

# DEA法在农村基础设施适用 建筑材料选择中的应用

李慧民<sup>1,2</sup>, 卢秋萍<sup>1</sup>, 薛建华<sup>1</sup>, 马 昕<sup>3</sup>, 孙婉琪<sup>4</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055;  
3. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

**摘 要:**通过综合分析农村基础设施建设材料性能的评价指标,提出综合评价指标体系,引用 DEA 模型对农村基础设施建设材料指标中经济性的投入、技术性输出和环境性能的量化问题进行有效性评价,选出最优的农村基础设施建设材料,提高农村基础设施的整体质量;另外,将该模型用于四种具有代表性的农村基础设施建设材料的实例评价。结论证明 DEA 法在农村基础设施建设材料择优研究中具有可行性。

**关键词:**农村基础设施;建设材料;数据包络分析(DEA);DEA 有效性

**中图分类号:**TU 50

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7930(2013)05-0647-05

针对传统建筑材料易造成环境污染、新型建筑材料成本高等问题,如何准确地选择技术适用、经济合理、环保节能的建筑材料成为农村基础设施建设者面临的新问题<sup>[1-4]</sup>。农村基础设施适用建筑材料选择属于多目标决策问题,需要综合考虑农村基础设施建设材料选择的原则及其影响因素。目前国内外已有学者提出农村基础设施建设适用建筑材料的评价方法和评价体系,大部分评价方法侧重于对农村基础设施建设经济性、技术与经济结合或单一的环境影响方面情况的评价<sup>[3-4]</sup>,缺少对农村基础设施建设使用建筑材料评价中综合考虑经济、技术、节能环保的研究。

为解决此问题,建立农村基础设施建设材料择优评价指标体系,并引进数据包络分析模型,将经济性作为输入性指标,技术性和环保性作为输出性指标,并利用该模型对四种农村基础设施建设常见的建筑材料进行的评价。

## 1 数据包络分析

### 1.1 数据包络分析的概念及工作流程

数据包络分析(Data Envelopment Analysis 简称 DEA)<sup>[4-6]</sup>,是由美国著名的运筹学家 A. Charnes 和 W. W. Cooper 等人提出并相继深入研究发展起来的一种以相对效率概念为基础的多投入多产出分析方法,这种方法主要利用线性规划模型评价相同类型的评价单元的有效性。它是运筹学、管理科学和数理经济学交叉研究的一个新领域,目前已成为成本收益利润问题、资源配置、金融投资、非生产性等各个领域一种常用而且重要的分析工具和研究手段。

DEA 法作为一种非参数统计方法,其基本思路是令具有多投入和多产出的被评价单元为决策单元,称为 DMU(Decision Making Units),所有的决策单元 DMU 组成一个评价群体,然后再对决策单元的投入产出比的相对有效性作综合分析判断<sup>[6]</sup>,其本质即是分析判断 DMU 偏离有效生产前沿面的程度,此处的生产前沿面可以通过以决策单元的投入和产出的权重为变量,借助数学规划和统计数据的方法进行评价运算得来。

DEA 方法的工作流程如图 1 所示<sup>[6]</sup>。

收稿日期:2012-12-04 修改稿日期:2013-09-10

基金项目:住房和城乡建设部科学技术基金资助项目(2013-R2-18)

作者简介:李慧民(1954-),男,陕西渭南人,教授,博导,主要研究方向为土木工程造价控制技术、建筑项目管理和工程技术经济。

## 2 农村基础设施建设建筑材料评价模型

### 2.1 综合评价指标体系结构

#### 2.1.1 评价指标体系结构

综合考虑农村基础设施建设适用建筑材料的经济性、技术性和环保性,建立相应评价指标体系,如图2所示。该评价指标体系包括三个层次,第一层次是目标层,第二层包含三个主要要素(经济、技术、环境),第三层级包括三个主要准则的影响因素级建立在指标体系的第三层。

