

微波辐射计计算准 K 指数对降水的反应

李睿劼 李宏宇

(北京市人工影响天气办公室, 100089)

提 要: 利用北京气象局安装的微波辐射计资料, 通过实时遥感温度、湿度数据, 计算得到大气不稳定指数 K 的近似值。根据 K 指数在 2007 年 6 月 27 日和 2008 年 7 月 14 日(奥运消减雨试验)等两次混合性降水过程中的变化情况, 分析降水过程中热力、水汽要素的影响。

关键词: 微波辐射计 K 指数 水汽

引 言

大气中充足的水汽含量是发生降水的必要条件, 水汽含量偏低时, 发生降水, 尤其是大雨的可能性很小; 相反, 水汽含量较高时, 发生降水的可能性就大大增加了。但水汽含量并不是降水的充分条件, 还需要动力、热力方面的诱发机制配合。

在天气预报业务上, 普遍采用无线电探空仪所探测的温度和湿度廓线以及由它们推导的大气不稳定指数, 作为大雨和雷暴的临近预报。 K 是常用的大气稳定度判断指数, 对雷暴降水和冰雹具有很好的预报效果。在气象系统推广应用的 MICAPS 预报系统中, 根据各站每日 08 时探空给出的廓线, 计算 K 以大致判断当日大气稳定度性质, 这在人工影响天气工作中尤为常用。

然而, 一般探空仪的释放每天只有两次, 在降水过程中, 大气对流层的热、动力性质在这两次探测之间会急速变化, 在某些特别地形中, 这种情况尤其明显。因此, 更加密集的数据资料对恶劣天气临近预报将大有帮助。

本文通过微波辐射计极高的测量密度, 计算出每分钟大气的 K , 根据它随时间的变化情况, 演示降水过程中热力、水汽条件的变化。

1 利用微波辐射计资料计算准 K 值

1.1 微波辐射计资料简介

本文使用的资料来源于安装在北京市气象局楼顶的微波辐射计。此类在地面使用的微波辐射计, 主要通过测量微波频谱中多个频道的辐射强度, 包括由大气中的水汽、云中液态水和氧分子的微波发射所支配的频道, 以反演地面至 10km 高空的温度、湿度、水汽密度和液态水含量廓线。这些廓线每隔约 1 分钟得到一组数据。

该设备安装于 2006 年 6 月, 经过设备标定、调试和磨合期, 于 2007 年汛期正式投入使用。

通过与无线电探空仪、风廓线仪/声雷达探测数据的比较, 微波辐射计大致上提供了准确的温度、湿度廓线, 可以应用到指导人影日常业务中来。

1.2 计算方法

K 计算公式如下:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$$

式中, T 为温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), T_d 为露点温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), 下标为气压层(单位: hPa)。

在微波辐射计资料中, 数据为各高度层上的探测值, 相应的气压层则需通过流体静力近似求得。1km 高度以下的遥感数据以 0.1km 为间隔, 1km 高度以上的遥感数据以 0.25km 为间隔, 经过计算 2007 年 6 月相应气压层的高度平均值, 求得: 850hPa 气压层近似高度 1500m, 700hPa 气压层近似高度 3000m, 500hPa 气压层近似高度 5500m。因此, 在计算中使用这三个高度的温度、湿度求取 K 的近似值, 本文称为准 K 。

露点温度(T_d) 在资料中没有现成数据, 它是 T 和 e 的函数:

$$T_d = f(T, e)$$

T 为温度, e 为当前温度下的水汽压, 可由下式求得:

$$e = E \times f$$

其中, f 为相对湿度(单位: %); E 为饱和水汽压, 是 E_0 与 T 的函数:

$$E = g(E_0, T)$$

其中, E_0 为 0°C 时的饱和水汽压, 其值为 6.11(单位: hPa); T 为该高度层上的温度(单位: $^{\circ}\text{C}$)。

2 K 在强对流过程中的变化分析

取 1500m、3000m、5500m 这三个高度上的探测温度、湿度数据, 通过以上一系列公式进行计算, 获得当前时刻的准 K 。微波辐射计每分钟获取一组数据, 也即是每分钟可计算得到一个准 K 值, 由此可得在整个降水过程中该数值随时间的变化。

