

# 用卡尔曼滤波制作河南省冬春季 沙尘天气短期预报

梁 钰<sup>1</sup> 布亚林<sup>2</sup> 贺 哲<sup>1</sup> 朱业玉<sup>1</sup>

(1. 河南省气象台, 郑州 450003; 2. 河南省专业气象台)

**提 要:** 在分析河南省冬春季沙尘天气气候特征的基础上, 筛选出 T213 数值预报产品中与风速和能见度相关性较好的预报因子, 采用卡尔曼滤波方法, 分站建立了河南省冬、春季的风速和能见度短期预报方程, 并利用相应的沙尘天气分级量化标准, 在一定程度上实现了河南省冬、春季沙尘天气的短期分站、分级预报。业务运行时, 又增加了两条判别指标进行后处理, 有效地消除了液滴对能见度预报的影响, 提高了沙尘天气预报的准确率。

**关键词:** 卡尔曼滤波 沙尘分级量化标准 风速预报 能见度预报

## Application of Kalman Filtering to Dust Forecast in Winter and Spring over Henan Province

Liang Yu<sup>1</sup> Bu Yalin<sup>2</sup> He Zhe<sup>1</sup> Zhu Yeyu<sup>1</sup>

(1. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003;

2. Henan Professional Meteorological Observatory)

**Abstract:** Based on the analysis of climatic characteristics of dust weather in winter-spring in Henan, some variables, which have close relationship with visibility and wind speed, are selected from the T213 Numerical Product as predicting factors (predictor), and then, with Kalman filtering method, the prediction equation of visibility and wind speed in spring and winter in Henan is developed. In terms of discriminative standard of dust weather, the quantitative dust weather forecast in spring and winter for the stations in Henan is realized. In the forecast operation, another two discriminative standard were added to eliminate the effect

of liquid droplets on the visibility, therefore the prediction accuracy is increased.

**Key Words:** Kalman filtering dust wind velocity visibility

## 引言

沙尘是我国西北和华北地区冬、春季经常出现的灾害性天气,它能加剧土地沙漠化,对大气环境造成严重污染,给交通和供电线路产生重要影响。因此,对沙尘天气做出较为准确的预报对防灾减灾具有十分重要的实际意义。我国气象工作者针对沙尘暴已做了很多研究工作,如:对当地沙尘天气进行天气气候学分析和诊断<sup>[1,2]</sup>、通过不同沙尘个例的对比分析找出预报指标<sup>[3]</sup>,以及应用人工神经网络技术建立沙尘客观预报方法等<sup>[4]</sup>。但上述研究都是把沙尘天气作为一个预报对象来进行分析的。其实产生沙尘天气的因素是多方面的,与降水一样,由于沙尘天气本身的不连续性,客观预报的难度大。本文尝试将沙尘这个不连续量的预报转化为对风速和能见度这两个连续量的预报,然后用卡尔曼滤波建立风速和能见度的预报方程,以达到对沙尘天气预报之目的。

卡尔曼滤波方法在气象领域中的应用已经得到认可,尤其是在对连续性变量(如温度、湿度等)的预报方面已得到广泛的应用<sup>[5,6]</sup>。虽然它的预报对象一般是具有线性变化特征的连续性变量,但一些气象工作者也通过间接的方式将该方法在短期气候预测<sup>[7]</sup>、中期暴雨<sup>[8]</sup>等领域进行了应用,本文也尝试采用卡尔曼滤波方法来做河南省冬、春季沙尘天气的预报。

### 1 沙尘天气的定义及分级量化标准

《地面气象观测规范》中将沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴三类:①浮尘——尘

土、细沙均匀地浮游在空中,使水平能见度 $<10.0\text{km}$ ;②扬沙——由于大风将地面尘沙吹起,使空气相当混浊,水平能见度在 $1.0\text{km}$ 至 $10.0\text{km}$ 以内。③沙尘暴——由于强风将地面大量尘沙吹起,使空气很混浊,水平能见度 $<1.0\text{km}$ 。这种分级法,虽然在一定程度上反映了沙尘现象的强弱,但没有给出确切的量值,给沙尘天气的深入研究带来了诸多不便。因此,我们参照已有的研究成果<sup>[9]</sup>,并结合台站观测的实际情况,利用能见度(VV)和风速(V)初步给出了沙尘天气的分级量化标准(表1)。