#### 2.1.2 评价指标

(1)经济性投入指标  $x$  该指标体系主要包括投入和产出两类评价指标,其中投入指标是经济性指标,产出指标包括技术性和环保性指标。①生产成本  $x_{1i}$  (Production Cost):考虑从原材料获取、运输至生产现场,然后制造材料成品整个过程中产生的费用,由此形成的材料单价,单价与数量的乘积作为出厂总额。②施工成本  $x_{2i}$  (Construction Cost):建筑材料用于农村基础设施施工过程中包括人工、材料、机械费用的综合单价,单价与数量的乘积作为施工总额。③维护成本  $x_{3i}$  (Maintenance Cost):设定大修年限,以大修次数与维修数量的乘积计算。

(2)技术性产出指标  $y$  ①基本性能  $y_{1i}$  (Basic Performance):建筑材料用于农村基础设施所必须具备的最基本、最直接的性能,例如结构性建筑材料的基本性能体现在力学性能上。②耐久性  $y_{2i}$  (Durability):在自然环境的各种影响下和承受长期的荷载作用下,仍能保证正常状态而不会产生破坏的能力,包括抗冻、抗渗、耐腐蚀等。③施工性  $y_{3i}$  (Application Property):在施工过程中,建筑材料能够通过一定的操作工序按要求加工成预期状态的性能,例如混凝土的和易性。

(3)环境性产出指标  $y$  ①原材料可得率  $y_{4i}$  (Availability of Raw Materials):建筑材料获取生产所需原材料的难易程度。②回收利用率  $y_{5i}$  (Recoverability Rate):用以评价建筑材料可再次利用或可再生利用能力的指标。③低碳环保  $y_{6i}$  (Low-Carbon Green):农村基础设施建设材料二氧化碳排放量的倒数。

### 2.2 建筑材料 DEA 有效性的评价模型

#### 2.2.1 DEA 模型的选择

DEA 法包含多种模型,如  $C^2R$ 、 $BC^2$ 、 $C^2GS^2$ 、 $FG$  和  $ST^{[5]}$ ,其中  $C^2R$  模型是用来评价拥有多输入且多输出的决策单元在固定规模收益的假定前提下,规模和技术同时有效理想方法,应用较为广泛。但是,  $C^2R$  模型在决策单元的有效性判别上存在一些缺陷,由此,在一定程度上可以弥补传统的  $C^2R$  模型方法缺陷的 DEA 交叉效率评价模型应运而生。DEA 交叉评价模型是基于每一个决策单元在抬高自己的同时,尽可能地降低其他决策单元为基本思想的对抗交叉评价方法。

