

气象现代化业务效益评价方法探讨

张钛仁

(中国气象局气象服务与气候司, 北京 100081)

提 要

依据现代化管理中的层次分析法、主成分分析法、模糊测评法和模式识别法的优点, 结合气象现代化业务效益的特点, 提出了适合于气象现代化业务效益评价的方法——APFP 评价法, 并应用 APFP 评价法, 分析和评价了气象现代化在短期天气预报服务中的效益。

关键词: 气象现代化 业务效益 评估方法

1 基本思路

气象现代化业务效益, 是指气象现代化业务建设在气象业务、服务、科研等方面所产生的效益。气象现代化效益是潜在的、间接的, 是难以直接度量的。气象现代化业务建设是多方面的, 彼此之间是相互联系的, 既有纵向的关系, 又有横向的关系, 其效益是多因素共同作用的结果。为了比较科学、客观的评价出气象现代化业务的效益, 我们提出了 APFP 法。

APFP 法是层次分析法 (AHP 法)、主成分分析法 (PCA 法)、模糊测评法 (FUZZY 法)、模式识别法 (PR 法) 四种方法的综合。可以对气象现代化业务效益进行定量与定性、相对与绝对、精确与模糊的评价。

APFP 综合评价法主要以运筹学评价法中的层次分析法 (AHP 法) 为主体, 建立了分层指标体系, 考虑到指标体系初建时, 数据量大, 互有相关和重叠, 不仅工作量大, 而且准确性也受到影响, 因而, 采用主成分分析法进行简化, 再用 AHP 法两两比较原则确定各指标的权值, 以消除主观观偏差的影响。在各分层指标中, 分别运用费用/效益分

析法和专家评价法 (D), 对照评价标准, 确定各分值指标的数值。为了使定性指标量化, 并排除因专家评价造成的主观或老好人的偏差, 运用模糊测评及模式识别法进行了处理, 最后将各基础指标分值加权求和得到评价总结果。

2 基本原理与方法

2.1 层次分析法 (AHP)

采用层次分析法, 首先将一个庞大而复杂的气象现代化业务系统视为一个有机的整体, 依据它们之间的关系, 进行分层归类, 并在此基础上建立气象现代化业务效益评价指标体系^[1]。

2.2 主成分分析法及指标体系的简化

2.2.1 基本原理

主成分分析法的原理如下:

若

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_p \end{bmatrix}$$

为 P 维随机变量, \sum 为 X 的协方差阵,

即协方差阵 $\Sigma = E\{(X_i - EX_i)(X_j - EX_j)\}$ 我们要考虑 X 诸分量的线性组合,使新的变量更加集中地反映 X 的随机变化。若 A 为 $P \times P$ 阵, $Y=AX$, 则 Y 的各分量是 X 的各分量的线性组合, 并且 Y 的协方差阵 $\Sigma Y=A \Sigma A'$, 因为 X 的协方差阵 Σ 是非常肯定的。则对 Σ 必有正交阵 U , 使得:

$$U \Sigma U' = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \lambda_2 & & \\ & & \cdot & \\ 0 & & & \cdot \\ & & & \lambda_p \end{bmatrix}$$

还可以认为, 对角阵 Λ 的对角元素满足: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \cdots \lambda_p \geq 0$; 此时, 若以 U_j 表示 U 的第 j 列, 即 $U = (U_1, U_2, \cdots, U_p)$ 。

取 $Y=UX = (U_1, U_2, \cdots, U_p) X$, 则 Y 的诸分量为 $Y_j = U_j X$, Y 的协方差阵为:

$$\Sigma Y = U \Sigma U' = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & 0 \\ & \lambda_2 & & \\ & & \cdot & \\ 0 & & & \cdot \\ & & & \lambda_p \end{bmatrix}$$

由线性代数易知: Y_1, Y_2, \cdots, Y_p 是互不相关的, 且 Y_j 的方差为 λ_j 。

由上我们称 Y_j 为 X 的第 j 个主成分。

$\lambda_j (\sum_{i=1}^p \lambda_i)^{-1}$ 称为主成分 Y_j 的贡献率。

$\sum_{i=1}^j \lambda_i (\sum_{i=1}^p \lambda_i)^{-1}$ 称为 y_1, \cdots, y_p 的累积贡献率。

主成分分析法, 可以针对一系列气象现代化业务效益评价初始指标, 找出其中少数新的指标, 这几个新的指标每个都是上述一系列指标的线性组合, 使这几个新指标相互间完全独立, 且基本上能够反映原来指标中所包含的信息。

