

城市空气质量短期统计预报

文 慧

陈爱忠

(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

(广东省深圳市环境科学研究所,深圳 518008)

林楚雄 马 兵

(广东省深圳市环境保护监测站,深圳 518008)

摘要 文章通过污染物浓度时间序列的持续性和气象要素的相似性,进行了城市空气质量短期统计预报可行性分析。以深圳城市空气中可吸入性颗粒物的污染指数预报为例,发展了一个基于 MM5 输出量的自适应统计模式,该预报方法在预报量本身的持续性水平上,预报效果改进 15%左右,效果显著。该方法克服了常规预报方法的地域限制,只要积累足够量的污染场资料和气象要素资料,就可以自动、客观地完成具有一定准确度的空气质量短期业务预报。

关键词 空气质量 空气污染预报 可预报性

引言

空气污染是目前全球最为关注的环境问题之一^[1]。伴随着中国区域经济发展,一些大中城市的空气质量有恶化的趋势^[2~3]。出于健康安全等方面的考虑,人们也越来越关心所居住城市的环境空气质量。为了向公众及时、准确、全面地提供未来有限时段内空气污染变化的信息,开展城市空气质量短期预报十分必要^[4]。

目前城市空气质量短期预报主要有三类方法:污染潜势预报、统计预报和数值预报。污染潜势预报只能提供定性或者半定量的结果,不能满足现在的业务预报需要。数值预报是用数值计算方法求解物质守恒方程,或者简化方程形式,以求得未来短期内污染物的时空散布特征。但是,由于城市空气质量预报的复杂性,数值预报理论发展不够完善,而且缺少可靠的污染实时排放数据,数值预报仍处于研究阶段。统计预报方法,尽管缺少确定性污染机理,但是简单有效。从国内各城市现有资料、资源,以及

预报准确度上讲,统计预报还是当前空气质量短期业务预报的一种有效方法^[4~5]。

常规的空气质量短期统计预报,几乎都采用历史气象监测资料和污染物浓度建立拟合方程,而预报时用的气象场是每日天气预报^[6~12]。由于气象资料的拟合和预报间存在一定的系统误差,会传递到空气质量预报中。对于一般城市而言,每日天气预报是会商的结果,主观性强,由此建立空气质量预报也在一定程度上带有主观性。本文利用 MM5 输出结果进行拟合和预报,消除了气象资料在拟合和预报时的系统偏差,而且结果完全客观化。这种方法,不受地域和污染物种类限制,只要积累足够的污染物浓度时间序列资料和同期 MM5 对该城市气象场的预报资料,就可以自动、客观地完成具有一定准确度的空气质量短期业务预报。

将此方法应用于深圳城市空气中可吸入颗粒物(PM_{10})污染指数 I_{AP} 预报中,结合污染物浓度序列的持续性,气象要素跟污染物浓度的相似性,进行了一般意义上城市空气质量短期统计预报的可行性分析。

国家自然科学基金和香港研究资助局联合项目 49910161986 资助

收稿日期:2002 年 5 月 15 日;定稿日期:2002 年 7 月 4 日

作者简介:文慧,男,1976 年出生,北京大学物理学院大气物理与大气环境专业硕士研究生

1 分析和预报方法

1.1 零阶量的持续性分析

在常规的空气品质短期统计预报中,一般是根据一种预报方法在一个城市的空气质量预报中的结果来衡量这种方法的预报水平^[14]。事实上,一个特定的预报结果包括了预报方法的预报水平和该地空气质量预报本身难易程度两个因素的影响。为了合理地评论一种预报方法的预报水平,有必要从最终的预报结果中剔除该城市空气质量预报的难度因素。本文采用污染物浓度序列的持续性来衡量城市空气质量预报难易程度。

序列的持续和变动是相对的,波动范围小的称作持续,波动范围大的称作变动。本文将持续性序列认可的最大波动范围定义为参数 $S (S > 0)$, 序列 $\{Y_0(t) | t=1, 2, 3, \dots, n\}$ 中, 满足公式(1)的样本在全部样本中所占的比率 $P(S)$, 来衡量序列的持续性水平。

$$|Y_0(t) - Y_0(t-1)| < S \quad (1)$$

在污染排放变化不大的假设下, 污染物浓度可认为是平稳序列, t 时次的一阶自回归预报量 $\hat{Y}_0(t)$ 等于 $t-1$ 时次的污染物浓度 $Y_0(t-1)$:

$$\hat{Y}_0(t) = Y_0(t-1) \quad (t > 1) \quad (2)$$

序列持续性水平 $P(S)$ 与滞后一个时次的自相关系数正相关: $P(S)$ 越大, 滞后一个时次的自相关函数也越大, 采用一阶自回归模式进行预报的预报准确度也越高。如果将持续性序列认可得最大波动范围 S 和污染物浓度预报允许的最大偏差结合起来, 污染物浓度序列的持续性水平 $P(S)$ 就可以显示城市空气质量预报难易程度。