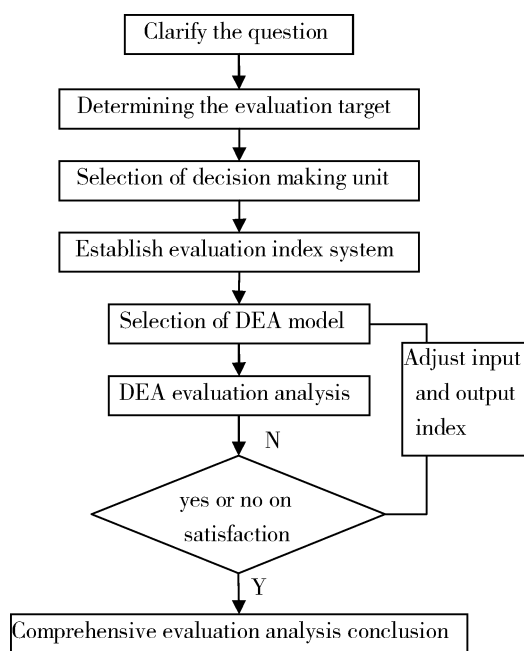


图1 DEA方法工作流程图

Fig. 1 Flowchart for DEA method

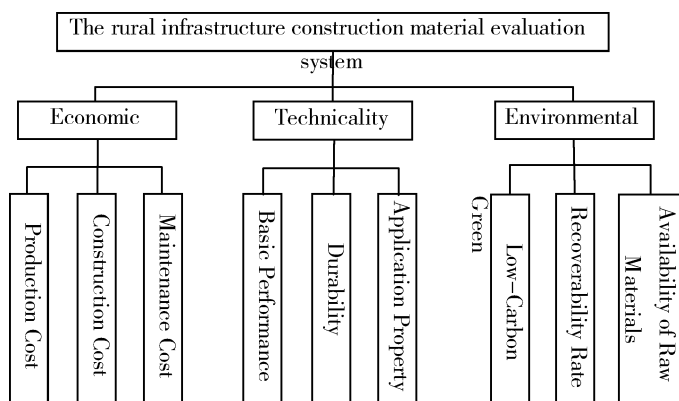


图2 农村基础设施建设适用  
建筑材料综合评价指标体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation index system of applicable  
building material for rural infrastructure

农村基础设施建设适用建筑材料择优系统是一个具有多输入、多输出且量纲不尽相同的复杂的投入产出系统,且并非所有的基础设施可用于选择的建筑材料种类都有很多,利用DEA对抗交叉评价方法能够满足所有的材料均在最合理的规模收益下,获得确定有效的评价值,选取最有效的材料,而当目标种类少时,一定程度上能避免传统DEA模型导致结果无法区分优劣的问题.

### 2.2.2 $C^2R$ 评价模型及对抗交叉模型的建立

以农村基础设施建设材料作为决策单元,一共有  $n$  种农村基础设施建设材料,每种材料都有  $m$  种类型的输入( $X$ )和  $s$  种类型的输出( $Y$ ),定义

$$E_{ii} = u^T y_i / v^T x_i = \sum_{l=1}^s u_l y_{li} / \sum_{t=1}^m v_t x_{ti}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中:  $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{mi})$ ;  $y_i = (y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}, \dots, y_{si})$ .

式中:  $x_{ti}$  第  $i$  个材料对第  $t$  种类型输入的投入总量;  $y_{li}$  第  $i$  个材料对第  $l$  种类型输出的产出总量;  $v_t$  第  $t$  种类型输入的权系数;  $u_l$  第  $l$  种类型输出的权系数.

为农村基础设施建设材料的投入和产出指标,适当选取权重  $u_l$  及  $v_t$ ,使其满足  $E_{jj} \leq 1$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).一般来说,  $E_{ii}$  越大,表明  $DMU_i$  越能用相对少的投入而获得较大的产出.

现在对第  $i$  个农村基础设施建设材料( $DMU_i, 1 \leq i \leq n$ )进行效率评价,以  $u, v$  为权重向量,以所有农村基础设施建设材料的效率指数为约束,构成分式规划模型  $P$ ,即DEA模型<sup>[5-6]</sup>.

$$P \begin{cases} \max & u_i^y / v_i^x \\ \text{s. t.} & u_j^y / v_j^x \leq 1 \\ & v = (v_1, v_2, \dots, v_n) \cdot v > 0 \\ & u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \cdot u > 0 \\ & x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ni}) \\ & y_i = (y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{si}) \\ & x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}) \\ & y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj}) \\ & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

模型( $P$ )是分式规划,根据Charnes-Cooper变换,以化为一个等价的线性规划问题,为此令  $s = 1/v^T x_{j_0}, \omega = sv, \mu = su$ ,则可将  $P$  化为等价的线性规划模型  $P'$ :

$$P' \begin{cases} \max & \mu^T y_i = E_{ii} \\ \text{s. t.} & \omega^T x_j > \mu^T y_j \quad j = 1, 2, \dots, n \\ & \omega^T x_0 = 1, \omega \geq 0 \quad \mu^T \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

记线性规划  $P'$  的最优解为  $\mu^*$  和  $\omega^*$ ,则最优值  $E_{ii} = \mu^{*T} y_i$  为决策单元  $DMU_i$  的效率评价指数,在交叉评价方法中被称为决策单元  $DMU_i$  的自我评价值.在传统的DEA方法评价中,若  $E_{ii} = 1$ ,则  $DMU_i$  为DEA有效,说明  $DMU_i$  内部运作效率高,以最合适的投入量,获得了相对最大的产出量.若  $E_{ii} < 1$ ,则  $DMU_i$  为DEA无效,这说明  $DMU_i$  在现有技术水平下,投入数量太多而产出数量太少,存在某种程度上的资源浪费.