表1 沙尘天气的分级量化标准

沙尘类型	能见度/km	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
浮尘	$VV < 10.0$	$V \geq 3$
扬沙	$1.0 < VV < 10.0$	$6 > V > 3$
沙尘暴	$VV < 1.0$	$V \geq 6$

## 2 河南沙尘天气的气候特征

利用郑州、安阳等11个国家基准(基本)站1961~2000年40年的气象资料,对河南沙尘暴、扬沙、浮尘天气发生的气候特点、变化趋势等进行了较详尽的分析。

### 2.1 区域差异

沙尘暴主要发生在我省黄淮平原,尤以沿黄一带及黄河故道、黄泛区最为严重,发生最多的是开封、郑州,平均每年5.4次和3.2次;相对于东部平原来说,西部丘陵山区及豫南沙尘暴发生较少,一般在10次以下,如卢氏近40年来没有发生过沙尘暴天气。

扬沙天气在各地均有发生,且相差悬

殊。发生最多的是豫西的卢氏、三门峡及豫东的西华, 平均每年30次、28次和27.5次。最少的是孟津, 平均每年2.4次。

浮尘天气也是一种全省性的天气现象, 其区域分布不同于扬沙, 而与沙尘暴相似, 主要分布在沿黄一带及豫东黄泛区, 全省以郑州最多, 平均每年28.3次, 较少的是固始、栾川、西峡, 平均每年不到1次。

## 2.2 年代际变化

不同年代和年份, 河南各地沙尘暴、扬沙、浮尘的发生有显著的不同, 表现为随着时间的推移, 其发生次数有明显的起伏变化, 尤其从20世纪70年代后, 呈现出显著的递减趋势。

沙尘暴: 沙尘暴的发生具有明显的年代际变化。以郑州、开封为代表的全省大多数地区, 40年中以60年代最多, 之后逐渐减少, 至90年代最少, 其中60年代的沙尘暴总数占40年总数的50%~75%。

扬沙: 河南扬沙的发生次数和发生频率要远远高于沙尘暴。全省绝大多数地区以60~80年代较多, 90年代扬沙天气最少。

浮尘: 河南浮尘的发生次数和发生频率也远远高于沙尘暴。其年代际变化与扬沙相似, 全省绝大多数地区以60~80年代较多, 90年代浮尘天气最少。

## 2.3 季节变化

河南沙尘暴、扬沙和浮尘的发生有明显的季节变化, 冬、春季较多, 夏、秋季较少。

沙尘暴主要发生在12月~次年6月份的7个月里, 一般占全年总数的85%~100%, 又集中在春季的3~5月, 占50%~100%。

扬沙的季节变化与沙尘暴相似, 但主要发生在11月~次年5月份的7个月里, 一

般占全年总数的88%~93%, 又集中在春季的3~5月, 一般占40%~60%。

浮尘的季节变化与沙尘暴、扬沙相似, 但主要发生在11月~次年6月份的8个月里, 一般占全年总数的90%以上, 又集中在冬、春的1~4月, 一般占40%~60%。

## 3 卡尔曼滤波方法及其原理

卡尔曼滤波方法是目前国际上较为先进的一种新的递推滤波方法。卡尔曼滤波方法通过利用前一时刻预报误差反馈到原来的预报方程, 并及时修正预报方程系数, 以此提高下一时刻的预报精度。

