# 绿色施工条件下铁路弃渣场的综合效益分析

郑雨茜，鲍学英

（兰州交通大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730070）

**摘　要**：[目的] 研究铁路弃渣场施工“资源效率—环境效率—经济效率”的“三位一体动态施工综合效益率”，为“四节一环保”应用于铁道弃渣场施工带来的水土保持及长远效益提供依据。[方法] 基于绿色施工理念和最大化水土保持带来的多维效益，以传统 Malmquist 模型为基础，以弃渣场施工为研究主体，引入施工所致的非期望产出，充分考虑资源的投入利用率以及动态投入的长远效应，构建铁路弃渣场施工 Malmquist 模型(QMPI)。[结果] QMPI 模型充分解释了铁路弃渣场“资源效率—环境效率—经济效率”三位一体的动态施工综合效益。基于 DEA-SOLVER PRO 软件平台进行了 QMPI 施工全要素生产率及其分解效率的测算，得出了各要素的冗余率。[结论] 施工综合效益率与资效效率(REC)和环效效率(EEC)呈整体正相关，即绿色施工会促进施工综合效益率。同时，提升“四节”会促进“一环保”，从而共同作用提高施工效益。

**关键词**：综合效益率；绿色施工；非期望产出；铁路弃渣场；Malmquist 模型；极差最大化赋权法；冗余率

**文献标识码**：B　　**文章编号**：1000-288X(2019)01-0125-07　　**中图分类号**：U215.2，TB114

**文献参数**：郑雨茜，鲍学英. 绿色施工条件下铁路弃渣场的综合效益分析[J]. 水土保持通报，2019，39(1)：125-131. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.020；Zheng Yuqian，Bao Xueying. Analysis of comprehensive benefits of railway dregs field under condition of green construction[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(1)：125-131.

# Analysis of Comprehensive Benefits of Railway Dreg Field Under Condition of Green Construction

Zheng Yuqian，Bao Xueying

(*School of Civil Engineering*，*Lanzhou Jiaotong University*，*Lanzhou*，*Gansu* 730070，*China*)

**Abstract**：[Objective] To study the trinity dynamic construction comprehensive efficiency rate of “resource efficiency-environment efficiency-economic efficiency” in the construction of railway dregs field，in order to provide the basis for the study of soil and water conservation and long-term benefit brought by the application of “four sections and one environmental protection” in the construction of railway dregs field. [Methods] The green construction concept and the multidimensional benefits of soil and water conservation was considered. The traditional Malmquist model was employed as a foundation. The construction of dregs field was taken as the research subject，the Malmquist model (QMPI) for construction of railway dregs field was established by introducing the unexpected production caused by construction，with the fully consideration of the utilization of resources and the long-term effects of dynamic investment. [Results] QMPI fully explained the dynamic construction comprehensive benefits of the “resource efficiency-environmental efficiency-economic efficiency” of the railway dregs field. The construction total factor productivity and decomposition efficiency of QMPI were calculated based on the DEA-SOLVER PRO software platform. Meanwhile，the redundancy rate of

**收稿日期**：2018-08-05　　**修回日期**：2018-09-12

**资助项目**：国家自然科学基金项目“西北寒冷地区铁路绿色施工措施及效果评价研究”(51768034)

**第一作者**：郑雨茜(1994—)，女(汉族)，重庆市人，硕士研究生，研究方向为绿色施工。E-mail：908175235@qq.com。

**通讯作者**：鲍学英(1974—)，女(汉族)，宁夏回族自治区中卫市人，博士，教授，从事建设项目管理及经济评价工作。E-mail：813257032@qq.com。

each element was analyzed. [Conclusion] The construction comprehensive efficiency rate is positively correlated with resource efficiency change (REC) and environment efficiency change (EEC), that is, green construction will promote the comprehensive benefit rate of construction. At the same time, the promotion of the "four savings" will promote "one environmental protection" and thus work together for higher construction benefits.

**Keywords: comprehensive benefit rate of construction; green construction; unintended production; railway dregs field; Malmquist model; maximal portfolio weighting method; redundancy rate**

铁路工程常有弃渣量大、渣堆松散等特点,铁路弃渣场暴露的工作面是水土流失的主要发生源,如若弃渣场的布设和施工不当,极易诱发滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害,造成项目区和下游生态环境的损坏,破坏自然和谐、危害人体安全及健康,而且不利于项目的发展和经济循环。因此,做好弃渣场的水土保持是利项目之根本。

