

基于云团特征的短时临近强降水预报技术

胡 波^{1,2} 杜惠良¹ 滕卫平³ 石蓉蓉¹

(1. 浙江省气象台,杭州 310017; 2. 中国气象科学研究院
灾害天气国家重点实验室; 3. 浙江省气象科学研究所)

提 要: 通过分析 2005—2008 年影响浙江的梅汛期强降水云团特征,将云团分为偏北型、居中型和偏南型,研究这三种类型云团云顶亮温与地面 1 小时强降水极值和 10mm/h 以上降水覆盖面积关系,结果表明偏南型和偏北型云团有较多相似特征,而居中型云团较其他两种云团则有较多相反特征。通过分析 1 小时强降水相对于云团中心移动路径的落区,指出梅汛期云顶 1 小时变温和亮温梯度与地面 1 小时强降水落区无明显配对模型。随后利用天气形势场资料,分析强降水云团与环境要素场的关系,指出云顶亮温的宏观特征与中高层的垂直速度、水汽通量密切相关,最后尝试建立三种类型强降水云团成熟阶段云顶亮温和地面降水人工神经网络预报方程,给预报员提供参考。

关键词: 梅汛期 对流云团 预报

A Study of Heavy Rain Nowcasting Based on Cloud Cluster Features During Meiyu Periods

Hu Bo^{1,2} Du Huiliang¹ Teng Weiping³ Shi Rongrong¹

(1. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017; 2. State Key Laboratory of Severe Weather Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. Zhejiang Meteorological Institute)

Abstract: By analyzing the cloud characteristics during Meiyu periods from 2005 to 2008, the heavy rain clouds were classified into three types, i. e. north-type, center-type and south-type. The relations between the TBB of cloud top and corresponding rainfall extreme and coverage of rainfall rate above 10 mm/h were studied. The results indicate that the north-type and south-type clouds have lots of common feature, and show reverse features compared to the center-type. The position of heavy rainfall corresponding to the moving path of clouds revealed that during Meiyu periods the one-hour variation and gradient of TBB were not

obviously correlative. Then the relations between environmental factors and clouds were analyzed. And the results show that the macroscopic features of cloud are obviously correlative with vertical velocity and water vapor flux. At last based on atmospheric circumstances the neural network forecast equations of TBB of cloud top and strong rainfall in mature phase of clouds were developed.

Key Words: Meiyu periods convective cloud nowcasting

引言

气象卫星由于能对降水的母体即对流云团进行有效观测,及时反映云团发生、发展和移向、移速等宏观特征,因此基于卫星云图短时降水估算开展了大量研究。20世纪70年代以来,国内外提出了多种方法,如概率匹配法(PMM)^[1]、查询表法(LUT)^[2]、对流云与层状云分类法(CSI)^[3]、生命史法^[4]。国内主要根据“云指数法”和“生命史法”这两类降水估计法,进行了大量的本地化研究^[5-6],同时对方法本身存在的一些缺陷进行改进,如考虑云团环境场、水汽输送、地形作用、临界温度等因子^[7-9],取得一定效果,但仍没有很好解决方法本身的缺陷。这些方法没有对强降水云团的类型进行系统划分,实际上不同对流云团所对应的地面雨量分布差异很大,强降水集中在云团中心和两侧位置均有可能,另外,单凭卫星云图不能获得云团的边界层微观信息和环境流场,很难预测云团未来发展趋势(如增强、减弱等)。实际上梅汛期雨带的维持、发展都出现在特定、有利的天气形势场中,目前天气形势场数值预报已经达到了很高的水平,因此可以通过分析环境要素场和强降水、对流云团之间的关系,以降水母体即对流云团为研究对象,结合雷达和卫星观测资料优点,综合分析云团的宏观和微观信息,对云团的发生和发展进行估计,提高云团强降水落区预报准确率。