2.1 2007 年 6 月 27 日降水过程

2.1.1 过程描述

该日降水过程是强对流雷雨天气, 雷达回波沿西南—东北方向移动经过北京市区域上空, 回波中心强度达到 50dBz, 自中午 11:00 左右开始影响北京地区, 发生降水, 过程历时大约 8 个小时, 在 19:00 左右逐渐移出北京。降水过程雷达回波变化如图 1(见彩图第 24 页)所示。

2.1.2 准 K 描述

通常, K 值越大, 大气层结越不稳定, 一般当 $K \geq 35$ 时易出现暴雨。从图 2 时间轴看, 对应 08:00 时, $K = 31.6$; 随时间推移, K 值逐渐增大, 在 10:00 左右达到 35.0 以上; 在 12:10 左右达到第一个波峰 $K = 43.3$, 此时回波主体距离探测中心 6~7km; 17:17 出现第二个波峰, 此时 $K = 47.9$; 20:11 出现第三个也是最强的波峰, $K = 51.2$, 但是降水回波减弱, 逐渐远离雷达探测中心的时候。随着降水过程结束, K 值逐渐减小。 K 值在 12:00—20:00 之间出现较大脉动变化。

图 2 中的趋势曲线(三次方多项式拟合)显示, 准 K 在降水时间段出现一个增长过程, 并在过程结束后减小。

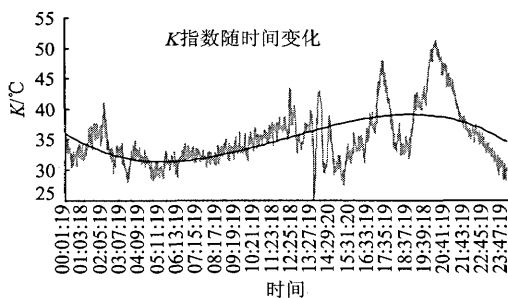


图2 2007年6月27日 K 随时间的变化

2.1.3 热力、水汽条件比较

K 计算的组成要素中, $T_{850} - T_{500}$ 表示高低层温度差, 差值越大, 热力条件就越有利于产生对流(如图 3 所示); T_{d850} 表示低层大气中水汽含量, 露点温度与水汽含量成正比, T_{d850} 值越大, 水汽含量越大(如图 4 所示); $T_{700} - T_{d700}$ 表示中层大气温度露点差, 反映大气的饱和程度, 温度露点差值与大气饱和程度成反比, $T_{700} - T_{d700}$ 值越小, 大气饱和程度

