

田付友, 郑永光, 张涛, 等. 短时强降水诊断物理量敏感性的点对点检验. 应用气象学报, 2015, 26(4): 385-396.  
doi:10.11898/1001-7313.20150401

## 短时强降水诊断物理量敏感性的点对点检验

田付友<sup>1)2)3)\*</sup> 郑永光<sup>3)</sup> 张涛<sup>3)</sup> 毛冬艳<sup>3)</sup> 唐文苑<sup>3)</sup>  
周庆亮<sup>3)</sup> 孙建华<sup>1)2)</sup> 赵思雄<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029)

<sup>2)</sup>(中国科学院大学, 北京 100049) <sup>3)</sup>(国家气象中心, 北京 100081)

### 摘 要

对诊断物理量的准确认识可以帮助提高短时强降水的预报准确率, 并帮助理解产生短时强降水的可能机制。考虑我国降水观测网的布设特点, 结合 NCEP 最终分析资料的物理量场, 以大气水汽总量和最优抬升指数为例, 通过点对点检验分析了多个用于表征短时强降水环境特征的诊断物理量的敏感性。结果表明: 常规的点对点检验是点对点检验的特殊情况。大气水汽总量和最优抬升指数对短时强降水的指示均存在最佳阈值, 且 140 km 范围内的大气状况才对某点 3 h 内能否出现短时强降水有直接影响。对于水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 资料, 建议点对点检验的搜索半径和记录数阈值分别为 140 km 和 2 个记录。对多个诊断物理量对比分析显示, 短时强降水对水汽相关量最为敏感, 其次是表征热力条件的物理量, 而表征动力条件和垂直风切变的量的指示意义不够显著。

**关键词:** 短时强降水; 诊断物理量; 点对点检验; 搜索半径; 记录数阈值

### 引 言

短时强降水常由中小尺度天气系统直接产生, 我国长期以来饱受暴雨灾害的侵袭, 与之有密切关系的短时强降水早已引起广大科研和业务预报人员的关注, 受科技支撑和预报能力限制, 针对短时强降水的国家级预报业务 2009 年才正式开始。目前, 中央气象台定义小时降水量超过 20 mm 的降水为短时强降水。陶诗言<sup>[1]</sup> 研究显示, 我国历史上多次严重暴雨灾害中均伴有高强度的短时强降水。陈炯等<sup>[2]</sup> 对我国短时强降水的时空分布和季节变化特征进行详细研究, 指出华南为我国短时强降水的高发区域。田付友等<sup>[3]</sup> 基于  $\Gamma$  函数对超过不同阈值的小时降水分布进行分析, 指出除陈炯等<sup>[2]</sup> 给出的地区外, 鲁苏豫皖交界处也是短时强降水的高发区域。这些研究结果为了解我国短时强降水的时空分布特

征、在预报业务中锁定重点关注区域提供了依据。

高分辨率的中尺度模式是短时强降水短期预报的有力工具, 而受多方面限制<sup>[4]</sup>, 如模式初值敏感性<sup>[5-8]</sup>、资料同化<sup>[9-10]</sup>、积云参数化<sup>[11-12]</sup> 和边界层湍流扰动<sup>[13]</sup> 等过程描述准确性的影响等, 当前的模式尚不能完全满足针对强对流的预报需求。与此同时, Miller<sup>[14]</sup> 的研究显示, 通过一套程序严密的大尺度环境条件分析, 完全可以帮助确定可能的强对流天气出现区域, 并成功将这一流程用于业务化的分类强对流预报。Doswell 等<sup>[15]</sup> 在此基础上发展了一套基于配料的暴雨预报方法。Martín 等<sup>[16]</sup> 基于这一概念的一次龙卷过程显示, 该方法用于业务预报时可帮助预报员锁定可能的龙卷区域。张小玲等<sup>[17]</sup> 研究了这一方法在我国暴雨预报中的可能应用, 表明配料方法可以帮助预报员确定可能的暴雨发生区域。基于这一认识, 国家气象中心制订了用于我国分类强对流预报业务中的技术路线<sup>[18]</sup>。

2014-07-18 收到, 2015-03-11 收到再改稿。

资助项目: 气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013Z04), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002, GYHY201206004), 国家重点基础研究发展计划(2013CB430106)

\* email: tianfy@cma.gov.cn

配料方法的使用中,诊断物理量的敏感性分析是使用的。因此,多个国家的研究人员针对自己关注的特定强对流天气开展了诊断物理量的敏感性分析,如 Rasmussen 等<sup>[19]</sup>分析了美国超级单体和龙卷的多个诊断物理量特征,Kunz<sup>[20]</sup>对德国南部雷暴预报的对流参数和物理量进行了研究,Haklander 等<sup>[21]</sup>对荷兰雷电预报的多个物理量的敏感性进行了详细分析,Tian 等<sup>[22]</sup>对我国中东部暖季短时强降水相关的部分环境物理量的统计特征进行了初步分析。在这些研究中,物理量的计算多来自于空间分布较为稀疏的探空,实况资料的收集也多样化,在物理量和实况的匹配处理过程中均进行时空临近处理,如 Rasmussen 等<sup>[19]</sup>对数据进行处理时,认为探空资料的代表空间为 400 km,且至少要有 10 个闪电才可以确定为有对流出现。Haklander 等<sup>[21]</sup>的研究显示,探空站的空间代表范围对结果的影响显著,并最终确定 100 km 的空间范围。Kunz<sup>[20]</sup>使用雷达、站点观测和保险数据等多来源的资料对实况进行认定,Tian 等<sup>[22]</sup>则使用给定时刻前后 6 h 的实况小时降水最大值作为对应的实况。

雷电的有无可借助闪电定位仪、雷达和地面闪

电观测综合判断,龙卷可以借助人眼观测和雷达识别进行,但降水的准确测量尚只能依赖于地面雨量计。目前,我国已经布设的自动雨量站超过 40000 部,将这一资料应用于短时强降水相关诊断物理量敏感性的分析,对于短时强降水的预报有重要意义。

## 1 资料

相关研究表明<sup>[2-3]</sup>,我国的短时强降水主要分布在中东部海拔较低地区。因此,本文使用常规预报检验业务中我国海拔 1000 m 以下的 1887 个常规地面气象站作为检验站(图 1a)。加密自动雨量站数量每年变化,图 1b 给出了 2009—2010 年约 33000 个自动雨量站的分布。由于很多自动雨量站均无人值守,为了保证其质量,所有资料均经过气候学界限值检查和区域极值检查<sup>[23]</sup>。为了与 NCEP 最终分析场的时间分辨率相对应,本文最终所用资料为 2011—2012 年 6—8 月 6 h 间隔的加密自动雨量站降水资料。