1 资料及处理

资料包括:(1)2005—2008年浙江省梅

汛期地面自动站1小时雨量资料。(2)2005—2008年浙江省梅汛期宁波、温州、杭州等多普勒雷达资料。(3)2005—2008年浙江省梅汛期FY2C卫星红外云图资料。以上资料均来自浙江省气象信息中心。(4)2005—2008年浙江省梅汛期期间NECP全球模式资料,分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,区域为 $27^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ 、 $118^\circ \sim 123^\circ \text{E}$,要素包括绝对涡度、垂直速度、比湿、风,层次包括850hPa、700hPa、500hPa,物理量包括对流有效位能和对流抑制能量。

资料处理:(1)利用FY2C卫星红外云图和地面自动站1小时雨量资料,挑选浙江省梅汛期期间的中小尺度强降水对流云团个例(强降水对流云团指其在影响浙江期间至少有一个地面自动站观测到1小时的地面降水在10mm以上,红外云团上表现为围绕一个亮温低值中心区的等值线,其中也可能有若干次低值区,但同主中心明显具有统一的云区外围,下面均简称云团),共得到146个强降水时次个例;分析云顶中心亮温极值和 -40°C 、 -50°C 、 -60°C 云顶亮温等值线覆盖面积;利用连续二个时次云团中心的移动确定其移向和移速。(2)根据挑选的强降水云团个例和对应的地面自动站1小时雨量资料,确定云团1小时地面雨量极值、10mm/h以上降水覆盖面积、强降水落区相对于云团中心的方位等信息;另外根据1小时地面雨量极值的落区计算相应区域的1小时云顶变温和亮温梯度。(3)利用NCEP资料计算850hPa、700hPa、500hPa三层水汽通量和水汽通量散度等物理量。

2 浙江省梅汛期强降水云团的特征

2.1 强降水云团中心相对于雨带位置的分类

根据梅汛期强降水云团中心相对于主雨带(主雨带指梅雨锋影响时,地面自动站 1 小

时降水在 3mm 以上的区域)的位置,得到三种类型的云团,分别为居中型、偏南型和偏北型(见图 1),分别占总个例数的 48%、32%和 20%,偏南型和偏北型云团中心位于主雨带边缘,而居中型则在主雨带中间,这三种云团在影响浙江的过程中一般保持稳定,类型转换常常出现在主雨带明显移动时。

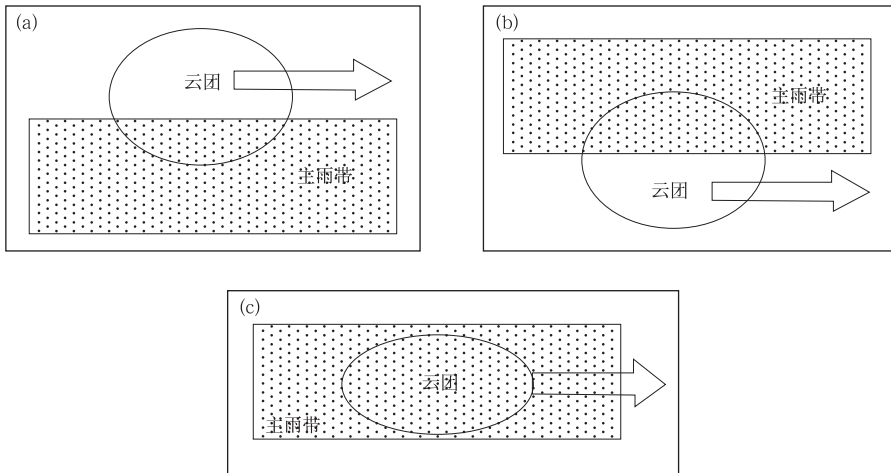


图 1 云团近中心相对于主雨带位置的分类
椭圆代表云团近中心分布,(a) 偏北型;(b) 偏南型;(c) 居中型

2.2 云团云顶特征量与地面强降水关系统计特征

2.2.1 云顶亮温 -50℃ 等值线覆盖面积与地面强降水关系

为了分析三类云团的宏观特征与地面强降水的关系,统计了三类云团云顶亮温

-50℃ 等值线覆盖面积与所对应的地面雨量极值分布情况(图 2),可见居中型云团 10~20mm/h 和 20~30mm/h 降水出现在覆盖面积 10000km² 以上个例最多,分别占总数 53%和 56%,30mm/h 以上降水出现个例随着覆盖面积增大,其出现概率有下降的趋势,从覆盖面积 5000km² 以下时的 26%减少到

