

# 场相似在汛期暴雨预报中的应用

闫丽凤 蔡则鹏

王建国

(山东省烟台市气象局, 264001)

(山东省气象局)

宋同文

(山东省烟台市气象局)

## 提 要

采用相似原理,利用车贝雪夫多项式对暴雨发生前期高空三层的高度场展开,突出与历史暴雨过程场相似特点。在高度场相似的基础上,又对和暴雨关系密切的 $Q$ 矢量散度,水汽通量及其散度,潜在不稳定性等物理量进行诊断分析,也取场的主要分布特点来进一步逼近,进行最佳相似预报和相似分析预报。通过试报和业务使用,效果较好。

**关键词:** 场相似 车贝雪夫多项式 暴雨预报

## 引 言

烟台汛期为6月下旬到9月上旬,全市大部分测站出现的汛期暴雨占全年暴雨总次数80%以上,部分站甚至多达90%以上。本文重点研究汛期暴雨。为扩大暴雨样本数,我们把暴雨标准定为:全市11个测站中,凡有:①3站或3站以上出现暴雨(日降水量 $\geq 50\text{mm}$ ,下同);②2站暴雨,另有2站或2站以上日降水量在38~50mm之间;③1站暴雨,另有4站或4站以上日降水量在38~50mm之间;④6站或6站以上日降水量在38~50mm之间。满足上述条件之一者,定为汛期一个暴雨日(以下简称暴雨)。以此标准,从1971~1994年,烟台市共出现暴雨70次,平均每年2.9次。

影响烟台暴雨的天气系统以气旋类居多,在70例中占32例,切变线次之,占24

例。我们重点研究气旋、切变线二种类型的暴雨。且主要介绍我们如何从场相似出发,再以物理量诊断分析进一步逼近,做出暴雨预报的方法。

## 1 场相似分析方法

相似预报方法是天气预报业务工作中经常使用的方法。如果将相似预报建立在比较完整系统的相似概念基础上,即建立在场与场之间相似的基础上,则更能把握事物的本质特征。车贝雪夫多项式正是认识场的特征的一种有效方法<sup>[1]</sup>,并在预报业务工作中发挥了作用<sup>[2]</sup>。车贝雪夫多项式展开可以将离散格点所组成的场 $Z(i, j)$ 分解为若干标准场,其系数为:

$$A_{KS} = \frac{\sum_{i=1}^{I_0} \sum_{j=1}^{J_0} Z(i, j) \varphi_k(i) \Psi_s(j)}{\sum_{i=1}^{I_0} \sum_{j=1}^{J_0} \varphi_k^2(i) \Psi_s^2(j)} \quad (1)$$

式中  $\varphi_k(i)$  为 X 方向 K 阶多项式,  $\Psi_s(j)$  是 Y 方向 S 阶多项式, A 为车贝雪夫多项式系数(简称车氏系数),它表征所对应的标准场的权重,反应  $Z(i, j)$  的分布规律。 $A_{KS}$  的物理意义分别是:  $A_{00}$  表征展开区间场量的平均;  $A_{01}$  表征  $Z(i, j)$  场从南到北线性变化的权重,也称纬向环流指数;  $A_{02}$  表征  $Z(i, j)$  从南到北抛物线变化的权重,也称纬向切变指数;  $A_{10}$  表征  $Z(i, j)$  从东向西线性变化的权重,也称经向环流指数;  $A_{20}$  表征  $Z(i, j)$  从东到西抛物线变化权重,也称经向切变指数;  $A_{11}$  表征  $Z(i, j)$  鞍型场的变化权重等等。不难看出,由离散格点所组成、很难进行准确描述的  $Z(i, j)$  场,经过车贝雪夫多项式展开就可以变成若干有确定含义的标准场。用其所对应的权重系数进行相似分析,就能进行真正含义上的场相似分析。

相似分析方法可以采取常用的求相似系数  $S_{ik}$  :

$$S_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m X_{ij} X_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m X_{ij}^2 \sum_{j=1}^m X_{kj}^2}} \quad (2)$$