用于表征环境大气不同特性的物理量有多个,其中与水汽相关的量包括大气水汽总量、比湿和相

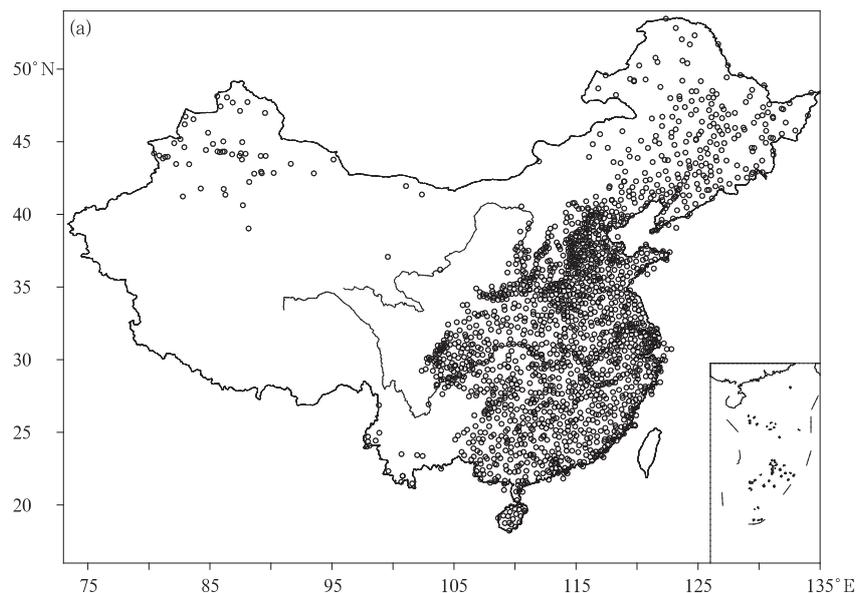
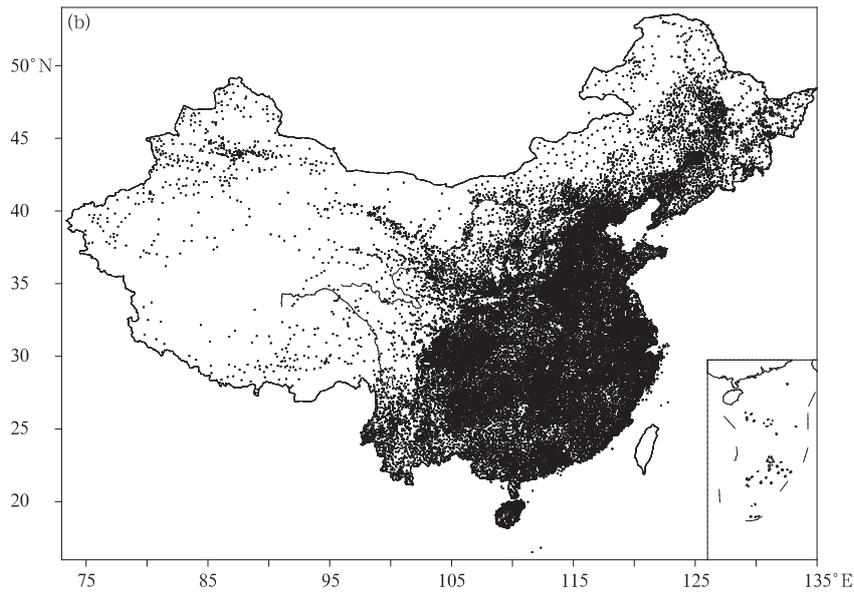


图 1 检验站、加密自动雨量站分布

- (a)海拔低于 1000 m 的 1887 个检验站(空心圆)的分布,  
(b)根据 2009—2010 年资料得到的加密自动雨量站分布

Fig. 1 The distribution of the verification stations, the automatic meteorological observation stations (AMOSs) (a) the distribution of 1887 verification stations(circles), (b) the distribution of the AMOSs obtained from the automatic observations during 2009 and 2010



续图 1

对湿度,表征大气运动状态的物理量包括低层散度和垂直风切变,表示大气层结稳定度的物理量有最佳对流有效位能、 $K$  指数、最优抬升指数、抬升指数、850 hPa和 500 hPa 温差以及沙氏指数,此外,还有温度和涡度平流散度,部分物理量的名称和单位见表 1,这些物理量均直接或间接来自 NCEP 最终分析场。

由于短时强降水为逐小时观测,为了更好地检验不同物理量对短时强降水的指示意义,将与 NCEP 最终分析场对应时刻前后共计 6 h 内的小时降水作为相应分析资料时刻的实况。由于 NCEP 最终分析场为格点场,通过双线性插值得到检验站的物理量值。

表 1 部分物理量名称和单位  
Table 1 Names and units of parameters

物理量名称	单位	物理量名称	单位
大气水汽总量	mm	最佳对流有效位能	$J \cdot kg^{-1}$
比湿	$g \cdot kg^{-1}$	850 hPa 与 500 hPa 温差	C
相对湿度	%	850 hPa 温度	C
水汽通量散度	$g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1}$	(最优)抬升指数	C
温度平流	$K \cdot s^{-1}$	总指数	C
涡度平流	$s^{-2}$	$K$ 指数	C
风场散度	$s^{-1}$	沙氏指数	C
垂直风切变	$m \cdot s^{-1}$	假相当位温	K

## 2 检验方法

### 2.1 传统两分类点对点检验

传统两分类检验中,TS 评分( $T$ )、预报偏差( $B$ )、虚警率( $F$ )和命中率( $H$ )等是用于反映预报水平的常用指标。这些指标作为确定性预报的评分标准,已纳入业务预报评价体系<sup>[24]</sup>。在这一检验体系中,首先对实况和预报的有无进行判断,其中分别用

$a, b, c$  和  $d$  代表预报正确的次数、实况有预报无的次数、实况无预报有的次数和实况无预报无的次数,从而可根据式(1)~式(4)计算相应的  $T, B, F$  和  $H$ 。

$$T = \frac{a}{a + b + c}, \quad (1)$$

$$B = \frac{a + b}{a + c}, \quad (2)$$

$$F = \frac{b}{a+b}, \quad (3)$$

$$H = \frac{a}{a+c}. \quad (4)$$

其中,  $T$  是剔除了实况无天气且预报无天气的预报准确率, 其值在  $0.0 \sim 1.0$  之间, 值越大表示预报准确率越高。预报偏差  $B$  是预报有天气和实况有天气站点数的比值, 可为大于  $0$  的任意值。当预报偏差为  $1.0$  时认为预报是无偏的, 当预报偏差在  $0.0 \sim 1.0$  之间时, 表示与实况相比, 预报范围偏小或站点数偏少, 预报偏差大于  $1.0$  表示预报范围偏大或站点数偏多。对于强对流和极端天气, 从预报服务和降低损失的角度考虑, 往往希望预报有适当的偏大, 以减少漏报率, 所以推荐的预报偏差  $B$  一般在  $1.0 \sim 2.0$  之间。虚警率  $F$  的取值在  $0.0 \sim 1.0$  之间,  $F$  越小表示预报结果越好。命中率  $H$  表示预报正确的比例, 取值也在  $0.0 \sim 1.0$  之间, 值越大预报准确率越高。

## 2.2 点对面检验

点对面检验中, 与  $T, B, F$  和  $H$  的计算有密切关系的  $a, b, c$  和  $d$  的计算要通过对常规地面气象站和其周围加密自动站的处理, 即通过搜索地面常规气象站一定距离范围内加密自动站的记录情况, 因此, 在实况判定过程中综合了常规地面气象站和加密自动雨量站两者的信息。常规地面气象站为检验站, 以每个检验站为中心, 其周围一定距离范围内的空间即是面(图 2), 分布在这一面上的加密自动站均可被相应的检验站检索到。