前人对铁道弃渣场的研究有弃渣场的选址布设、运输规划、水土保持、效益比选等。石杨子[1],朱艳玲[2]认为弃渣场应减少农田耕地的占用,选址应避开生态敏感区;王明慧等[3]认为弃渣场应注重防护工程,避免自然灾害的发生;还有大多数学者认为弃渣场的主要选址应考虑山沟和山脚,且回填弃渣场一举多得,是优选措施[4]。总结前人研究可以发现,学者们虽然认为弃渣场是水土保持的根本,但并没有对弃渣场的绿色施工进行系统的研究。基于文献综述,本文认为节约资源、保护环境是弃渣场研究的大势所趋,也是工程单位在弃渣场施工时的效益目标。

综上所述,本文拟在绿色施工理念下,基于传统经济学中的 MPI 模型,引入施工带来的非期望产出,建立铁路弃渣场施工 Malmquist 模型,应用 DEA-SOLVER PRO 软件和极差最大化组合赋权法进行求解,并对各个研究对象的综合效益率进行一一分析[5-13],以期为研究"四节一环保"应用于铁道弃渣场施工带来的水土保持及长远效益提供依据。

# 1 弃渣场施工 Malmquist 模型

## 1.1 弃渣场施工 Malmquist 概念模型

为便于后文叙述,首先给出文中所用到的一些术语缩写及意义(表 1)。

参考经济学的传统 Malmquist 模型,本文基于绿色施工理念,从资源效应角度出发,同时考虑环境负产出要素和动态要素,建立"资源效率—环境效率—经济效率"三位一体的动态弃渣场施工 Malmquist 模型(QMPI),其概念模型如图 1 所示。

模型基于弃渣场工程的施工投入、产出要素之间的影响,及要素本身的跨期动态效应,即可得出铁路弃渣场施工的全要素生产率(QTFP),即是考虑了环境、安全、资源、经济及社会的弃渣场施工综合效益率。

**表 1 术语缩写及意义**

| 术语缩写 | 术语意义 |
|---|---|
| (Q)MPI | (弃渣场施工)Malmquist 模型 |
| (Q)TFP | (弃渣场施工)全要素生产率 |
| ECTE(C) | 资效技术效率(改变)指数 |
| RE(C) | 资效效率(改变)指数 |
| EE(C) | 环效效率(改变)指数 |
| SE(C) | 规模效率(改变)指数 |
| PT(C) | 纯技术效率(改变)指数 |
| DTP(C) | 动态技术(进步)指数 |
| DP(C) | 动态(改变)指数 |
| TP(C) | 技术(改变)指数 |

注:表中(Q)MPI 表达了 2 个意思:QMPI 表示弃渣场施工 Malmquist 模型;MPI 表示 Malmquist 模型;其他术语表达的意思类推。

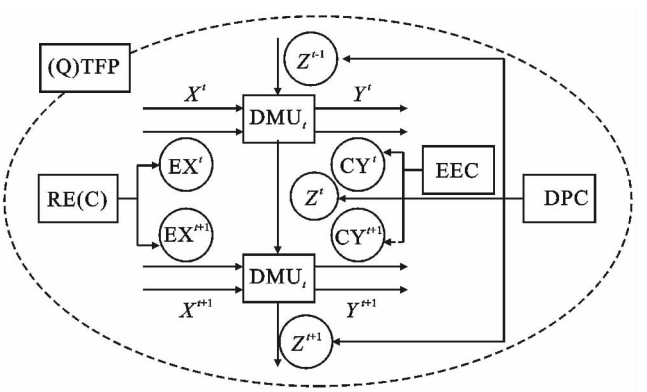



**图 1 弃渣场施工 Malmquist 概念模型**

宏观上讲,QMPI 是从可持续发展角度进行弃渣场施工的综合效益评析,不仅考虑资效动态要素的跨期效应,还考虑环境负产出的影响。此外,整个评估过程基于无导向非径向的 SBM 模型,即允许各种要素同时且非比例变化[14]。

模型假设共 $T$ 期 $n$ 个决策单元(DMU),每个

DMU 由 $X$ 个投入要素生产得出 $Y$ 个产出要素,其中 $EX^t$ 为资源投入要素,CY 为非期望产出要素,$Z$ 为动态要素(即第 $t$ 期的产出作为第 $t+1$ 期的投入)。

