

装备与防护

## DEA 交叉模型融合熵值法的战役仓库航材保障能力评估

方坤, 胡勇, 崔崇立, 徐启丰  
(空军勤务学院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** **目的** 为科学地检验评估空军战役仓库的航材保障能力, 提出构建基于数据包络分析(DEA)法的航材保障能力评估模型。**方法** 首先确定能够表达战役仓库航材保障军事、经济特性的评估指标, 建立基于数据包络分析法的评估模型, 计算出各战役仓库的综合交叉效率值, 以实现待评估战役仓库航材保障能力的排序。**结果** 运用模型对 15 个战役仓库进行实例分析, 得出各战役仓库的交叉效率值为 0.69048~0.82253, 第 15 号战役仓库的效率值最高, 与实际情况相符合; 并通过对比验证了新模型具有更好的排序效果。**结论** 新模型可以为航材保障能力评估工作提供科学依据。

**关键词:** 战役仓库; 能力评估; DEA 交叉效率; 熵值法

**中图分类号:** E926; V351 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)21-0260-06

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.21.036

### Support Strength Evaluation on Air Materials in Battle Warehouse by DEA Cross-Efficiency Model and Entropy Method

FANG Kun, HU Yong, CUI Chong-li, XU Qi-feng

(Air Force Logistics University, Xuzhou 221000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to build an evaluation model of air material support strength based on data envelopment analysis (DEA), in order to scientifically test and evaluate the air material support strength of battle warehouse. Firstly, the evaluation indexes expressing the military and economic characteristics of air material support in battle warehouses were determined to establish an evaluation model based on data envelopment analysis and calculate the comprehensive cross-efficiency value of each battle warehouse, so as to realize the ranking of air material support strength of battle warehouse to be evaluated. Finally, this model was used to analyze the fifteen warehouses, and it was found that the cross-efficiency value of each battle warehouse was 0.69048-0.82253. The efficiency value of the 15<sup>th</sup> battle warehouse was the highest, which was consistent with the actual situation. By comparison, it was verified that the new model had better ranking effect. The new model can provide a scientific basis for the evaluation of air material support strength.

**KEY WORDS:** battle warehouse; strength evaluation; DEA cross-efficiency; entropy method

空军战役仓库作为空军飞行保障的物资供应基地,其航材保障能力对于空军部队的战训行动具有重要影响,当部队产生航材需求或是上级派出特定任务时,仓库的航材保障能力将决定任务能否精确高效地完成。新时期下,空军的战备工作对于航材保

障工作的要求愈发提高,这既是提高空军部队作战能力的现实要求,也是当前亟须解决的难题,因此,对战役仓库的航材保障能力进行系统、科学的评估十分必要,通过分析现状找出存在的问题,让决策人员更好地掌握新体制下仓库的航材保障能力,为

收稿日期: 2021-03-16

作者简介: 方坤(1997—),男,空军勤务学院硕士生,主攻航材保障决策与信息化。

通信作者: 胡勇(1975—),男,空军勤务学院教授、硕导,主要研究方向为航材保障信息化。

下一步的优化整改提供理论依据，最终实现仓库航材保障能力的提高。

影响战役仓库航材保障的因素颇多，对其能力评估本质上是多目标问题，而不同的评估方法可能产生不尽相同的评估结果。国内外关于能力评价方法的研究有很多，目前常用的评价方法主要概括为专家评估法、多元统计理论、不确定性理论、多属性理论、交叉学科评估方法及组合评估法<sup>[1]</sup>。其中，数据包络分析 (DEA) 法是一种以相对效率概念为基础发展起来的交叉学科评估方法<sup>[2]</sup>，能有效处理多输入、输出的复杂问题，可用于评价决策单元的相对有效性，该方法在指标权重的确定上可以避免评估者主观因素的影响，能够有效避免人为因素干扰评估，具有较好的实用价值。国内外许多学者已在不同领域内采用 DEA 法来进行评比评估<sup>[3-8]</sup>，且达到了理想的效果，不过目前在战役仓库保障能力评估方面较少有相关研究。

文中拟对空军战役仓库的航材保障能力实施检验评估，首先通过分析战役仓库航材保障的军事性属性和经济性属性，选取航材保障能力的评估指标。鉴于所有评估方法都难免存在局限性和不足之处，而科学地采用具有互补性的方法建立组合模型能够弥补不同方法的缺陷，使评估的结论更加精确和可信，文中应用数据包络分析法融合熵值法来建立保障能力评估模型，并利用多个战役仓库的保障数据进行实证评估，最后将结果与传统 DEA 交叉效率模型所得结果比较分析，验证新模型具有更高的实用价值。