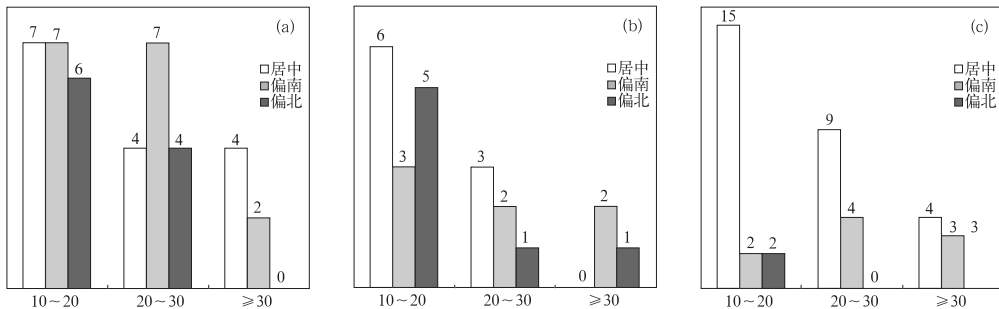


图 2 三类云团云顶亮温 -50℃ 等值线覆盖面积与所对应的地面 1 小时雨量极值分类个例
横坐标为小时雨量,单位为 mm/h,纵坐标单位为个

(a) 覆盖面积 5000km² 以下;(b) 5000~10000km²;(c) 10000km² 以上

10000km² 以上时的 14%;相反偏南型和偏北型云团 10~20 和 20~30mm/h 降水出现 5000km² 以下的个例最多,偏南型占总数的 58%和 53%,偏北型占总数的 46%和 80%,随着覆盖面积的增大,两种类型 30mm/h 以上降水出现概率明显增加,偏南型从覆盖面积 5000km² 以下时的 12%增加到 10000km² 以上时的 33%,偏北型则从 0% 增加到 60%。可见偏南型和偏北型云团云顶亮温覆盖面积与地面降水之间具有相似特征,而与居中型云团相反。

另外,对三类云团云顶亮温 -50℃ 等值线覆盖面积与所对应的地面 10mm/h 以上雨量覆盖面积关系统计表明(图略),居中型云团以覆盖面积 10000km² 以上个例最多,占总数的 53%,随着云顶亮温 -50℃ 等值线覆盖面积的增大,所对应的地面 1 小时强降水面积并没有增加趋势,大部分个例仍然在 800km² 以下,而偏南和偏北型云团以覆盖面积 5000km² 以下个例最多,分别占总数 50% 和 45%,随着云顶亮温 -50℃ 等值线覆盖面积的增大,1 小时强降水面积有较明显增加趋势。可见单从云团覆盖面积指标上看,偏南和偏北型云团比居中型云团降水效率更高一些。

2.2.2 云团中心亮温与地面 1 小时强降水关系

统计了三类强降水云团在不同中心亮温时地面 10mm/h 以上降水不同覆盖面积出现频次(见图 3),中心亮温在 -40℃ 以上时,三类云团强降水覆盖面积主要表现为 500km² 以下,没有出现超过 1000km² 个例,在 -40~-60℃ 时三类云团大部分降水个例覆盖面积在 500~1000km²,低于 -60℃ 以后偏南和偏北型云团仍以 500~1000km² 覆盖面积个例最多,而居中型则以 500km² 以下个例最多,随着云团中心亮温的降低,偏南型和偏北型云团地面 1 小时强降水覆盖面积具有相似的特征,相对而言偏南型云团出现 >2000km² 降水覆盖面积的概率更高一些。

另外对三类强降水云团中心亮温与地面 1 小时降水极值关系进行分析(图略),中心亮温在 -40℃ 以上时,居中型和偏南型云团地面降水极值没有出现超过 20mm/h 的个例,随着中心亮温的降低,这二类云团对应的降水极值在 10~20mm/h、20~30mm/h 和 ≥30mm/h 三个档次所占的比例基本保持一致,可见其地面降水极值并没有随着中心亮温降低而发生明显变化,相反偏北型云团随着中心亮温降低,雨量极值有较明显的增大趋势。