令  $i \in \{1, 2, \dots, n\}, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ,解线性规划  $D$ <sup>[7]</sup>:

$$D \begin{cases} \min & \mu^T y_k \\ \text{s. t.} & \mu^T y_i \leq \omega^T x_i \\ & \mu^T y_i = E_{ii} \omega^T x_i \\ & \omega^T x_k = 1 \\ & 1 \leq i \leq n, \mu \geq 0, \omega \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

根据线性规划  $D$  的最优解  $\mu^*$  和  $\omega^*$ ,计算交叉评价

$$E_{ik} = \frac{\mu_{ik}^T y_k}{\omega_{ik}^T x_k} = \mu_{ik} y_k \quad (5)$$

由计算出的交叉评价值构成交叉评价矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ E_{n1} & E_{n2} & \cdots & E_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

该矩阵中,主对角线上的元素  $E_{ii}$  为决策单元  $DMU_i$  的自我评价值,其余非对角线元素  $E_{ik}$  为交叉评价值.除对角线元素之外的第  $i$  行是  $DMU_i$  对其他决策单元的评价值,其值越小对  $DMU_i$  越有利.

将矩阵  $E$  的各列分别计算平均值,作为评价决策单元  $DMU_i$  优劣的最终指标.

$$e_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_{ik} \quad (7)$$

计算出的平均值  $e_i$  越大,表明  $DMU_j$  越优.

### 3 实例应用

通过对农村基础设施建设材料使用现状的调研发现,目前农村基础设施中常用的建筑材料主要为混凝土、粘土砖等.这些常用建筑材料对环境的影响较大,目前已有许多新型的建筑材料被提出可作为替代选择.

以陕西省安康市平利县某村庄的水塔为例,该村庄主要利用水塔集中供水.水塔外径为 3m,高 20 m 的圆柱形,其基础及承重外墙均采用钢筋混凝土结构,外墙厚度为 370 mm.陕南地区自然资源丰富,水塔的类型也有多种,如混凝土、粘土砖,石材等,鉴于这些常用材料对环境的影响较大,现已有许多新型的材料被提出可作为替代选择,于是本研究确定了混凝土、粘土砖、水泥砖、石材等四种作为备选建筑材料.

根据调研过程中收集的数据资料,结合前述公式,计算得出各项指标的具体数值见表 1.

表 1 农村基础设施建设材料指标值

Tab. 1 Index value of building material for rural infrastructure

Evaluation Index		Concrete	Clay brick	Flyash brick	Stone
Economic Expenditure /Ten thousand yuan	Production cost( $x_{1i}$ )	4.95	2.36	2.45	1.31
	Construction cost( $x_{2i}$ )	11.64	1.46	1.46	1.29
	Maintenance cost( $x_{3i}$ )	0.65	0.86	0.58	0.54
Technicality output	Basic performance( $y_{1i}$ )	3.15	0.51	0.39	5.33
	Durability( $y_{2i}$ )	1.02	0.54	0.54	1.89
	Application property ( $y_{3i}$ )	1.14	1.07	0.71	1.07
Environmental Performance output	Availability of raw materials ( $y_{4i}$ )	0.5	0.75	0.25	0.75
	Recoverability rate( $y_{5i}$ )	0.90	0.30	0.92	0.95
	Low-carbon green( $y_{6i}$ )	1.07	0.70	1.31	1.15