## 1 战役仓库航材保障能力评估指标的确定

对于评价研究来说，指标是决定评估结果是否科学有效的关键因素，需要对评估对象的本质特征进行深入研究，明确指标选取原则，坚持聚焦实战、以评促改，科学地确定评估指标。决定战役仓库航

材保障能力的因素很多，在选取评估指标时应遵循如下几点。

1) 系统性与简洁性结合。所选取的评估指标均应以系统评估为目的，能够反映战役仓库的重要信息，同时所选取的各个指标应当避免出现属性上的重叠，每个指标都应能较好地反映被评估对象的某个特定属性，力求指标体系整体上的精简，以使评估活动便于实施。

2) 科学性 with 可操作性结合。指标体系的构建必须在对仓库航材保障科学分析的基础上，牢牢抓住航材保障能力这一中心目标，突出主要的指标。同时也要注意指标的可操作性与实用性，指标的构建应从实际出发，指标的含义必须明确，量化计算方法不应过于复杂，且所用的数据要有可靠的来源。

3) 定量与定性结合。航材保障涉及诸多方面，在构建评估指标时应注重选择可量化的指标，对于部分无法直接量化的指标则应当使用特定的方法对其定性描述后量化处理。各级指标中涉及的数据、资料要可靠，统计口径保持一致，确保评估结果的准确性。

应用 DEA 法需要把指标分为投入、输出两大类，投入类指标通常来说越小越好，输出类指标越大越有益<sup>[9]</sup>。基于上述原则，通过广泛咨询一线航材保障人员及院校专家的意见，选取战役仓库航材保障能力评估指标见表 1。

## 2 战役仓库航材保障能力评估模型的建立

### 2.1 DEA 理论模型

假设有  $n$  个待评估的战役仓库，可将每个战役仓库都视为一个决策单元  $\{D_j, j=1, 2, \dots, n\}$ ，每个战役仓库都有  $m$  种输入指标和  $s$  种输出指标。 $X_j$  和  $Y_j$  分别为第  $j$  个战役仓库的输入向量和输出向量； $X_{ij}$  为

表 1 航材保障能力评估指标  
Tab.1 Evaluation index of air material support strength

指标类型	指标名称	指标含义
投入指标	航材保障人员数量 $I_1$	该战役仓库里专业实施航材保障业务的人员总数
	航材保障经费 <sup>[10]</sup> $I_2$	该战役仓库航材保障部门该年度用于维持单位运转、维护维修保障设备、处理业务等活动的费用 (不含库存航材自身价值) (万元)
	航材保障设施设备 $I_3$	该战役仓库配备的用于各类航材保障业务的装设备，为了量化分析，该指标取这些装设备配置时的价格总值 (万元)
	航材库存空间 $I_4$	该战役仓库用来储存航材的最大库存空间 ( $\text{km}^3$ )
输出指标	仓库容量 $O_1$	该战役仓库用于储存航材的库房所能存放航材的最大数量 (千件)
	吞吐量 $O_2$	该战役仓库在该年度内收发航材的总数 (千件)
	供给率 $O_3$	发生器材申请后，仓库在规定时间内将器材按要求供应到位的百分比

第  $j$  个战役仓库的第  $i(i=1,2,\dots,m)$  种输入指标的输入量;  $Y_j$  表示第  $j$  个战役仓库的第  $r(r=1,2,\dots,s)$  种输出指标的输量;  $V_j = (v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{mj})^T$  为第  $j$  个战役仓库的输入指标对应的权向量,  $v_{ij}$  为第  $j$  个战役仓库的第  $i$  种输入的权;  $U_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{sj})^T$  为第  $j$  个战役仓库的输出指标对应的权向量,  $u_{rj}$  为第  $j$  个战役仓库的第  $r$  种输出的权。各战役仓库  $D_j$  对应的效率评估指标  $g_j$  即为:

$$g_j = \frac{U^T Y_j}{V^T X_j} \quad j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

