

热带气旋路径预报评估方法研究*

II、多因子综合评价方法

李建平

史久恩

(兰州大学大气科学系 兰州 730000) (北京气象学院 北京 100081)

提 要

本文在文献〔1〕的基础上,利用 Fuzzy 数学观点,建立了热带气旋路径预报的多因子综合评价模型。模型分为单级综合评价和多级综合评价两种,以 1991 年和 1992 年为例进行了评价,结果表明模型是令人满意的。

关键词 多因子 综合评价 热带气旋

一、引 言

我们在文献〔1〕中已经讨论了热带气旋路径预报评价的单因子方法。单因子评价是针对事物的某一方面性能而提出的,它在评价事物某一方面性能上往往能获得满意的结果。然而,正如文献〔1〕中指出,单因子评价的弱点是不能反映出事物在各方面的总的性能。比如,在热带气旋路径预报的单因子评价中可知,有的方法在某些方面是比较好的,但它在另一些方面的性能又是薄弱的。若问在考虑所有单因子在内各预报方法的总体性能如何?这是单因子评价方法所不能回答的。因此,就非常有必要引入考虑多因子综合效果的评价方法。由于预报方法的好和坏本身就是 Fuzzy 概念,所以采用 Fuzzy 综合评价是适合的。本文在文献〔1〕的基础上,建立了热带气旋路径预报评价的综合方法,模型分为单级综合评价和多级综合评价两种,讨论了 1991 年和 1992 年各方法的预报效果,表明模型是有效的,结果是令人满意的。

二、单级综合评价的数学模型及其实际意义

1、模型建立

单级综合评价^{〔2~4〕}的模型在数学上已非常成熟,其建立的步骤如下:

* 本文1993年11月11日收到,1994年12月1日收到修改稿。本文得到“八五”国家科技攻关项目85-906-05-04专题和中国气象局短平快项目资助。

(1) 建立备择的对象集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 。如要评价的技术方案, 即 $X = \{\text{方案}_1, \text{方案}_2, \dots\}$ 。

(2) 建立评价对象的因素(或指标)集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。因素(或指标)就是刻画对象的属性或性能的各个方面。它们反映出对象在各方面的质量。

(3) 建立评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。

(4) 建立单因素评价, 给出模糊值映射

$$f: U \rightarrow F(V), \quad \forall u_i \in U \quad (1)$$

$$f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in F(V)$$

$$0 \leq r_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m.$$

(5) 由 f 导出 U 到 V 的模糊关系——综合评价矩阵

$$R = R_f = (r_{ij})_{n \times m} \quad (2)$$

(6) 综合评价

由于对 U 中各个因素(或指标)有不同的侧重, 需要对每个因素(或指标)赋与不同的权重, 得权重集

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$$

式中 a_i 满足 $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ 。

R 与 A 求出后, 则综合评价为

$$B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (3)$$

式中

$$b_j = \bigvee_{k=1}^n (a_k \wedge r_{kj}), \quad j = 1, \dots, m \quad (4)$$

或

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}, \quad j = 1, \dots, m \quad (5)$$

式(4)为“主因素突出型”的综合评价; 式(5)为“加权平均型”的综合评价。选择式(4)或式(5)应视研究的问题而定。本文选用的是“加权平均型”的综合评价, 采用的算子对是 $(\cdot, +)$, 这主要是让每个因素都对综合评价有贡献。

2. 实际意义

在实际中, 影响一事物的因素往往不只有一个, 而是有多个。针对其中某一个因素(或事物的某一侧面), 我们一般都可以给出较为合理的指标来反映它对这一事物的影响。但这个单一指标并不能代表整体情况, 它只是反映了事物的部分情况。要对事物作出总的评价, 就必须引入一种对多因素所影响的事物作出总的评价的方法, 这就是综合评价方法。即对评价对象的全体, 根据所给的条件, 给每个因素赋予一个非负实数——评价的特性指标, 然后综合事物的这些侧面的效果, 从而得到考虑各因素在内的事物的总体评价。

三、热带气旋路径预报的单级综合评价

1. 综合预报方法的评价

首先讨论 1991 年各方法的情况。建立评价的对象集, 参加评价的方法有:

$$X = \{M_1, M_2, \dots, M_8\}^*$$

根据文献〔1〕对热带气旋路径预报的单因子评价, 建立评价对象的指标集 $U = \{\text{距离稳定度 } DS_{24}, DS_{48}, \text{方向稳定度 } PS, \text{有效稳定度 } ES, \text{转型预报灵敏度 } TS, \text{技巧水平 } P_{24}^*, P_{48}^*\}$ (因 1991 年未对各方法做变速预报灵敏度的评价, 故不把它列入)。