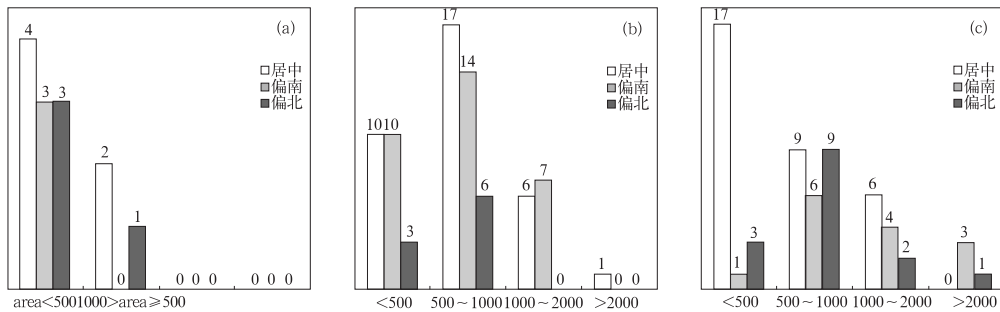


图 3 三类云团中心亮温与对应地面 10mm/h 以上降水覆盖面积分类个例

横坐标为覆盖面积,单位 km²,纵坐标单位为个

(a) 云团中心亮温在 -40℃ 以上; (b) 在 -40~-60℃ 之间; (c) 在 -60℃ 以下

2.2.3 1 小时地面雨量与云顶特征量的关系

对云团各种参数与地面雨量进行相关统计,结果如表 1 所示,雨带特征量与云团

-60℃的覆盖面积相关最明显,显著性水平均达到 0.05,云团-50℃的覆盖面积次之,达到显著性水平 0.01,而云团-40℃的覆盖面积只与雨量极值具有相关性。可见降水的主体对流云团宏观特征与其降水直接相关。

表 1 云团各种参数与地面雨量相关统计

| | -60℃覆盖面积 | -50℃覆盖面积 | -40℃覆盖面积 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| 1小时地面雨量极值 | 0.34 | 0.20 | 0.19 |
| ≥5mm/h降水覆盖面积 | 0.32 | 0.21 | 0.14 |
| ≥10mm/h降水覆盖面积 | 0.35 | 0.21 | 0.17 |

注:加粗数值通过 0.05 显著性检验,加粗斜体通过 0.01 显著性检验

2.2.4 云团 1 小时强降水相对云团中心移动路径的落区

统计三种类型云团 1 小时地面强降水具体的落区,结果如图 4 和表 2 所示,图 4 为强降水落区相对于云团中心移动路径的分类,表 2 为各种分类出现的概率,可见每类云团的 1 小时强降水落区相对于云团的移动有明显不同分布,云团居中型强降水出现概率最多的为 a 型即后部型,占 54%,其次 b 型即前部型,占 28%,最后为 c 型即中部型,云团偏南型强降水出现概率最多的为左后部型占 53%,其余三种类型出现概率相差不大,偏北型云团没有出现超过 50% 概率的落区,在这三种类型云团中其强降水落区为最复杂。总的来说,云团 1 小时强降水落区出现在云团移向的前部、中部和后部都有可能,与实际的强降水轴紧密联系,并没有固定模式。