以某一战役仓库的效率值  $g_{j0}$  为目标, 全部战役仓库的效率值  $g_j$  为约束, 求该战役仓库效率评估指数  $g_{j0}$  的最大值, 建立如下标准 DEA-C<sup>2</sup>R 模型<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \max g_{j0} = \frac{\sum_{r=1}^s u_{rj} y_{ij0}}{\sum_{i=1}^m v_{ij} x_{ij0}} \\ \frac{\sum_{r=1}^s u_{rj} y_{ij}}{\sum_{i=1}^m v_{ij} x_{ij}} \leq 1 \\ u_{rj} \geq 0, v_{ij} \geq 0 \quad j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (2)$$

根据线性规划对偶理论并引入松弛变量  $s^+$  和  $s^-$ , 将式 (2) 转换为等式约束:

$$\begin{cases} \min \theta_j \\ \sum_{j=1}^m \lambda_j X_j + s^+ = \theta_j X_0 \\ \sum_{j=1}^m \lambda_j Y_j - s^- = Y_0 \\ \lambda_j \geq 0, \theta \geq 0, s^+ \geq 0, s^- \geq 0 \end{cases} \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

式中:  $\theta_j$  为第  $j$  个战役仓库的相对效率指数;  $\lambda_j$  为相对于第  $j$  个战役仓库的输入输出组合系数。对式 (3) 求得最优解  $\theta$ , 若  $\theta < 1$ , 说明此战役仓库非 DEA 有效;  $\theta=1$  且  $s^+ \neq 0$  或者  $s^- \neq 0$ , 说明此战役仓库为 DEA 弱有效;  $\theta=1$  且  $s^+ = 0$  且  $s^- = 0$ , 说明此战役仓库为 DEA 有效。

### 2.2 DEA 交叉效率模型

传统 DEA 模型在进行效能评估时经常会产生多个有效决策单元, 导致无法对全部决策单元实现彻底排序。在传统 DEA 与超效率 DEA 模型中, 各个决策单元会找出最利于自身的权重组合, 而这可能使得个别指标的系数权重过高而抑制其他指标的表达, 造成部分权重极端化, 使得评估失去公正性。交叉效率模型<sup>[12]</sup>旨在通过互评体系来降低传统 DEA 模型以自评为主带来的问题, 该模型中所有决策单元均会参与

评估与自评, 各决策单元的相对效率值同时取决于自己和其余决策单元的最优权重, 从而避免了权重系数极端化的情况出现, 并且也能像超效率 DEA 模型一样对所有决策单元进行完全排序。交叉效率评估的具体原理: 把 DEA-C<sup>2</sup>R 模型中式 (2) 计算得到的最优权重解记作  $(u_{ij}^*, v_{rj}^*)$ , 同理, 对于  $D_k (k=1,2,\dots,n)$  也有最优权重解  $(u_{ik}^*, v_{rk}^*)$ 。相应地, 定义  $D_k$  利用  $D_j$  的最优权重计算得出交叉效率值  $\theta_{jk}$  为:

$$\theta_{jk} = \frac{\sum_{r=1}^s u_{rj}^* y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_{ij}^* x_{ik}} \quad j=1,2,\dots,n; \quad k=1,2,\dots,n \quad (4)$$

对所有决策单元根据式 (4) 计算, 结果见表 2。

表 2 交叉效率值  
Tab.2 Cross-Efficiency value

评价决策单元 $D_j$	被评价决策单元 $D_k$			
	1	2	...	$n$
1	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$	...	$\theta_{1n}$
2	$\theta_{21}$	$\theta_{22}$	...	$\theta_{2n}$
...	...	...	...	...
$n$	$\theta_{n1}$	$\theta_{n2}$	...	$\theta_{nn}$

在表 2 中, 第  $j$  行即为  $D_j$  对其他战役仓库的评价效率值, 其数值越大表明  $D_j$  的效率值越低; 第  $k$  列即为其他战役仓库对  $D_k$  的评价效率值, 其数值越大表明  $D_k$  的效率值越高。对于  $D_k$  最终的交叉效率值  $\delta_k$ , 许多文献直接取第  $k$  个决策单元  $D_k$  利用所有决策单元的最优权重所得的  $\theta_{jk} (k=1,2,\dots,n)$  的算术平均值, 即:

$$\delta_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_{jk} \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

这种算法存在着不容忽视的问题, 即单纯地取算术平均数会忽略决策单元之间的关联性, 会使得权重信息和交叉效率值的联系无法表达出来, 并且这样得出的平均效率值并非帕累托效率<sup>[13]</sup>, 难以让所有决策单元认可, 因此文中将熵值法引入交叉效率值的计算中来, 以期解决上述问题。