通过图 2 所示常规地面气象站与加密自动雨量站的点和面匹配示意图可知, 对于给定的检验站, 通过黑色圆圈所示的搜索范围对检验站一定半径内的加密自动站进行检索。检验站能否出现相应的实况, 主要受两方面因素的影响:

① 搜索半径。搜索半径越大, 能够搜索到加密自动站的可能性越大, 站点数量也越多, 越容易判定检验站出现了相应的实况。

② 满足条件的加密自动雨量站记录的数量(记录数阈值)。对于给定的搜索半径, 可以搜索到多个加密雨量自动站的记录满足要求。

本研究中重点考察搜索半径和记录数阈值是否存在上限。

相对于严格的点对点检验, 点对面检验使用了更多的天气实况信息。这一处理相当于扩大了实况

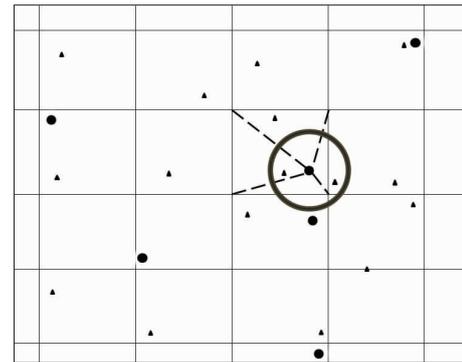


图 2 点对面检验示意(网格代表分析格点场, 黑色实心点表示用于检验的常规地面气象站(检验站), 黑色三角表示加密自动雨量站, 圆圈表示所能搜索的范围)  
Fig. 2 Schematic diagram of the point-area verification method(the lattice field indicates the numerical analysis field, the solid black dots represent the basic datum station, verification stations, and the gray triangles are the AMOSs, the black circle denotes the searching coverage around verification stations)

观测的空间范围(图 3), 但不影响预报结果。Hilliker<sup>[25]</sup>在对类似问题的研究中指出,  $a$  对  $T$  的影响尤其复杂, 由于  $a, b, c$  和  $d$  的相对变化对检验指标影响的讨论属于纯数学讨论的范畴, 下文将主要从物理量敏感性的角度讨论分析搜索半径和记录数阈值对预报评分的影响。

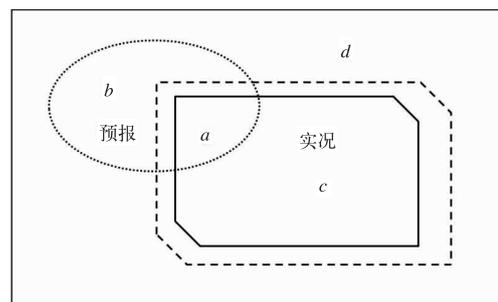


图 3 点对面检验对  $a, b, c$  和  $d$  的影响示意(外部方框表示样本空间, 椭圆虚线表示预报空间, 不规则多边形实线表示实况空间, 不规则虚线多边形表示采用点对面检验时被扩大的实况空间)  
Fig. 3 Sketch map of  $a, b, c$  and  $d$  affected by the point-area verification(the black box represents the total sample space, the dotted ellipse indicates the forecast field while the solid black polygon represents the observational field, the dashed polygon is the observational field with the point-area verification method, the observational field of the point-area is definitely enlarged)

### 3 搜索半径和记录数阈值对检验结果影响

#### 3.1 大气水汽总量

大气中的水汽总含量是决定短时强降水天气的一个重要配料<sup>[22]</sup>,因此,首先使用大气水汽总量分析不同搜索半径对点对点检验结果的影响。图 4 为各检验指标随搜索半径( $R$ )和大气水汽总量的变化。大气水汽总量越大越利于短时强降水,所以图 4 中大气水汽总量所对应的检验指标为将超过该值的部分作为被检验场时得到的计算结果。设定的加

密自动雨量站记录数阈值为 1,作为对比,也给出了使用点对点检验的结果。从不同检验指标的变化和分布可知,点对点检验是点对点检验搜索半径无限小时的一种特殊情况。对于同一个大气水汽总量值,根据传统的点对点检验得到的 TS 评分值均最小, $B$  最大, $F$  也最大,表明点对点检验结果均比点对点检验结果差。

点对点检验中,同一搜索半径的 TS 评分在达到最大值前随大气水汽总量的增大而增大,达到最大值后快速减少,但最大 TS 评分对应的大气水汽总量随搜索半径的增大而呈减小趋势。对于给定的