2.2.2 指标体系的简化

现在以气象现代化建设对短期预报的业

务效益指标为例, 进行简化过程的说明, 简化程序如下:

$$\textcircled{1} X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pm} \end{bmatrix}$$

求矩阵每行平均值:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}$$

样本的选取采用抽样调查, 在全国 30 个省(区、市)气象局中选取 105 名专家进行抽样调查。

每行方差

$$U_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{X}_i)^2$$

$\textcircled{2}$ 设 C_{ij} 是 X_i 和 X_j 的协方差, 由公式:

$$C_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{X}_i)(x_{jk} - \bar{X}_j)$$

$\textcircled{3}$ 由公式 $Y_{ij} = C_{ij} \sqrt{U_i U_j}$ 求出 X 的相关系数矩阵 γ ;

$\textcircled{4}$ 求解相关系数矩阵 γ 的特征方程 $|\gamma - \lambda I| = 0$ 的 N 个根。实际上这些 λ 叫做相关系数矩阵 γ 的特征值。且因为:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} - \lambda & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1m} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \gamma_{p1} - \lambda & \gamma_{p2} & \cdots & \gamma_{pm} - \lambda \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ L_{1m1} \end{bmatrix} = 0$$

相应的各个 L 是特征向量的分量。

$\textcircled{5}$ 将特征值按顺序排列, 计算其累积贡献率。

$$\sum_{i=1}^j \lambda_i (\sum_{i=1}^n \lambda_i)^{-1}$$

选取累积贡献率在 82.75% 以上的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \cdots, \lambda_k$ 。

$\textcircled{6}$ 求出主成分, $Y = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j (i = 1, 2, \cdots, k)$, 然后进行归纳、分析。

依照上述步骤,求得气象现代化业务效益16项指标的平均得分,结果见表1(原始数据通过专家调查获得)。

并由此计算出矩阵 X 的协方差阵 C 。再由 C 得出相关系数矩阵 R (表2)。

表1 气象现代化业务效益各指标平均得分

指标因素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
平均得分	6.7	5.6	6.3	6.3	6.2	5.8	5.9	5.9	6.9	6.0	6.1	6.2	7.6	7.6	6.7	7.6

表2 相关系数矩阵 (R_{ij})

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	0.74	0.77	-0.14	-0.17	-0.33	-0.25	-0.27	0.3	-0.13	-0.09	-0.07	0.12	0.37	0.47	-0.2
2		1	-0.36	-0.23	0.47	0.25	-0.34	-0.10	0.41	0.01	0.07	0.13	-0.07	0.43	-0.49	0.09
3			1	0.37	0.38	0.40	0.42	0.25	0.09	0.23	0.21	0.21	0.28	0.45	0.32	0.31
4				1	0.71	0.80	-0.14	0.25	0.05	0.29	0.25	0.19	-0.19	-0.29	0.06	-0.15
5					1	0.60	-0.30	-0.10	0.45	-0.13	-0.06	0.14	0.04	0.42	0.33	-0.11
6						1	-0.15	0.08	0.48	0.11	0.18	0.07	-0.13	0.41	0.48	-0.1
7							1	0.80	0.76	0.11	0.05	0.25	0.21	0.31	0.41	0.07
8								1	0.38	-0.14	0.02	0.15	0.29	0.19	0.22	0.05
9									1	0.02	0.01	0.05	0.15	0.48	0.47	0.15
10										1	0.88	0.83	0.89	0.04	0.29	0.05
11											1	0.28	0.06	0.24	0.28	0.09
12												1	0.28	0.06	0.24	0.14
13													1	0.14	0.19	0.46
14														1	0.78	0.68
15															1	0.09
16																1

先对表2中16项因子间的相关系数进行一些直观的分析,以便对数据间相互关系有一直观的了解。从相关系数阵上可以看出,第1号与第2号、第3号指标间相关系数较大,约在0.74以上;第4号与第5号、第6号指标间的相关系数在0.71以上;第7号与第8号、第9号指标间相关系数均在0.76以上;因此,这三项指标可以简化成一至两项。从相关系数阵上还可知,第10号与第11号、第12号、第13号指标间相关系数均在0.83以上。第14号与第15号、第16号指标的相关系数在0.68以上。

对照表3可以看出,这反映了气象现代化业务效益指标。如天气雷达对短期天气预报的作用,极轨气象卫星资料和同步气象卫星资料对短期天气预报的作用之间有着某种因果关系。国家级巨型机网、区域中心和省气象台工作站、地(市)台和远程终端,在短期天气预报业务效益中有很密切的关系。