### 2.3 应用熵值法计算综合交叉效率值

熵值法<sup>[14-15]</sup>基于各指标所包含的信息来判断指标间的离散程度, 进而确定权重, 信息熵越小说明离散程度越大, 该指标对评估的影响就越明显, 相应的权重也就越大, 反之则相反。该方法具有不受人员主观因素的影响、结果完全由数据决定且易于计算等优点, 因此, 可以利用熵值法对所得交叉效率矩阵进行处理, 加强交叉效率值自身所含信息在权重确定过程

中的表达。熵值法的计算步骤如下所述。

1) 以表 2 中的交叉效率值  $\theta_{jk}$  为元素构造交叉效率矩阵  $E$ ，将  $E$  转置得到  $E^T$ ：

$$E = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \cdots & \theta_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \theta_{n1} & \cdots & \theta_{nn} \end{bmatrix}, E^T = \begin{bmatrix} \theta_{11}^T & \cdots & \theta_{n1}^T \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \theta_{n1}^T & \cdots & \theta_{nn}^T \end{bmatrix}$$

2) 将  $E^T$  作最大最小归一化处理，得到熵值判断矩阵  $R$ ：

$$\alpha_{jk} = \frac{\theta_{jk}^T - \min\{\theta_{1k}^T, \theta_{2k}^T, \dots, \theta_{nk}^T\}}{\max\{\theta_{1k}^T, \theta_{2k}^T, \dots, \theta_{nk}^T\} - \min\{\theta_{1k}^T, \theta_{2k}^T, \dots, \theta_{nk}^T\}} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{n1} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \alpha_{1n} & \cdots & \alpha_{nn} \end{bmatrix}$$

3) 通过计算信息熵判定各个交叉效率值的重要度，根据熵的定义，第  $k$  ( $k=1,2,\dots,n$ ) 个决策单元的熵：

$$H_k = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{j=1}^n f_{jk} \ln f_{jk} \right)$$

$$f_{jk} = \frac{\alpha_{jk}}{\sum_{j=1}^n \alpha_{jk}} \quad (7)$$

4) 利用熵值计算  $D_k$  的交叉效率值的熵权  $\lambda_k$ ：

$$\lambda_k = \frac{1 - H_k}{n - \sum_{k=1}^n H_k} \quad (8)$$

5) 最后计算综合交叉效率值，第  $j$  个决策单元即第  $j$  个战役仓库最终的综合效率值  $\delta_j$ ：

$$\delta_j = \sum_{k=1}^n \lambda_k \theta_{jk}^T \quad (9)$$

### 3 实证分析

#### 3.1 数据来源

文中所建模型针对空军战役仓库，模型的决策单元为任务属性相同的部分空军战役仓库。通过实地调研及向相关部门收集资料，获取到参与检验评比的 15 个战役仓库 2020 年度的航材保障数据，将所得数据按第 1 节确定的评估指标表处理，得到表 3。

#### 3.2 数据分析

分别采用 DEA-C<sup>2</sup>R 模型、传统 DEA 交叉效率模型和文中所提模型处理表 3 数据，各模型的计算结果均通过 Matlab R2019b 软件得出，具体结果见表 4。

从评估结果来看 15 号与 9 号战役仓库的综合效率值最高，经上级机关考证后证实与实际情况相符，这 2 个仓库负责保障的区域近几年来一直属于热点地区，战训任务多、强度大，航材保障人员的专业素质相对突出，能在保障过程中熟练运用信息化手段。综合效率值较低的战役仓库中，5 号战役仓库在库房的利用率上劣势明显，可见其仓库布局还有较大改进

表 3 15 个战役仓库投入产出数据

Tab.3 Input-Output data of 15 battle warehouses

战役仓库 $D_j$	投入指标				输出指标		
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$O_1$	$O_2$	$O_3$
$D_1$	61	225	1652	58	24	12.862	0.94
$D_2$	72	325	2249	88	45	28.652	0.95
$D_3$	50	192	1367	51	19	8.654	0.96
$D_4$	56	260	1865	66	28	12.546	0.94
$D_5$	41	236	1454	42	13	7.635	0.96
$D_6$	57	282	1539	39	15	8.144	0.95
$D_7$	53	246	1463	52	22	12.652	0.96
$D_8$	58	268	1267	48	19	10.787	0.95
$D_9$	54	246	1378	46	20	13.664	0.95
$D_{10}$	80	330	1856	63	31	20.367	0.94
$D_{11}$	46	310	1385	55	28	15.526	0.94
$D_{12}$	55	290	1562	42	18	10.356	0.97
$D_{13}$	62	300	2156	85	40	27.562	0.93
$D_{14}$	48	275	1495	56	25	11.624	0.96
$D_{15}$	67	290	1634	70	37	25.457	0.95

