

“配料法”用于长江下游暴雨预报

来小芳^{1,2}, 张艳玲^{1,3}, 陆汉城⁴, 寿绍文^{1,2}

(1 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044

2 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044

3 南通市气象局, 江苏 南通 226006; 4. 解放军理工大学 气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 利用配料法, 设计了一个表示强降水趋势的参数 I_{ZH} (强降水指数), 根据 2001—2003 年 NCEP 资料计算, 得到 I_{ZH} 与降水的对应关系。之后用 MM5 模式进行运算, 得到预报时刻的 I_{ZH} 值, 用来预报强降水的产生。 I_{ZH} 作为指示强降水的参数, 其正值区域表示有降水的区域, 其数值大小反映降水的强度。分析表明, 用 I_{ZH} 指数作暴雨预报比用单一物理量作预报的效果要好。

关键词: 暴雨预报; 配料法; 强降水指数 I_{ZH}

中图分类号: P456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007) 04-0556-05

An Ingredients-Based Methodology for Forecasting Rainstorm in the Lower Reaches of the Yangtze River

LAIXIAO fang^{1,2}, ZHANG Yan-ling^{1,3}, LU Han-cheng⁴, SHOU Shao-wen^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China

2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China 3. Nantong Meteorological Bureau, Nantong 226006, China

4. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract Based on the ingredients-based methodology, a parameter I_{ZH} , which serves as an indicator of heavy precipitation potential, is designed. Based on the historical data, the relationship between I_{ZH} and precipitation is obtained. I_{ZH} may be first predicted by using NCAR/PENSM5 model, and then the area and intensity of precipitation determined. The positive I_{ZH} area indicates the rain area and the I_{ZH} value the precipitation intensity. I_{ZH} as a composite parameter is a better indicator for precipitation than other single physical parameter indicators.

Key words rainstorm forecast; Ingredients-based methodology; heavy precipitation index I_{ZH}

0 引言

中小尺度天气系统常常引起暴雨、雷暴、冰雹、大风、龙卷、下击暴流等对流性天气, 以及局地浓雾等非对流性天气, 他们都可能造成严重的灾害。

中尺度天气预报方法的类型包括线性外推法、中尺度模式法、气候学方法及利用气象知识作预报的方法等, 这其中又有经验规则的应用、判断树方法、中尺度数值模拟及动力—统计预报方法等, 而针对暴雨的预报方法也有很多^[1]: 如综合叠套法、环流型法、群指数法、暴雨预报专家系统、MOS(模式—

输出—统计)方法、MDCE(模式、诊断、云图、经验)预报法等。“配料法”, 是一种数值预报产品释用方法, 也是针对中小尺度天气系统的一种预报方法, 可用于强降水等天气预报。

1 配料法的发展及其应用

“配料法”(Ingredients-Based Methodology)在国外发展较快, 已处于业务应用阶段。它最初被应用于预报暖季雷暴深厚湿对流的发生^[2-4], 且认为 3 个成分(不稳定、湿度和抬升)同时存在时, 深湿对流发生; 缺少任何 1 个成分, 可能有一些重要天气现

收稿日期: 2006-02-16 改回日期: 2006-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(40405009, 40575022, 40205008); 江苏省气象局科技开发项目(200406); 江苏省气象灾害重点实验室项目(KIME050201); 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB418301); 江苏省自然科学基金项目(BK2005141)

作者简介: 来小芳(1978-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 从事中尺度气象学研究, s200321061@nuist.edu.cn

象产生, 但不再是深湿对流。Brooks 等^[5]为了预报与洪水相关的降水提出了成分原则, 认为造成洪水的强降水的前提是持续的高降水率和湿空气迅速上升, 并以此为前提, 假设瞬间降水与垂直水汽流动成比例, 定性地预报了降水率 $R = Ewq$ (E 是降水效率, w 为抬升速度, q 是混合比)。 E 作为比例常数, 定义为降水降落水汽质量与流入云里水汽质量的比率。

