

文章编号: 1006-4354 (2003) 02-0024-04

城市空气污染指数预报方法研究

张雅斌, 陈卫东, 梁新兰, 高菊霞

(宝鸡市气象局, 陕西宝鸡 721006)

摘要: 借鉴自动控制、经济和气象领域中广泛使用的马尔可夫随机过程理论, 考虑了天气变化与气象要素对空气污染物浓度变化的影响, 提出了新的空气污染物业务预报方法。该方法对各地区气象与环保部门联合进行城市空气污染指数的预报工作具有实际意义。

关键词: 空气污染指数; 马氏链; 转概阵; 概率分布

中图分类号: R122.7

文献标识码: A

寻找一个有效的空气质量预报方法, 对气象和环保部门进一步开展空气污染物的预报工作是很有意义的。马氏链是概率统计工作中, 对某一系统所处各个状态之间的动态转移规律进行研究的方法。少数空气质量预报部门已经将该概念引入空气污染物的定性预报中。但在应用过程中, 没

有考虑天气背景对污染物扩散的影响, 方法过于简单, 难以在实际业务工作中精确描述空气质量状况的演变过程。马氏链模型在以往天气现象的出现、天气过程的持续以及天气形势的转变等研究工作中已经取得了较好的结果。借鉴这一数学模型, 结合天气演变, 对实际工作中空气污染物

收稿日期: 2002-10-31

作者简介: 张雅斌 (1976-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 助工, 从事天气预报工作。

表 1 紫外线强度等级表

等级	指数值	影响	程度	服务用语
1	$0 \leq Y \leq 2.0$	安全	最弱	不需要采取防护措施
2	$2.0 < Y \leq 4.0$	较安全	弱	可以适当采取防护措施, 如涂擦防护霜等
3	$4.0 < Y \leq 7.0$	轻度有害	中等	外出时戴好遮阳帽、太阳镜和太阳伞等, 涂擦 <i>SPE</i> 指数大于 15 的防护霜
4	$7.0 < Y \leq 9.0$	有害	强	外出时戴好遮阳帽、太阳镜等, 涂擦 <i>SPE</i> 指数大于 15 的防护霜, 10:00—16:00 避免外出, 或尽可能在遮阴处
5	$Y > 9.0$	极有害	很强	尽可能不要在室外活动, 必须外出时, 要采取各种有效的防护措施

3 讨论

紫外线指数对于指导人们避免紫外辐射过度具有重要作用, 但在计算方面尚需改进, 应当考虑更加真实的大气状况和地面状况。由于影响到地面紫外辐射的因素较多, 如 SO_2 、地表反照率、臭氧垂直分布等, 而公式 (4) 并没有考虑, 以后随着紫外线监测网的建立, 用实际观测值对预报做出统计检验, 在此基础上进一步改进预报方程, 并开发多种预报方法, 作出更准确、精细

的紫外线指数预报, 更好地为公众服务。

参考文献:

- [1] 周秀骥. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [2] 张庆阳, 张沅, 胡英. 国外紫外线指数预报概况 [J]. 气象, 2000, 26 (11): 56-57.
- [3] 张书余. 城市环境气象预报技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [4] 吴 兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2001.

的预报问题进行深入探讨,提出了科学实用的预报流程及相关算法。

1 马氏链与状态转移矩阵

1.1 概念的引入

空气污染物未来的状态只与该时刻所处状态有关,与前一时刻所处状态无关(即无后效性),符合马尔可夫随机过程^[1]。马氏链指时间离散、状态离散的马氏过程。为叙述方便起见,只将空气污染程度所处的状态 i 划分为优,良,中度污染 3 种状态,对应为: $i=1,2,3$ 。3 种污染状态的转移概率描述了各个状态之间演变趋势。在一个马氏链中,系统状态的转移可以是系统中任何一种状态转移到另一种状态或与自身相同的状态。如果把状态随时间由 $i=1,2,3$ 经一步转移变化到状态 $j=1,2,3$ 的可能性大小,称为转移概率,记为 P_{ij} :

$$P_{ij} = p(A_j/A_i) \quad i, j=1, 2, 3$$

由此可组成这个系统的一步转移概率矩阵,简称转移矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \text{ 其中, } P_{ji} > 0, i, j=1, 2, 3$$

1.2 转移概率的求解

以往研究中,某天气背景下空气污染物由状态 i 向状态 j 的转移概率是由定义求解的:

$$P_{ij} = \lim_{N_i \rightarrow \infty} \frac{N_{ij}(\text{某天气下,污染物是 } i \text{ 状态,一天后转化为 } j \text{ 状态的次数})}{N_i(\text{某天气下,污染物是 } i \text{ 状态的次数})}$$