基于弃渣场施工 Malmquist 概念模型,本文利用距离函数的思想对 QMPI 进行分解[15],分解效率指数之间的关系如图 2。

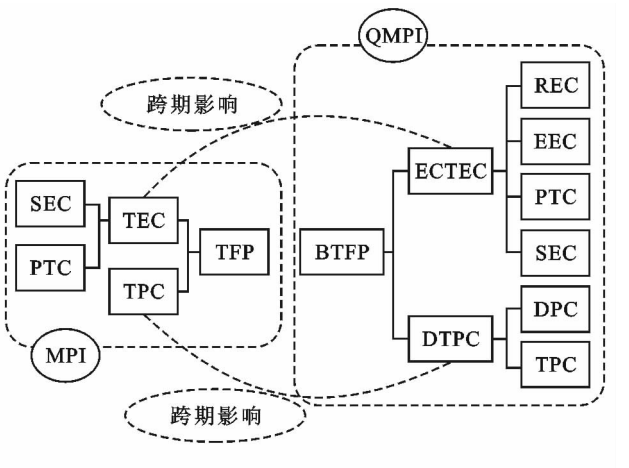



**图 2　弃渣场施工 Malmquist 概念模型分解**

### 1.2　弃渣场施工 Malmquist 模型及模型分解

(1) QMPI 模型分解效率指数。

本文利用距离函数对第 $t$ 期到第 $t+1$ 期的弃渣场施工 Malmquist 模型定义如式(1)。

$$\begin{aligned}&\overline{M}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1},x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)\\&=\left[\left(\frac{\overline{D}_t(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_t(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}\right)\left(\frac{\overline{D}_{t+1}(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_{t+1}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}\right)\right]^{1/2}\\&=\underbrace{\frac{\overline{D}_t(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_{t+1}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}}_{a}\times\underbrace{\left[\left(\frac{\overline{D}_{t+1}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}{\overline{D}_t(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_e^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}\right)\left(\frac{\overline{D}_{t+1}(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_t(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}\right)\right]^{1/2}}_{b}\end{aligned}\tag{1}$$

式中:$x$——投入要素,$y$——产出要素,$z$——动态要素。$X_e$——资效投入要素,$y_c$——环境负产出要素。式(1)中 $a$ 部分表示 QMPI 的资效技术效率改变指数(ECTEC),$b$ 部分表示动态技术进步指数(DTPC)。再由距离函数可对其进行式(2—3)的分解。

$$\begin{aligned}\mathrm{ECTEC}&=\frac{\mathrm{ECTE}_{t+1}}{\mathrm{ECTE}_t}\\&=\frac{\overline{D}_t(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_{t+1}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}\end{aligned}\tag{2}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{DTPC}&=[\mathrm{DTP}^{t+1}\times\mathrm{DTP}^t]^{1/2}\\&=\left[\left(\frac{\overline{D}_{t+1}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}{\overline{D}_t(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1})}\right)\right.\\&\left.\times\left(\frac{\overline{D}_{t+1}(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}{\overline{D}_t(x_e^t,x^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\end{aligned}\tag{3}$$

从概念模型的角度,结合前人的研究,式(2)表示:ECTEC 可以分解为环境和资效的独立影响;式(3)表示:DTPC 是跨期动态技术效应指数的几何平均值。由此可以得到 QMPI 分解效率指数如式(4):

$$\begin{aligned}\overline{M}=\mathrm{ECTEC}\cdot\mathrm{DTPC}=&\mathrm{REC}(x_e^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1},x_e^t,z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)\\&\times\mathrm{EEC}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},z^{t+1},x_e^t,x^{t+1},z^{t-1},y_c^t,z^t)\\&\times\mathrm{SEC}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1},x_e^t,x^{t+1},z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)\\&\times\mathrm{PTC}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1},x_e^t,x^{t+1},z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)\\&\times\mathrm{DPC}(x_e^{t+1},x^{t+1},z^t,y_c^{t+1},y^{t+1},z^{t+1},x_e^t,x^{t+1},z^{t-1},y_c^t,y^t,z^t)\\&\times\mathrm{TPC}(x_e^{t+1},x^{t+1},y_c^{t+1},y^{t+1},x_e^t,x^{t+1},y_c^t,y^t)\end{aligned}\tag{4}$$

(2) QMPI 模型分解。基于模型 UOM 和模型 SBM,首先将相邻两期的 QMPI 分解为以下 4 个距离函数:$\overline{D}_t(x^{t+1},z^t,y^{dt+1},y^{ut+1},z^{t+1})$,$\overline{D}_{t+1}(x^{t+1},z^t,y^{dt+1},y^{ut+1},z^{t+1})$,$\overline{D}_t(x^t,z^{t-1},y^{dt},y^{ut},z^t)$,$\overline{D}_{t+1}(x^t,z^{t-1},y^{dt},y^{ut},z^t)$。假设每期有 $n$ 个 DMUs($j=1,\cdots,n$),共 $T$ 期,则第 $t$ 期决策单元 $j$ 的纯技术效率为:

$$\rho_v^*=\min\frac{1-\left(\frac{1}{m+r}\right)\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{s_{it}^-}{x_{iot}}+\sum_{i=1}^{r}\frac{s_{ilt-1}^-}{z_{iot-1}}\right)}{1+\left(\frac{1}{s+p+r}\right)\left(\sum_{i=1}^{s}\frac{s_{idt}^+}{y_{idot}}+\sum_{i=1}^{p}\frac{s_{iut}^-}{y_{iuot}}+\sum_{i=1}^{r}\frac{s_{ilt}^+}{z_{iot}}\right)}\tag{5}$$