以当前的城市空气污染指数短期预报来说, 国家标准要求业务预报对外发布的首先是针对 I_{AP} 的模糊等级: 优 ($I_{AP} < 50$)、良 ($51 < I_{AP} < 100$)、轻度污染 ($101 < I_{AP} < 200$)、中度污染 ($201 < I_{AP} < 300$)、重度污染 ($I_{AP} > 301$); 在实测 I_{AP} 等级和预报 I_{AP} 等级一致的情况下, 预报 I_{AP} 和实测 I_{AP} 差异不大于空气污染指数预报最大偏差时, 则认为 I_{AP} 预报准确。因此, 参数 S 可以选择业务预报允许的最大偏差 S_{GB} , 比如空气污染指数预报系统中 S_{GB} 为 10。

$$S = S_{GB} \quad (3)$$

这种参数选择下的持续性水平 $P(S_{GB})$ 约等于 (不分预报等级的情况下完全等于) 一阶自回归预报的预报水平。一阶自回归预报是没有任何技术性设计的预报措施, 代表该序列预报本身的难易程度, 因此这种参数选择的持续性水平代表了这种预报本身的难易程度。

从一般意义上来说, 参数 S 的选择可以超越业务预报允许的最大偏差这类统一指标。因为空气质量预报本身是一个局地系统, 各地污染物浓度资料本身的离散程度不一样, 预报偏差的允许范围也不应该使用统一的指标。更合理的考虑是参数 S 的选择包含了序列本身离散程度的影响, 比如污染物浓度的标准差 σ 作为参数 S 值, 与此对应的持续性水平 $P(\sigma)$ 剔除了序列本身离散度对它的干扰, 可以更加合理地衡量该污染物浓度可预报性的难易程度。

$$S = \sigma \quad (4)$$

对一种预报方法预报水平的评价, 是评价使用该方法后空气质量预报结果在污染物浓度序列的持续性水平 $P(S_{GB})$ 或者 $P(\sigma)$ 上的改进。

1.2 一阶量的相似预报

本文将预报量 $Y(t)$ 分解成零阶量 $Y_0(t)$ 和一阶量 $Y_1(t)$:

$$Y(t) = Y_0(t) + Y_1(t) \quad (t > 1) \quad (5)$$

$$Y_0(t) = Y(t-1) \quad (t > 1) \quad (6)$$

$$Y_1(t) = Y(t) - Y(t-1) \quad (t > 1) \quad (7)$$

零阶量由前一时次的监测量进行一阶自回归预报, 这个过程是完全确定的 (见公式(2)); 空气质量短期预报中起关键作用的是一阶量预报。本文假定: 污染物浓度的变化, 即一阶量 $Y_1(t)$, 与气象环境场在 t 时次和 $t-1$ 时次之间的变化场 $D(t)$ 显著相关, 如公式(10); 气象环境变化场对一阶量的贡献

$Y_1[D(t)]$ 等于气象环境变化场各分量 $D_i(t)$ 对一阶量贡献的合成, 即 t 时次和 $t-1$ 时次之间气象环境场中各要素的变化对一阶量贡献 $Y_1[D_i(t)]$ 的合成, 如公式(11), 具体的合成办法请参考 1.3 节预报集成部分。

由此可得, 一阶量预报量 $\hat{Y}_1(t)$ 如公式(12)所示。其中, t 时次气象环境场为 $X(t)$, $t-1$ 时次气象污染环境场为 $X(t-1)$, $t > 1$, $i=1, 2, \dots, n$; 气象环境变化场记作 $D(t)$, 变化场分量 $D_i(t)$ 等于对应场各分量的变化, 如公式(9); 在历史样