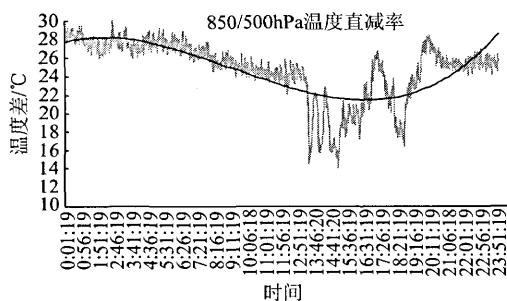


图3 $T_{850}-T_{500}$ 值随时间变化

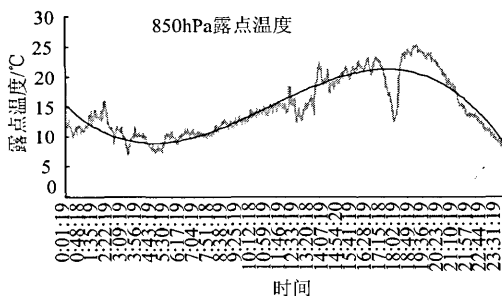


图4 T_{d850} 值随时间变化

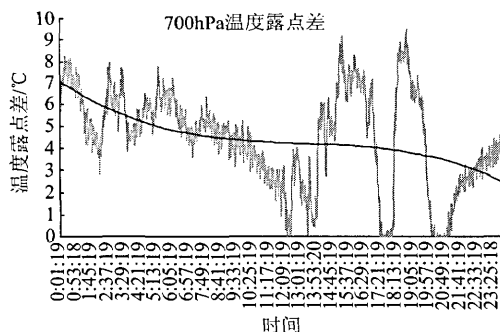


图5 $T_{700}-T_{d700}$ 值随时间变化

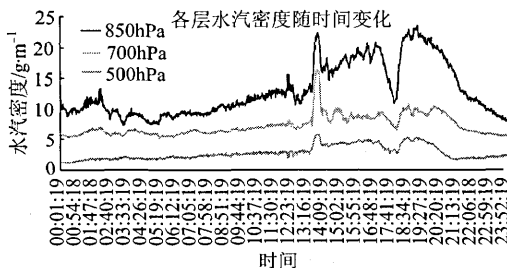


图6 微波辐射计水汽密度变化

大(如图5所示)。

温度递减率图(图3)显示,该项数值在降水过程中出现3个波峰,时间轴位置与 K

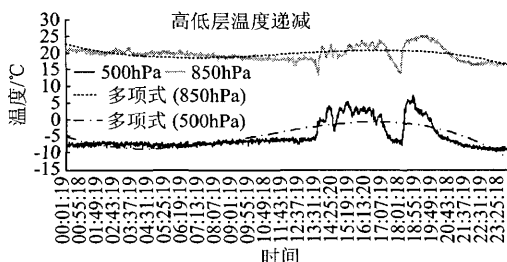


图7 高低层温度变化

数值一一对应,但拟合趋势线却与 K 趋势变化相反。通过对高低层温度(图7)的比较,发现 500hPa、850hPa 两层温度变化特征一致,拟合趋势线均与 K 一致,在降水过程中均有增长。通常晴朗天气的温度日变化高峰应在 14:00 左右,且高空温度变幅较低空平缓;而图7显示的温度日变化高峰在时间轴上的位置明显滞后,高空温度变幅较低空强烈,因此温度直减率减小。

低层水汽条件图(图4)显示,水汽条件变化特征与微波辐射计水汽密度遥感曲线(图6)基本一致,低层变化比高层变化明显;低层露点温度变化曲线与趋势拟合曲线均与 K 变化一致。

中层饱和程度图(图5)显示,中层温度露点差变化曲线与趋势拟合曲线均与 K 变化呈反向位。

2.1.4 降水时间段比较

图8显示,一小时降水量数值在降水过程初期出现最大值,随后逐渐减小,在 K 最后一个波峰对应的时段略有增长;图9显示,5分钟降水量变化比较频繁,降水高峰与 K 高峰在时间轴位置上对应比较一致,但 K 值的大小与降水量数值大小没有对应关系。

综上所述,在本个例降水过程中,由于高空云中释放水汽凝华潜热造成温度显著升高,导致温度直减率减小,在对 K 总体变化趋势的影响上,热力条件的贡献度明显小于水汽条件;而对降水引起的 K 数值扰动,表现在 13:30—16:30 时间段上,热力条件与 K 变化呈正比例,中层水汽条件与 K 变化成正