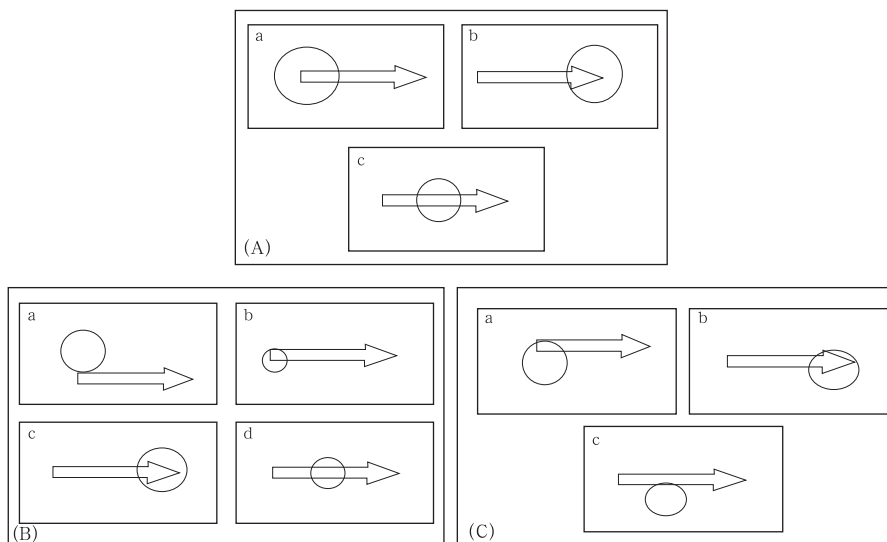


图 4 三种类型云团 1 小时强降水落区相对于云团中心移动路径概念模型

(A) 居中型; (B) 偏南型; (C) 偏北型

箭头表示云团移动方向,箭头前部表示后一时刻云团中心位置,

箭头尾部表示前一时刻云团中心位置;圆圈表示强降水落区

表 2 对应于图 4 中 a、b、c、d 降水落区概念模型的出现概率(%)

| | a 型 | b 型 | c 型 | d 型 | 其他 |
|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 居中型 | 54 | 28 | 18 | 无 | 无 |
| 偏南型 | 53 | 19 | 15 | 13 | 无 |
| 偏北型 | 37 | 33 | 19 | 无 | 11 |

2.2.5 云顶 1 小时变温和亮温梯度与地面 1 小时强降水关系

在梅雨锋这种大尺度天气系统,往往有若干个对流云团镶嵌在雨带之中,然而在这个宽广的雨带之中一般只有 1~2 条窄强降

水轴,只有经过这些窄强水汽辐合轴的云团才能引发新一轮的强降水,而其他云团虽然也沿着雨带移动,造成前方云顶亮温降低和温度梯度增加,但引发的降水相对小很多,甚至没有降水;从三种类型云团各自所对应的地面1小时强降水落区也可以看出,强降水有时出现在云团移向前方,有时出现在移向后方,因此与地面1小时强降水所对应的云顶出现正变温和负变温都有可能;由于对流云团镶嵌在锋面宽广的对流云系及其衍生的层状云系中,其周围云顶亮温一般较低,所以在移动过程中造成的亮温梯度一般较小;可见梅汛期强降水与云顶1小时变温和亮温梯度的相关并不明显。

3 强降水云团与环境要素场的关系

梅汛期强降水云团是在有利的天气形势中生成,一些云团有高达数十毫米的降水率,

这么高的降水率必须具备十分有利的水汽条件、动力条件和不稳定能量等因子,为了对强降水云团的发生发展进行预报,有必要研究云团与这些因子的关系。水汽条件因子采用水汽通量和水汽通量散度,动力条件因子采用绝对涡度和垂直速度,层次包括850hPa、700hPa、500hPa,不稳定能量衡量采用CAPE指数和CIN指数,分别对这些物理量与云团云顶 -40°C 、 -50°C 和 -60°C 等亮温值线覆盖面积、云团中心亮温和地面1小时降水极值进行相关分析,结果如表3,可见云顶亮温的宏观特征与中高层的垂直速度、水汽通量密切相关,两者均通过0.01显著性检验,而地面降水极值则同不稳定能量和中低层水汽通量有更好的相关性。

