

建立气象经济模式的基本原则

史 国 宁

(气象科学研究院气象科技情报研究所)

用以定量描述气象与经济之间关系的数学模式称为气象经济模式。它通常包括两方面的内容：一是对各种气象情报的经济效益作定量的计算；一是根据气象情报确定最佳经济决策。这是互相联系不可分割的两个方面。只有对各种气象情报的经济效益进行合理评价之后，才能据以作出最佳经济决策，力争最大限度地发挥气象情报潜在的能力，以达到提高气象服务经济效益的目的。

这里所说的气象情报，指的是气候资料、天气实况资料、各种形式的天气预报、气象咨询服务等等。

一、气象经济效益评价的基本含义

1. 经验方法的局限性

对气象情报经济效益的评价通常有经验方法和理论方法两种。经验方法是通过向使用气象情报的生产部门作实地调查，以获得用户在某些具体条件下使用具体气象资料后得到的收益。此法虽简单，但有相当大的局限性，原因主要有以下两个。第一，这样得出的经济效益数字通常是根据为数不多的实例确定的，因此无法充分考虑在不同气象条件下可能出现的全部情况以及可能采取的各种经济决策。而且在确定对哪些个例进行调查时，往往是由人主观决定的，有意或无意地略去了不利的实例，因此总是得到正的经济效益，很少有人提到由于预报错误而造成的负经济效益，显然这是不合理的。第二，由于采取决策后得到的经济效益大小不仅取决于所使用的气象情报的质量（例如天气预报的准确率和时效），还取决于生产部门如何使用这些情报，因此这样得出的经济效益指标并不能充分反映出各种气象情报本身所固有的经济价值。在实际中，许多气象资料经常并未得到充分利用，因而其经济价值也常

常被低估了。

2. 理论模式的作用

经验方法的上述缺点可以用理论模式来弥补。对专门设计的气象经济数学模式进行理论分析，就能得出所谓潜在经济效益，它是指当气象情报获得最有效的利用时所可能得到的平均效益。平均效益有很好的代表性，因而要比只根据少量实例直接得出的效益指标合理得多。

此外，通过数学模式还可以计算出有关经济生产和技术过程对天气影响的反应，从而可判断用户以各种不同方式使用气象情报会产生哪些结果。根据已有的试验资料调整模式，还可以用它来解决一系列重要问题，例如当现有的气象情报不复存在时，会给用户经济生产活动带来什么后果；在具备一定的气象情报的情况下以采取什么策略为最优；用户如果考虑某些气象情报能得到什么潜在收益；就现有的气象情报而言已经实现的经济效益与潜在经济效益的差距有多大；用什么办法可以逐渐接近于现有情报的潜在经济效益；对气象服务系统作各种改进（例如提高预报准确率）后会带来什么结果等等。

二、几个与建立模式有关的基本概念

在建立气象经济模式时，经常用到的有以下几个基本概念。

1. 效益（或损失）函数

在不同的天气状态（ F ）下，用户采取不同的决策（ d ），所得到的效益（或所遭受的损失）可以用一个函数 $u = u(F, d)$ 来表示，称为效益（损失）函数。在有 m 种天气状态和 n 种经济决策时，效益（损失）函数可以写成矩阵形式如表 1。

矩阵的元素 u_{ij} 代表在第 i 种天气状态（ F_i ）下采取第 j 种决策（ d_j ）所得到的效益

表 1 效益矩阵 (或损失矩阵) 的一般形式

F	d					
	d ₁	d ₂	...	d _j	...	d _n
F ₁	u ₁₁	u ₁₂	...	u _{1j}	...	u _{1n}
F ₂	u ₂₁	u ₂₂	...	u _{2j}	...	u _{2n}
...	...	...	...	...	...	...
F _i	u _{i1}	u _{i2}	...	u _{ij}	...	u _{in}
...	...	...	...	...	...	...
F _m	u _{m1}	u _{m2}	...	u _{mj}	...	u _{mn}

(或所遭受的损失)。例如, 对于出现 (F₁) 或不出现 (F₂) 坏天气的两分类预报来说, 存在两种决策, 即采取预防措施——d₁, 不采取预防措施——d₂。又设不采取预防措施时遭受的气象损失为 L, 采取预防措施所需费用为 C, 并假设不存在不可避免的损失, 则可以按照上面的效益矩阵建立所谓“费用—损失”模式如表 2。显见, 仅当 C < L 时, 采取预防措施才有意义。