Janish 等^[6]的方法为降水类型的短期预报提供了有用的指导。把水汽、温度廓线、铅直运动 3 个变量的数值预报输出用手工分析到单独的图上, 作为一种制作降水类型的预报方式。Nierfeld 等^[7]调整了 Brooks 等^[5]的方法, 用于冬季降雪量预报。他们认为降雪的 3 个成分是空气温度、降雪率、降雪持续时间。与 Brooks 等^[5]的方法类似, 降雪率 $R = Ewq$, q 为混合比, 降水效率 E 描述了空气的饱和程度, 上升速度 w 由考虑天气尺度和次天气尺度上升机制来诊断。虽然 Nierfeld 等^[7]使用了“成分”这个术语, 可是他们的方法本质上仍被设计作为一个概念模式, 并没有发展成为业务使用。

Wetzel 等^[8]、Cortinas 等^[9]、Wetzel 等^[10]的研究扩展了 Janish 等^[6]的概念。他们提出冬季降水 5 个事件的成分: 准地转上升强迫、水汽、不稳定、降水效率和温度。通过建立一个数值预报模式输出和观测的框架, 配料法提供了一个预报冬季降水的体系方法。强迫成分与不稳定成分相结合, 形成了一个新的参数 PVQ (湿位涡与 Q 矢量散度的乘积, (ζ_{PVes}) ($\nabla \cdot Q$)), 作为强降水潜势的一个指示。他们认为配料法中诊断量是由观测或推导得到的量, 能被用来估计一个成分的存在和强度。各个成分和诊断量的选择是有机性的, 随着时间空间的变化, 成分和诊断量的选择也是不同的。而且, 给定诊断量的量级范围, 只是一个潜势的指示, 并不代表严格的临界值。配料法的精髓就是它具有很容易和新的成分估值相结合的灵活性。

我国对这方面研究也有所关注^[11], 但目前发表的研究成果较少。

2 成分定义及其诊断

2.1 成分定义

“配料法”又称成分法, 是指用基本成分的观点预报降水可能性的方法, 适用于暴雨和强对流天气等的预报。“成分”被定义为一个直接对降水事件的发展和强度有影响的基本物理量或过程。基本成

分的正确搭配, 能产生预计的天气现象, 从而提供定点、定时、定量的预报。对暴雨而言, 几个基本物理成分是上升强迫, 不稳定, 水汽和降水效率。

2.2 成分的诊断

2.2.1 上升强迫

垂直运动的准地转强迫可由绝热和非粘滞准地转 ω 方程中的 Q 矢量形式得到^[11]。

$$\left(\sigma \nabla^2 + f^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = -2 \nabla \cdot Q, \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} - \left[\frac{\partial v_g}{\partial x} \right] \cdot \nabla \left[- \frac{\partial \phi}{\partial p} \right] i \\ - \left[\frac{\partial v_g}{\partial y} \right] \cdot \nabla \left[- \frac{\partial \phi}{\partial p} \right] j \end{bmatrix}.$$

其中: ϕ 是重力位势, 而 $\omega = \frac{dp}{dt}$ 。使用 Q 矢量来计算

垂直运动天气尺度强迫现在已经在业务上广泛应用。考虑到强迫, $\nabla \cdot Q$ 和 ω 响应是由假拉普拉斯算子相联系, (1) 式提供了一种定性估计垂直运动的方式。 Q 矢量的幅合 (幅散) 对应于 ω 的负 (正), 因此有垂直上升 (下沉) 强迫, 所以可用 $\nabla \cdot Q$ 估计准地转上升强迫, $\nabla \cdot Q < 0$ 表示有抬升。

2.2.2 不稳定性

湿空气饱和地转相当位涡^[14, 12-13] (湿位涡)

$$\zeta_{PVes} = \zeta_{MPVes1} + \zeta_{MPVes2}, \quad (2)$$

$$\zeta_{MPVes1} = -g (\zeta + f) \frac{\partial \theta_{es}}{\partial p}, \quad (3)$$

$$\zeta_{MPVes2} = g \left[\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{es}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{es}}{\partial y} \right]. \quad (4)$$

其中: ζ_{MPVes1} 表示惯性稳定性和对流稳定性的作用; ζ_{MPVes2} 包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。若 $\zeta_{PVes} < 0$ 则对应对称不稳定区, 这在一些个例诊断中有所应用^[14]。