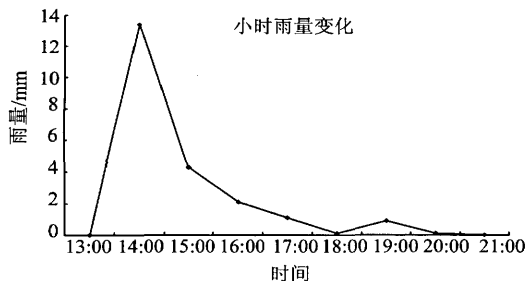


图8 1小时降水量

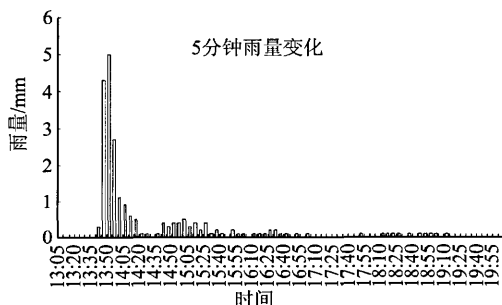


图9 5分钟降水量

比例,低层水汽条件与 K 变化成反比例,可见,前两者的贡献度大于后者。 K 对降水的反应明显,是随着降水的减小而增加的。

2.2 2008 年 7 月 14 日消减雨试验

2.2.1 过程描述

该日降水过程是混合性降水天气,雷达回波自西向东移近北京市区域,回波中心强度达到 30dBz;自上午 06:40 左右开始,雷达回波移入并开始影响北京西部。北京市人工影响天气办公室按照试验计划,从 17:30 开始在海淀作业区实施 5 轮次火箭消减雨试验,时间分别为 17:30、18:16、19:45、20:30、21:15,作业过程历时大约 4 个小时,21:25 宣布实验结束,降水过程雷达回波变化如图 10(见彩图第 24 页)所示。在作业区出现回波减弱现象。

2.2.2 准 K 值描述

2008 年 7 月 14 日 K 指数随时间的变化呈现早晚数值低,中间数值高的形势(见图 11)。08:00 的 $K = 26.30$;12:37 出现 $K = 50.82$ 的日最高值;17:30 消减雨作业开始

时, $K = 29.57$;21:25 消减雨结束时, $K = 23.93$,其间表现为 4 段比较规律的波峰波谷变化,并逐渐减弱;23:24 波谷时的 $K = 19.78$;多项式拟合趋势线大体上呈先增加后减小的趋势,转折出现在 14:20 左右。

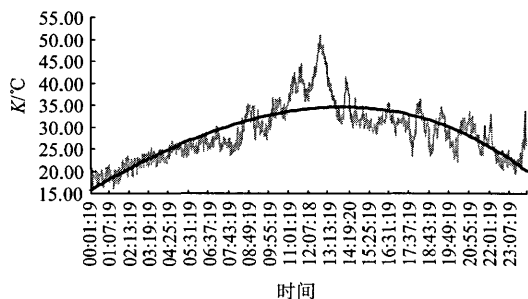
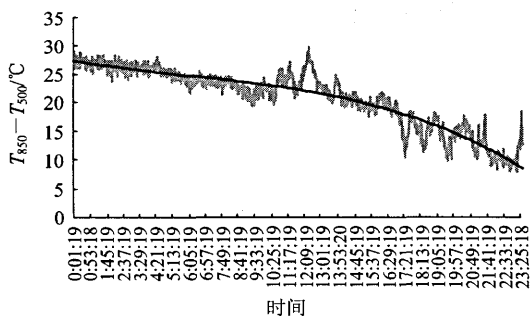


图11 2008年7月14日K随时间变化

图12 $T_{850}-T_{500}$ 随时间变化

2.2.3 热力、水汽条件比较

在 2008 年 7 月 14 日试验中,高低层温度直减率($T_{850} - T_{500}$)随时间变化的拟合趋势线呈下降变化,但曲线脉动特征在时间轴上的位置与 K 曲线一致(如图 12 所示)。通过高低层温度变化(图 16)的比较,发现高低层温度曲线特征基本一致,在中午(降水主体临近)前后都出现明显降低,这应与雷达回波移动至遥感中心位置,降水云体遮挡引起整层降温有关;午前低层温度脉动强于高层,午后则是低层温度脉动强于低层,消减雨试验时段内,这一现象和 4 波峰特征特别明显。由于高层温度在午后上升较快,而低层温度趋势线基本水平,导致温度直减率显著减小,温度直减率要素对准 K 的贡献度在中午前为负,中午后为正。