还表明,B模式、 T_{42} 模式、欧洲中心模式及日本数值模式在短期天气预报业务效益中有很密切的关系;MOS预报、专家系统、常规天气预报图在短期天气预报业务效益中也有密切关系。

表3 主成分

序号	特征向量 子因素	主成分				
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
X_1	天气雷达	0.38	-0.03	0.03	0.19	-0.03
X_2	气象极轨卫星	0.37	0.04	-0.02	0.03	0.15
X_3	气象同步卫星	0.36	0.10	0.14	-0.04	0.03
X_4	国家→区域→省台通信网	0.15	0.42	0.14	0.16	0.11
X_5	省台→地(市)台远程通信网	0.15	0.43	0.14	0.14	-0.02
X_6	地(市)台→县站通信网	0.16	0.50	0.01	0.08	0.16
X_7	国家级巨型机网	-0.19	0.11	0.39	0.18	-0.05
X_8	区域中心和省台工作站	-0.05	0.04	0.45	0.05	0.16
X_9	地(市)台和县站计算机网	0.19	0.05	0.43	0.12	-0.04
X_{10}	B模式	-0.02	0.15	0.18	0.39	-0.01
X_{11}	T_{42} 模式	0.01	0.14	-0.19	0.43	0.03
X_{12}	欧洲中心数值模式	0.16	0.13	-0.20	0.50	0.17
X_{13}	日本数值模式	-0.04	0.16	-0.15	0.44	0.09
X_{14}	MOS预报方法	0.15	-0.02	0.05	-0.12	0.48
X_{15}	专家系统	0.15	0.17	0.06	0.16	0.43
X_{16}	常规天气预报图	-0.03	-0.12	0.13	0.15	0.41

表4 特征根

原序号	新序号	特征值	累计贡献%
2	1	3.94	24.625
4	2	3.52	46.625
8	3	2.16	63.875
16	4	2.01	76.4375
12	5	1.01	82.75
1	6	0.69	87.0625
5	7	0.48	90.0625
7	8	0.38	92.4375
13	9	0.30	94.3125
15	10	0.26	95.9375
3	11	0.21	97.25
6	12	0.15	98.1875
11	13	0.12	98.9375
14	14	0.09	99.5
9	15	0.06	99.875
10	16	0.02	100.00

综上所述, 16项指标其相关系数的大小基本可简化成5类。第一类是: 1号、2号、3号; 第二类是4号、5号、6号; 第三类是7号、8号、9号; 第四类是: 10号、11号、12号、13号; 第五类是14号、15号、16号。这五类指标, 每类中指标相关系数均较大, 但类与类之间相关系数很小。

相关系数矩阵的特征根如表4所示(特征根由其值大小重新排序)。前5号特征根的累计贡献已达82.75%, 自第6号特征根开始其数值都小于1, 所以就取这5个主成分, 除了在表中写出其特征向量外, 并由表3分析主成分的直观含义:

对于第一个主成分: $Y_1 = 0.38X_1 + 0.37X_2 + 0.36X_3 + 0.15X_4 + 0.15X_5 + 0.16X_6 - 0.19X_7 - 0.05X_8 + 0.19X_9 - 0.02X_{10} + 0.01X_{11} + 0.16X_{12} - 0.04X_{13} + 0.15X_{14} + 0.15X_{15} - 0.03X_{16}$ 。

从 X_1 到 X_{16} 的系数看, 可以说这是 X_1 、 X_2 和 X_3 的一个混合量, 我们称其为“大气综合探测的贡献”。

对第二个主成分: $Y_2 = -0.03X_1 + 0.04X_2 + 0.10X_3 + 0.42X_4 + 0.43X_5 + 0.5X_6 + 0.11X_7 + 0.04X_8 + 0.05X_9 - 0.15X_{10} + 0.14X_{11} + 0.13X_{12} + 0.16X_{13} -$

$0.02X_{14} + 0.17X_{15} - 0.12X_{16}$ 。

从 X_1 到 X_{16} 的系数看, X_4 、 X_5 和 X_6 的系数远远大于其它, 都在0.42以上, 故主成分主要受 X_4 、 X_5 和 X_6 的控制, 为这三项指标的混合体。综观这三项指标我们将该主成分命名为“气象通信的贡献度”。

同理, 对第三个主成分 Y_3 主要受 X_7 、 X_8 、 X_9 的控制。考虑到 X_7 、 X_8 和 X_9 的原含义, 我们将第三个主成分定为“计算机网络的贡献度”。

第四个主成分, 受 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 和 X_{13} 的控制, 考虑到 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 和 X_{13} 的原含义, 我们将第四个主成分定为“数值模式的贡献度”。