2.2.3 水汽和降水效率

若不考虑湍流扩散的影响, 则由水汽方程^[15]:

$$\frac{dq}{dt} = -c + K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}, \quad (5)$$

可得 $\frac{dq}{dt} \approx -c$ (c 为凝结率), 设降水率 I 为

$$I = - \int_0^{\infty} \rho \frac{dq}{dt} dz.$$

(5) 式展开形式为

$$\frac{\partial (R_q)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (R_{qu}) - \frac{\partial}{\partial y} (R_{qv}) - \frac{\partial}{\partial z} (R_{qw}) - R_c + K_q \frac{\partial^2 q}{\partial z^2}. \quad (6)$$

设在单位面积的整层大气柱中水汽的水平辐合量为 $-D$, 水汽水平辐合的大小可以用水平水汽通量散度来表示, 表达式为

$$-D = -\int_0^{\infty} \nabla \cdot (\rho_q V) dz = -\int_0^{\infty} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho_q u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_q v) \right] dz$$

将 (6) 代入, 得到

$$-D = \int_0^{\infty} \rho_c dz + \int_0^{\infty} \frac{\partial(\rho_q)}{\partial t} dz + \int_0^{\infty} \frac{\partial(\rho_{qw})}{\partial z} dz - \int_0^{\infty} \rho_{q1} \frac{\partial^2}{\partial z^2} dz \quad (7)$$

不考虑地形和地面蒸发的影响, 且认为地面和大气层顶的垂直速度为零, 则 (7) 式右端第 3、4 项为零。又因在降水地区, 水汽的局地变化量比降水量要小得多, 故上式右端第 2 项也可以略去。于是, 得到 $-D = \int_0^{\infty} \rho_c dz = I$ 。简要表示降水率 I 与水汽通量散度 D 的关系:

$$D = \frac{1}{g} \nabla \cdot (qV) = \frac{1}{g} V \nabla q + \frac{q}{g} \nabla \cdot V = -I \quad (8)$$

式中表示降水率 I 可由水汽通量散度 D 求得, 而水汽通量散度由水汽平流和风的散度两部分组成, 风的辐合越强, 降水率越大, 越有利于强降水的产生。降水强度还决定于该地上空整层大气的水汽含量和饱和程度。同时, $q = \frac{\rho}{p} = \frac{0.622e}{p - 0.378e} \approx \frac{0.622e}{p} = \frac{0.622f \cdot e_s}{p}$ 可用相对湿度 f 来定量表示水汽含量。

又由露点温度的定义: 湿空气在水汽含量不变的条件下, 等压降温达到对水面饱和时的温度, 可以知道温度露点差 $t - t_d$ 大致反映了空气的饱和程度, 值越小, 空气越接近饱和。

3 I_{ZH} 参数的设计

把几个成分结合起来, 形成了一个新的结合参数——强降水指数 I_{ZH} , 并用其来指示潜在的强降水。 I_{ZH} 参数的定义如下: 当湿位涡 $\zeta_{pv,es}$ 为负, 且 $\nabla \cdot Q$ 为负时,

$$I_{ZH} = (1 + f) \left[-\zeta_{pv,es} - \frac{3 \nabla \cdot Q}{1 + t - t_d} \right] \quad (9)$$

此式是在参考 I_{KV} 指数和浙江省群指数 Q 的设计思路^[16]基础上, 引进 $\zeta_{pv,es}$ 和 $\nabla \cdot Q$ 等参数并加以组合而成的。当 $\zeta_{pv,es}$ 为正和 $\nabla \cdot Q$ 为正时, 令 $I_{ZH} = 0$ 。

从水汽方程可以知道, 影响降水的因素有水汽

平流、水汽通量散度、稳定度、垂直运动、蒸发、湍流等。这里选取一些物理量来表示这些影响因素:

$\nabla \cdot Q$ 为 Q 矢量散度, 用来衡量垂直运动的大小; $\zeta_{pv,es}$ 为湿位涡, 用来衡量不稳定的大小; f 表示相对湿度, 用来衡量湿度; $t - t_d$ 为露点温度, $t - t_d$ 衡量空气饱和程度; Q 矢量散度单位取 $10^{-11} s^{-3} \cdot hPa^{-1}$, 湿位涡单位取 $m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$, 相对湿度 f 单位为 %。用南通单站逐步回归筛选时间分布资料显示, 相对湿度和温度露点差通过信度 0.001 的 F 检验^[17], 虽然湿位涡未通过信度 0.15 的 F 检验, Q 矢量散度通过信度 0.25 的检验, 但是 $f \cdot \zeta_{pv,es}$