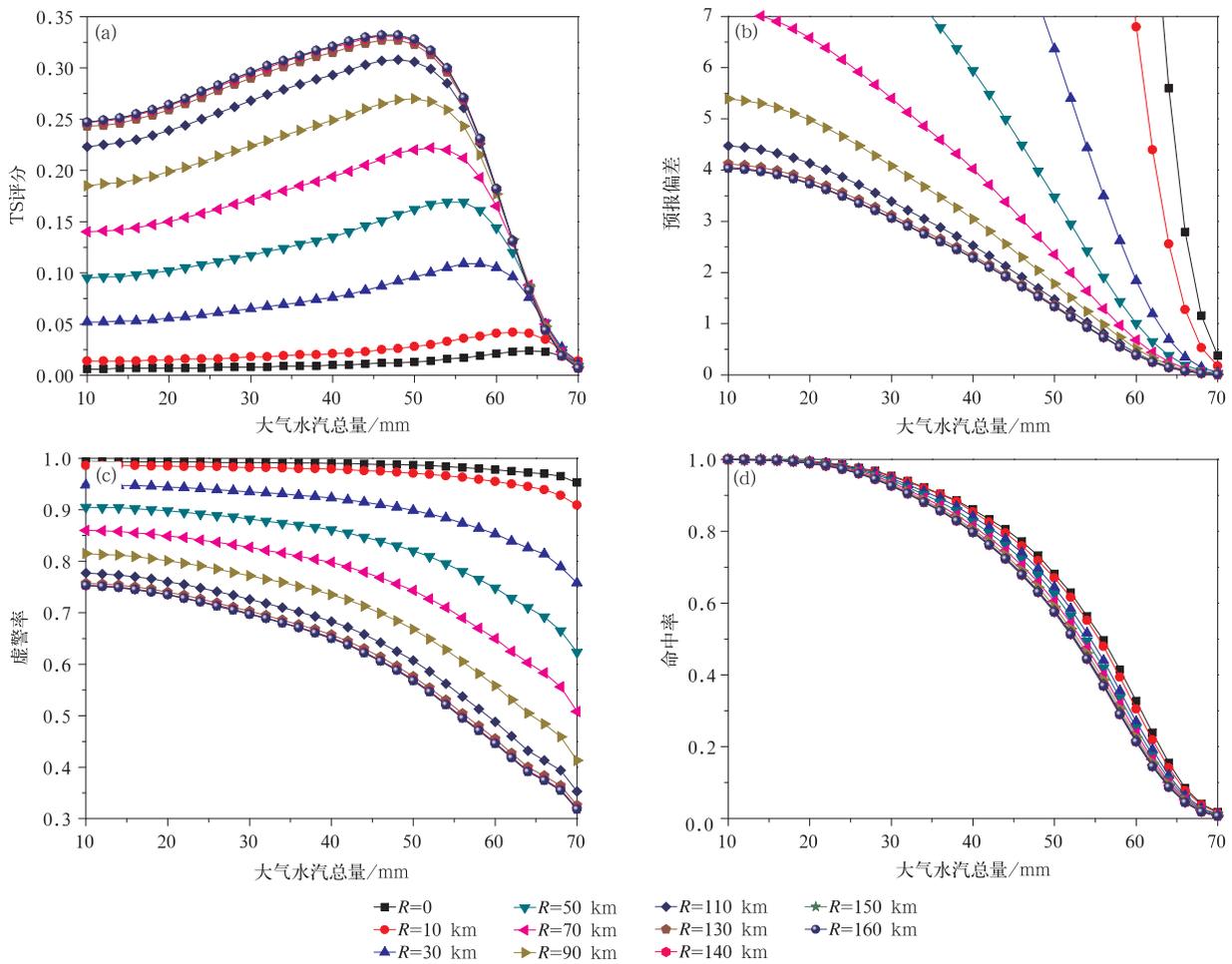


图 4 加密自动雨量站的短时强降水记录数阈值为 1 时,检验指标随搜索半径和大气水汽总量的变化 ( $R=0$  表示使用严格点对点检验时的结果) (a)TS 评分,(b)预报偏差,(c)虚警率,(d)命中率

Fig. 4 Variation of scores with the searching radius and total precipitable water when the basic datum station is considered a short-duration heavy rainfall record while at least one AMOS has

a record of short-duration heavy rainfall reported

( $R=0$  represents results obtained with the traditional point-point verification method)

(a) threat scores, (b) bias, (c) false alarm ratio, (d) hit rate

大气水汽总量, TS 评分先随搜索半径的增大而增大, 但当搜索半径达到 140 km 以后, TS 评分趋于稳定, 大气水汽总量在 48 mm 处达到其 0.331 的极大值。可见, 搜索半径并不能无限增大, 而是存在一个上限值。虽然 TS 评分是我国业务预报的主要衡量指标之一, 但 Wilks<sup>[26]</sup> 指出, 除考虑 TS 评分外, 还需要考虑预报偏差  $B$ 。由图 4b 中  $B$  的分布可知, 对于给定的搜索半径,  $B$  随大气水汽总量的增大而减小, 并逐渐趋于合理范围; 对于给定的大气水汽总量,  $B$  随搜索半径的增大而快速减小, 且当搜索半径增大至 140 km 后,  $B$  不再随搜索半径的变化而变化, 这与 TS 评分变化一致。当 TS 评分在 140 km 搜索半径和 48 mm 大气水汽总量处取得其 0.331 的极大值时, 对应的  $B$  为 1.534, 位于 1.0~2.0 的理想取值范围内。虚警率  $F$  显示了与  $B$  类似的特征, 然而, 命中率  $H$  只随大气水汽总量变化, 对搜索半径的响应并不明显, 由式(4)和图 2 可知, 这可能与点对点检验中  $a$  和  $c$  出现次数的同步增减有关。

尽管大气水汽总量对短时强降水天气的发生非常重要, 但短时强降水的强度和影响范围与大气水汽总量的量值和范围之间非线性关系, 因此, 对于给定的搜索半径, 当 TS 评分达到最大值前随大气水汽总量的增大而增大, 此后却快速减小的现象, 可能与产生短时强降水的物理机制有关; 即满足相应大气水汽总量数值的空间范围随大气水汽总量的增大而不断减小, 虽然短时强降水出现需要一定的水汽条件, 但如果大气水汽总量超过一定量值, 由于满足该水汽条件的范围减小, 从而导致短时强降水天气漏报的可能性增大。图 4c 所示最为显著, 大气水汽总量越大且搜索半径越大时, 表明更大地理范围内的水汽条件均较为充沛, 即有更大地理范围的大气水汽总量满足短时强降水的水汽条件, 此时, 对于同样的动力抬升触发条件, 水汽辐合也将更显著, 从而产生短时强降水的可能性也更高。因此, 通过点对点检验表现出来即是同一大气水汽总量时 TS 评分随搜索半径的增大而增大, 虚警率  $F$  则随搜索半径的增大而减小。以上结果也从另一个方面表明, 水汽含量的多少和其控制范围对短时强降水的重要性, 即对某一地点而言, 140 km 范围外的大气水汽对该点 3 h 内能否出现短时强降水的影响非常有限, 而在 140 km 范围内, 大气水汽总量越大, 该点

周边 3 h 内出现短时强降水的可能性也越大。

对某一点而言, 既然只有半径 140 km 内的水汽对其在 3 h 内能否出现短时强降水更有意义, 那么将搜索半径设定为 140 km, 分析不同记录数阈值对检验结果的可能影响。图 5 为将搜索半径设定为 140 km 时, 各检验指标随记录数阈值( $N$ )和大气水汽总量阈值的变化, 同时也给出了点对点检验结果。可知, 随记录数阈值从 1 增加至 15, 相应检验指标的分布与点对点检验结果越来越接近, 点对点检验可看作是点对点检验的一种特殊情况, 即搜索记录数阈值无限大时的特殊情况。

从不同指标的分布看, 不同的记录数阈值对各指标的影响与搜索半径(不超过 140 km 时)的影响刚好相反, 这与要求越苛刻条件越难以满足, 使图 2 中的  $a$  难以快速增大有关。对于给定的记录数阈值, TS 评分先随大气水汽总量的增大而增大, 达到其最大值后, 随大气水汽总量的增大而快速减小, 且不同记录数阈值时的 TS 评分最大值对应的大气水汽总量随记录数阈值的增多而增大, 表明出现短时强降水的站点数越多, 需要的大气水汽总量也越大, 即更大地理范围的短时强降水需要更强的水汽条件; 但给定大气水汽总量时的 TS 评分随记录数阈值的增大其增长速率不断减小, 可能与产生短时强降水的对流云团的尺度不能无限增长有关, 即对流云团的空间尺度本身存在一个上限, 而短时强降水主要是由对流云团直接产生的。

加密自动雨量站记录数阈值对点对点检验的重要影响显而易见, 既需要的记录个数越多, 条件越难以达到, 从而得到的 TS 评分也越低, 偏差也会越大, 虚警率  $F$  也越高。同时也表明, 点对点检验既然是搜索记录数阈值无限大时的一种特殊情况, 其结果也必然使检验指标显著偏低, 可见, 点对点检验得到的结果并非真实预报技巧和水平的客观表现。

### 3.2 最优抬升指数

对最优抬升指数的分析可以指示短时强降水对环境不稳定条件的敏感性。由于最优抬升指数越小表征不稳定性越强, 所以图 6 和图 7 中不同检验指标值的获得是根据小于给定最优抬升指数的部分统计得到  $a, b, c$  和  $d$  的值后, 再根据式(1)~式(4)计算得到的结果。各检验指标的变化特征与大气水汽总量相反(图 4), 这与大气总的水汽含量越大越利