第五个主成分受 X_{14} 、 X_{15} 、 X_{16} 的影响较大。由 X_{14} 、 X_{15} 、 X_{16} 的含义可定为“预报工具和方法的贡献度”。

由此可见, 经过主成分分析, 评估气象现代化对短期天气预报业务效益的指标可找出5个相对独立的新指标, 即 a. 大气综合探测的贡献度; b. 气象通信的贡献度; c. 计算机网络的贡献度; d. 数值预报模式的贡献度; e. 预报工具和方法的贡献度。

由于这5个新指标已按原来16个指标的相关性程度作了重新分类, 故可消除原指标包含的许多重复因素。上述指标虽然只有5个, 但它们包含了全部信息量的82.75%以上。可见, 依靠这5项主成分指标进行业务效益评价, 其结果有较强的准确性。值得一提的是, 它已使数据采集、指标权重确定以及评价等工作大大简化了。

主成分分析的结果和通过相关系数矩阵直观分析的结果, 两者完全相符, 这表明指标体系的简化是正确的。

最后以新的指标体系为基础, 以原有的数据为依据, 进行重新评估, 再将新老指标体系的某些结果进行对比, 其结果如表5。

表 5 新、旧指标体系表

	新 体 系	旧 体 系
总平均分	$1/5(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5) = 6.38$	$(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{16})/16 = 6.3$
主成分 1 得分	$Y_1 = 6.39$	$(X_1 + X_2 + X_3)/3 = 6.2$
主成分 2 得分	$Y_2 = 5.90$	$(X_4 + X_5 + X_6)/3 = 6.1$
主成分 3 得分	$Y_3 = 6.28$	$(X_7 + X_8 + X_9)/3 = 6.23$
主成分 4 得分	$Y_4 = 6.43$	$(X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13})/4 = 6.33$
主成分 5 得分	$Y_5 = 7.0$	$(X_{14} + X_{15} + X_{16})/3 = 6.77$

2.3 模糊测评法

指标体系得到了简化并确定了权重之后,运用测评法,对气象现代化业务效益进行实际评价,不但能够将大量的模糊、非精确性的定性数据与定量数据有机地结合在一起,而且可以充分运用群组评价技术,使评价结果更趋准确。具体步骤如下:

① 确定评价指标集合 X 。 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。其中 $1 - L$ 项指标为可以精确评分的定量指标; $1 + L - 1$ 项为模糊指标,并令 $n - 1 = \gamma$ 。

② 确定评价等级集合 $Y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_m)$ 。其中, y_i 为第 i 等级, m 为评价等级数,在实际应用时,一般 $m = 5$,即 $y_1 =$ 很好, $y_2 =$ 较好, $y_3 =$ 好, $y_4 =$ 一般, $y_5 =$ 差。

③ 确定评价等级的隶属度集合 $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_i, \dots, u_m)$ 。其中, U_i 为第 i 评价档次对应的隶属度分数,若我们把上述 5 等隶属度分别定义为 1, 0.85, 0.70, 0.50, 0.30, 即 $U = (1, 0.85, 0.70, 0.50, 0.30)$ 。

④ 填写模糊评判表,并计算模糊测评矩阵 R 。

为了测评的准确性,测评人数最好大于 10 人,因模糊定性指标共有 γ 项,关于 R 矩阵详见文献[5]。

⑤ 计算综合隶属度。综合隶属度是将模糊测评矩阵与隶属矩阵相乘(略,见文献[5])。

⑥ 计算综合评分数。将各测评人在各项

指标上的评分与各项指标权重(已有层次分析法确定)对应相乘即可(略,见文献[5])。

2.4 模式识别法

模式识别法在气象现代化业务效益评价中,起两方面的作用,一是用于确定指标系的权重;二是识别和筛除评判人的极端、主观意见。具体步骤如下:

① 对群组评判意见计算出中心值(略,见文献[5])。

② 计算每位测评者在各指标上的两两比较判断值与中心值的距离。

③ 确定极端意见的边界值。可采用两种方法加以实现。

第一方法是定值法。首先确定一个边界 D ,当某测评者的评价结果与中心值的距离大于这个定值 D 时,则认为该测评者的评价结果是极端意见。

第二方法是百分比法。首先确定一个百分数,这个百分数是指远离中心评判部分人所占总测评人数的比例值,则余下 $m - s$ 名较公正者重新计算。以此组成新的判断矩阵,再求特征向量和权重。