$\frac{\nabla \cdot Q}{1 + t - t_d}$ 通过信度 0.15 的检验。 I_{ZH} 有无降水的分界值是 0, I_{ZH} 大于零的地区, 视为有降水, I_{ZH} 值越大, 表示降水的量级越大。

4 结果分析

4.1 资料与方法

所用资料包括每隔 6 h 一次的 NCEP 资料 (水平分辨率为经纬度 $1^\circ \times 1^\circ$), 每日 20 时一次日 20 时的降水实况资料。此处暴雨量级取日雨量 (20 时一次日 20 时) ≥ 50 mm, 或 20 时一次日 08 时以及 08 时—20 时任一时段 ≥ 30 mm。定点资料选取南通地区 8 站: 吕四 ($121.60^\circ E, 32.07^\circ N$), 南通 (市区, $120.85^\circ E, 32.02^\circ N$), 通州 ($121.80^\circ E, 32.10^\circ N$), 海门 ($121.20^\circ E, 31.90^\circ N$), 启东 ($121.67^\circ E, 31.80^\circ N$), 海安 ($120.45^\circ E, 32.53^\circ N$), 如皋 ($120.57^\circ E, 32.38^\circ N$), 如东 ($121.18^\circ E, 32.33^\circ N$)。

直接用历史 NCEP 资料计算, 得到 Q 矢量散度、湿位涡、 I_{ZH} 参数随时间的变化, 与实况降水随时间变化相比, 得到它们与降水的对应关系。之后用 MM5 模式进行运算, 得到预报时刻的 I_{ZH} 值, 用来预报强降水个例。

4.2 结果分析

4.2.1 时间序列诊断分析

取 1998—2003 年暴雨多发期 459 d 其中降水 201 d, 暴雨 12 d。直接用 NCEP 资料计算, 得到 I_{ZH} 参数随时间的变化, 与实况降水的时间变化相比, I_{ZH} 指数与降水变化 (正相关) 吻合较好, 湿位涡 (负相关) 其次, 说明 I_{ZH} 指数预报比单一量预报要好, 具有较好的可信度 (图 1)。