根据实际情形, 如用平均距离误差来表示距离稳定度情况, 则它们的隶属函数建立如下:

$$\mu_{24h}(u_1) = \begin{cases} 1, & u_1 \leq 50 \text{ km} \\ \frac{400 - u_1}{400 - 50}, & 50 \text{ km} < u_1 \leq 400 \text{ km} \\ 0, & u_1 > 400 \text{ km} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{48h}(u_2) = \begin{cases} 1, & u_2 \leq 100 \text{ km} \\ \frac{600 - u_2}{600 - 100}, & 100 \text{ km} < u_2 \leq 600 \text{ km} \\ 0, & u_2 > 600 \text{ km} \end{cases} \quad (7)$$

(式中 u_1, u_2 分别是 24 小时、48 小时预报距离误差)。如用距离稳定度 DS_{24}, DS_{48} , 由于 $DS \in (0, 1]$, 因此, 它们本身就可以当作隶属度, 不再建立隶属函数。同样, PS, ES, TS 也不再建立隶属函数。而对技巧水平, 建立隶属函数如下:

$$\mu_i(P_i^*) = \begin{cases} 0, & P_i^* \leq -100 \\ 0.5 - \sqrt{|P_i^*|} / 20, & -100 < P_i^* \leq 0 \\ 0.5 + \sqrt{P_i^*} / 20, & 0 < P_i^* \leq 100 \\ 1, & P_i^* > 100 \end{cases} \quad (8)$$

式中 $i = 24 \text{ h}, 48 \text{ h}$ 为预报时效。

确定权重集 $A = (0.2, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0.1)$ 。如用 DS_{24}, DS_{48} 代表距离稳定度, 则 1991 年各综合方法的综合评价矩阵为

* 为简便起见, $M_1, \dots, M_8$ 分别表示北京、上海、浙江、福建、广州、海南、关岛和日本的综合预报方法; 后文出现的 M_9, M_{10}, M_{11} 表示广西、香港和江苏的综合预报方法, 三站资料不全, 故未参加评定。

$$R = \begin{bmatrix} 0.60 & 0.68 & 0.38 & 0.62 & 0.66 & 0.52 & 0.59 & 0.71 \\ 0.52 & 0.48 & 0.70 & 0.56 & 0.57 & 0.82 & 0.71 & 0.69 \\ 0.73 & 0.71 & 1.00 & 0.83 & 0.71 & 0.93 & 0.85 & 0.78 \\ 0.35 & 0.21 & 0.33 & 0.17 & 0.17 & 0.20 & 0.39 & 0.33 \\ 0.0 & 0.14 & 0.67 & 0.67 & 0.20 & 0.0 & 0.11 & 0.13 \\ 0.66 & 0.71 & 0.06 & 0.71 & 0.71 & 0.35 & 0.71 & 0.79 \\ 0.68 & 0.73 & 0.27 & 0.84 & 0.68 & 0.76 & 0.78 & 0.79 \\ M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 & M_8 \end{bmatrix}$$

则综合评价 $B = A \cdot R$, 取算子对 $M = (\cdot, +)$,

$$B = (0.50, 0.50, 0.48, 0.58, 0.51, 0.51, 0.58, 0.60) \quad (10)$$

由此可见, 1991 年日本、关岛和福建的综合预报较好, 其他方法结果相差不大。

如以平均距离误差作为稳定度 DS 的判据, 则可得

$$B = (0.46, 0.44, 0.40, 0.52, 0.43, 0.46, 0.54, 0.55) \quad (11)$$

式 (11) 与式 (10) 所得结论是一致的。

1992 年各方法综合评价的情况。参加评价的方法有 $X = \{M_1, M_2, \dots, M_{11}\}$, 对象的指标集 $U = \{\text{距离稳定度、方向稳定度、有效稳定度、转型预报灵敏度、技巧水平、变速预报灵敏度}\}$ 。

取权重集 $A = (0.2, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1, 0.1)$, 建立综合评价矩阵 R (为节省篇幅, R 的具体值略, 下同; 其中的距离稳定度为简单距离稳定度), 则得综合评价 $B = A \cdot R$,

$$B = (0.56, 0.63, 0.55, 0.64, 0.55, 0.32, 0.54, 0.66, 0.62, 0.48, 0.45) \quad (12)$$