若滤波对象为离散时间线性动态系统, 并认为天气预报对象是具有这种特征的动态系统, 可用下列两组方程来描述:

$$Y_t = X_t \beta_t + e_t \quad (1)$$

$$\beta_t = \Phi_{t-1} \beta_{t-1} + e_{t-1} \quad (2)$$

式(1)为预报方程,  $e_t$ 为量测噪声, 是 $n$ 维随机向量;  $Y_t$ 是预报量, 可用下式表示:

$$Y_t = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$$

$X_t$ 是 $n \times m$ 维的预报因子矩阵,  $\beta_t$ 是回归系数, 即

$$\beta_t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m]^T$$

式(2)为状态方程。可以简化为

$$\beta_t = \beta_{t-1} + e_{t-1} \quad (3)$$

式(1)和式(3)用来描述离散时间的线性动态系统, 用最小二乘法, 可推导出一组递推滤波系统, 在实际运算中, 通常是利用递推滤波系统来进行预报量的计算。

## 4 应用卡尔曼滤波方法做冬春季沙尘天气预报

由于卡尔曼滤波对象是离散时间的线性动态系统, 因此, 将沙尘这个不连续量的预报转化为对风速和能见度这两个连续量的预

报,通过对它们的预报达到对沙尘天气的预报。

#### 4.1 预报资料的选取

本方法采用 T213 的每 6h 一次的预报场(昨日 20 点发布的 30、36、42、48 小时预报场)作为预报资料,分站建立每 6h 一次的风速和能见度的预报方程。建立方程时,使用了 2003 年 11~12 月各代表站的 02、08、14、20 时四个时次的风速和能见度实况资料和 T213 的预报资料。虽然用小样本建立的预报方程统计特性差,但卡尔曼滤波方法自身可以不断通过误差反馈订正预报方程系数来适应预报对象的统计特征<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 预报思路

为了在实际预报工作中能够实现预报的自动化,我们选取了能够直接获取风速和能见度资料的安阳、新乡、三门峡等 11 个站进行站点沙尘天气预报。

针对每一站点,将风速和能见度作为预报量,选取预报因子,采用卡尔曼滤波方法建立预报方程,并做逐日滚动预报。

#### 4.3 预报因子的选取

由于卡尔曼滤波初始方程是建立在少量历史资料基础上的,为了减少干扰,预报因子一般不超过 4 个<sup>[6]</sup>。

风速和能见度往往与特定的地面及高空天气形势相联系。通过普查历史天气图得出,导致沙尘天气发生的天气系统一般为:高空有一较深的西风槽,槽后有强冷中心;地面有一庞大的冷高压,高压前有气旋强烈发展。另外,天气形势的变化与动力场和热力场的变化也有较大关联。

因此,在进行风速和能见度预报因子的选取时,首先根据上述形势分析和物理量分析结论,选取了一些初级因子,并增加一些

复合因子,然后经过反复分析和相关性计算,确定最终入选因子。不同区域的站点,预报因子并不完全相同。

下面以郑州站为例,给出风速和能见度的预报因子,因子中用到的各站点物理量均通过 T213 产品每 6h 一次的格点预报资料进行插值到站点计算后获得。

##### 4.3.1 郑州站风速预报因子

郑州站风速的预报选取了地面气压差、地面变压差、100hPa 全风速及 850hPa 温度梯度四个因子。

###### (1) 地面气压差

$X_1 = p_{\text{西安}} - p_{\text{郑州}}$ 。郑州站的沙尘天气的发生多与西路强冷空气的入侵有关,而西安与郑州之间的气压差反映了西路冷空气的强弱。

###### (2) 地面 24 小时变压差

$X_2 = \Delta p_{24\text{西安}} - \Delta p_{24\text{郑州}}$ 。变压反映了气压系统的变化趋势,对锋面的移动有较大的影响。

(3) 1000hPa 全风速  $X_3 = V_{1000\text{郑州}}$ 。直接选取数值预报产品 T213 资料预报场中的郑州站 1000hPa 全风速  $V$ 。