于短时强降水、最优抬升指数越小越利于短时强降水有关。点对点检验作为点对点检验搜索半径无限

小时的特殊情况再次得到验证。

针对最优抬升指数的分析也表明,140km的搜

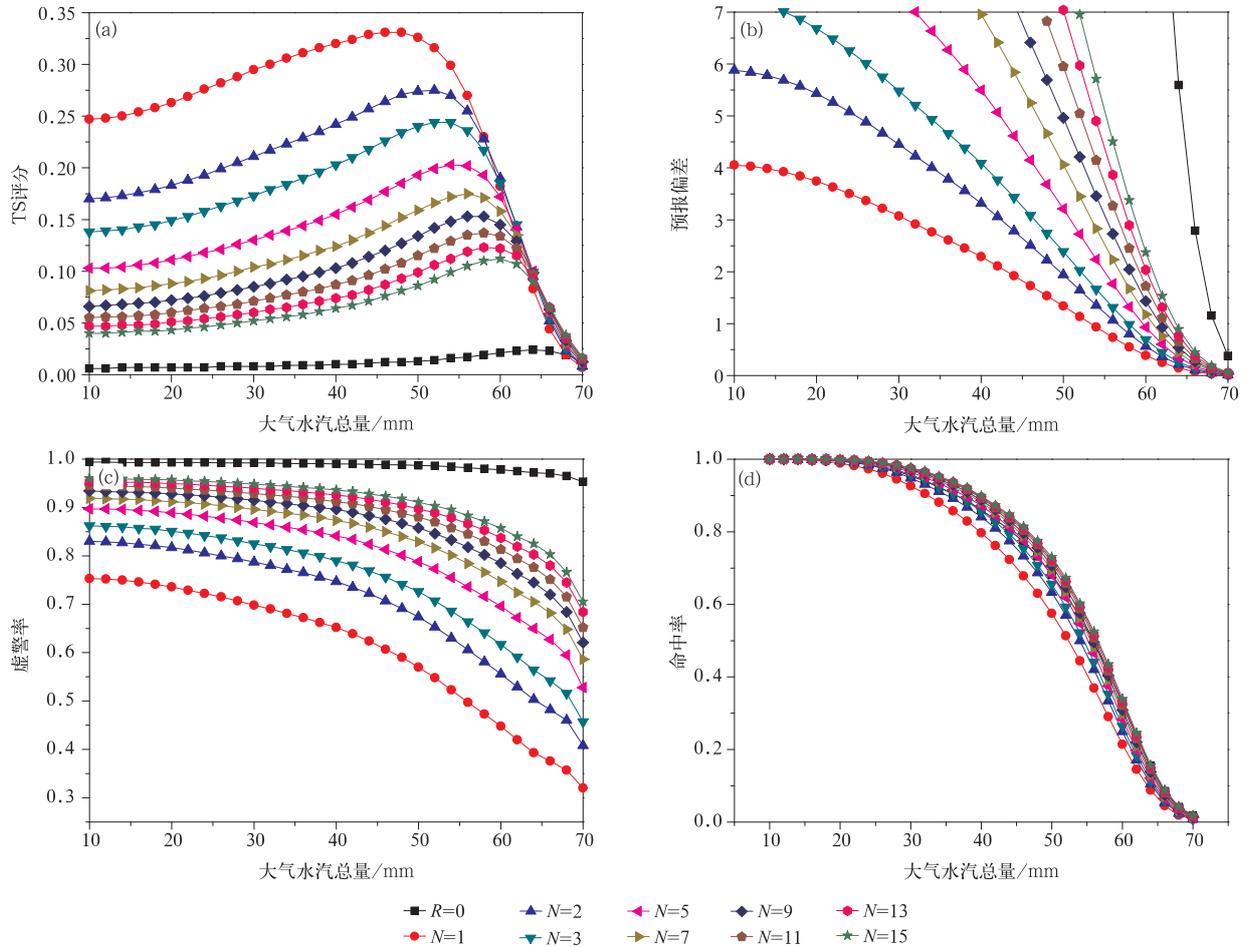


图 5 设定搜索半径为 140 km 时,检验指标随记录数阈值和大气水汽总量的变化 (R=0 表示使用点对点检验时的结果)

(a)TS 评分,(b)预报偏差,(c)虚警率,(d)命中率

Fig. 5 Scores variation with the total precipitable water and the AMOS number of short-duration heavy rainfallwith 140 km searching radius(R=0 represents results obtained with the traditional point-point verification method) (a)threat scores,(b)bias,(c>false alarm ratio,(d)hit rate

索半径上限也同样适用于大气环境的不稳定条件,即对于给定的最优抬升指数,搜索半径小于140 km 时,TS 评分随搜索半径的增大而增大,偏差 B 随搜索半径的增大而减小,虚警率 F 则随搜索半径的增大而减小;搜索半径超过 140 km 时,T,B 和 F 不再随搜索半径的变化而变化,表明 140 km 的范围可能是一个普遍适用的半径,即对于某点 3 h 内能否出现短时强降水,140 km 内的热力不稳定条件才会产生影响。

对于给定的搜索半径,TS 评分随最优抬升指数

的增大先增大后减小。不同搜索半径时的最大 TS 评分对应的最优抬升指数随搜索半径的增大而增大,当搜索半径为 140 km 时,TS 评分在最优抬升指数为 -1℃ 时取得其 0.310 的极大值。尽管 TS 最大值均出现在最优抬升指数为负时,但在最优抬升指数大于 0℃ 时,仍能得到一定的 TS 评分,且命中率 H 较高,但此时预报偏差几乎均超过 3.0,且 F 均超过 0.7,显示了严重的空报。当最优抬升指数小于 -7℃ 时,T,B 和 H 均趋于 0,这与最优抬升指数一般不小于 -7℃ 有关。