$s.t.$

$$x_{iot}=\sum_{j=1}^{n}x_{ijt}\theta+s_{it}^-\quad(i==1,2,\cdots,m)$$

$$z_{iot-1}=\sum_{j=1}^{n}z_{ijt-1}\theta+s_{ilt-1}^-\quad(i=1,2,\cdots,r)$$

$$y_{idot}=\sum_{j=1}^{n}y_{idit}\theta-s_{idt}^+\quad(i=1,2,\cdots,s)$$

$$y_{iuot}=\sum_{j=1}^{n}y_{iujt}\theta+s_{iut}^-\quad(i=1,2,\cdots,p)$$

$$z_{iot}=\sum_{j=1}^{n}z_{ijt}\theta-s_{it}^+\quad(1,2,\cdots,r)$$

$$\sum_{j=1}^{n}z_{ijt-1}\theta=\sum_{j}^{n}z_{iut}\theta(\forall i)$$

$$\begin{aligned}&(\textstyle\sum\theta=1\quad\theta\geqslant0;\ \forall t=1,2,\cdots,T;\\&s_{it}^-\geqslant0,s_{idt}^+\geqslant0,s_{iut}^-\geqslant0,s_{ilt-1}^-\geqslant0,s_{ilt}^+\geqslant0)\end{aligned}\tag{6}$$

式中:$\rho_v^*$——纯技术效率;$m$——投入要素个数;$r$——动态要素个数;$s$——期望产出要素个数;$p$——非期望产出要素个数;$x_{ijt}$——第 $t$ 期决策单元

$DMU_j$ 的投入要素；$y_{idjt}$——第 $t$ 期决策单元 $DMU_j$ 的期望产出要素；$y_{iujt}$——第 $t$ 期决策单元 $DMU_j$ 的非期望产出要素；$z_{ijt}$——第 $t$ 期决策单元 $DMU_j$ 的动态要素；$s_{it}^-$——投入冗余；$s_{ilt-1}^-$——动态冗余；$s_{idt}^+$——期望产出或缺；$s_{iut}^-$——不期望产出冗余；$s_{ilt}^+$——动态获缺；$\theta$——各要素的权重，本文将采用极差最大化组合赋权法进行求解。

这里得出的 $\rho_v^*$ 表示规模可变的情况，若是规模不变的情况 $\rho_c^*$，将约束条件 $\sum\theta_j=1$ 略去即可；在不考虑资耗因素时，用 $\rho_v^{**}$ 和 $\rho_c^{**}$ 分别进行表示。最后，根据式(7—8)即可得出全要素生产率(QTFP)。

$$ECTE=\rho_c^*,PT=\rho_v^*,SE=\rho_c^*/\rho_v^*,$$
$$EE=\rho_v^*/\rho_v^{**},CE=\rho_v^{**}/\rho_v^* \quad (7)$$

$$BTF_p=REC\cdot EEC\cdot SEC\cdot PTC\cdot DPC\cdot TPC$$
$$=(EE_{t+1}/EE_t)(CE_{t+1}/CE_t)(SE_{t+1}/SE_t)$$
$$(PT_{t+1}/PT_t)\cdot DPC\cdot TPC \quad (8)$$

式中：TPC——投入、产出要素质量的进步(倒退)；DPC——动态要素带来的跨期影响。均可通过实测数据经计算得出。

## 2 各要素变量权重求解

### 2.1 要素变量选取

查阅路线工程弃渣场施工方案(主要有地基处理，支挡防护，排水，渣土堆放四大块)和相关研究文献，基于绿色施工“四节一环保”的施工理念，首先选出与弃渣场施工相关的 103 个变量指标，再从施工单位、兰州铁路局、科研单位邀请 11 位高级职称及以上的该领域专家对指标进行筛选，并在筛选出的 23 个指标中，针对数据统计比较困难的指标按照弃渣场的现场施工情况，结合专家打分表进行估值打分。