方法的缺点是:大多数地区级空气检测站的连续资料很少,理论上等式很难成立。新的转移矩阵的求解方法不受所选择的样本个数限制,同时可以由固定的最优算法一次求得系统各个状态之间演变的转移矩阵 P 。

研究起始 n 时刻污染物所处状态的概率分布为 $A^n = (a_1^n, a_2^n, a_3^n)$, 经过一步转移后 $n+1$ 时刻的概率分布则可表示为: $A^{n+1} = (a_1^{n+1}, a_2^{n+1}, a_3^{n+1})$ 。污染物状态发生一步 (1 d) 变化,由定义可用矩阵关系式描述如下:

$$A^n P = A^{n+1} \quad (\text{a})$$

其中, $\sum_{j \in S} P_{ij} = 1, S = \{1, 2, 3\}$ 表示污染物浓度所处状态的概率空间。

同理,空气污染物状态发生两步 (2 d) 变化

过程,有矩阵关系式:

$$A^n P Q = A^{n+2} \quad (\text{b})$$

P 和 Q 分别表示不同天气背景下污染物的状态转移概率矩阵,若记 $P^* = P Q$, 则有 $P_{ij}^* = \sum_{l \in S} P_{il} Q_{lj}$ ($C-K$ 方程), 其物理含义为: 污染物在 2 d 中由 i 态转移到 j 态的概率为第 1 d 天气背景下状态由 i 到所有可能的状态的概率与第 2 d 天气背景下由所有可能的状态落到 j 状态的概率乘积的累加。

仅对一步变化矩阵关系式 (a) 进行分解研究。由 (a) 式,可以建立某种典型天气背景下,污染物从第 n 天到 $n+1$ 天的转化的概率方程组,如下:

$$a_1^n P_{11} + a_2^n P_{21} + a_3^n P_{31} = a_1^{n+1} \quad (1)$$

$$a_1^n P_{12} + a_2^n P_{22} + a_3^n P_{32} = a_2^{n+1} \quad (2)$$

$$a_1^n P_{13} + a_2^n P_{23} + a_3^n P_{33} = a_3^{n+1} \quad (3)$$

$$P_{21} + P_{12} + P_{13} = 1 \quad (4)$$

$$P_{21} + P_{22} + P_{23} = 1 \quad (5)$$

$$P_{31} + P_{32} + P_{33} = 1 \quad (6)$$

矩阵关系式 (a) 表示的实际物理过程可通过其展开式 (1) 予以阐述。(1) 式左边第 2 项表示起始 n 时刻污染物浓度处于 $i=2$ 状态 (良) 的概率 a_2^n 乘以由状态 $i=2$ (良) 变化到状态 $i=1$ (优) 的转移概率。右边表示到 $n+1$ 时刻污染物浓度停留在 $i=1$ (良) 状态的概率。由历史资料建立上述相同天气背景下,污染物从第 m 天到 $m+1$ 天的转化概率方程组:

$$a_1^m P_{11} + a_2^m P_{21} + a_3^m P_{31} = a_1^{m+1} \quad (7)$$

$$a_1^m P_{12} + a_2^m P_{22} + a_3^m P_{32} = a_2^{m+1} \quad (8)$$

$$a_1^m P_{13} + a_2^m P_{23} + a_3^m P_{33} = a_3^{m+1} \quad (9)$$

至此,通过同一种天气背景下,污染物 2 次 (共 4 d) 变化过程,可封闭方程组 (1) — (9), 解得某种天气背景下污染物污染状态的一步转移矩阵 P 。

1.3 状态分布概率矩阵

上述求转移矩阵过程中,初始 n 时刻污染物的状态分布概率矩阵 A^n (为便于叙述,这里简记为 A) 可由实测浓度值求解,方法如下 (以 SO_2 为例):

假设 SO_2 的实测浓度为 C , 因其 API 指数与实测浓度有如下线性关系:

$$API = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} (API_{\max} - API_{\min}) + API_{\min}$$