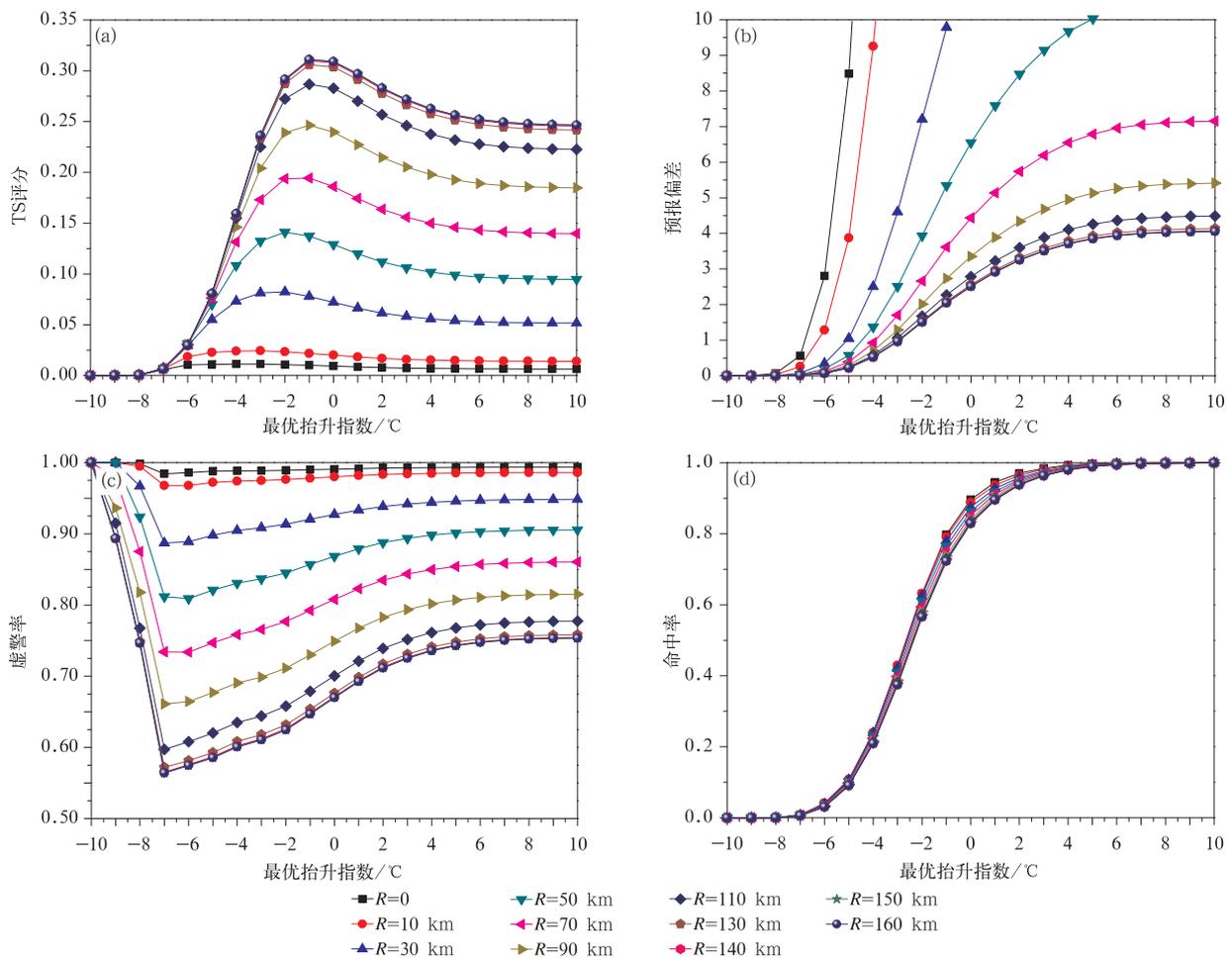


图6 同图4,但为最优抬升指数

Fig. 6 The same as in Fig. 4, but for the best lifted index

既然 140 km 的搜索半径也适用于最优抬升指数,同样设定搜索半径为 140 km,考察记录数阈值对检验结果的影响。TS 评分的变化显示(图 7a),对于给定的记录数阈值,TS 评分随最优抬升指数的增大先增大后减小,只是记录数阈值越大,TS 评分随最优抬升指数变化的曲线与点对点时的结果越接近,其波动也越小。对于给定的最优抬升指数,TS 评分随记录数阈值的增大而快速减小,记录数阈值越大,减小的速率越慢。预报偏差  $B$  和虚警率  $F$  也显示了类似特征(图 7a 和 7b)。因此,对于记录数阈值的选择,需要根据实际情况慎重选择。点对点检验结果可看作给定搜索半径时,搜索记录数阈值无限大时的情况,这与根据大气水汽总量得到的结论一致。

### 3.3 大气水汽总量和最优抬升指数结果讨论

以上分析显示,大气水汽总量对短时强降水天

气意义显著,在点对点检验中,仅使用大气水汽总量指示短时强降水也可以达到 0.331 的 TS 评分,远远超过了点对点检验 0.024 的最大 TS 评分。最优抬升指数对短时强降水的指示意义比大气水汽总量差,但也远远超过了点对点检验的结果。造成结果之间巨大差别的原因可能与造成短时强降水天气系统的水平尺度有关,即短时强降水一般由中小尺度系统产生,但也可能与形成短时强降水的大尺度环境条件有关,即只有 140 km 内的水汽、不稳定等条件对某点能否在 3 h 内出现短时强降水产生影响,超过此距离的物理量将难以在 3 h 内对该点产生作用。因此,140 km 的半径可能是我国中东部产生短时强降水天气时的环境大气物理量的影响半径,但也可能是中小尺度系统或中尺度雨团的最多出现半径,尚需通过中尺度对流系统的分布统计和相关研究进一步验证。