表 2 费用—损失矩阵

F	d	
	d ₁	d ₂
F ₁	C	L
F ₂	C	0

2. 气象损失

在某一天气状态 (F) 下存在一个最优决策 d₀(F), 如果用另一决策 d 来代替 d₀, 就会使效益降低或使损失增加, 其差值 r(F, d) 称为气象损失。显然, 当 u 表示效益时, $u(F, d_0) = \max_d u(F, d)$, 这时有

$$r(F, d) = u(F, d_0) - u(F, d) \quad (1)$$

当 u 表示损失时, $u(F, d_0) = \min_d u(F, d)$, 这时有

$$r(F, d) = u(F, d) - u(F, d_0) \quad (2)$$

气象损失可以表示成损失矩阵, 矩阵的元素为 u_{ij} = u(F_i, d_j)。例如对于两分类预报, 气象损失矩阵如表 3。

3. 共轭矩阵

设有某种 m 分类天气预报, 我们可以根据历史资料计算出实际天气状态 (F_i) 与预报 (F_j) 的一切可能组合的出现频率, 用概率

表 3 两分类预报的气象损失矩阵

F	d	
	d ₁	d ₂
F ₁	0	L - C
F ₂	C	0

P(F_i实, F_j预) 来表示。全部 P_{ij} = P(F_i实, F_j预) 组成一个矩阵, 称为共轭矩阵。共轭矩阵是用来计算预报准确率的, 由它可以看出报对、报错、空报和漏报的出现频率。两分类预报的共轭矩阵见表 4。

表 4 两分类预报的共轭矩阵

实 况	预 报	
	F ₁	F ₂
F ₁	P ₁₁	P ₁₂
F ₂	P ₂₁	P ₂₂

在上述的效益 (损失) 函数、气象损失和共轭矩阵三项中, 前两项属于气象情报的经济特征, 后一项属于气象特征。对于每一种气象情报, 将这三种特征结合起来考虑, 按一定的规则在利弊损益、轻重得失之间进行计算、对比、斟酌和权衡, 即可得到该气象情报的经济效益评价和最佳经济决策。

三、建立气象经济模式的基本着眼点

1. 所有的气象经济模式都必须建立在概率意义的基础上, 这是由以下三点事实所决定的。第一、大气运动本身具有随机性的一面; 第二、天气预报不可能达到百分之百的准确; 第三、经济生产活动中更有很多事先难以预测的非确定性因素。这三种不确定性叠加在一起, 使得气象经济决策复杂化了。因此, 根据模式作出的最佳决策只能做到在概率意义上最为合理, 并不能保证每一次都得益, 甚至有时还会连续多次失败。但这并不损害所取策略在概率意义上的最佳性。

同样, 我们在某一天气事件发生之后评价事前采取的决策时, 也应该按照概率意义去讨论事前采取的决策是否最佳, 而不应作事后诸葛亮, 把已经发生的事件当作必然发

生的事件看待。

总之,无论是评价经济效益也好,进行气象经济决策也好,都不能忘记要在概率的意义上考虑问题,否则一不注意,就会得出一些似是而非的结论。

2.任何模式都必须将气象参数与经济参数结合起来考虑:在根据某一天气预报作经济效益评价或经济决策时,不但要统计历史资料计算该天气预报的准确率 P (气象参数),而且要考虑每种决策的经济后果(经济参数)。如果经济效益或损失很大,那末即使预报很不准确,也有必要加以重视。再以两分类预报的决策问题为例稍作说明。如果 $C>L$,即采取措施的花费比采取措施后避免的损失还要大时,那末即使天气预报100%准确,也不应该采取措施。反之,如果 $C\ll L$,那末即使天气预报很不准确,也应该考虑采取措施。在这种思想的指导下,可以推导出两分类预报的决策判据如下:

$$P = \begin{cases} < \frac{C}{L} & \text{采取措施} \\ = \frac{C}{L} & \text{两可} \\ > \frac{C}{L} & \text{不采取措施} \end{cases}$$