4 人工神经网络预报方程的设计与试报

作为云团宏观特征量在短时强降水预报

表3 云团各种参数与气象要素场相关统计

| | 500hPa 绝对涡度 | 850hPa 绝对涡度 | 700hPa 绝对涡度 | 对流有 效位能 | 对流抑 制能量 | 500hPa 垂直速度 | 700hPa 垂直速度 |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| 云团中心亮温 | 0.06 | -0.15 | -0.30 | 0.067 | 0.03 | -0.21 | -0.20 |
| -40°C 亮温覆盖面积 | 0.10 | 0.38 | 0.40 | -0.01 | -0.01 | -0.38 | -0.36 |
| -50°C 亮温覆盖面积 | -0.08 | 0.20 | 0.17 | -0.12 | -0.019 | -0.36 | -0.34 |
| -60°C 亮温覆盖面积 | -0.20 | 0.07 | 0.1 | -0.1 | 0.05 | -0.32 | -0.34 |
| 地面1小时降水极值 | 0.003 | -0.02 | -0.11 | 0.23 | 0.18 | 0.08 | 0.03 |
| | 850hPa 垂直速度 | 500hPa 水汽通量 | 700hPa 水汽通量 | 850hPa 水汽通量 | 500hPa 水汽通量散度 | 700hPa 水汽通量散度 | 850hPa 水汽通量散度 |
| 云顶中心亮温 | -0.05 | -0.46 | -0.37 | -0.17 | 0.018 | 0.17 | -0.001 |
| -40°C 亮温覆盖面积 | -0.20 | 0.50 | 0.43 | 0.27 | 0.013 | -0.19 | -0.007 |
| -50°C 亮温覆盖面积 | -0.17 | 0.48 | 0.46 | 0.29 | 0.067 | -0.1 | -0.006 |
| -60°C 亮温覆盖面积 | -0.11 | 0.32 | 0.29 | 0.14 | 0.13 | -0.02 | 0.006 |
| 地面1小时降水极值 | 0.02 | -0.12 | 0.18 | 0.18 | -0.12 | 0.043 | -0.05 |

注:加粗数值通过0.05显著性检验,加粗斜体通过0.01显著性检验

中的应用尝试,本文以环境要素场为神经网络输入层,具体因子取表3中通过0.01显著性检验的物理量,三种类型的云团云顶特征量为人工神经网络输出层,具体包括 -40°C 、 -50°C 、 -60°C 等值线覆盖面积和云顶中心

亮温,建立预报方程;由于偏南型和偏北型具有较多类似特征,将两者个例合并建立方程。需要指出的是,云团强降水一般都发生在云团成熟期,这样组建的方程所做的预报一般代表云团成熟形态。

大量研究发现,诸多因素会影响人工神经网络预测能力,其中主要的有:网络过度拟合、网络结构、训练样本的数量和质量、初始权值和网络的误差(目标)函数。神经网络结构是指网络输入结点数、隐层数、隐层节点数和激励函数等。网络结构与预测对象的复杂程度不匹配是影响网络预测能力最主要因素,也是神经网络泛化理论研究的核心。结构简单,规模过小,不能逼近复杂对象;结构复杂,规模过大,也会引起预测能力下降。要使一个网络达到给定的预测能力,必须使网络的结构复杂性与训练样本数匹配。实际应

用中,要提高网络的预测能力,我们的选择只能是,要么增加训练样本,要么减小神经网络规模,本文根据网络“最简原则”,建模过程中不断自动调整网络结构;在样本挑选方面,尽量选用更多的具有差异性的目标场,作为训练和学习,其他样本作测试和检验;每个预报目标都自动经过几种不同网络结构试验和比较;为了防止网络过拟合,建立预报模型后,进行“伪样本”实验,最后选择输出预报效果较好的五种“简单”模型,并对预报结果进行集合,结果如表 4。

表 4 云顶特征量集合预报的平均误差

| 云团类型 | -40℃覆盖面积(km ²) | | -50℃覆盖面积(km ²) | | -60℃覆盖面积(km ²) | | 云团中心亮温(℃) | |
|--------|----------------------------|-----|----------------------------|-----|----------------------------|-----|-----------|-----|
| | A | B | A | B | A | B | A | B |
| 训练平均误差 | 378 | 480 | 336 | 364 | 280 | 285 | 1.1 | 0.9 |
| 预报平均误差 | 950 | 840 | 650 | 660 | 500 | 440 | 2.2 | 1.8 |

注:A:居中型;B:偏南型和偏北型

然后,以云顶特征量和表 3 中通过 0.01 信度的物理量为神经网络输入层,分别以地面 1 小时雨量极值和 10mm/h 以上覆盖面积为输出层,应用与前面类似的神经网络设计方案,建立人工神经网络预报模型,试验的结果如表 5。