在用车氏系数求  $S_{ik}$  的时候,式中  $X_{ij}$ 、 $X_{kj}$  分别代表  $n$  组  $m$  个  $A_{KS}$ 。

## 2 高度场的相似分析结果

高度场是高空天气形势的主要内容,我们从暴雨前期高度场的相似分析入手,做好暴雨研究的基础工作。取  $25 \sim 45^\circ\text{N}$ ,  $105 \sim 135^\circ\text{E}$  范围内 500、700、850hPa 的高度资料,用车贝雪夫多项式分别对高度场进行展开,得到一系列车氏系数  $A_{KS}$ ,进而分析高空三层高度场相似情况。由于资料来源限制,我们只能做 1979 年以后高度场相似的分析工作,其中气旋型暴雨 12 个,切变型暴雨 13 个。

### 2.1 气旋型暴雨

气旋型暴雨前期高度场相似分析的结果可分成两种类型:气旋 I 型和 II 型。

气旋 I 型代表个例为 1979 年 6 月 23 日(编号为①),它和其它 4 个个例都有较好的相似关系(见图 1)。

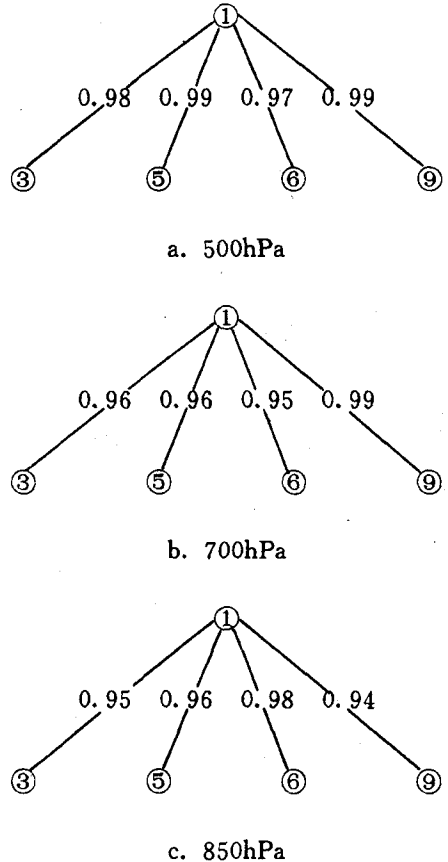


图 1 气旋 I 型代表个例与其它个例的相似系数

图中①、③...为气旋型暴雨编号,联线中间的数字为相似系数值。从图中可以看出,①例和其它 4 例的场相似系数值都在 0.94 以上,这说明气旋 I 型的高度场基本具备固有的特征;且上下层高度场配置的合理性和一致性,才能提供产生暴雨的前期环流背景。

从代表个例①的车氏系数(表 1),我们

可以认识这种环流背景的主要特点。由表1可见:500hPa,  $A_{10}$  值特别突出,说明自东向西线性变化即东高西低的形势非常明显。其次  $A_{01}$  较大,整个高度场仍有较为明显的南高北低的形势。这两个标准场叠加的结果,在展开区间的西北方就有明显的低值区。再加上处于第三位的  $A_{02}$  表示南北低中间高,处

于第四位的  $A_{11}$  表示东北、西南高,西北、东南低。这两个叠加进去,进一步突出西北方的低值区,说明西北方存在一个明显的低值系统。这与500hPa的实况图十分吻合。同样,700、850hPa 车氏系数叠加的结果,在西北方存在一更加明显的低值系统,一般为低涡,也与实况相吻合(图2)。

表1 气旋I型①例展开后的车氏系数

| 高度/hPa | $A_{00}$ | $A_{01}$ | $A_{02}$ | $A_{03}$ | $A_{10}$ | $A_{20}$ | $A_{30}$ | $A_{11}$ | $A_{12}$ | $A_{13}$ | $A_{21}$ | $A_{22}$ | $A_{23}$ | $A_{31}$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 500    | 583.5    | 0.292    | -0.029   | 0.006    | 0.885    | -0.002   | 0.001    | -0.017   | 0.007    | -0.001   | -0.008   | 0.001    | 0        | 0        |
| 700    | 313.2    | 0.427    | 0.022    | 0.002    | 0.445    | 0.002    | 0.001    | 0.002    | 0.004    | 0        | 0.005    | 0.001    | 0        | 0        |
| 850    | 149.8    | 0.46     | -0.014   | -0.003   | 0.314    | -0.01    | 0.002    | 0.018    | 0.002    | 0        | -0.004   | 0        | 0        | 0        |