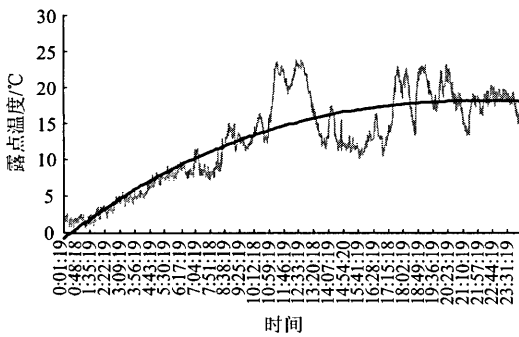


图13 T_{d850} 随时间变化

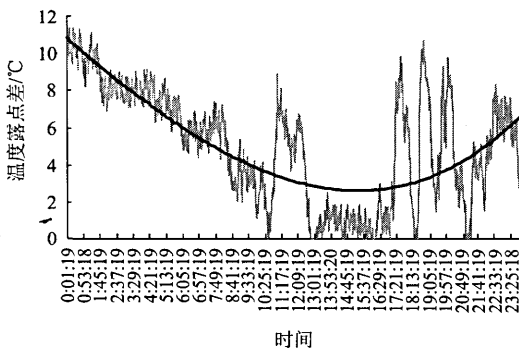


图14 $T_{700}-T_{d700}$ 随时间变化

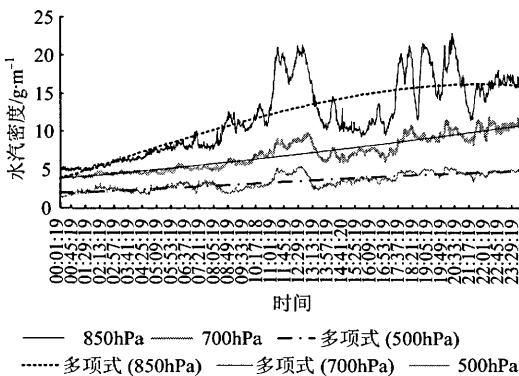


图15 各特征层水汽密度随时间的变化

如图 13、14 所示,低层大气中水汽含量 (T_{d850}) 和中层大气饱和度 ($T_{700} - T_{d700}$) 的曲线特征都与温度变化比较一致,这与 2007 年 6 月 27 日个例相同;但前者的趋势线显示,低层水汽条件对准 K 的贡献度在中午前为正,中午后为负;后者贡献度为正。

可见,准 K 的三组要素量变化趋势不同,但特征变化以及在消减雨试验中出现的

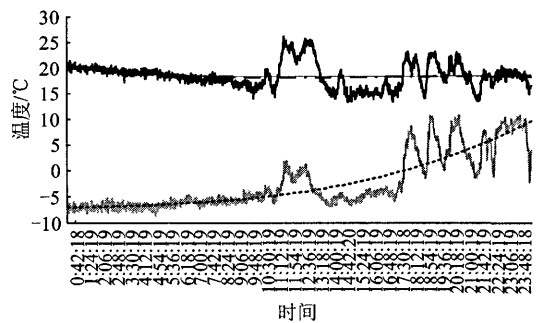


图16 高低层温度变化

4 波峰特征同样明显;准 K 指数受高低层温度递减和中层饱和度的影响大于低层水汽含量。

2.2.4 降水时间段比较

图 17 显示,火箭作业在出现微量降水后开始进行。试验过程中,5 分钟降水量变化比较频繁,数值都在 $0 \sim 0.1\text{mm}$ 之间变化,并出现多次间歇。作业结束后,降水量明显增加,5 分钟雨量达到 0.8mm ,且在时间轴上形成连续。3 个特征层的水汽含量变化特征 (见图 15) 基本一致,数值自低层向高层逐渐减小,低层脉动较大,增长很快;中高层变化平缓,增长很小,符合降水发展的规律。联系热力、水汽条件在这期间的剧烈脉动表现,可以认为:一是人为扰动引起了热力、水汽条件的剧烈变化;二是过量引晶导致释放大量的凝华潜热,小水滴数量增加和云体浮力增强起到了一定的抑制降水效果。