此外，考虑到本文建立的铁路弃渣场施工 Malmquist 模型中涉及动态要素的投入，据相关研究显示，动态要素一般要求为固定资产，考虑弃渣场施工现场特点，本文选取在弃渣场施工中涉及到的施工机械和临时便道作为动态要素来扩充整个评价指标体系(详见表 2)。

**表 2 QMPI 相关要素变量指标体系**

| 要 素 | 变量指标 | |
|---|---|---|
| 投入 $I$ | 土地/$hm^2$ | $I_1$ |
| | 施工用电/kWh/d | $I_2$ |
| | 施工用水/($L\cdot s^{-1}$) | $I_3$ |
| | 燃油消耗/($t\cdot d^{-1}$) | $I_4$ |
| | 砼消耗/($kg\cdot m^{-3}$) | $I_5$ |
| | 其他材料(分值) | $I_6$ |
| | 机械配置效率/% | $I_7$ |
| | 施工平面布置(分值) | $I_8$ |
| | 劳动力(人/d) | $I_9$ |
| | 绿色施工组织管理(分值) | $I_{10}$ |
| | 绿色施工技术占比/% | $I_{11}$ |
| 期望产出 $E$ | 拦渣率/% | $E_1$ |
| | 水土保持率/% | $E_2$ |
| | 抗灾性能(分值) | $E_3$ |
| | 植保率/% | $E_4$ |
| | 复垦率(分值) | $E_5$ |
| 非期望产出 $U$ | 水污染(分值) | $U_1$ |
| | 土壤侵蚀/% | $U_2$ |
| | 自然灾害(分值) | $U_3$ |
| | 植被破坏/% | $U_4$ |
| | 施工扬尘(分值) | $U_5$ |
| | 噪声振动(分值) | $U_6$ |
| | 固体废弃物(分值) | $U_7$ |
| 动态 $D$ | 施工机械(摊销分值) | $D_1$ |
| | 施工便道(摊销分值) | $D_2$ |

### 2.2 极差最大化组合赋权法

(1) 4 种单一赋权法对指标赋权。本文将采用表 3 中的 4 种单一赋权方法进行各变量指标权重的求解。

**表 3 4 种单一赋权法步骤**

| 单一赋权方法 | 赋权模型构建步骤 |
|---|---|
| $G_1$ 法主观赋权 | ①专家确定指标的顺序，给定相邻两指标 $k_{h-1}$ 和 $k_h$ 间的重要度之比，即 $r_h$；<br>②$j$ 准则层下第 $l$ 个指标的 $G_1$ 法权重 $w_l$ 为：$w_l=(1+\sum_{h=2i=h}^{l}\prod^{l}r_h)^{-1}$<br>③由权重 $w_l$ 得出其余指标的权重为：$w_{h-1}=r_hw_h(h=l,l-1,\cdots,3,2)$ |
| $G_2$ 法主观赋权 | ①专家确定指标的顺序，给出最不重要的唯一一个指标，记为 $k_m$；<br>②请专家给出其余指标 $k_h$ 和 $k_m$ 间的重要度之比，即 $\alpha_h$ 的理性赋值；<br>③$j$ 准则层下第 $h$ 个指标的 $G_2$ 法权重 $w_h$ 为：$w_h=\alpha_h/\sum_{h=1}^{l}\alpha_h$ |
| 均值方差法客观赋权 | 设 $k_{ih}$ 为第 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 个评价对象的第 $h(h=1,2,\cdots,l)$ 个指标规范化处理后的分值，则权重：$w_h=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(k_{ih}-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_{ih})^2/n}\Big/\sum_{h=1}^{l}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(k_{ih}-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_{ih})^2/n}$ |
| 离差最大化法客观赋权 | 假设条件同上，则权重公式为：$w_h=\sum_{i=1h=1}^{n}\sum^{l}|k_{ij}-k_{ih}|/\sum_{j=1i=1k=1}^{g}\sum^{n}\sum^{l}|k_{ij}-k_{ih}|$ |

(2) 极差最大化法确定权重向量。

记第 $t$ 种单一赋权法求得的第 $h$ 个评价指标的权重为 $\beta_h^{(t)}$。

①求第 $i$ 个评价对象的综合评价得分:

$$Z_i=\sum_{h=1}^{l}k_{ih}\beta_h^{(t)} \tag{9}$$

②将 4 种单一赋权法求得的综合评价得分进行组合形成综合得分矩阵 $Z$,标准化处理得 $Z^*$,并求得其协方差矩阵 $H$:

$$H=(Z^*)^TZ^* \tag{10}$$

③根据最大差距拉开评价对象的极差差异原则,得到如下线性规划问题:

$$\begin{cases}\max\ \lambda^TH\lambda\\ s.t.\ \ \lambda^T\lambda=1\end{cases} \tag{11}$$