气旋II型其代表个例为1980年6月29日,编号②。它和其它5个个例也有较好的相似关系,每个个例三层和②例的相似系数一般都超过0.95。这也说明气旋II型的高度场基本具有固有特征和上下层配合的一致性和合理性。

气旋型暴雨前期高度场的相似分析结果,可以分成两种类型,但是它们有共同的特点:高空经向环流指数很大( $A_{10} > 0.7$ )。说明有较强的偏南风场,低空和地面常有低涡和气旋出现。所不同的是,气旋I型一般存在西北涡,气旋II型一般存在西南涡,并有偏南低空急流指向山东半岛。

### 2.2 切变型暴雨

切变型暴雨相似分析的结果,基本属于同一种类型,代表个例为1985年7月25日,编号①。它和另外个例高空三层的高度场都有比较一致的相似关系,相似系数大都超过0.90,少数在0.85以上。因此,对切变型暴雨的前期高度场亦存在固有的特征和高层配合的合理性与一致性。

通过  $A_{10}$ 、 $A_{02}$ 、 $A_{20}$ 、 $A_{11}$  等系数所代表

场的叠加结果,在35~45°N,110~120°E的范围内有较为明显的低值区,对应应有低槽、切变线或低涡存在。

以上所说的气旋I型、II型和切变型都有比较理想的代表个例,它们与同类型其它个例有较好的相似关系,有的达最佳相似关系。但即使是最佳相似关系,其后期所出现暴雨的强度、范围和落点也可能有较大的差别。例如切变型①例和③例,即1985年7月25日和1981年8月16日存在最佳的相似关系,高空三层高度场的相关系数为两个0.99,一个0.90,但第二天一个有一站出现暴雨,另一个有7站出现暴雨,差异较大。因为这种最佳相似仅仅是高度场相似,常有一定的片面性和局限性。因此,暴雨预报不能仅停留在高度场相似分析上,还需进一步进行物理量诊断分析。

### 3 物理量诊断分析

在高度场相似的前提下,我们仍然在高度场的展开区内,计算和暴雨有关的物理量,如  $Q$  矢量散度、水汽通量及散度、潜在稳定度等(网格距取100km),以此分析和寻找

一些物理量场特征来作为暴雨强度和落区预报的依据。

### 3.1 Q 矢量散度分布和暴雨的关系

用 Q 矢量表示的准地转  $\omega$  方程<sup>[3]</sup>

$$\nabla_h^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial \omega}{\partial p^2} = 2\nabla \cdot \mathbf{Q} \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{Q} = (Q_1, Q_2) = \left( \frac{\partial v_g}{\partial x} \cdot \nabla \theta, -\frac{\partial u_g}{\partial y} \cdot \nabla \theta \right) \quad (4)$$

由上可知,  $\omega \propto \nabla \cdot \mathbf{Q}$ ,  $\nabla \cdot \mathbf{Q} < 0$  的区域对应为上升运动, 反之则为下沉运动。

气旋 I 型暴雨 Q 矢量散度分布具有比较一致的特点。在展开区间的中部有西北~东南向的辐合带, 辐合带内有辐合中心存在, 且愈向高层, 辐合中心愈强, 并向山东半岛倾斜。当 35~38°N、117~120°E 范围内辐合中心值  $< -16$  (单位:  $1.0 \times 10^{-13} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 下同), 烟台市可出现 4 站以下暴雨。若辐合中心在山东半岛西南侧并靠近半岛, 中心值  $< -30$ , 则暴雨强度和范围较大, 烟台市可出现 5 站以上暴雨。

气旋 I 型暴雨 Q 矢量散度分布也具有规律。35°N 以北地区在 850 和 700hPa 上存在一个准东西向的辐合带, 负值区已控制山东半岛, 辐合带内有辐合中心存在。500hPa 准东西向辐合带有时不明显, 但有一个辐合中心已进入或接近山东半岛(图略)。若辐合中心强度  $> -20$  且  $< 0$ , 烟台可出现 4 站以下暴雨; 若  $< -30$ , 暴雨强度和范围较大, 一般可出现 5 站以上暴雨。