###### (4) 温度梯度

$X_4 = \nabla T_{850(\text{郑州}-\text{北京})}$ 。选郑州与北京之间 850hPa 温度梯度  $\nabla T$ ,此因子反映了高空锋区的强弱。

##### 4.3.2 郑州站能见度预报因子

郑州站能见度的预报选取了 500hPa 高度差、稳定度、湿度项、垂直速度四个因子。

###### (1) 500hPa 高度差

$X_1 = H_{500\text{西安}} - H_{500\text{郑州}}$ 。郑州站的沙尘天气发生时的低能见度一般出现在高空强西北气流的天气形势下。

###### (2) 近地面层稳定度

$X_2 = T_{850\text{郑州}} - T_{1000\text{郑州}}$ 。选取 T213 资料预报场中的郑州站 850hPa 与 1000hPa 的温

度差作为单站近地面层稳定度指标。

#### (3) 近地面层湿度项

$X_3 = (T - T_d)_{1000\text{hPa}}$ 。选取 T213 资料预报场中的郑州站 1000hPa 的温度露点差作为单站湿度指标, 湿度越小, 越容易产生沙尘天气。

#### (4) 上升运动项

$X_4 = \omega_{500\text{hPa}}$ 。选取 T213 资料预报场中的郑州站 500hPa 的垂直速度作为上升运动指标, 上升运动越剧烈, 越容易产生沙尘天气。

### 4.4 沙尘天气预报方法的建立

利用 T213 数值预报产品的 6h 物理量预报场, 计算出所需的预报因子, 并读取当日各站的风速和能见度实况, 用卡尔曼滤波方法对预报方程系数进行修正后, 即可实现风速和能见度的滚动预报。

利用表 1 给出的沙尘天气分级量化标准, 结合卡尔曼滤波的每 6h 风速和能见度滚动预报结果, 在 24h 内某站只要在一次预报有达到表 1 中规定的扬沙、浮尘、沙尘暴量级标准的风速和能见度, 即可预报该站有无相应等级沙尘天气发生。

## 5 预报试验及后处理

### 5.1 试验结果

利用 2004 年 1~5 月的资料, 对建立的沙尘预报方法进行了业务试验。从 11 个站的分站预报结果 (表 2) 来看, 扬沙和浮尘的平均预报准确率达到 60% 以上, 但沙尘暴的预报准确率较低, 仅有 46.2%。造成准确率下降的原因主要是空报较多。

### 5.2 预报方法的后处理

分析空报原因, 主要是因为沙尘天气的

产生因子比较复杂, 除了与地形有关外, 与本站的前期气温、降水、地表状况和干旱情况等气候背景特征也有很大关系。另外, 对于能见度的预报方程而言, 因子无法排除液滴作用 (降雨或大雾) 所带来的能见度下降, 虽然有时预报能见度较低, 但该站当时有降水天气出现时, 沙尘天气一般不会发生。

表 2 用卡尔曼滤波方法做全省沙尘天气预报的试验结果 (2004 年 1~5 月)

24h 预报项目	对 (次)	空 (次)	漏 (次)	准确率
浮尘天气	38	15	7	63.3%
扬沙天气	35	16	7	60.3%
沙尘暴天气	6	5	2	46.2%

根据上述分析, 将预报方法进行了后处理, 增加了两条判别指标。

(1) 方程输出沙尘预报等级后, 再利用该站前 15 天的降水实况与历史平均值进行对比, 如果总降水量比历史同期偏多 20% 以上时, 该站沙尘天气预报结果降低一个等级 (如方程预报结果为沙尘暴, 则实际发布预报结论为扬沙, 以此类推)。