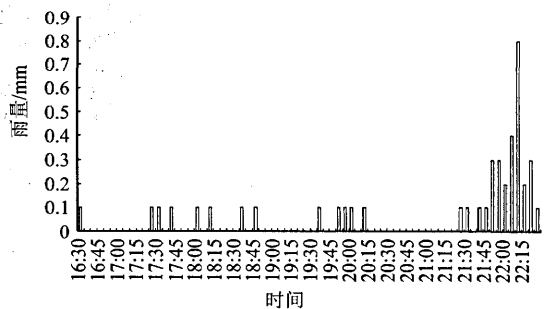


图17 5分钟雨量变化

3 对比分析和结论

(1)微波辐射计探测结果显示了各层大气中温度、湿度、水汽密度、液态水含量等要素,并且可以根据这些要素计算出其他需要的参数,如准 K 等。同时,其获得的高密度探测数据,为考虑准 K 与大气不稳定性之间存在的关系,以及在降水临近预报中的作用提供了可能。

(2)据计算所得准 K 指数,其中反映低层水汽条件的要素 T_{ds50} 变化曲线与设备遥感所得水汽密度变化完全一致,表明计算结果可以正确反映探测分析所需内容。

(3)通过微波辐射计数据可计算得到每分钟的准 K 数值。个例1中08:00数值为31.6,个例2中08:00数值为26.3,可见 K 指数对回波强度大于45dBz的强对流性(混合性)降水有较好的预报效果,但对回波强度小于35dBz的较弱混合性降水预报性较差,其间的差异主要表现在水汽条件上;但 K 数值可以反映降水发展变化过程,而且对降水过程中人为扰动造成的影响有一定的响应,在这一过程中,热力条件的变化作用很大。

(4)个例1中,由于高层温度升高较快引起温度直减率减小,使得在整个过程中,中低层水汽条件对 K 的贡献度明显大于热力条件;在本站降水时间内,温度直减率的特征曲线和低层水汽条件的被动变化,使得热力条件的贡献度有所增加,即在降水过程中, K 对热力条件的反应比较敏感。而 K 脉动时间段虽然与降水时间段对应,但数值与降水量却呈反比关系,这与各项要素在该时间段内的贡献度变化有关。

(5)在个例2的主要降水时间中,中低

层水汽条件的被动变化,同样使得热力条件对 K 的贡献度增加。在消减雨试验时间内,各项要素特征变化对试验作业的反应是明显和及时的。通过与本站降水的对照,可见试验期间 K 对应出现4波峰特征,降水量明显受到抑制;试验结束后, K 数值跌落波谷,降水量骤增,两者依然成反比关系。

(6)通常认为,个例1是强对流混合性降水,个例2是弱对流混合性降水,前者过程的热力条件变化应当强于后者。但通过两个个例的对比,可以看到后者强于前者,因此可以认为,人为扰动造成的热力条件变化明显强于自然变化。

(7)两个个例中 K 曲线特征与降水量变化有对应关系。基于 K 曲线对人为扰动的明显响应,可以认为降水量在一定程度上受到了人为扰动因素的影响。同时,降水量在事实上的变化,也对人工影响作用的佐证有所助益。

参考文献

- [1] 李炳华,等. 全球卫星定位系统(GPS)水汽资料在暴雨临近预报中的发展和应用[C]. 第十九届粤港澳气象科技研讨会,2005. 3, reprint572.
- [2] 陈柏纬. 多波长微波辐射计在降雨临近预报的表现与应用[C]. 第十九届粤港澳气象科技研讨会, 2005. 3, reprint573.
- [3] Hewison, T., and coauthors, 2004: Monitoring inversions from ground - based remote sensing instruments during Temperature, Humidity, and Cloud profiling campaign (TUC). Preprints, 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications.
- [4] 李新麟,等. 梅雨期连续性暴雨的中分析[J]. 安徽气象,2004,(6).
- [5] 陈晓红,等. 对流参数在强对流天气预报中的释用[J]. 气象与减灾, 2006(2).