切变型暴雨 Q 矢量散度分布, 一般在渤海或者周围存在一个辐合带, 若山东半岛已经处于负值区, 辐合中心强度  $\geq -15$  且  $< 0$ , 则烟台有 4 站以下暴雨。若辐合中心强度  $< -15$ , 则有 5 站以上的暴雨出现。

### 3.2 水汽通量及其散度的分析

气旋 I 型暴雨: 在其前期都有明显的水汽通道, 一种情况是水汽通量轴线从西南方直指山东半岛, 850hPa 水汽通量中心值  $> 13$

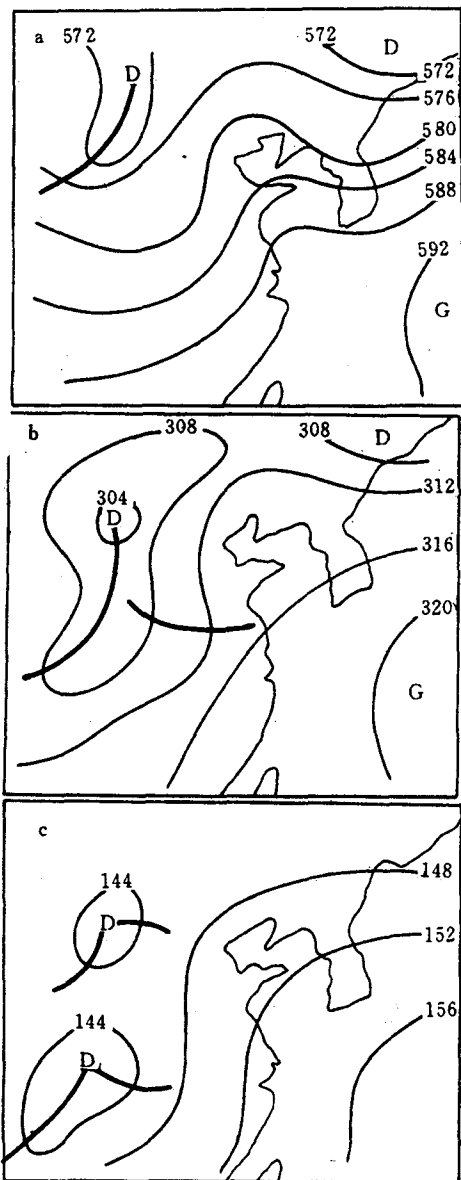


图2 气旋 I 型代表个例的高空形势  
a. 500hPa b. 700hPa c. 850hPa

(单位:  $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ , 下同), 水汽通量辐合中心已经到达黄河下游地区。由于高度场经向环流指数( $A_{10}$ )较大, 水汽通量辐合中心往往向东北方移动, 在烟台市可造成4站以下暴雨。另一种情况是水汽通量轴线基本沿长江走向略向东北抬, 水汽通量中心值 $>19$ , 此时, 水汽通量辐合中心位于长江上游地区, 沿着高空西南气流指向山东半岛, 一般在山东半岛出现5站以上的暴雨。

气旋Ⅱ型暴雨: 850和700hPa水汽通量的轴线多呈南北向。850hPa水汽通量中心值 $>16$ , 850hPa水汽通量辐合中心在黄河中下游地区和长江下游地区都可能出现。若700hPa山东半岛已经为水汽通量辐合中心所控制, 则未来半岛能出现5站以上暴雨。

切变型暴雨: 850hPa上, 山东半岛上游有 $<-120$ (单位:  $10^{-9} \cdot \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ )的水汽通量辐合中心存在, 未来则有5站以上暴雨, 否则有4站以下的暴雨。

### 3.3 潜在不稳定度的分析

气旋Ⅰ型暴雨: 有80%的个例在暴雨前期并不处于潜在不稳定状态, 因此, 潜在不稳定度不能作为此型暴雨预报的依据。而气旋Ⅱ型从目前所有的个例来看, 半岛都处于 $\theta_{se500}^* - \theta_{se850} < 0$ 的潜在不稳定状态, 它可能成为气旋Ⅱ型暴雨预报的一种主要依据。但 $\theta_{se500}^* - \theta_{se850}$ 的负值大小和暴雨强度及范围尚无定量关系。