由此可知, 1992 年日本、福建、上海及广西的综合预报较好。

如果将 24、48 小时的预报分开考察, 则同上方法得 1992 年各综合方法的 24、48 小时预报的综合评价分别为

$$B_{24h} = (0.56, 0.62, 0.55, 0.70, 0.54, 0.38, 0.58, 0.63, 0.52, 0.46, 0.57) \quad (13)$$

$$B_{48h} = (0.56, 0.64, 0.55, 0.57, 0.56, 0.26, 0.49, 0.69, 0.71, 0.49, 0.32) \quad (14)$$

由式 (13)、式 (14) 知, 1992 年各综合方法中福建、日本和上海台的 24 小时预报较好; 广西、日本和上海台的 48 小时预报较好。

2. 客观预报方法的评价

参加评价的方法有 $X = \{\text{SMD 法, SDD 法, ZBD 法, GBD 法, PC 法, JSD 法, BBD 法或 FBD 法}\}$ (对 1991 年情况无 FBD 法, 1992 年情况无 BBD 法)。指标集分别同综合预报方法。

对于 1991 年各客观预报方法, 取 $A = (0.2, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0.1)$, 建立关系矩阵 R , 得综合评价:

$$B = (0.45, 0.53, 0.49, 0.37, 0.47, 0.36, 0.38) \quad (15)$$

由式 (15) 知, 1991 年各客观方法中上海动力统计法最好。

对于 1992 年各客观预报方法, 取 $A = (0.2, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1, 0.1)$, 建立关系矩阵 R , 得综合评价

$$B = (0.67, 0.49, 0.48, 0.43, 0.57, 0.36, 0.67) \quad (16)$$

由此知, 1992 年各客观方法中福建回归法和上海复合统计法最好, PC 法次之, 表明 PC 法在一定情形下, 是很有参考价值的预报工具。将 24、48 小时预报分开讨论, 则 1992 年各客观方法的 24、48 小时预报综合评价分别为

$$B_{24h} = (0.71, 0.54, 0.56, 0.53, 0.62, 0.57, 0.62) \quad (17)$$

$$B_{48h} = (0.63, 0.43, 0.39, 0.32, 0.52, 0.15, 0.72) \quad (18)$$

可见, 1992 年各客观方法 24 小时预报中, 上海复合统计法最好, PC 法和福建回归法次之; 48 小时预报, 福建回归法最好, 上海复合统计法次之。

四、多级综合评价的数学模型

在单级综合评价中, 综合评价是考虑了多因子综合作用的结果, 在评价事物方面是符合实际的。不过, 单级综合评价有一个弱点, 就是当评价因素较多时, 每一因素取得权重分配的值很小, 而且权重分配难以做到合理, 使得评价得不到预期的效果。因此, 需要引入多级综合评价方法。其建立步骤如下:

1. 将因素集 U 按属性的类型划分成 S 个子集, 记作 $U_1, U_2, \dots, U_S$, 应满足

$$\bigcup_{i=1}^S U_i = U, \quad U_i \cap U_j = \varnothing (i \neq j) \quad (19)$$

设每个子集的因素为

$$U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in_i}\} \quad (i = 1, 2, \dots, S)$$

$$\sum_{i=1}^S n_i = n, \quad n = |U|$$

2. 对于每个子集 U_i , 按一级模型进行评价。假设评价集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, U_i 上的权重分配为 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in_i})$, 其中 $\sum_{j=1}^{n_i} a_{ij} = 1$, U_i 的单因子评价矩阵为 R_i , 于是得第一级的综合评价

$$B_i = A_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}) \quad (i = 1, \dots, S) \quad (20)$$

3. 将每个 U_i 作为一个元素, 用 B_i 作为它的单因子评价, 又可构成评价矩阵

$$R = (B_1, B_2, \dots, B_S)^T \quad (21)$$

(式中 T 表示转置, 下同) 它是 $\{U_1, U_2, \dots, U_S\}$ 的单因子评价矩阵, 每个 U_i 作为 U 的一部分, 反映了 U 的某类属性, 可按它们的重要程度给出权重分配 $A = (a_1, a_2, \dots, a_S)$, 于是得第二级综合评价

$$B = A \cdot R \quad (22)$$

4. 如果在第一步将 U 划分为 S 个子集时, 感到 S 的值仍然偏小, 这时可按更高一

层的某种属性再将 S 细分, 得到更高层次的因素集, 然后再按第 2、3 步进行。以此类推, 即可构成多级综合评价模型。

多级综合评价的优点是克服了因素多权重不好分配的困难, 而且更能反映出事物的各种因素的不同层次。

五、热带气旋路径预报的多级综合评价

本文只讨论 1992 年各预报方法的多级综合评价。

评价的指标集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_{11}\}$ ($u_1, \dots, u_{11}$ 分别是 $DS_{24}, DS_{48}, PS_{24}, PS_{48}, ES_{24}, ES_{48}, TS_{24}, TS_{48}, P_{24}^*, P_{48}^*, VS_{24}, VS_{48}$, 以后还将 60 小时的结果一并考虑)。按照各自的属性将 U 分成六个子集:

$$U_i = \{u_{2i-1}, u_{2i}\}, \quad (i = 1, \dots, 6)$$

首先讨论综合预报方法的情况。参加评价的方法有 $M_1, \dots, M_{11}$, 对应六个子集的单因子评价矩阵为 $R_1, \dots, R_6$ (限于篇幅, 具体值略)。确定每一子集的权重分配 $A_i = (0.4, 0.6), i = 1, \dots, 6$, 于是第一级综合评价 $B_i = A_i \cdot R_i$ 为

$$B_1 = (0.58, 0.57, 0.52, 0.73, 0.54, 0.18, 0.54, 0.66, 0.82, 0.38, 0.71)$$

$$B_2 = (0.82, 0.82, 0.94, 0.70, 0.91, 0.75, 0.76, 0.87, 0.96, 0.92, 0.24)$$

$$B_3 = (0.59, 0.64, 0.60, 0.64, 0.55, 0.46, 0.53, 0.71, 0.86, 0.53, 0.24)$$

$$B_4 = (0.45, 0.68, 0.43, 0.64, 0.58, 0.00, 0.46, 0.60, 0.00, 0.43, 1.00)$$

$$B_5 = (0.22, 0.31, 0.31, 0.77, 0.21, 0.33, 0.28, 0.42, 0.16, 0.17, 0.59)$$

$$B_6 = (0.37, 0.60, 0.0, 0.0, 0.17, 0.0, 0.29, 0.48, 0.0, 0.0, 0.0)$$

取 $R = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6)^T$ 为 $U = \{U_1, \dots, U_6\}$ 的单因子评价矩阵, 并取权重分配为 $A = (0.2, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1, 0.1)$, 进行第二级综合评价

$$B = A \cdot R$$

$$= (0.56, 0.63, 0.55, 0.62, 0.55, 0.36, 0.52, 0.67, 0.63, 0.48, 0.42)$$

可见, 1992 年综合预报方法中, 日本、上海、广西和福建的预报较好。

对于 1992 年各客观预报方法, 同上讨论得如下二级综合评价结果

$$B = (0.66, 0.47, 0.46, 0.40, 0.56, 0.32, 0.68)$$

可见, 福建回归法和上海复合统计法较好。

六、小 结

本文建立了考虑多因子影响的热带气旋路径预报评价的综合评价模型, 分为单级和多级两种, 讨论了 1991 年和 1992 年的情况。

单级综合评价的结果是: (1) 综合预报方法, 1991 年日本、关岛和福建三站最

好, 1992年日本、福建、上海和广西四站最好; (2) 客观预报方法, 1991年上海动力统计法最好, 1992年福建回归法和上海复合统计法最好。另外, 客观方法中PC法也具有相当实力, 表明它是很有参考价值的预报工具。

多级综合评价的结果是: (1) 综合预报方法, 1992年日本、上海、广西和福建的预报较好; (2) 客观预报方法, 1992年福建回归法和上海复合统计法最好, PC法次之。

由以上结论知, 单级综合评价和多级综合评价的结果是基本一致的, 多级综合评价方法更具稳定性。本文的讨论虽然是初步的, 但可以看到综合评价方法在评价事物方面是符合实际的, 客观的, 有效的, 结果是令人满意的。因此, 在热带气旋路径预报的评价中应采用这种方法。

参 考 文 献

- (1) 李建平、史久恩, 热带气旋路径预报评估方法研究I、单因子评价方法, 大气科学研究与应用(九), 气象出版社, 1995。
- (2) 汪培庄等, 应用模糊数学, 北京经济学院出版社, 1990。
- (3) 王光远, 论综合评判几种数学模型的实质及应用, 模糊数学, 4, 1984。
- (4) 肖位枢, 模糊数学基础及应用, 航空工业出版社, 1992。

STUDY OF THE ASSESSMENT METHODS ON THE TROPICAL CYCLONE TRACK FORECASTING II. MULTIFACTORIAL COMPREHENSIVE ASSESSMENT METHOD

Li Jianping

(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University 730000)

Shi Jiuen

(Beijing Meteorological College, Beijing 100081)

Abstract

The models of multifactorial comprehensive assessment on the tropical cyclone track forecasting are established in this paper. The models are divided into two kinds: one-level comprehensive assessment and multi-level comprehensive assessment. These models are applied for the assessment of forecastings of the tropical cyclone track during 1991~1992. The results show that these models are satisfactory.