由前人研究结果[9]可知,上述线性规划问题即式(11)的最优解即为所求的单一赋权值调节向量,记为 $\lambda=(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4)$。由此可以得到最终第 $h$ 个指标的组合权重 $\boldsymbol{\theta_h}$:

$$\boldsymbol{\theta_h}=\lambda_1\beta_h^{(1)}+\lambda_2\beta_h^{(2)}+\lambda_3\beta_h^{(3)}+\lambda_4\beta_h^{(4)} \tag{12}$$

# 3　实例研究

## 3.1　参数及数据处理

首先进行决策单元选取,即弃渣场的选取。本文拟根据铁路绿色施工的研究现状,选取前人已较深入研究的其中 3 条铁路线路,并从每条线路中选取能反映线路特色和绿色施工效果的几个弃渣场作为研究对象,由此组成最终的决策单元组合(表 4)。

**表 4　决策单元组合**

| 铁 路 | 弃渣场编号 |
|---|---|
| 大丽铁路 | 1,2,3 |
| 青藏铁路 | 4,5,6 |
| 京沪铁路 | 7,8,9,10 |

表 5 是变量实测统计数据,将其进行同趋化处理和无量纲化处理后,最后以系数 0～1 的相对效率值的形式来体现。由于篇幅限制,故不给出数据处理后的相对效率值。

**表 5　各要素变量实测数据**

| 弃渣场编号 | 投入 $I$ | | | | | | | | | | | 期望产出 $E$ | | | | | 非期望产出 $U$ | | | | | | | 动态 $D$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ | $I_5$ | $I_6$ | $I_7$ | $I_8$ | $I_9$ | $I_{10}$ | $I_{11}$ | $E_1$ | $E_2$ | $E_3$ | $E_4$ | $E_5$ | $U_1$ | $U_2$ | $U_3$ | $U_4$ | $U_5$ | $U_6$ | $U_7$ | $D_1$ | $D_2$ |
| 1 | 2.31 | 2 864 | 8.03 | 195.63 | 289.32 | 80 | 70 | 85 | 25 | 65 | 60 | 85 | 87 | 87 | 75 | 95 | 80 | 15 | 90 | 12 | 70 | 75 | 70 | 80 | 75 |
| 2 | 3.45 | 2 912 | 7.57 | 208.23 | 276.49 | 82 | 75 | 80 | 30 | 65 | 70 | 87 | 87 | 87 | 77 | 97 | 80 | 15 | 90 | 12 | 73 | 80 | 75 | 85 | 80 |
| 3 | 3.86 | 2 828 | 7.83 | 157.28 | 288.25 | 80 | 75 | 85 | 30 | 60 | 70 | 90 | 90 | 87 | 80 | 95 | 83 | 12 | 85 | 10 | 75 | 80 | 75 | 85 | 80 |
| 4 | 4.77 | 1 987 | 6.89 | 150.71 | 258.43 | 88 | 85 | 75 | 35 | 85 | 80 | 90 | 90 | 90 | 85 | 99 | 85 | 10 | 90 | 10 | 85 | 85 | 85 | 80 | 80 |
| 5 | 3.52 | 2 019 | 7.46 | 254.30 | 234.22 | 90 | 80 | 75 | 30 | 80 | 83 | 85 | 90 | 90 | 85 | 97 | 78 | 10 | 90 | 10 | 80 | 85 | 85 | 85 | 85 |
| 6 | 5.13 | 2 383 | 7.02 | 193.23 | 249.67 | 85 | 85 | 70 | 40 | 85 | 80 | 87 | 85 | 90 | 80 | 97 | 80 | 15 | 90 | 12 | 88 | 80 | 85 | 90 | 75 |
| 7 | 2.39 | 2 786 | 7.33 | 178.43 | 293.77 | 85 | 85 | 80 | 20 | 90 | 85 | 90 | 85 | 90 | 85 | 97 | 80 | 15 | 90 | 12 | 80 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| 8 | 4.33 | 2 097 | 6.55 | 193.25 | 219.49 | 85 | 90 | 80 | 30 | 85 | 90 | 90 | 87 | 90 | 83 | 97 | 83 | 12 | 90 | 10 | 90 | 75 | 90 | 80 | 80 |
| 9 | 2.14 | 2 628 | 8.21 | 212.26 | 243.55 | 90 | 80 | 80 | 20 | 85 | 88 | 85 | 87 | 87 | 80 | 95 | 83 | 12 | 85 | 12 | 70 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| 10 | 4.28 | 2 692 | 7.88 | 230.07 | 248.84 | 84 | 80 | 75 | 35 | 80 | 85 | 87 | 90 | 87 | 80 | 97 | 80 | 12 | 90 | 12 | 75 | 80 | 75 | 85 | 75 |