切变类暴雨前期有近90%的个例 $\theta_{se500}^* - \theta_{se850} > 0$ , 因此此类暴雨也不能把潜在不稳定度作为必要条件。

## 4 烟台汛期暴雨预报

通过以上高度场相似分析和物理量诊断分析, 基本上可以形成两种暴雨预报思路: 一种是最佳相似预报, 另一种是相似分析预报。

### 4.1 最佳相似预报

首先, 根据暴雨入型条件判断是否入型。气旋型暴雨入型的条件: 在24、36小时日本地面预报图上,  $30 \sim 40^\circ\text{N}$ ,  $115 \sim 125^\circ\text{E}$ 范围内有气旋。切变型暴雨是在08时700或850hPa高空图上, 在 $35 \sim 45^\circ\text{N}$ ,  $110 \sim 120^\circ\text{E}$ 范围内有切变线。其次, 入型后, 则在展开区间对高空三层的高度场用车贝雪夫多项式进行分解, 并计算它与相似样本的相似系数。对气旋型Ⅰ型和Ⅱ型三层相似系数的平均值均要大于0.90; 切变型三层相似系数的平均值要大于0.85(否则停止进行)。第三, 在本类型的相似样本中逐一计算相似系数, 选出最佳相似个例。第四, 在展开区间进行物理量计算, 如果各物理量的分布状况及其强度和最佳相似个例近于一致, 则用最佳相似个例的实况进行预报, 否则不存在最佳相似, 可转入相似分析预报。

### 4.2 相似分析预报

当与最佳相似个例的物理量分布特点及强度不近于一致时, 则按上述物理量场分布特点和强度, 预报是否有暴雨出现以及暴雨的范围和强度。

### 4.3 暴雨预报业务流程

按照上述最佳相似和相似分析预报的基本思路, 烟台汛期暴雨预报业务流程如图3。除少量人工判别暴雨入型条件外, 其它均由微机自动完成。

### 4.4 使用情况

1995~1998年, 汛期暴雨预报情况见表2(1997年气旋、切变型暴雨未报未出)。由表2可见, 共入型22次, 正确或基本正确为15次, 占68%。其中预报区域暴雨10次, 正确5次, 基本正确3次, 正确和基本正确的次数占80%。空报2次, 漏报5次。预报效果超出当前暴雨预报的实际水平, 在预报业务中有一定的使用价值。