本中与 $D(t)$ 相似的气象环境变化场记作 $D(t)$, 对应污染物浓度变化量 $Y_1[D(t)]$; 在历史样本中与 $D_i(t)$ 相似的气象环境变化场分量记做 $D_i(t)$, 对应污染物浓度变化量 $Y_1[D_i(t)]$;

$$D(t) = X(t) - X(t-1) \quad (8)$$

$$D_i(t) = X_i(t) - X_i(t-1) \quad (9)$$

$$Y_1(t) \propto D(t) \Rightarrow Y_1(t) = Y_1[D(t)] \quad (10)$$

$$Y_1[D(t)] = \sum_{i=1}^n Y_1[D_i(t)] \quad (11)$$

$$\hat{Y}_1(t) = \sum_{i=1}^n Y_1[D_i(t)] \quad (12)$$

1.3 预报集成

气象环境变化场对污染物浓度变化的贡献由各分量的贡献合成, 但是无法确切知道影响污染物浓度变化的气象环境变化场。根据空气质量预报的经验知识可以为预报系统准备若干前兆因子, 选择其中与预报量显著相关的作为预报因子, 近似认为影响污染物浓度变化的气象环境变化场各分量就是这些预报因子, 但是由于这些预报因子不是相互独立的, 公式(11)中各分量对污染物浓度变化贡献的合成不能进行简单的叠加, 本文选择各预报因子对污染物浓度变化贡献的预报集成。

每个预报因子对污染物浓度变化单独的贡献算作一条预报路径。针对每个时次 t 的预报, 选择紧靠 t 时次的前 N 个时次作为试预报, 对试预报中各预报路径预报效果的好坏进行评分。第 i 个路径在第 j 次试预报中预报值为 $Y_i(j)$, 实际监测值为 $Y_1(j)$, 单路径单次试预报得分 S_{ij} 与其预报偏差绝对值成反比, 如公式(13); 试预报的时次和 t 的时间间隔距离为 $N-j$, 该预报路径在 N 次试预报中的总得分 S_i , 由单次试预报得分 S_{ij} 加权累加, 如公式(14)。权重 $\rho(j)$ 与间隔时间距离 $(N-j)$ 负相关如公式(15)。因此, 单预报路径 i 在 N 次试预报中预报效果 S_i 如公式(16)所示。

$$S_{ij} = \frac{1}{|Y_i(j) - Y_1(j)|} \quad (13)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^N [S_{ij} \times \rho(j)] \quad (14)$$

$$\rho(j) = N - (N - j) = j \quad (15)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^N [S_{ij} \times \rho(j)] =$$

$$\sum_{j=1}^N [S_{ij} \times j] = \sum_{j=1}^N \left| \frac{j}{Y_i(j) - Y_1(j)} \right| \quad (16)$$

试预报的次数 N 叫作评分天数。

根据 N 次试预报中各路径预报效果选择其中的 M 个表现最好的路径, 它们在 t 时次预报结果的平均值作为最终集成预报结果。 M 成为优化路径数。

选择不同的 N 和 M 值, 得到不同的集成预报结果。这些结果中, 在污染物浓度序列持续性水平上的最大改善所对应的 N 和 M , 称作最优评分天数和最佳预报路径数。这样, 在最终的集成预报结果中, 用这两个值为集成预报的参数。

2 预报模式发展

2.1 准备前兆因子

空气污染是一个非常复杂的系统, 从污染源排放到扩散输送、大气中的转化, 再到沉降, 影响因素众多, 包括前期污染场分布、同期污染源排放、同期气象场作用。尽管目前对空气污染中各种因素的作用有所研究, 但是仍还不够完全, 因为这种作用有确定对应关系的一面, 也存在不确定的一面, 比如说降水对可吸入颗粒物 PM_{10} 浓度的影响, 总的效果来看降水导致 PM_{10} 浓度降低, 但在降水量很小时, 由于雨滴在大气中的蒸发, 悬浮粒子量会在一定程度上增加; 相同日累积降水量下不同的降水持续时间, 结果也会相差很大; 甚至在几乎类似的气象环境场配置下, 污染物浓度也会有不小的变化幅度。这种不确定性的信息在确定性系统中就是干扰, 设计预报时通过统计方法尽可能的剔除那些对空气污染指数准确预报的干扰因素。

以深圳空气中 PM_{10} 的污染指数预报为例, 从 PM_{10} 的演化机理和因子普适性角度出发, 初步选择 $MM5$ 输出量中的以下变量作为前兆因子供预报系统筛选, 如表 1。