由于铁路弃渣场的施工主要有地基处理、支挡防护、排水、渣土堆放这四大块,因此本文将每个 DMU 分为 4 期,再根据表 2 和表 4 的数据,即可得出在本文建立的实例 QMPI 中各个参数的取值。参数设置为:$n=10$,$T=4$,$r=2$,$m=11$,$s=5$,$p=7$。

## 3.2　要素变量权重确定

据极差最大化组合赋权法确定各个变量指标的权重。基于 Lingo 软件对线性规划问题即式(11)进行求解即得到在 4 种单一赋权法下的调节量为 $\lambda=$(0.288 3,0.220 6,0.243 9,0.247 2(详见表 6)。

其中,$G_1$ 法和 $G_2$ 法是主观赋权,由邀请的 11 位专家给出相应分值再进行计算即可。均值方差法和离差法是客观赋权,根据处理后的指标相对效率值按公式进行计算即可。这里由于篇幅限制,故不再列出 $G_1$ 法和 $G_2$ 法的专家打分情况。

## 3.3　结果与分析

(1) 弃渣场施工效益率整体分析。基于 DEA-SOLVER PRO 软件平台,根据公式(5)—(8)可以得到各个弃渣场施工的 QTFP 及分解效率情况。本文给出如图 3 所示的 QTFP,REC,EEC 这 3 个指数情况。

**表 6 变量指标的权重**

| 指标 | $G_1$ 法 $\beta^{(1)}$ | $G_2$ 法 $\beta^{(2)}$ | 均值法 $\beta^{(3)}$ | 离差法 $\beta^{(4)}$ | 组合权 $\theta$ | 指标 | $G_1$ 法 $\beta^{(1)}$ | $G_2$ 法 $\beta^{(2)}$ | 均值法 $\beta^{(3)}$ | 离差法 $\beta^{(4)}$ | 组合权 $\theta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_1$ | 0.076 6 | 0.067 3 | 0.088 2 | 0.063 7 | 0.074 2 | $E_1$ | 0.044 9 | 0.041 9 | 0.041 0 | 0.039 6 | 0.042 0 |
| $I_2$ | 0.041 2 | 0.045 1 | 0.044 1 | 0.042 7 | 0.043 1 | $E_2$ | 0.048 9 | 0.052 2 | 0.051 0 | 0.081 9 | 0.058 3 |
| $I_3$ | 0.027 5 | 0.031 3 | 0.030 6 | 0.029 6 | 0.029 6 | $E_3$ | 0.038 2 | 0.023 8 | 0.023 3 | 0.022 5 | 0.027 5 |
| $I_4$ | 0.052 2 | 0.020 6 | 0.020 1 | 0.019 5 | 0.029 3 | $E_4$ | 0.025 8 | 0.044 4 | 0.043 4 | 0.042 0 | 0.038 2 |
| $I_5$ | 0.034 3 | 0.040 2 | 0.039 3 | 0.038 0 | 0.037 7 | $E_5$ | 0.016 5 | 0.048 1 | 0.047 0 | 0.045 5 | 0.038 1 |
| $I_6$ | 0.027 7 | 0.018 5 | 0.018 1 | 0.017 5 | 0.020 8 | $U_1$ | 0.039 1 | 0.021 2 | 0.020 7 | 0.020 0 | 0.026 0 |
| $I_7$ | 0.059 0 | 0.060 7 | 0.059 3 | 0.057 4 | 0.059 1 | $U_2$ | 0.030 1 | 0.013 6 | 0.013 3 | 0.012 9 | 0.018 1 |
| $I_8$ | 0.046 0 | 0.026 9 | 0.026 3 | 0.025 4 | 0.031 9 | $U_3$ | 0.037 1 | 0.042 4 | 0.041 4 | 0.040 1 | 0.040 0 |
| $I_9$ | 0.025 7 | 0.012 5 | 0.012 2 | 0.011 8 | 0.016 0 | $U_4$ | 0.020 0 | 0.028 2 | 0.027 5 | 0.026 6 | 0.025 3 |
| $I_{10}$ | 0.065 9 | 0.077 9 | 0.076 1 | 0.095 3 | 0.078 3 | $U_5$ | 0.045 7 | 0.049 6 | 0.048 5 | 0.046 9 | 0.047 5 |
| $I_{11}$ | 0.048 0 | 0.063 0 | 0.061 6 | 0.059 6 | 0.057 5 | $U_6$ | 0.036 5 | 0.041 9 | 0.041 0 | 0.039 6 | 0.039 6 |
| $D_1$ | 0.061 9 | 0.040 2 | 0.039 3 | 0.038 0 | 0.045 7 | $U_7$ | 0.024 7 | 0.055 0 | 0.053 7 | 0.052 0 | 0.045 2 |
| $D_2$ | 0.026 6 | 0.033 7 | 0.032 9 | 0.031 8 | 0.031 0 | | | | | | |