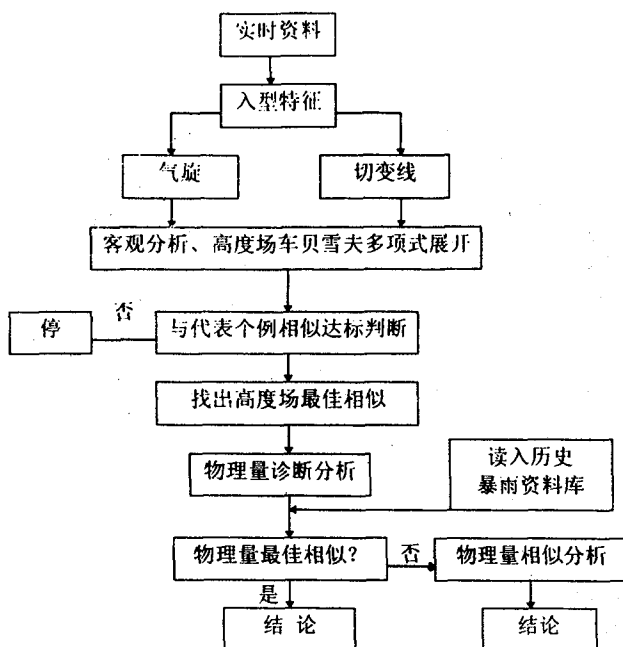


图3 暴雨预报业务流程

表2 1995~1998年汛期业务使用情况

| 预报日期        | 入型    | 相似系数 | 预报意见   | 实况    | 评定   |
|-------------|-------|------|--------|-------|------|
| 1995. 7. 18 | 气旋 I  | 0.88 | 无区域暴雨  | 无     | 正确   |
| 1995. 7. 25 | 切变    | 0.96 | ≥5 站暴雨 | 4 站暴雨 | 基本正确 |
| 1995. 7. 30 | 切变    | 0.86 | ≤4 站暴雨 | 2 站暴雨 | 基本正确 |
| 1995. 8. 17 | 气旋 II | 0.92 | 无区域暴雨  | 4 站暴雨 | 不正确  |
| 1995. 8. 18 | 气旋 II | 0.89 | 无区域暴雨  | 无     | 正确   |
| 1995. 8. 21 | 气旋 II | 0.95 | 无区域暴雨  | 1 站暴雨 | 基本正确 |
| 1995. 8. 22 | 切变    | 0.89 | ≥5 站暴雨 | 7 站暴雨 | 正确   |
| 1996. 6. 16 | 气旋 II | 0.93 | ≥5 站暴雨 | 5 站暴雨 | 正确   |
| 1996. 6. 28 | 气旋 II | 0.88 | 无区域暴雨  | 2 站暴雨 | 基本正确 |
| 1996. 6. 29 | 切变    | 0.95 | ≤4 站暴雨 | 无     | 不正确  |
| 1996. 7. 01 | 切变    | 0.82 | 无区域暴雨  | 4 站暴雨 | 不正确  |
| 1996. 7. 14 | 气旋 I  | 0.91 | ≥5 站暴雨 | 4 站暴雨 | 基本正确 |
| 1996. 7. 29 | 切变    | 0.55 | 无区域暴雨  | 6 站暴雨 | 不正确  |
| 1998. 7. 07 | 切变    | 0.88 | ≤4 站暴雨 | 4 站暴雨 | 正确   |
| 1998. 7. 17 | 切变    | 0.75 | 无区域暴雨  | 无     | 正确   |
| 1998. 7. 23 | 切变    | 0.73 | 无区域暴雨  | 5 站暴雨 | 不正确  |
| 1998. 7. 24 | 切变    | 0.67 | 无区域暴雨  | 无     | 正确   |
| 1998. 7. 30 | 气旋 II | 0.97 | ≥5 站暴雨 | 5 站暴雨 | 正确   |
| 1998. 8. 05 | 切变    | 0.63 | 无区域暴雨  | 无     | 正确   |
| 1998. 8. 09 | 切变    | 0.93 | ≤4 站暴雨 | 无     | 不正确  |
| 1998. 8. 21 | 切变    | 0.78 | ≤无区域暴雨 | 8 站暴雨 | 不正确  |
| 1998. 8. 22 | 气旋 II | 0.86 | ≤4 站暴雨 | 4 站暴雨 | 正确   |

## 5 结语

经过大量计算分析、研究探讨和业务使用,我们认为,场相似在汛期暴雨预报工作中,具有一定意义,在今后的预报业务工作中能发挥一定的作用。但我们也应看到,做为相似预报方法,样本越多,越有选择的余地,效果就越好。这里,由于受资料条件的限制,样本数量显得不多。我们将在今后的工作中不断补充和完善,并逐步嫁接到数值预报产品

的场相似分析上。

## 参考文献

- 1 周家斌. 不规则格点上的车贝雪夫多项式展开问题. 科学通报, 1981: 548~550.
- 2 金一鸣, 陈碧莲. 利用不规则格点上的车贝雪夫多项式展开预报浙江省 5~9 月汛期降水. 气象学报, 1985, 43 (3): 339~343.
- 3 杨小艳, 曹希孝. 准地转  $Q$  矢量诊断分析与暴雨关系的分析. 气象, 1996, 21(11): 18~21.

# The Application of Field-similarity to Rainstorm Forecast in Flood Season

Yan Lifeng Cai Zepeng

(Yantai Meteorological Office, Shandong Province 264001)

Wang Jianguo

(Shandong Meteorological Province)

Song Tongwen

(Yantai Meteorological Office, Shandong Province)

## Abstract

Using similarity principle and Chebashev Polynomial, the altitude field for three layers at high altitude in the earlier stage of rainstorm was expanded and the field-similarity characteristics of altitude field came into prominence. The  $Q$  vector divergence, water vapour flux and flux divergence, potential instability and other physical quantities closely related to rainstorm were analysed. Also, by futher approximating the main characteristics in field distribution, the optimum analogue forecast and analogue analysis forecast were given.

**Key Words:** field similarity Chebashev Polyomical rainstorm forecast