上式表明只根据经济参数 C 和 L 无法作决策,只根据气象参数 P 也无法作决策,而必须将 C 、 L 与 P 进行比较之后才能作出决策。

以上是最简单的一种气象经济决策模式。其它各种决策模式尽管比这复杂得多,但万变不离其宗,基本思路还是一样的。

3.最佳策略的选择标准之一——坏中求好、少中择多原则:选择最佳策略时通常用所谓最大中取最小方法(对于损失)或最小中取最大方法(对于效益)。最大中取最小方法是先在损失矩阵的每列找最大元素:

$$u_j^{\max} = \max_i u(F_i, d_j), i = 1, 2, \dots, m, \\ j = \text{const}$$

再在 $u_1^{\max}, u_2^{\max}, \dots, u_m^{\max}$ 中找最小元素:

$$u_{\min} = \min_j u_j^{\max} = \min_j \min_i u(F_i, d_j)$$

对于气象损失 $r(F, d)$,则同样可找出:

$$r_{\min} = \min_j \max_i r(F_i, d_j)$$

在各种天气条件 F_i 下采取不同决策 d_j 的频率可以用条件概率 $P_s(d_j/F_i)$ 来表示。如果这些概率已知,则可以计算某用户在各类天气下的平均(统计意义上的)可能损失

$U(F_i)$:

$$U(F_i) = \sum_{j=1}^n u(F_i, d_j) P_s(d_j/F_i) \quad (3)$$

对所有的 i 计算 U 值,可以找到一最大值:

$$U^{\max} = \max_i U(F_i), i = 1, 2, \dots, m$$

所谓最优策略,就是在所有策略中使可能的最大损失达到最小或可能的最小效益达到最大的那种策略。这种最优策略 S_0 应满足条件:

$$U_0^{\max} = \min_{\langle S \rangle} U^{\max} \quad (\text{对于损失}) \quad (4)$$

$$\text{或 } U_0^{\min} = \max_{\langle S \rangle} U^{\min} \quad (\text{对于效益})$$

同样,对于气象损失 R 而言,则最优策略 S_0 应满足:

$$R_0^{\max} = \min_{\langle S \rangle} R^{\max} \quad (5)$$

其中,

$$R^{\max} = \max_i R(F_i) = \max_i \sum_{j=1}^n r(F_i, d_j) P_s(d_j/F_i) \quad (6)$$

仔细分析以上各式可以看出,这种方法的基本思想是“从最坏处着眼,向最好结果努力”。也就是说,我们先设想采取每一种可能的策略都会遭遇到一种最不利的天气,然后在一切最不利的天气状态下来确定我们的最佳策略。这种基本思想是符合我们的思维逻辑和实际经验的。我们在对一个尚未发生的、后果不能完全预料的事件采取对策时,总是宁可先把后果设想得坏一些,然后尽一切办法向最好结果去努力。

4.最佳策略的选择标准之二——贝叶斯方法:对于每一策略 S ,可以找到统计意义上的平均效益:

$$U = M_s \{u(F, d)\} \quad (7)$$

其中 M_s 为对于给定策略 S , u 在一切可能的 F 和 d 值上的概率平均算子(数学期望)。若 F 和 d 是离散值,则

$$U = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u(F_i, d_j) P_s(F_i, d_j) \quad (8)$$

由(1)式,上式可改写成:

$$U = \sum_{i=1}^m U(F_i) P(F_i) \quad (9)$$

其中 $P(F_i)$ 是 F_i 的气候概率。

若 F 由某一取连续值的气象要素 $X = x$ 确定,按照某一 $X = a$ 采取决策,则平均效益

$$U = \int_{\langle x \rangle} \int_{\langle a \rangle} u(x, a) f_s(x, a) da dx \quad (10)$$

其中 $f_s(x, a)$ 是 x 和 a 值的二维分布平面, 取决于策略 S , $\langle x \rangle$ 和 $\langle a \rangle$ 是 x 和 a 的可能值域。设在每一具体情况下是按照天气预报 $F_{\text{预}}$ 采用某一规则来进行决策的, 则 $d = S(F_{\text{预}})$, 于是 (5) 式可改写成

$$U = M\{u[F, d = S(F_{\text{预}})]\}$$

其中 M 是按照 $F_{\text{预}}$ 和 F 的一切可能组合取平均的概率平均算子。

设有 m 种可能的天气状态, m 种互异的天气预报, 则上式为:

$$U = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u(F_i, d = S(F_{i\text{预}})) P(F_j, F_{i\text{预}}) \quad (11)$$