根据公式(1)~(7),将四种建筑材料的指标值代入评价模型,利用 MATLAB 计算,得出交叉评价效率矩阵  $E^{[8]}$ :

$$E = \begin{bmatrix} 0.8851 & 0.6279 & 0.6178 & 1.0000 \\ 0.0739 & 0.8836 & 0.2945 & 0.8488 \\ 0.1025 & 0.3121 & 1.0000 & 0.9429 \\ 0.0598 & 0.0531 & 0.0391 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

其中对角线上的自我评价值为

$$E_{11} = 0.8851; E_{22} = 0.8836; E_{33} = 1.0000; E_{44} = 1.0000$$

上述自我评价值中,取得最大值 1 的有两种材料,这表明有两种建筑材料  $DMU_i$  是相对有效的,而其余建筑材料  $DMU_i$  是非有效的,从而无法用  $E_{ii}$  区别四个决策单元的优劣.于是,再计算四种建筑材料

的平均交叉评价值为:

$$e_1 = 0.280\ 3; e_2 = 0.469\ 2; e_3 = 0.487\ 9; e_4 = 0.985\ 7$$

按  $e_i$  的大小,从大到小的顺序对这四种材料的优劣排序为:

$$DMU_4 > DMU_3 > DMU_2 > DMU_1$$

因此,按照 DEA 交叉评价模型计算的结果显示,石材是最优的水塔材料,而混凝土是最差的选择。

## 4 结 论

本文建立了农村基础设施建设适用建筑材料评价指标体系,并引入 DEA 对抗型交叉评价方法,给出了一种农村基础设施建设材料的量化评价方法。通过实例分析,将材料的经济性投入、技术性、环保性的输出作为指标,进行定量化评价和优化,发现石材、粉煤灰砖等低能耗材料的综合效益优于混凝土、粘土砖等当前常用的建筑材料,且得出结论,在安康平利地区某村庄,同时具备本土化、低成本、低能耗特征的石材是水塔建设的最优建筑材料。

农村基础设施建设材料择优评价的结果表明数据包络分析法可操作性强,能够客观、准确地用于农村基础设施建设材料的择优研究中。此外,数据包络分析无需任何权重假设的特点,相较于其他评价方法显示了其极大的优越性,对建筑材料决策相关的评价理论具有现实意义。

## 参考文献 References

- [1] 赵 平, 同继锋. 绿色建筑对建筑材料的要求[J]. 中国建材科技, 2003(06):1-10.  
ZHAO Ping, TONG Ji-feng. Therequirements of green building to building materials[J]. China Building Materials Science & Technology, 2003(06):1-10.
- [2] 马 昕. 陕西省农村基础设施建设适用技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.  
MA Xin. Appropriate technology researchs on rural infrastructure of Shaanxi province[D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [3] 比尔·劳森. 建筑材料、能源与环境:朝向生态可持续发展[M]. 张明顺,译. 北京:中国环境科学出版社, 2000.  
BILL Lawson, Building material/energy and environment: toward ecological and sustainable development[M]. ZHANG ming-shun, Translation. Beijing: China Environmental Science Press, 2000.
- [4] 刘 军, 翟树栋, 刘 宁, 等. 基于 DEA 的农房适用墙体砌块材料优选分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2012, 28(1): 123-128.  
LIU Jun, ZHAI Shu-dong, LIU Ning, et al. The Optimization analysis of rural housing block wall material based on DEA[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2012, 28(1): 123-128.
- [5] 魏权龄. 数据包络分析[J]. 科学通报, 2000, 45(17): 1793-1808.  
WEI Quan-ling. Data envelopment analysis [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1793-1808.
- [6] 李美娟, 陈国宏. 数据包络分析法(DEA)的研究与应用[J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 88-94.  
LI Mei-juan, CHEN Guo-hong. A review on the research and application of DEA[J]. Engineering Science, 2003, 5(6): 88-94.
- [7] 张沈生, 王小云, 高 鸣. 基于 DEA 对抗型交叉评价法的供暖设备综合效益评价[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2009, 25(6): 1161-1167.  
ZHANG Shen-sheng, WANG Xiao-yun, GAO Ming. An evaluation and research on comprehensive benefits of heating equipment based on DEA confrontational cross-evaluation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(6): 1161-1167.
- [8] 彭育威, 吴守宪, 徐小湛. 利用 Matlab 进行 DEA 交叉评价分析[J]. 西南民族大学:自然科学版, 2004, 30(4): 553-556.  
PENG Yu-wei, WU Shou-xian, XU Xiao-zhan. DEA cross-evaluation analysis with MATLAB[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2004, 30(4): 553-556.
- [9] 陈大鹏, 任 辉, 刘小红, 等. DEA 方法在工业厂址选择中的应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2012, 44(3): 364-368.  
CHEN Da-peng, REN Hui, LIU Xiao-hong, et al. Application of DEA in industrial enterprise site selection[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2012, 44(3): 364-368.