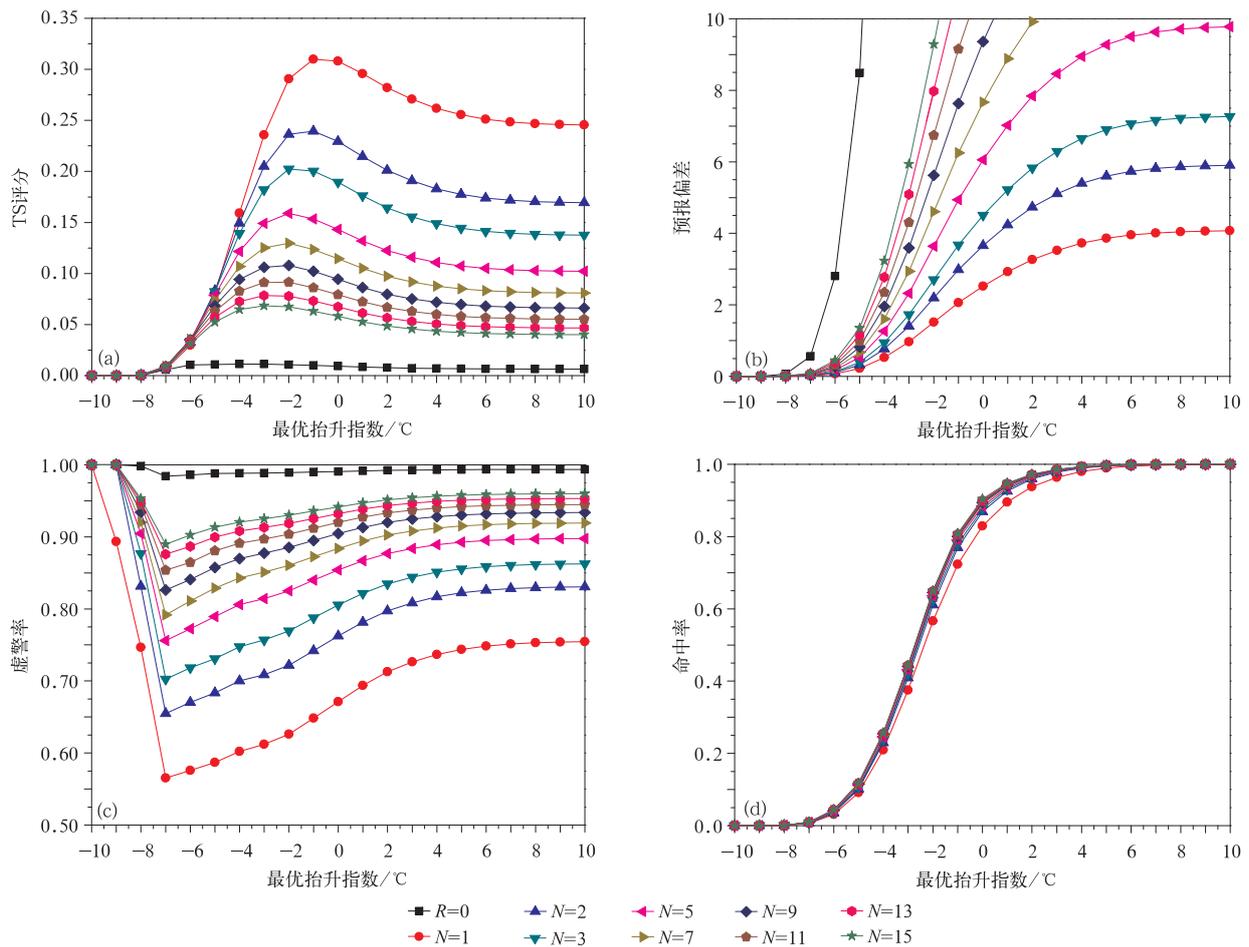


图 7 同图 5, 但为最优抬升指数

Fig. 7 The same as in Fig. 5, but for the best lifted index

在某些情况下,如无人值守的加密自动雨量站的虚假记录等,取记录数阈值数为 1 时会使得检验结果的代表性不够,因此,本文推荐使用记录数阈值 2,即当在 140 km 的范围内搜索到 2 个加密自动雨量站出现短时强降水记录时,可以认为检验站点也出现短时强降水,但对于质量可靠的数据,使用 1 个搜索记录数阈值也是合理的。

#### 4 诊断物理量的敏感性

第 3 章的分析显示,大气水汽总量对短时强降水的指示意义要优于最优抬升指数,但在基于物理成因的短时强降水预报中,预报员需要关注更多物理量的分布情况。表 2 给出了将搜索半径和记录数阈值分别设定为 140 km 和 2 的情况下,根据 TS 评分大小得到的不同物理量的排序及其最佳阈值。在排序过程中,不仅考虑了 TS 评分的大小,且要求预

报偏差  $B$  在 1.0~2.0 之间,如果 TS 评分取最大值时  $B$  不满足,则取  $B$  值最接近 1.0~2.0 区间时的 TS 评分大值。因此,表 2 中给出的并不全是 TS 评分的最大值,但通过表 2 预报偏差  $B$  的取值可知,除 700 hPa 水汽通量散度和 850 hPa 散度场外,其他量均满足 TS 评分取最大值时  $B$  在 1.0~2.0 之间的要求。

表 2 显示,排名前十的物理量中包含了大部分完全表征大气水汽条件的量,如大气水汽总量、925 hPa 和 850 hPa 比湿,因此,水汽相关量对短时强降水的指示意义最好,说明水汽是决定能否出现短时强降水天气的基础条件,预报中需要重点考虑。表征湿热条件的  $K$  指数的表现与大气水汽总量相当,均显著优于其他物理量,表明与水汽相关的湿热指标可以很好地用于指示短时强降水。沙氏指数表明,不稳定条件也是影响短时强降水出现的重要条

件。通过对比不难发现,无论是低层还是中层的水汽通量散度和温度平流,其各项评分指标均相当,表明不同层次的水汽通量散度和温度平流对短时强降水的指示意义均比较接近且不显著。

在表征触发条件的散度场中,925 hPa 散度的

指示意义要好于 850 hPa 散度,表明近地层的辐合触发对于短时强降水的指示意义更为显著。垂直风切变单独用于短时强降水预报时,其表征意义不够显著。

表 2 设定搜索半径和记录数阈值分别为 140 km 和 2 时,按照 TS 评分从大到小排列的不同物理量的评分和阈值  
Table 2 Parameters listed in descending order of TS, all the scores are obtained with the setting of 140 km searching radius and at least two AMOSs short-duration heavy rainfall reported

物理量	最佳阈值	单位	<i>T</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
大气水汽总量	52	mm	0.275	1.645	0.653	0.570
K 指数	35	℃	0.275	1.596	0.649	0.560
850 hPa 比湿	13	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.263	1.542	0.657	0.629
850 hPa 假相当位温	342	K	0.261	1.860	0.682	0.591
700 hPa 假相当位温	342	K	0.256	1.938	0.691	0.599
925 hPa 比湿	15	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.248	1.705	0.685	0.537
925 hPa 假相当位温	348	K	0.235	1.564	0.688	0.488
沙氏指数	0	℃	0.235	1.714	0.699	0.516
最佳对流有效位能	500	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.226	1.972	0.722	0.548
700 hPa 相对湿度	80	%	0.215	1.882	0.729	0.510
抬升指数	-3	℃	0.213	1.523	0.709	0.443
最优抬升指数	-3	℃	0.205	1.403	0.709	0.409
850 hPa 相对湿度	85	%	0.192	1.363	0.721	0.380
925 hPa 水汽通量散度	$-1 \times 10^{-7}$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$	0.180	1.308	0.731	0.352
850 hPa 水汽通量散度	$-1 \times 10^{-7}$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$	0.149	1.006	0.741	0.260
700 hPa 水汽通量散度	$0 \times 10^{-7}$	$\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$	0.151	2.938	0.824	0.516
925 hPa 散度	$-1 \times 10^{-5}$	$\text{s}^{-1}$	0.147	1.048	0.750	0.262
925 hPa 温度平流	$5 \times 10^{-6}$	$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	0.144	1.621	0.797	0.329
850 hPa 温度平流	$10 \times 10^{-6}$	$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	0.143	1.607	0.797	0.326
500 hPa 温度平流	$10 \times 10^{-6}$	$\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$	0.136	1.724	0.811	0.326
500 hPa 温度	20	℃	0.129	1.401	0.805	0.273
0~3 km 垂直风切变	7	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.129	1.705	0.818	0.310
500 hPa 涡度平流	$2 \times 10^{-10}$	$\text{s}^{-2}$	0.120	1.734	0.831	0.293
925 hPa 涡度平流	$0 \times 10^{-10}$	$\text{s}^{-2}$	0.119	1.746	0.833	0.291
总指数	44	℃	0.117	1.444	0.823	0.255
0~1 km 垂直风切变	7	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.117	1.260	0.812	0.236
850 hPa 散度	$-1 \times 10^{-5}$	$\text{s}^{-1}$	0.116	0.842	0.773	0.191
850 hPa 涡度平流	$1 \times 10^{-10}$	$\text{s}^{-2}$	0.114	1.558	0.832	0.261
0~6 km 垂直风切变	11	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.089	1.609	0.867	0.214
850 hPa 与 500 hPa 温差	24	℃	0.072	1.838	0.896	0.191

## 5 结论与讨论

对诊断物理量的准确认识可以帮助提高短时强降水的预报准确率,并帮助理解产生短时强降水的可能机制。本文考虑我国降水观测网的布设特点,结合 NCEP 最终分析资料的物理量场,基于一种综合使用常规地面气象站和加密自动雨量站的点面对面检验方法,以大气水汽总量和最优抬升指数为例,在对点对点两方面的属性进行讨论的基础上,分析了

可表征短时强降水环境特征的诊断物理量的敏感性,得到以下主要结论:

1) 常规的点对点检验是点面对面检验的特殊情况,既可以认为是搜索半径无穷小的情况,也可以认为是给定搜索半径时记录数阈值上限无穷大时的情况。

2) 用于指示短时强降水时,大气水汽总量和最优抬升指数均存在最佳阈值,且 140 km 范围内的大气状况才对某点 3 h 内能否出现短时强降水具有直接影响。

3) 综合考虑加密自动雨量站资料质量等方面的影响,对于水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 最终分析资料,建议点对面检验的搜索半径和记录数阈值为 140 km 和 2。