表4 不同模型解算所得结果  
Tab.4 Results obtained by different models

战役仓库 $D_j$	DEA-C <sup>2</sup> R 模型		DEA 交叉效率模型		DEA 交叉效率融合熵值法模型	
	效率值	排名	效率值	排名	效率值	排名
$D_1$	0.966 06	13	0.750 76	10	0.729 34	10
$D_2$	1.000 00	1	0.754 64	9	0.744 98	7
$D_3$	1.000 00	1	0.788 38	5	0.761 82	5
$D_4$	0.959 08	15	0.716 92	14	0.690 76	14
$D_5$	1.000 00	1	0.733 40	13	0.700 42	13
$D_6$	1.000 00	1	0.694 85	16	0.669 29	16
$D_7$	0.980 72	12	0.796 93	4	0.774 50	4
$D_8$	1.000 00	1	0.741 71	12	0.718 08	12
$D_9$	1.000 00	1	0.821 06	2	0.802 19	2
$D_{10}$	0.963 63	14	0.702 01	15	0.690 48	15
$D_{11}$	1.000 00	1	0.811 85	3	0.780 32	3
$D_{12}$	1.000 00	1	0.742 41	11	0.718 09	11
$D_{13}$	1.000 00	1	0.763 08	7	0.754 84	6
$D_{14}$	0.995 26	11	0.772 35	6	0.74059	8
$D_{15}$	1.000 00	1	0.829 34	1	0.822 53	1

空间；4号 和 6号战役仓库较为老旧，部分库房未完成自动化改造，机械化水平不高，所以发付效率不高，致使仓库的吞吐量上不去；10号战役仓库各项资源都相对充裕，但供给率却处于较低水平，因此该仓库需要加强精细化管理，着重提升保障人员的专业能力，提高保障质量。整体来看各战役仓库的综合效率值都还有进步空间，各仓库均可依据评估结果找准各自需要改进的方面，为未来一段时期的优化整改找准方向。

### 3.3 与传统模型的对比分析

据表4和图1可知，由DEA-C<sup>2</sup>R模型得出的评

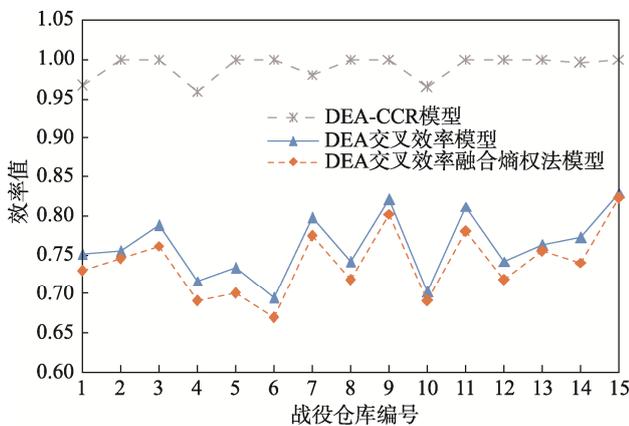


图1 不同模型效率值对比

Fig.1 Comparison of efficiency values of different models

价结果中有多个战役仓库的效率值为1，可见当有多个评价指标或各决策单元之间的差异性较小时，传统DEA模型具有较大的局限性，无法实现全部战役仓库的完全排序；同时，由DEA交叉效率模型和DEA交叉效率融合熵权法模型得出的结果都实现了各决策单元的完全排序，且结果基本一致，可见新模型保留了DEA交叉效率模型的优点。再结合表5的统计学指标可以看出，文中所提新模型得出的结果极差与标准差均要大于传统DEA交叉效率模型，即新模型的评价结果要更加离散，也就是说在新模型下各决策单元之间的差异更显著，即更有利于区分优劣，因此，可以认为文中所提模型具有改良意义。

表5 不同模型解算所得结果的精度比较  
Tab.5 Precision comparison of the results obtained by different models