(下转第 667 页)

- [5] 张常光,张庆贺,赵均海. 非饱和土抗剪强度及土压力统一解[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1871-1876.  
ZHANG Chang-guang, ZHANG Qing-he, ZHAO Jun-hai. Unified solutions of shear strength and earth pressure for unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1871-1876.
- [6] DRUMRINGHT E E, NELSON J D. The shear strength of unsaturated tailings sand[C]// Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils Paris: 1995(1): 45-50.
- [7] ROHM S A, VILAR O M. Shear strength of an unsaturated sandy soil[C]// Proceedings of the 1st international conference on unsaturated soils. Paris: 1995(1): 189-193.
- [8] 冯志焱,邱本胜,谢定义. 黄土的三轴试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(6): 803-808.  
FENG Zhi-yan, QIU Ben-sheng, XIE Ding-yi. Experimental study of triaxial test of loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. : Natural Science Edition, 2010, 42(6): 803-808.

## Relation of suction strength with water content and dry density of unsaturated loess

LI Yan-long, SU Li-jun, WANG Tie-hang, WANG Juan-juan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Suction strength is defined as the contribution of suction to shear strength, which is also the core variable of unsaturated soil. The effective shear strength index of soil remains unchanged in both circumstances of saturated and unsaturated loess. Based on this conclusion, suction strength of unsaturated soil can be studied by conventional triaxial test. Triaxial test results show that the relation of suction strength and moisture content is of the linear type in, negative correlation. The relation of suction strength and dry density is linear that is positively correlated. A function about suction strength is established which includes dry density and moisture content. Distribution of suction strength acts like a plane in water content, dry density and suction strength space. Formulas about shear strength and suction strength of unsaturated loess including the impact of water content and dry density are also established, to serve as reference for engineering.

**Key words:** unsaturated loess; suction strength; water content; dry density; triaxial test

**Biography:** LI Yan-long, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-15809298289, E-mail: liyanlong1229@163.com

(上接第 651 页)

## Application of DEA method in the selection of building materials applicable for rural infrastructure

LI Hui-ming<sup>1,2</sup>, LU Qiu-ping<sup>1</sup>, XUE Jian-hua<sup>1</sup>, MA Xin<sup>3</sup>, SUN Wan-qi<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Architectural Engineering College of Chang'an University, Xi'an 710054, China;

4. Baoji petroleum steel pipe co., LTD, Baoji 721008, China)

**Abstract:** Through comprehensive analysis of performance evaluation index of rural infrastructure construction materials, this paper puts forward a comprehensive evaluation system, the DEA model, in evaluating the economy input, technology output and environmental protection set output of rural infrastructure construction material, so as to choose the best rural infrastructure construction materials, and improve the overall quality of rural infrastructure. In addition, the model is used for the evaluation of four kinds of typical rural infrastructure construction material. The conclusion proves that the data envelopment analysis(DEA) method is feasible in the research of the rural infrastructure construction material optimization.

**Key words:** rural infrastructure; construction material; data envelopment analysis (DEA); DEA validity

**Biography:** LI Hui-min, Professor, Xi'an 710055, P. R. China., Tel: 0086-013909180668, E-mail: Li\_Huimin2005@126.com