图 1a-d 为时间序列南通 8 站平均后统计结果, 时间为 1998、2000、2001、2002 和 2003 年的 6—8

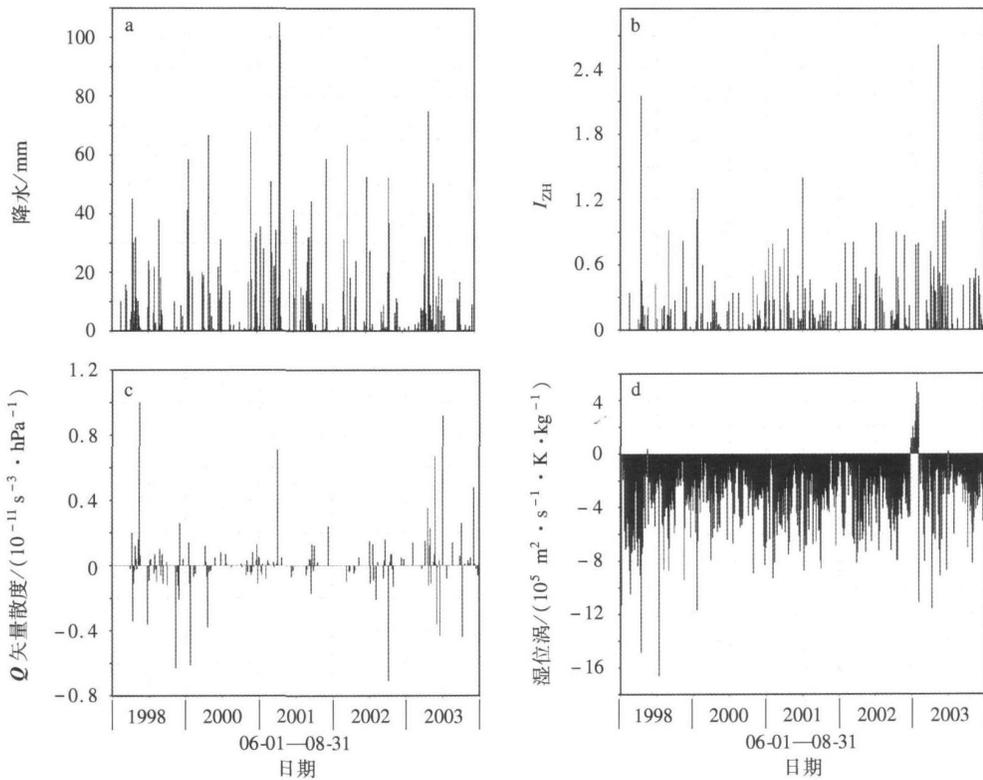


图 1 时间序列实况降水 (a)、 I_{ZH} 参数 (b)、 Q 矢量散度 (c)、湿位涡 (d) 分布

Fig. 1 Averaged observed (a) 24-h rainfall (b) I_{ZH} index, (c) observed Q vector divergence and (d) saturated geostrophic equivalent potential vorticity over the 8 stations of Nantong etc in the summer (JJA) of 1998, 2000, 2001, 2002, and 2003

月,统计单位是 d。在 201 d 降水过程中,暴雨事件 12 d 漏报 50 d 空报 30 d 其中暴雨漏报 7 d 暴雨空报次数 9 d。可以看出, I_{ZH} 指数对暴雨预报的效果更好。从暴雨频率分布和选定 I_{ZH} 指数进行频率分布计算可看出, I_{ZH} 指数取 0.8 时,拟合较好,所以取 0.8 表示有强降水。

4.2.2 I_{ZH} 指数预报分析

选取 2004 年 6 月 24 日个例,进行模拟和预报。以南通所在地区经纬度为模式中心经纬度。用 MM 5 模式进行模拟,对得到的数值预报产品进行分析计算。

所选区域把南通 8 站都包括入内。选取南通降水实况和模拟值进行对比,发现属于同一级别降水,模拟结果可信。比较 I_{ZH} 指数和模拟降水分布 (图 2) 看出,落区和级别相符。在降水中心 100 mm 以上的地方, I_{ZH} 值达到了 1.8 也有最大值 2.0 出现。在南通站, 25 日 00 点 24 h 实况降水为 115 mm, 模拟显示南通站降水为 140 mm, I_{ZH} 参数值为 1.25。

但是,有空报区域出现,估计与产生暴雨的天气类

型有关,进一步对产生暴雨的天气类型进行分类,找出各个类型对应的暴雨概率,进而分析空报、漏报原因,提高预报率,这有待在以后的工作中改进、提高。

5 结论

本文应用配料法作暴雨预报尝试。此方法利用上升强迫、不稳定、水汽、降水效率这几个成分组成了一个预报框架。

Q 矢量散度用来定性的估计准地转上升强迫,饱和地转相当位涡 ζ_{pves} 被用来诊断不稳定的区域,相对湿度和温度露点差来定量有效水汽,用统计结果作为一个权重的依据,这样形成一个新的结合参数—强降水指数 I_{ZH} 。通过识别 I_{ZH} 的大小,用来指示强降水潜势。 I_{ZH} 值越大,降水量级越大。

用历史 NCEP 资料计算,得到 Q 矢量散度、湿位涡、 I_{ZH} 参数随时间的变化,与实况降水随时间的变化相比,得到它们与降水的对应关系。之后用 MM 5 模式进行运算,得到预报时刻的 I_{ZH} 值,用来预报强降水的产生。参数 I_{ZH} 作为指示强降水的参数,