评价模型	均值	极差	标准差
DEA 交叉效率	0.761 312	0.134 489 7	0.040 380 3
DEA 交叉效率融合熵值法	0.739 882	0.153 242 3	0.042 216 3

## 4 结语

在分析空军战役仓库航材保障特点及影响保障能力的因素的基础上，选取了保障能力评估指标，然后利用熵权法改良DEA交叉效率模型，最后用新模

型用于实证分析,并与未经改良的模型所得的结果进行比较分析,验证了新模型对战役仓库的排序区分度更高,具有更好的实用价值,可为航材保障能力的评估提供科学有效的参考。

#### 参考文献:

- [1] 帅勇, 宋太亮, 王建平, 等. 装备保障能力评估方法综述[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 1—3.  
SHUAI Yong, SONG Tai-liang, WANG Jian-ping, et al. Review of Equipment Support Capability Assessment Methods[J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(3): 1—3.
- [2] CHARNES A, COOPER W, RHODES E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2: 429—444.
- [3] 史成东, 陈菊红, 张雅琪. 物流公司绩效的 DEA 交叉评价[J]. 系统工程, 2010, 28(1): 47—52.  
SHI Cheng-dong, CHEN Ju-hong, ZHANG Ya-qi. Cross-Evaluation of Logistics Company Performance by DEA[J]. Systems Engineering, 2010, 28(1): 47—52.
- [4] ZHU J. Super-Efficiency and DEA Sensitivity Analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2): 443—55.
- [5] WU J, LIANG L, CHEN Y. DEA Game Cross-Efficiency Approach to Olympic Rankings[J]. Omega, 2009, 37: 909—918.
- [6] WANG Y M, CHIN K S, JIANG P. Weight Determination in the Cross-Efficiency Evaluation[J]. Computer and Industrial Engineering, 2011, 61(3): 497—502.
- [7] 王宁, 王鲁玉. 基于改进 DEA 交叉模型的“一流大学”建设高校科研效率评价[J]. 现代教育管理, 2019(2): 75—80.  
WANG Ning, WANG Lu-yu. Research Efficiency Evaluation of "First-Class University" Based on Improved DEA Cross-Efficiency Model[J]. Modern Education Management, 2019(2): 75—80.
- [8] 鲁静, 戴新民. 基于熵权法和 DEA 法的企业标杆选择研究[J]. 大理大学学报, 2019, 4(5): 110—117.  
LU JING, DAI Xin-min. Research on Enterprise Benchmarking Selection Based on Entropy Weight Method and DEA Method[J]. Journal of Dali University, 2019, 4(5): 110—117.
- [9] 何定养, 崔崇立, 郭军, 等. 基于超效率 DEA 的战役仓库航材保障效能评估研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(4): 20—29.  
HE Ding-yang, CUI Chong-li, GUO Jun, et al. Research on Evaluation of Aviation Material Support Efficiency of Battle Warehouse Based on Super Efficiency DEA[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(4): 20—29.
- [10] 何亚群, 史霄霏. 航材保障学[M]. 徐州: 空军勤务学院, 2015: 125—129.  
HE Ya-qun, SHI Xiao-pei. Air Material Support Science[M]. Xuzhou: Air Force Logistics University, 2015: 125—129.
- [11] 高江涛, 李红, 邵金鸣. 基于 DEA 模型的中国粮食产业安全评估[J]. 统计与决策, 2020, 36(23): 61—65.  
GAO Jiang-tao, LI Hong, SHAO Jin-ming. Evaluation of China's Grain Industry Security Based on DEA Model[J]. Statistics and Decision, 2020, 36(23): 61—65.
- [12] SEXTON T R, SILKMAN R H, HOGAN A J. Data Envelopment Analysis: Critique and Extensions[J]. New Directions for Program Evaluation, 1986(32): 73—105.
- [13] 梁樑, 吴杰. 数据包络分析(DEA)的交叉效率研究进展与展望[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(11): 941—947.  
LIANG Liang, WU Jie. Research Progress and Prospect of Cross Efficiency of Data Envelopment Analysis[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(11): 941—947.
- [14] WU J, SUN J S, LIANG L, et al. Determination of Weights for Ultimate Cross Efficiency Using Shannon Entropy[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(5): 5162—5165.
- [15] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2): 12—15.  
ZHU Xi-an, WEI Guo-dong. Excellent Standard of Dimensionless Method in Entropy Method[J]. Statistics and Decision, 2015(2): 12—15.