表 1 深圳城市空气中 PM_{10} 污染指数预报的前兆因子

气象要素日最小值 逐日变化	气象要素日最大值 逐日变化
X_{01} : 日最低温度	X_{06} : 日最高温度
X_{02} : 日最低湿度	X_{07} : 日最高湿度
X_{03} : 日最低气压	X_{08} : 日最大气压
X_{04} : 日最低混合层高度	X_{09} : 日最高混合层高度
X_{05} : 日最小风速	X_{10} : 日最大风速

续表 1

气象要素日平均值 逐日变化	气象要素日平均值逐日 变化对应的 I_{AP} 变化
X_{11} :日平均东西方向风速	X_{22} :大气温度日平均值对应 I_{AP}
X_{12} :日平均南北方向风速	X_{23} :大气湿度日平均值对应 I_{AP}
X_{13} :日平均大气温度	X_{24} :垂直运动速度日平均值 对应 I_{AP}
X_{14} :日平均日大气湿度	X_{25} :气压日平均值对应 I_{AP}
X_{15} :日平均垂直运动速度	X_{26} :混合层高度日平均值对 应 I_{AP}
X_{16} :日平均气压	X_{27} :稳定度类型日平均值对 应 I_{AP}
X_{17} :日平均混合层高度	X_{28} :紫外辐射日平均值对应 I_{AP}
X_{18} :日平均稳定度类型	X_{29} :风速日平均值对应 I_{AP}
X_{19} :日平均紫外辐射	X_{30} :日模糊主风向对应 I_{AP}
X_{20} :日平均风速	X_{31} :日累积降水模糊等级对 应 I_{AP}
X_{21} :排放源星期变化	

2.2 挑选预报因子

从预报信息完整的角度上讲,前兆因子越多越好。但是这些前兆因子是根据经验主观选择的,有些因子可能与预报量的相关程度很低,剔除与预报量不是显著相关的前兆因子,则可一定程度地淘汰冗余信息。与预报量显著相关的前兆因子作为预报因子进入预报系统。

在深圳 PM_{10} 的污染指数统计预报中,进行前兆因子和预报量的相关性检验。样本容量 n 为 271, 90%置信度下 (α 为 0.1), 根据公式 (17) 计算相关系数 $r(Y, X_i)$ 对应的统计量, 该因子与预报量显著相关的假设是检验统计量 t 满足公式 (18), t_0 为检验统计临界值。

$$t = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \quad (17)$$

$$t \geq t_0 = t(n-2, \alpha) = t(269, 0.1) = 1.65 \quad (18)$$

2.3 发展模式

将历史资料划分成拟合样本和检验样本。在拟合样本中统计各种气象要素场配置下对应的污染物浓度变化,进行相似预报:由每一个预报因子建立单要素回归方程;将所有因子一起进行逐步回归,得到逐步回归方程;将所有因子都引入预报方程,得到一个回归方程;根据持续性,直接将预报日前一日的污染物浓度当作预报日浓度进行预报。这样一共得到预报因子数加 3 个预报方程,每个预报方程就是一条预报路径,以此为基础进行预报集成。

根据 1.3 节所述,本文中每次集成预报都有一组集成参数: N 和 M , N 为评分天数, M 为优化路径数。对于任意一组集成参数都有一个预报准确度,根据它在对应资料持续性水平上的改善幅度,挑选最佳的预报集成参数:最优评分天数 N_B 和最佳预报路径数 M_B 。本文仍以深圳城市空气中 PM_{10} 的污染指数预报为例进行预报集成。

表 2 深圳市 PM_{10} 污染指数预报的预报因子及其与预报量的相关系数

前兆因子	相关系数	前兆因子	相关系数
X_{01} :日最低温度逐日变化	0.210	X_{22} :温度日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.552
X_{04} :日最低混合层高度逐日变化	-0.207	X_{23} :湿度日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.553
X_{05} :日最小风速逐日变化	-0.217	X_{24} :垂直运动速度逐日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.528
X_{06} :日最高温度逐日变化	0.210	X_{25} :气压日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.580
X_{10} :日最大风速逐日变化	-0.289	X_{26} :混合层高度日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.491
X_{12} :日平均南北方向风速逐日变化	0.237	X_{28} :紫外辐射日平均值逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.547
X_{13} :日平均大气温度逐日变化	0.237	X_{29} :日平均风速逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.499
X_{17} :日平均混合层高度逐日变化	-0.178	X_{30} :日模糊主风向逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.176
X_{19} :日平均紫外辐射逐日变化	-0.333	X_{31} :日累积降水模糊等级逐日变化对应 I_{AP} 变化	0.343
X_{20} :日平均风速逐日变化	-0.288		