4) 对 NCEP 最终分析资料中多个物理量对短时强降水指示意义的分析显示,与水汽相关量的指示意义最好,其次是表征热力条件的量,表征动力条件和垂直风切变的量的指示意义不够显著。

点对面检验相当于扩大了常规检验体系中  $a$  和  $c$  的数量的同时减少了  $b$  和  $d$  的数量,使这一检验方法更适合与强对流天气相关的极端或小概率事件的检验,如短时强降水、冰雹和雷暴大风等天气。本文既是对与短时强降水相关物理量敏感性的分析,也是对加密自动雨量站资料在预报检验中的应用进行的探索,是对利于短时强降水的大尺度环境场认识的深入,也是对检验方法本身的探讨。基于点对面的不同物理量对短时强降水预报的对比分析对该类天气的主观业务预报具有一定参考价值,但本文结果主要基于  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP 最终分析资料得到的,该工作还是探索性的,尚需更多研究补充和完善。

致谢:感谢国家气象中心盛杰和曹艳察提供基于 NCEP 最终分析场的诊断物理量资料。

### 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析. 气象学报, 2013, 71(3): 367-382.
- [3] 田付友, 郑永光, 毛冬艳, 等. 基于  $\Gamma$  函数的暖季小时降水概率分布. 气象, 2014, 40(7): 787-795.
- [4] Doswell III C A. Short-range Forecasting. Mesoscale Meteorology and Forecasting//Ray P E. Boston: American Meteorological Society, 1986.
- [5] Etherton B, Santos P. Sensitivity of WRF forecasts for south Florida to initial conditions. *Wea Forecasting*, 2008, 23: 725-740.
- [6] Torn R D, Hakim G J. Initial condition sensitivity of western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 2009, 137: 3388-3406.
- [7] 常越, 薛纪善, 何金海. 水汽场初值调整及其对华南降水预报贡献的研究. 应用气象学报, 2000, 11(1): 35-46.
- [8] 管成功, 陈起英, 王娟, 等. 初值中云变量对 T213 预报性能的影响. 应用气象学报, 2007, 18(5): 594-600.
- [9] 王金成, 龚建东, 邓莲堂. GNSS 反演资料在 GRAPES\_Meso 三维变分中的应用. 应用气象学报, 2014, 25(6): 654-668.
- [10] 高郁东, 万齐林, 薛纪善, 等. 同化雷达估算降水率对暴雨预报的影响. 应用气象学报, 2015, 26(1): 45-56.
- [11] Molinari J, Dudek M. Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: A critical review. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 326-344.
- [12] 沈新勇, 黄文彦, 王卫国, 等. 利用 TWP-ICE 试验资料对比两种边界层参数化方案. 应用气象学报, 2014, 25(4): 385-396.
- [13] Davies H C. Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models. *Mon Wea Rev*, 1983, 111: 1002-1012.
- [14] Miller R C. Notes on Analysis and Severe-storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central. Air Weather Service (MAC), USAF, Technical Report 200 (Rev), 1972: 1-183.
- [15] Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 1996, 11: 560-581.
- [16] Martín F, Riosalido R, Esteban L de. The Sigüenza tornado: A case study based on convective ingredients concept and conceptual models. *Meteorol Appl*, 1997, 4: 191-206.
- [17] 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 基于“配料”的暴雨预报. 大气科学, 2010, 34(4): 754-756.
- [18] 国家气象中心. 中尺度天气分析业务技术规范. 2013: 1-31.
- [19] Rasmussen E N, Blanchard A O. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 1148-1164.
- [20] Kunz M. The skill of convective parameters and indices to predict isolated and severe thunderstorms. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2007, 7: 327-342.
- [21] Haklander A J, Delden A Van. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. *Atmos Res*, 2003, 67-68: 273-299.
- [22] Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *J Meteor Res*, 2015, 29, doi:10.1007/s13351-014-4119-y.
- [23] 任芝花, 赵平, 张强, 等. 适用于全国自动站小时降水资料的质量控制方法. 气象, 2010, 36(7): 123-132.
- [24] 黄卓. 气象预报产品质量评分系统. 北京: 中国气象局预测减灾司, 2001: 9-11.
- [25] Hilliker J L. The sensitivity of the number of correctly forecasted events to the threat score: A practical application. *Wea Forecasting*, 2004, 19: 646-650.
- [26] Wilks D S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (3rd). New York: Academic Press, 2011: 301-391.

## Sensitivity Analysis of Short-duration Heavy Rainfall Related Diagnostic Parameters with Point-area Verification

Tian Fuyou<sup>1)2)3)</sup> Zheng Yongguang<sup>3)</sup> Zhang Tao<sup>3)</sup> Mao Dongyan<sup>3)</sup> Tang Wenyuan<sup>3)</sup>  
Zhou Qingliang<sup>3)</sup> Sun Jianhua<sup>1)2)</sup> Zhao Sixiong<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS),  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

<sup>2)</sup> (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

<sup>3)</sup> (*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

### Abstract

The knowledge about the short-duration heavy rainfall related diagnostic parameters is very important for improving the accuracy, and it can help understand the possible mechanism of meso-scale system producing short-duration heavy rainfall. The data collections of basic datum stations (verification stations), automatic meteorological observation stations (AMOSs), and 6-hours NCEP final analysis data (FNL) diagnostic parameters from 2011 to 2012 during 1 June and 31 August are used. By considering characteristics of rain gauge distribution, the total precipitable water and the best lifted index obtained from NCEP FNL are firstly analyzed with the “point-area” verification method to reveal the sensitivities of short-duration heavy rainfall to the environment conditions. Values of diagnostic parameters for a specific basic datum stations (verification stations) is obtained by adopting bilinear interpolation method.

Results show that the popularly used verification is just special cases of “point-area” verification; One could be reached by setting infinitesimal searching radius, the other can be reached by setting the record threshold infinite. Both the total precipitable water and best lifted index have optimum thresholds indicating short-duration heavy rainfall, and the short-duration heavy rainfall in 3 hours can only be directly affected by the moisture and instability within the radius of 140 km. A searching radius and a record threshold of 140 km and 2 are supposed, respectively, for  $1^\circ \times 1^\circ$  NCEP dataset. A total precipitable water of 55 mm divides the threat score ( $T$ ) into monotone increasing and monotone decreasing parts, indicating under-forecast and over-forecast, respectively. A best lifted index of  $-2^\circ\text{C}$  divides the threat score into over-forecast and under-forecast parts. It is found that the total precipitable water and  $K$  index are equal better while both got the same highest threat scores of 0.275 with the bias ( $B$ ) desirable and the false alarm ratio ( $F$ ) and the hit rate ( $H$ ) in the reasonable range. Short-duration heavy rainfall is most sensitive to parameters concerning the environment water vapor, nine of the top ten diagnostic parameters are water vapor related parameters. Parameters indicating environment instability conditions are also influencing, but parameters used to represent dynamic conditions and vertical wind shear conditions are lower ranked.

**Key words:** diagnostic parameters; short-duration heavy rainfall; point-area verification; searching radius; threshold of records