(2) 如果预报站点前一天实况已经出现降水或 T213 数值产品预报 6h 内有降水发生时, 该站沙尘天气预报结果相应降低一个等级。

### 5.3 预报业务流程的建立

建立的河南省冬春季沙尘天气短期预报业务流程见图 1。此流程是在已经利用历史资料建立了风速和能见度的预报方程后运行的。

## 6 预报方法的业务化运行

2004 年 11 月~2005 年 5 月, 河南省冬春季沙尘短期预报方法正式投入了业务运

行,并表现出了较高的预报准确率。特别是对2005年河南省最强的两次沙尘天气(3月10日和4月7日),均做出了准确的预报。从全省11个站的沙尘业务预报结果(表3)来看,扬沙、浮尘、沙尘暴三类沙尘天气的平均预报准确率都比业务试验时提高了10%以上,达到了75.0%、75.8%和70.0%。从各代表站的沙尘预报结果(表略)来看,浮尘和扬沙的预报准确率开封站最高,预报准确率分别达到了82.5%和85.8%;沙尘暴的预报准确率安阳最高,达到了80.0%。

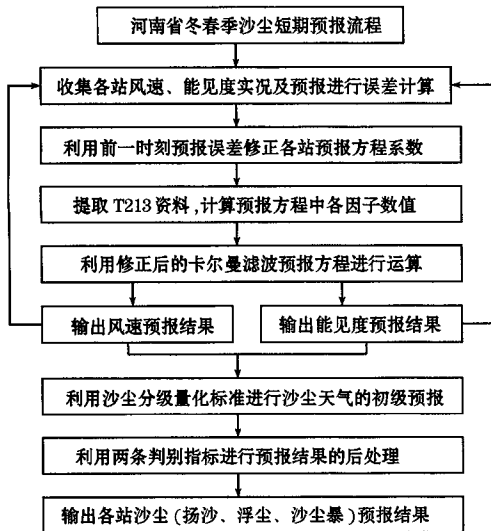


图1 河南省冬春季沙尘天气短期预报业务流程图

表3 正式投入业务运行的沙尘预报方法的预报结果(2004年12月~2005年5月)

24h 预报项目	对(次)	空(次)	漏(次)	准确率
浮尘天气	36	7	5	75.0%
扬沙天气	47	8	7	75.8%
沙尘暴天气	7	2	1	70.0%

## 7 小结

(1) 试验表明,将对沙尘这个不连续量的预报转换为对连续的风速和能见度的预报是可行的,设计的预报方法是成功的。用卡尔曼滤波方法做沙尘天气预报是可行的,但必须利用前期降水量、地表状况等气候特征指标进行后处理,以减少预报方法的空报率。

(2) 此方法在一定程度上实现了沙尘天气的分站、分级预报,但目前只适用于基本站,而对于非基本站,由于无法及时得到6h一次的风速、能见度和降水量等实况资料,因此无法利用卡尔曼滤波方法及时订正方程系数,进行沙尘预报。

致谢: 本文得到河南省气象局李平高级工程师的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- 1 彭维耿,赵光平,陈豫英. 宁夏春季沙尘暴与气象要素及环流指数的关系. 气象, 2005, 31(3): 17~21.
- 2 张仁健,徐永福,韩志伟. 北京春季沙尘暴的近地面特征. 气象, 2005, 31(2): 8~11.
- 3 申红喜,李秀连,石步鸿. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析. 气象, 2004, 30(2): 12~16.
- 4 赵翠光. 人工神经网络方法在沙尘暴短期预报中的应用. 气象, 2004, 30(4): 39~41.
- 5 黄嘉佑,谢庄. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用. 气象, 1993, 19(4): 3~7.
- 6 陆如华,徐传玉,张玲等. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用技术. 数值预报产品评价公报, 1996, 5~6 双月刊: 28~36.
- 7 陈雷,刘开富,李英. 卡尔曼滤波在短期气候预测中的应用. 气象, 2001, 27(10): 42~45.
- 8 魏文秀,任彪,杨海龙等. 卡尔曼滤波技术在暴雨中期预报中的应用. 气象, 1998, 24(3): 46~49.
- 9 张冬斌,尚可政等. 沙尘天气的量化指数及其在干旱气象, 2003, 21(3): 58~61.