个例中有大约一年的历史资料,共 271 个样本,19 个预报因子(表 2)可以构成 22 条预报路径。由于样本容量太小,不适合固定地划分拟合样本和检验样本,对于特定的集成参数 N 和 M ,循环对样本做预报检验 $Y_1(t)$ ($t > N$),用其前面的 $t - N$ 到 $t - 1$ 之间的样本做试预报,去除试预报样本和预报检验样本之外的所有样本拟合预报方程(22 个)。用公式(16)对每次的试预报中各个预报路径评分,选择其中最优的 M 条预报路径在预报检验样本中预报值的平均值为集成预报结果。在一定范围内变化集成参数 N 和 M ,根据预报集成结果在持续性水平上的提高,选择最优的集成参数。如果选用业务预报允许最大偏差 10 以内,全年尺度上,最佳评分天数 $N=13$,最优路径数 $M=2$ 时,对 PM_{10} 的指数集成预报改进效果最好,可以从序列持续性水平的 47.7% 提高到 55.8%,有一定的改善。

3 模式预报结果讨论

3.1 无气象要素预报和有气象要素预报

如果污染物浓度序列足够长,可以直接用污染物序列自身的结果进行预报。这种没有气象要素输入的预报,与有气象要素输入的预报效果作对比,可以衡量出气象要素预报场在空气质量预报中的作用。

以深圳 PM_{10} 的污染指数预报为例,进行有、无气象要素输入的预报准确度对比。由于资料跨度一年,但是缺测样本很多(缺测率 130/400),这样的序列很难做时间序列分析,持续性水平 $P(S)$ 近似看作一种时间序列分析预报准确度水平;与之相对应的是根据 MM5 对该地气象要素预报序列预报,代表这种方法预报水平的是对所有要素进行逐步回归拟合的预报方程预报准确率。

表 3 无气象要素预报和有气象要素预报对比

项目	S 取业务预报 允许最大偏差	S 预报量序列 标准差
	$S = S_{max} = 10.5$	$S = \sigma = 19.2$
无气象要素预报准确度 (近似用持续性水平代替)	47.3 %	73.4 %
有气象要素预报准确度 (用 MM5 预报气象要素)	52.7 %	79.5 %

从表 3 结果看来,有气象要素的单方程预报可以提高 6% 的水平。

3.2 单一路径预报和多路径预报集成

该方法的关键是通过单一路径预报集成最优预报。如果最大限度地利用经验知识,构建跟污染机制关联度最高的单一路径,尝试不同的评分办法,该方法的预报水平还可以得到改善。

在深圳 PM_{10} 污染指数预报中,只是用了 MM5 输出场作为预报因子,没有从污染机理上设计跟预报量相关度最大的组合量作预报因子。从评分上讲,也只是简单的偏差和时间距离作为权重的累加。尽管这种集成方法是简单的,由此仍然可见多路径预报集成在预报上的改进。该例中多路径预报集成相对单路径预报平均预报水平提高了大约 8%,即使针对预报效果最优的单路径改善量也在 3% 左右,见表 4。

表 4 单路径预报和多路径预报准确度对比 %

	S 取业务预报 允许最大偏差	S 取预报量 序列标准差		S 取业务预报 允许最大偏差	S 取预报量 序列标准差
	$S = S_{max} = 10.5$	$S = \sigma = 19.2$		$S = S_{max} = 10.5$	$S = \sigma = 19.2$
	47.7	75.4		48.1	73.9
	48.1	71.6		45.7	74.6
	46.5	72.4		44.6	76.5
	50.0	72.4		49.6	70.5
	50.0	75.0		46.9	73.9
	47.7	70.1		45.3	72.8
	47.7	74.6		44.6	68.7
	47.7	72.0		45.3	72.8
	46.9	73.9		52.7	78.0
	48.1	70.5		50.4	75.7
	47.7	74.3		47.3	72.0
平均值	47.7	73.3	最大值	52.7	79.5
多路径预报集成	55.8	78.4			
持续性水平 $P(S)$	47.3	72.0			