其中,下标 max 和 min 表示某范围内对应物理量的上下临界值。

这里,用污染物实测浓度直接分析其初始状态的概率分布问题。若 C_1, C_2, C_3 是各个状态间对应浓度的临界值。记:

$$M_1 = \frac{C_1}{2}, M_2 = \frac{(C_1+C_2)}{2}, M_3 = \frac{(C_2+C_3)}{2}$$

$$L_1 = |C - M_1|, L_2 = |C - M_2|, L_3 = |C - M_3|, L = L_1 + L_2 + L_3$$

则由概率分布的意义得到:

$$a_1 = \frac{(L-L_1)}{2L}, a_2 = \frac{(L-L_2)}{2L}, a_3 = \frac{(L-L_3)}{2L}$$

同理,由污染物一天后的实测浓度可计算得到各状态发生一步转移后的概率分布 A^{n+1} 。

2 建立天气—污染物转概阵数据库 (DB-WP)

表 1 记录了城市每天的天气变化、污染物实测浓度 C 与相应的概率分布 A 。假设现在预计未来天气将由晴天转变为阴天,同时地面风向也由西风转变为东风。进入数据库检索,发现历史上 D_n 到 D_{n+1} 与 D_m 到 D_{m+1} 天气过程与现在预报相同。将 4 d 资料送入与 1.3 节对应的子程序,求出 $A^n, A^{n+1}, A^m, A^{m+1}$;然后将这些矩阵向量对应的分量送入与 (1) — (9) 式对应的子程序中,求得污染物未来的转概阵 P ;最后用现在实测污染物分布矩阵 A 与 P 相乘外推出未来污染物的变化。

表 1 天气—污染物转概阵数据库 (DB-WP)

日期	实况天气	污染物浓度	分布概率	转概阵
D_0	小雨	C_0	A^0	...
...
D_{n-1}	多云 (d)	C_{n-1}	A^{n-1}	...
D_n	晴 (q), 西风	C_n	A^n	$P(\dots)$
D_{n+1}	阴 (y), 东风	C_{n+1}	A^{n+1}	$P(d-q)$
...	$P(q-y)$
D_m	晴 (q), 西风	C_m	A^m	...
D_{m+1}	阴 (y), 东风	C_{m+1}	A^{m+1}	$P(\dots-q)$
...	$P(q-y)$

实际工作中建议使用最近相同天气背景下的转概阵 P 。因为随着城市污染物排放源位置的变化,建筑物三维结构变化及四季更迭,都影响各

污染物的物理扩散和光化学反应过程,所以相同天气背景下的转概阵 P 也会不断变化。

3 个例分析

对西安 1998—2000 年的资料分析后发现: NO_2 在 99% 的时间内为优级, SO_2 在 97% 的时间内为优良级, PM_{10} 是西安市空气质量的首要污染物,冬季良和轻度污染的等级占 83%, 中度污染占据了其余的 4%。夏季各污染物的浓度等级分布类似。因此,这里着眼于 PM_{10} 的预报分析。

将 PM_{10} 划分为优、良、轻度污染、中度污染四个等级,选择小寨 7 月 13—14 日, 7 月 15—16 日, 7 月 22—23 日的 PM_{10} 变化实况,建立低槽控制形势下,地面由静风转变为东北风时,小寨 PM_{10} 变化的转移概率方程组。通过高斯消元法类似 (1) — (9) 的方程组,解得上述天气要素背景下,小寨 PM_{10} 状态变化的转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} 0.39 & 0.50 & 0.08 & 0.03 \\ 0.08 & 0.37 & 0.45 & 0.1 \\ 0.09 & 0.38 & 0.32 & 0.21 \\ 0.03 & 0.30 & 0.33 & 0.34 \end{bmatrix}$$

可以看出,此天气背景下小寨 PM_{10} 由良级转变为优级的概率最大,为 0.5,污染状况变好的可能性大。同理,选择小寨 7 月 6—7 日, 8 月 11—12 日, 10 月 20—21 日 PM_{10} 的变化,建立低槽转为均压场,地面受东北风控制时小寨 PM_{10} 状态变化的转移概率方程组,得到相应的转移概率矩阵:

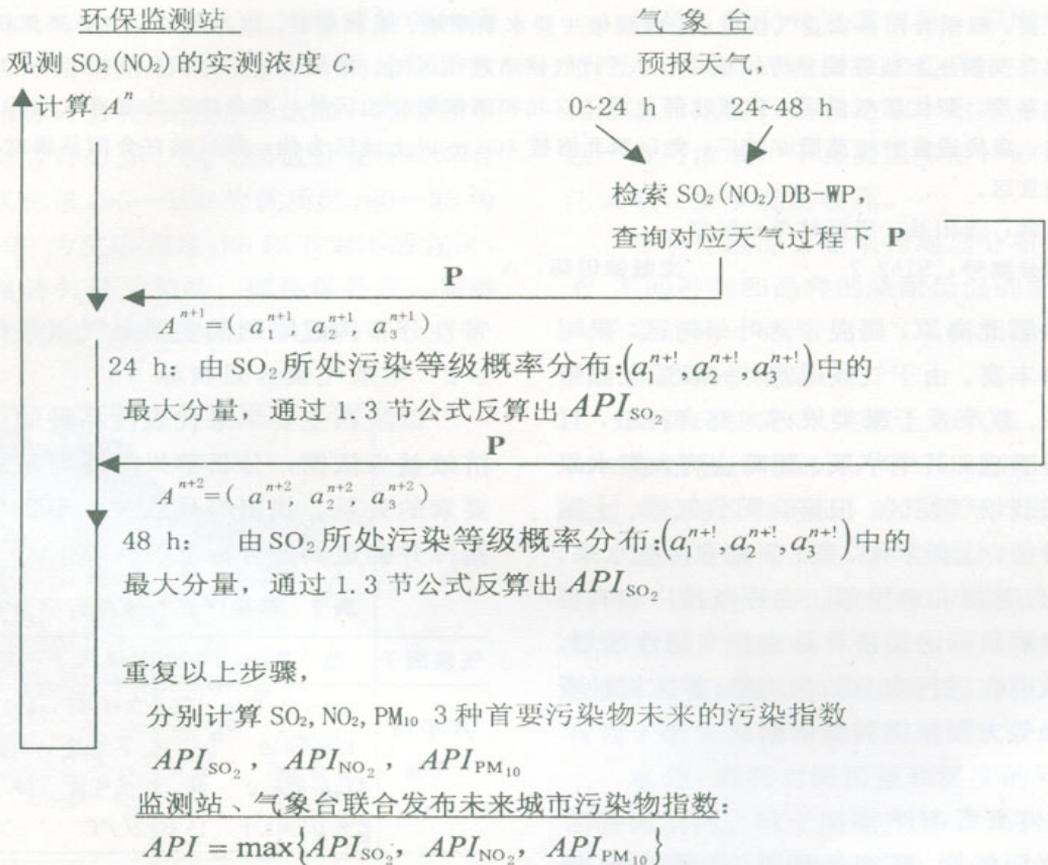
$$P = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.39 & 0.19 & 0.08 \\ 0.32 & 0.40 & 0.21 & 0.07 \\ 0.18 & 0.44 & 0.39 & 0.03 \\ 0.01 & 0.24 & 0.43 & 0.36 \end{bmatrix}$$

通过矩阵进行预报和实况对比分析。11 月 21 日小寨 PM_{10} 为 0.169 mg/m^3 , 换算为初始概率分布为 (0.23, 0.30, 0.28, 0.19), 与上面得到的转概阵右乘,得到 22 日 PM_{10} 污染状况的概率分布为 (0.24, 0.38, 0.30, 0.12), 即 PM_{10} 污染处于良的状态。而 22 日实际观测浓度得到的概率分布为 (0.23, 0.31, 0.29, 0.17)。23 日到 24 日天气转化形势相同,由 23 日小寨 PM_{10} 为 0.170 mg/m^3 , 计算得到 24 日 PM_{10} 污染状况的概率分布为 (0.22, 0.36, 0.32, 0.10), 而由 24 日实

况得到的概率分布为 (0.24, 0.29, 0.28, 0.19)。可以看出, 22日和24日预报的 PM_{10} 和实况相符, 处于良级, 但预报的 PM_{10} 处于良级状态的概率要比实际大。这与由历史资料计算矩阵时

的气象要素与预报时段内气象要素的存在差异有关。

4 空气质量污染预报流程



5 小结

方法避免了常规计算转移概率时烦琐的统计过程, 由通过固定算法整体求得转移矩阵。

提高污染物预报的精确程度, 要对污染物状态进行更细致的划分, 若划分为 5 种状态, 则需要相同天气过程下污染物 8 d 的污染物浓度值, 求解 25 个方程, 对计算机性能要求高。

通过个例分析看到, 该方法进行空气污染物等级预报简便实用。但实际业务预报时, 还需要通过特定区域大量的历史资料来精确求解污染物在不同天气形势和气象要素下的污染状态转移概

率矩阵。同时上述方法及相关计算程序需在实践中进一步完善。

* 本文资料由西安市气象台提供, 在此对王建鹏和林杨的帮助表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 毛用才, 胡奇英. 随机过程 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000. 101-108.
- [2] 王建鹏, 卢西顺, 林杨, 等. 西安城市空气质量预报统计方法及业务化应用 [J]. 陕西气象, 2001, (6): 5-7.