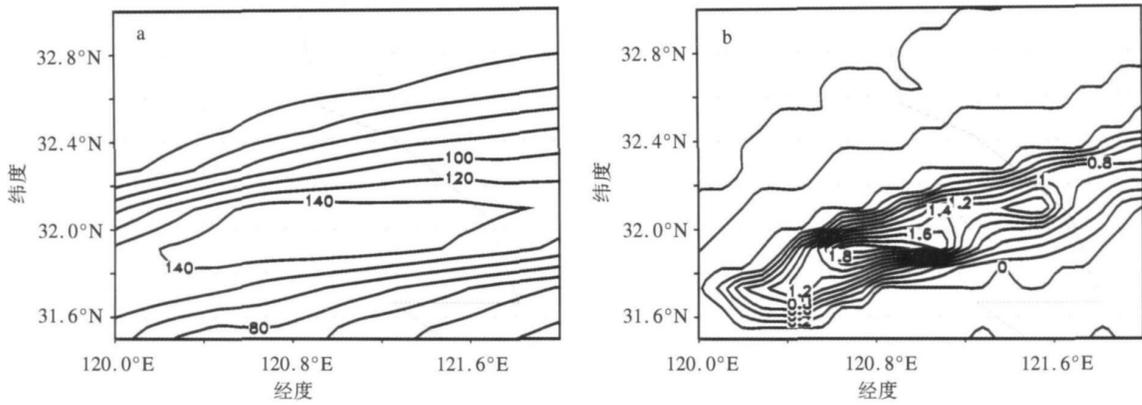


图 2 2004年 6月 25日 00时的 24 h模拟降水 (a)和 850 hPa的 I_{ZH} 分布 (b)

Fig 2 (a) Simulated 24h rainfall and (b) I_{ZH} at 850 hPa at 0000 BST, 25 June 2004

其正值区域表示有降水的区域, I_{ZH} 的大小数值反映降水的强度。分析表明,用 I_{ZH} 指数预报暴雨的效果比仅用单一物理量作预报的效果要好。

不足之处是仍然有空报和漏报产生,估计与产生暴雨的天气类型有关,中国的大暴雨过程经常发生在稳定经向型和稳定纬向型两种天气形势背景下,进一步对产生暴雨的天气类型进行分类,找出各个类型对应的暴雨概率,进而分析空报、漏报原因,提高预报率,这有待在以后的工作中改进、提高。

参考文献:

- [1] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [2] Doswell C A III The distinction between large scale and mesoscale contribution to severe convection A case study example [J]. *Weather Forecasting* 1987, 2: 3-16.
- [3] McNulty R P. On upper tropospheric kinematics and severe weather occurrence [J]. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 662-672.
- [4] McNulty. Severe and convective weather A central region forecasting challenge [J]. *Weather Forecasting* 1995, 10: 187-202
- [5] Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting An ingredients-based methodology [J]. *Weather Forecasting* 1996, 11: 560-581
- [6] Janish P R, Crisp C A, Cortinas J V Jr et al Development of an ingredients based approach to forecasting winter weather in an operational environment [C] // The 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting Norfolk VA: Amer Meteor Soc, 1996 56-59
- [7] Nietfeld D D, Kennedy D A. Forecasting snowfall amounts An ingredients-based methodology supporting the Garcia method [C] // Preprints 16th Conf on Weather Analysis and Forecasting Phoenix AZ: Amer Meteor Soc, 1998 385-387
- [8] Wetzel S W, Martin J E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation [J]. *Weather Forecasting* 2001, 16: 156-167.
- [9] Cortinas J V Jr, Doswell C A III Comments on 'An ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation' [J]. *Weather Forecasting* 2002, 17: 160-167
- [10] Wetzel S W, Martin J E. Reply [J]. *Weather Forecasting* 2002, 17: 168-171
- [11] Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. A new look at the W-equation [J]. *Quart J Roy Meteor Soc* 1978, 104: 31-38
- [12] 胡伯威. 关于位涡理论及其应用的几点看法 [J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26(1): 111-115.
- [13] 袁佳双, 寿绍文. 1998年华南大暴雨冷空气活动的位涡场分析 [J]. *南京气象学院学报*, 2001, 24(1): 92-98
- [14] 吴海英, 曾明剑, 沈树勤, 等. 高强度降水过程形成和发展的一种机制分析 [J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(1): 101-107.
- [15] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1992: 456-466.
- [16] 章淹. 暴雨预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 219-221.
- [17] 朱道元, 吴诚鸥. 多元统计分析与软件 SAS [M]. 南京: 东南大学出版社, 1999: 257-285.