3.3 固定参数集成和适应性参数集成

不同时期,控制污染形势的主导天气系统不一样,污染物浓度序列的持续性水平是不一样的,预报集成相当于一阶量上的持续性,这种持续性也可能发生变化。因此,集成参数在序列中不取固定的值,采取适应性的变化,预报效果将可能改善。

以深圳 PM_{10} 的污染指数预报为例,对比固定参数集成和适应性参数集成。在 1.3 节预报方法中,增加一个检测样本量 L ,在对 $Y_1(t_0)$ 进行预报时($t_0 > N + L$),取出紧靠它前面的 $N_{max} + L$ 样本(作

为检验样本)和 $Y_1(t_0)$,其余资料用作拟合样本得到各预报路径的预报方程。通过对紧靠 $Y_1(t_0)$ 的 L 个样本的不同参数集成效果进行评价得到局地

最优集成参数,用这组参数预报 $Y_1(t_0)$ 。固定参数集成和适应性参数集成效果对比见表 5。

表 5 固定参数集成和适应性参数集成预报准确度对比

		S 取业务预报允许最大偏差 $S = S_{\max} = 10.5$	S 取预报量序列标准差 $S = \sigma = 19.2$
固定参数集成	预报效果	55.8	78.4
	持续性水平	47.3	72.0
适应性参数集成	预报效果	61.7	82.8
	持续性水平	47.6	71.7

由这个例子可知,适应性参数集成预报的改进是显著的,由固定参数预报的 55.8% 提高到了 61.7%。

4 结语

(1) 利用 MMS 输出结果,根据气象环境和污染物浓度的相关关系进行预报是可行的。这种方法在持续性水平基础上的改进大约在 15% 以内。其预报效果可以基本满足目前公众对空气质量短期预报的要求,最大的优点是客观。该方法存在一定局限性,其预报水平依赖于气象要素预报的准确性及其污染物序列的持续性水平。

(2) 污染物序列的持续性是城市空气质量可预报的基础。对某种预报方法的评价应该评价其预报效果在持续性水平上的改善幅度。

(3) 单一气象要素对空气质量预报水平有限,通过试预报的评分集成可以在一定程度上提高预报准确度。但是业务预报中应该增加更多的污染机理,设计更加有效的单路径预报因子,以此来改善整个预报水平。

(4) 预报方程对天气系统变化的适应性调整是必要的,本文采用的预报方程,及其由单一预报路径的集成都采用自动适应调整的机制,改进效果显著。

致谢:香港科技大学海岸和大气研究中心的刘启汉博士,北京大学大气科学系秦瑜教授对此项工作进行了细致的指导,在此致谢。

参考文献

- 1 Helmut Mayer. Air pollution in cities. *At mos. Environ.*, 1999, 33: 4029 - 4037
- 2 徐华英.我国空气污染状况及其对人体健康的影响.气候与环境研究,1999,4(1): 56 - 60
- 3 朱建平.中国 1998 年度环境质量状况.环境监测管理和技术,1999,11(5): 19 - 22
- 4 韩志伟,张美根,雷孝恩,等.城市空气污染数值预报试验.气候与环境研究,1999,14(3): 283 - 290
- 5 徐大海,朱蓉.大气平流扩散的箱格预报模型与污染潜势指数预报.应用气象学报,2000,11(1): 1 - 12
- 6 张静,秦寿根,陈征,等.用微机进行大气环境污染预测的研究.环境与开发,1995,10(1): 27 - 30
- 7 黄磊,王赐震,王建华,等.青岛市大气污染时间序列分析预报方法研究.青岛海洋大学学报,2001,31(1): 14 - 20
- 8 魏生生,林学范.北京城区空气污染浓度长期预测.气象,1999,25(1): 43 - 47
- 9 王建华,于鹏,郭素荣.青岛市空气污染统计预报方法研究.青岛大学学报,1999,14(4): 60 - 62
- 10 李蕙兰,谢兵,刘从荣,等.沈阳市大气污染综合指数预报.中国环境监测,1997,13(6): 33 - 36
- 11 周势俊.大连市空气污染预测预报统计方法的研究.环境保护科学,2000,26(4): 34 - 36
- 12 李琼,李福娇,叶燕翔,等.珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系.热带气象学报,1999,15(4): 363 - 369
- 13 吴兑,邓雪娇.环境气象学与特种气象预报.北京:气象出版社,2001
- 14 黄嘉佑.统计动力分析与预报.北京:气象出版社,1993