数/d	5	5	6	26	24	26	9	7	11	10	9	11
浓度增加天数与总降水天数比值/%	64.3	64.3	57.1	25.7	31.4	25.7	30.7	46.2	15.4	41.2	47.1	35.3
浓度减少天数与总降水天数比值/%	35.7	35.7	42.9	74.3	68.6	74.3	69.3	53.8	84.6	58.8	52.9	64.7

## 2.4 典型日气象条件分析

本文根据典型日定义,选择 4 月 25—27 日作为典型时段进行分析。4 月 25—27 日陕西出现一次大风、沙尘天气过程。25 日在甘肃西部和内蒙古西部以及新疆北部到西伯利亚有一南北向的冷高压,内蒙古自治区的锡林郭勒盟附近有一低压中心,锡林郭勒盟经华北到四川为一东北西南向的低压带,陕西处于低压线密集带前沿,气压梯度大,同时高低空明显的急流和强的风速垂直切变及低空切变线的存在,为大风天气的形成提供了动力机制<sup>[7]</sup>。大风携带沙尘自北向南,增加了西安地区空气中的颗粒物浓度,这点可以很好地解释在空间分布上草滩站点(位于西安市最北的监测点)的  $\text{PM}_{10}$  在 4 月份异常偏高的原因(图 1)。而这一时段西安市大气主要以稳定为主。期间日均风速自 3.1 m/s 降至 1.6 m/s,受本地气象条件限制,外来污染物并未得到有效的稀释和扩散,造成

这一时段西安地区空气污染严重。

同时 4 月 25 日西安出现小雨(1.5 mm),但因北方大风沙尘影响, $\text{PM}_{10}$  污染物的浓度不降反升,并在 26 日迅速升至全年最高。

由此可见,一个地区的空气污染现状不仅取决于本地污染源,还受外地源的影响<sup>[8]</sup>。而在本地不利气象条件的制约下,相同污染源和排放量对环境空气的影响程度会更加严重。

## 3 大气环境容量

大气环境容量与污染性质、气象条件等有密切关系。本文采用前述方法估算西安市的理想大气环境容量,计算周期为 1 a。根据气象条件,西安市混合层平均高度取 769 m<sup>[2]</sup>,取 2010 年降水量为 504.4 mm/a;2010 年均风速取 1.4 m/s。 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  年平均环境质量浓度标准值分别为 0.06、0.08、0.1 mg/m<sup>3</sup>。

经计算,2010年西安市 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 理想环境容量分别为 $9.6 \times 10^4$ 、 $12.06 \times 10^4$ 、 $16.31 \times 10^4$  t/a。 $\text{SO}_2$ 年排放量远大于其环境容量,处于超负荷状态, $\text{NO}_2$ 略有盈余(参考西安市人民政府关于下达我市“十二五”主要污染物总量削减任务的通知(市政发(2011)102号)), $\text{PM}_{10}$ 暂无可参考依据。由于年内静风和小风频率较高,降水日数及降水量较多年均值偏少,排放到大气中的污染物得不到及时扩散与稀释,造成环境容量的高利用率甚至超负荷现象。

## 4 结论

(1) 2010年西安市 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 月平均浓度变化趋势基本一致,呈两头高中间低的趋势,其中 $\text{PM}_{10}$ 在11月、12月出现超标现象(二级标准)。从空间分布看,以小寨为代表的商业区在节假日各污染物浓度高于以兴庆小区为代表的居住区;以开关厂为代表的工业区在工作日 $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 均高于以纺织城为代表的轻工业区,而 $\text{NO}_2$ 则出现纺织城浓度高于开关厂的现象;从全年的变化情况看,草滩成为全年浓度最小的站点。

(2) 通过大气稳定度、风速与污染物浓度变化相关分析表明,大气稳定度越强,风速越小,污染物越不易被稀释扩散。风速与 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 呈显著负相关;与 $\text{PM}_{10}$ 负相关性略弱,而在春季有较明显正相关。

(3) 降水对 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 的稀释影响分别能够达到62%,55.7%,68.3%,有较强的稀释作用。

在日降水量小于1 mm时污染物浓度出现增大现象,日降水量大于10 mm时对各污染物的稀释作用都相对减弱。通过典型日分析,发现受本地不利气象条件限制,外来污染源将加重污染程度。

(4) 计算大气环境容量。受气象条件的综合影响,西安市污染物排放造成环境容量的高利用率甚至超负荷现象。

参考文献:

- [1] 张侠,王繁强,杜继稳.西安大气环境要素变化特征分析[J].内蒙古环境科学,2009,21(6):63-68.
  - [2] 张军.基于修正A值法的西安市大气环境容量估算[J].干旱区资源与环境,2011,25(1):127-129.
  - [3] 张艳,王体健,胡正义,等.典型大气污染物在不同下垫面上干沉积速率的动态变化及空间分布[J].气候与环境研究,2004,9(4):591-604.
  - [4] 任阵海,苏福庆,高庆先,等.边界层内大气排放物形成重污染背景解析[J].大气科学,2005,29(1):57-63.
  - [5] 朱敏,王体健,卢兆民.一次持续空气污染过程的气象条件分析[J].气象科学,2008,28(6):674-677.
  - [6] 李小平,司瑶冰,杨武杰.呼和浩特市冬季气象条件对空气质量的影响[J].干旱区资源与环境,2009,23(4):136-139.
  - [7] 刘国生,雷斌,李萍云.2010年4月下旬一次大风、沙尘天气个例分析[C]//陕西省气象学会.2010年全省气象学术交流会议论文集.西安:陕西气象出版社,2010:27-29.
  - [8] 朱敏,王体健,李淑玲,等.淄博市污染气象特征与大气环境容量[J].南京气象学院学报,2007,30(3):312-319.
- (上接第256页)
- [6] 李锦秀,肖洪浪,任娟.阿拉善盟地区水资源与生态环境变化及其对策研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(11):56-61.
  - [7] Oudm H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996: 20-50.
  - [8] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
  - [9] 陆宏芳,蓝盛芳,李谋召.农业生态系统能值分析方法研究[J].韶关大学学报,2000(8):74-78.
  - [10] Meillaud F, Gay J B, Brown M T. Evaluation of a building using the emergy method[J]. Solar Energy, 2005,79(2):204-212.
  - [11] 辛琨.生态系统服务功能价值计算:以辽宁省盘锦地区为例[D].沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所,2001.
  - [12] 魏学占,吴瑞芬.额济纳旗近47年气候变化特征分析[J].内蒙古气象,2008(6):5-8.
  - [13] 敖民德力根.调水后额济纳绿洲生态环境的变化及其保护措施[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2007.
  - [14] 唐仲霞,刘泽华,柯君,等.青海湖湿地生态系统服务价值分析[J].青海师范大学学报:自然科学版,2007(4):81-83.