3 应用分析举例

根据这一目的,结合气象现代化建设的实际,按照 APFP 法中的层次分析法的层次分析思想,我们重新建立了气象现代化效益的评价体系(图略)。

指标体系建立之后,按照层次分析法计算权重的要求,设计了权重咨询两两比较调查表(表略)。向有关专家(气象系统各层次

的管理专家,各类专业技术人员等)进行调查、咨询,将数据集合起来进行模式识别处理,建立新的判断矩阵,最后计算出各层指标的权值,以及一致性检验情况(权值计算结果略)。

权重确定后,运用模糊测评法对实际情况进行评价,将指标层的指标按从好到坏的顺序,分成若干标准档次,制定评价等级标准并设群组评价调查表。取得各基础指标的分值,针对分值,再用模式识别法,剔除极端意见,求得各指标的平均值(评价等级标准表、群组调查表略)。

最后,运用 APFP 评价法加权求总表达式:

$$Z_i = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij}$$

其中, Z_i 表示气象现代化对短期天气预报业务的综合评价得分值。取 $0 \leq Z_i \leq 100\%$ 。

n 为指标体系中指标层的指标个数。

W_j 为气象现代第 j 项目(指标体系中影响层的各指标)对天气预报业务贡献的权值,权值反映了影响层各指标对短期天气预报业务的贡献(影响)度的大小。

$$\text{且有 } \sum_{j=1}^n W_j = 100\%$$

A_{ij} 为各专家对指标层各指标的评判得分。

经上述一系列的计算后,即可得到气象现代化在短期天气预报业务中的效益。经综合评价和计算,气象现代化在短期天气预报中的业务效益为 86.8%。该结果因受数据来源的限制,可能不一定很准确,其结果有待于进一步研究和核实。

以上我们以短期天气预报业务为例,比较系统地分析和探讨了气象现代化业务效益评价的方法,依照此方法可以很容易地评价出气象现代化在天气预报(含短期天气预报、

中期天气预报、长期天气预报和短时天气预报)业务中的效益。类似地,可以评价出气象现代化在大气探测、气象通讯、气候资料加工处理等业务中的效益。最后评价和计算出气象现代化在整个气象业务中的效益。此效益是一个百分数,也称为现代化权重系数。再用此权重系数乘以气象服务的效益值,即可得到气象现代化在国民经济建设、国防事业和社会发展中的作用和效益,这也就是本文所说的气象现代化服务效益。在分析和评价出气象现代化业务效益和气象现代化服务效益的基础上,分析和评价出气象现代化的总效益。

4 讨论

4.1 该方法能够较好地将气象现代化业务效益评价中复杂的定性指标和定量指标有机地结合在一起,获得较客观、公正的数量化评价结果。

4.2 该方法能够较好地解决指标中的相关和重叠问题,使指标大大地得以简化。既使指标保持了全面性和科学性,又减少了评价的工作量,增加了实用性。

4.3 该方法通用性强,通过对基础指标的调整可以用于气象现代化业务效益的评价。通过对评价指标的适当修正能够较好地兼顾不同行业不同类型现代化效益的评价。

4.4 该方法运用 AHP 法确定指标权重,避免了对权重直接评估赋值的不精确性。

4.5 该方法一方面可以将专家评价思维和判断清晰化和量化,充分发挥专家对定性指标的判断作用,另一方面通过模式识别辨别和筛选因个人主观极端或老好人产生的评判误差。

4.6 该方法尽管比较科学、客观,但比较复杂,有许多问题还有待于进一步研究和完善,在此只想起一个抛砖引玉的作用。

(下转 19 页)

(上接 12 页)

参考文献

- 1 钱颂迪. 运筹学. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- 2 贺仲雄. 模糊数学及其应用. 天津: 天津科技出版社, 1984.
- 3 王树柏. 层次分析法原理. 天津: 天津出版社, 1986.
- 4 Robert E. Chapman. Benefit-Cost Analysis for the

Modernization and Associated Restructuring of the the Nation. Weather Service, 1992. 7.

- 5 张钦仁. 气象现代化业务效益评价及方法研究: 【硕士学位论文】. 北京: 清华大学, 1994.
- 6 张钦仁. 气象现代化业务效益评价指标体系. 气象, 1997, 23 (3): 3-7.

Study on Meteorological Modernization Benefit Evaluating Method

Zhang Tairen

(Chinese Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract

The basic characteristics and the form of expression of the Chinese meteorological modernization benefit was analysed and deduced, and the basic thinking and evaluating method of the meteorological modernization benefit was put forward. The evaluating system of the meteorological modernization benefit was set up and the basic method of the MMBE was researched. Some preliminary results of analysing and evaluating the meteorological modernization in the short-range weather forecast were obtained.

Key Words: meteorological modernization operation benefit evaluating method