对于平均气象损失 R 则有:

$$R = M_s\{r(F, d)\}$$

对于离散型系统有:

$$R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r(F_i, d_j) P_s(F_i, d_j) \quad (12)$$

对于连续模式系统有:

$$R = \int \int_{(x)(a)} r(x, a) f_s(x, a) da dx \quad (13)$$

设 $\|u_{ij}\|$ ($i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$) 为效益矩阵, 则由 (1) 和 (2) 式得:

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r(F_i, d_j) P_s(F_i, d_j) \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\max_{d_j} u(F_i, d_j) - u(F_i, d_j)\} P_s(F_i, d_j) = W - U \end{aligned} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} W &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \{\max_j u(F_i, d_j) P_s(F_i, d_j)\} \\ &= \sum_{i=1}^m \max_j u(F_i, d_j) P(F_i) \end{aligned}$$

W 不依赖于选择什么样的策略。由此可知, 策略 S_0 既保证平均收益 U 达到最大, 也就等于是使平均气象损失 R 达到最大。因此在贝叶斯方法中不管用 u 或 r 都是一回事。

在贝叶斯方法中所要寻找的不是保证使 $u(F, d)$ 或 $r(F, d)$ 的数学期望达到最大或最小的策略, 而是要寻找使它们的某些函数 $Z_u = Z(u)$ 或 $Z_r = Z(r)$ 达到最大或最小的策略。

如果给定气象损失 r 的某一较高值 r' , 所谓最优策略 $S = S_0$, 就是要使概率 $P(r \geq r')$ 达到最小值的策略, 即使得

$$P_0(r \geq r') = \min_{\langle S \rangle} P(r \geq r')$$

的策略。

设给定一单位梯阶函数

$$h(r) = \begin{cases} 0 & \text{当 } r < r' \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } r \geq r' \text{ 时} \end{cases}$$

按照概率的定义

$$P(r \geq r') = M_s\{h\}$$

由此可以得出结论, 使重大损失的出现频率达到最小的方法在于寻找这样一种策略, 即使得函数 $h(r)$ 的数学期望达到最小。

以上是建立气象经济模式的基本原则, 在具体采取决策时, 可以根据上述基本原则分别对气候资料、分类预报、定量预报和概率预报作不同考虑。

四、当前建立和使用气象经济模式的难点所在——资料积累问题

建立和使用气象经济模式不仅需要使用实际资料, 而且需要使用大量的、连续的、系统的实际资料作为模式的输入, 只靠少量实例调查是难以解决问题的。输入数据分为两类, 一类是属于气象参数的数据, 例如根据历史资料统计所发布天气预报的准确率, 对于定量预报还必须知道预报值和实况的联合分布函数(或相关函数)等等; 另一类是属于经济参数的数据, 例如需根据经济部门积累的足够多的实际资料估算出用户效益矩阵(或损失矩阵)中的每个元素, 从而构造完整的效益(损失)矩阵, 或计算出效益(损失)函数等等。前一类资料档案的建立需由气象部门来完成, 可以先对单一预报要素和一定的预报方法统计出准确率, 或计算出预报和实况的相关系数。后一类资料档案的建立需由气象部门与经济生产部门共同来完成, 可由气象部门提出要求, 请经济生产部门系统地收集有关经济参数数据。我国气象经济效益评价工作刚刚开始, 缺乏系统的资料, 因此建立有关资料档案乃是当务之急, 特别是需要积累在各种天气状态下采取各种决策时的得失损益数据。

在缺少系统资料的情况下, 个例调查仍不失为一种有用的方法, 尽管它有很大的局限性。为了提高个例调查资料的代表性, 首先, 应该尽量用随机挑选的办法来确定调查对象, 以避免主观挑选的人为偏差; 其次, 调查的个例数应尽量多一些, 而且最好是属于同一类型的个例。