表 5 地面 1 小时降水极值和 10mm/h 以上覆盖面积集合预报的平均误差

| 云顶特征量 | 地面 1 小时雨量极值 | | 10mm/h 以上雨量覆盖面积 | |
|--------|-------------|-------|--------------------|--------------------|
| 云团类型 | A | B | A | B |
| 训练平均误差 | 1.2mm | 2.5mm | 65km ² | 70km ² |
| 训练相对误差 | 9% | 12% | 13% | 14% |
| 预报平均误差 | 3.3mm | 3.5mm | 115km ² | 154km ² |
| 预报相对误差 | 19% | 20% | 21% | 24% |

注:A:居中型;B:偏南型和偏北型

由试验可知,三类云团预报误差接近,随着云团覆盖面积的增大,预报绝对平均误差有减少的趋势,但总的来说,相对误差有增加的趋势;云团中心亮温预报效果较好,绝对误差在 2℃左右,部分弥补了-60℃亮温覆盖面积预报误差较大的情况。地面 1 小时雨量

极值预报绝对误差在 3~4mm,10mm/h 以上雨量覆盖面积居中型云团误差较偏北和偏南型小。应用上述方法,对 2008 年 6 月 26 日 14—18 时 3 个云团 12 个时次、2008 年 6 月 18 日 00—08 时 2 个云团 12 个时次进行跟踪预报表明,地面 1 小时雨量极值和 10mm/h 以上雨量覆盖面积预报的平均相对误差在 20%左右,具有较好的应用效果。

5 结 论

(1) 梅汛期强降水云团中心相对于主雨带的位置存在三种类型,分别为居中型、偏南型和偏北型,其中偏南型和偏北型云团宏观特征与地面 1 小时强降水极值和 10mm/h 以上降水覆盖面积之间具有较多相似特征,而与居中型云团有较多相反特征。

(2) 在浙江省梅汛期期间,强降水云团云顶 1 小时变温和亮温梯度与地面 1 小时强降水落区并无明显配对模型。

(3) 云顶亮温的宏观特征与中高层的垂直速度、水汽通量密切相关,而地面1小时降水极值则同不稳定能量和中低层水汽通量有更好的相关性。

(4) 基于云团的梅汛期短时临近强降水人工神经网络集合预报对业务有一定指导意义。

参考文献

- [1] Grose A M E, Smith E A, Chung H-S, et al. Possibilities and limitations for quantitative precipitation forecasts using nowcasting methods with infrared geosynchronous satellite imagery[J]. *J Appl Meteorol*, 2002, 41:763-785.
- [2] Kurio T. A rainfall estimation with the GMS-5 infrared split-window and water vapor measurements[G]. *Meteorological Satellite Center Technical Note*, Japan Meteorological Satellite Center, 1997, 33:91-101.
- [3] Adler R F and Negri A J. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall[J]. *Applied Meteorology*, 1988, 27: 31-51.
- [4] Scofield R A. The NESDIS operational convective precipitation technique[J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 115:1773-1792.
- [5] 杨扬, 戚建国. 数字卫星云图估算面雨量的应用试验[J]. *气象*, 1995, 21(3):35-39.
- [6] 王立志, 李俊, 周凤仙, 等. GMS-5 四通道云图的自动分类及其在定量降水估算中的应用[J]. *大气科学*, 1998, 22(3): 371-375.
- [7] 卢乃锰, 吴蓉璋. 强对流降水云团的云图特征分析[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(3):269-275.
- [8] 江吉喜. 华北两类灾害性云团的对比研究[J]. *应用气象学报*, 1999, 10(2): 199-206.
- [9] 刘正本, 赵守春. 卫星云图在短时降水预报中的应用[J]. *气象*, 1998, 24(2):31-33.
- [10] 胡波, 杜惠良, 滕卫平, 等. 用红外云图估算热带气旋短时雨量[J]. *气象*, 2006, 32(1):74-77.
- [11] 叶惠明, 蒋尚城. 华北地区强对流云团的卫星云图特征[J]. *气象*, 1993, 19(1):34-38.
- [12] 尹承美, 卓鸿, 胡鹏, 等. FY-2 产品在济南“7·18”大暴雨临近预报中的应用[J]. *气象*, 2008, 34(1):27-34.