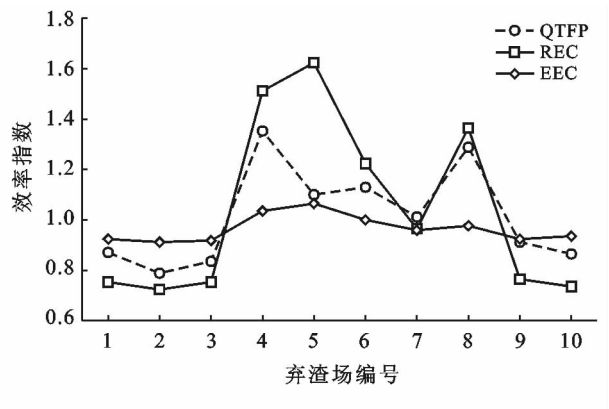



**图 3 QTFP 及部分分解效率指数**

由图 3 的 QTFP 数据可得，各个弃渣场施工的综合效益率降序排序为：4，8，6，5，7，9，1，10，3，2。

结合杨中立等[6]的研究成果可以发现，青藏铁路的绿色施工评价等级高于另两条铁路，而在该铁路中选取的弃渣场 4，5，6 的 QTF$p$ 值均排在前列；同时，QTF$p$ 值排在末端的弃渣场 3，2 均选自绿色度等级较低的大丽铁路。因此，可以认为，绿色施工对弃渣场施工的综合效益率有着促进作用。

此外，根据图中资效效率改变指数（REC）和环效效率改变指数（EEC）的变化情况：除个别数据外，REC 和 EEC 的整体趋势随 QTFP 的变化趋势一致，这说明，在铁路弃渣场工程施工中，资源投入利用情况、环境保护措施的采取效率与其综合效益率呈整体正相关，即验证了绿色施工（四节一环保）促进弃渣场施工的综合效益率。

图 3 中，弃渣场 5 的 REC 和 EEC 走势与 QTFP 的走势不一致，且 REC 很高但 QTFP 却反而降低，这是因为弃渣场 5 选自青藏铁路中的格拉段，首先青藏铁路是冻土的集中地，其次，格拉段是其中各种施工条件都较为艰难复杂的一个标段，因此其弃渣场施工的考虑因素较其他铁路而言比较繁杂，同时其物资的投入相对而言没有那么便捷，因此在它的弃渣场施工中，只有提高其绿色组织管理，投入绿色施工技术，保证并提高资源的利用率才能更好确保施工效益，这也就是为什么弃渣场 5 中 REC 很高的原因。但是后天的绿色施工并不能完全改善先天较差的施工条件，这也就是为什么 REC 很高但 QTFP 反而降低的原因。

同时，图中弃渣场 1，2，3，9，10 的 REC ＜EEC，且这 5 个弃渣场的 QTFP 值均排在末端。这说明，在这些弃渣场的施工中，资源的利用效率跟不上环境的治理效率。在本文的 QMPI 中，正常的弃渣场施工，或多或少而言，投入即有非期望产出（环境污染物），但这里却出现了有资源的投入，没有非期望产出的处置，即是说，正常的施工过程已经完成，但仍有资源在投入，这就导致过量投入造成大量的资源浪费，同时降低了施工效益率。反之，弃渣场 4—8 的 REC 明显大于 EEC，且这些点的 QTFP 都相对较高，这说明其资源的投入得到了合理的使用，同时这些点的 EEC 大多高于其余点，这也说明资源的合理投入和高效利用会促进环境的保护效率，同时提高施工效益率。

（2）低施工效益率原因分析。当 QTFP ＜1 时，施工效益率衰退低下。根据式（6）中松弛变量 $s_{it}^-$，$s_{iut}^-$ 值的大小可以反映施工综合效益率低的原因。参考文献[8]对冗余率的处理，这里给出了本文实例中弃渣场工程施工投入/产出冗余率较大的变量及其冗余率值（表 7）。

**表 7　弃渣场施工投入/产出冗余率**

| 弃渣场编号 | 投入冗余率/% | | | | | | 非期望产出冗余率/% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 土地 | 施工用电 | 燃油 | 砼 | 施工用水 | 劳动力 | 水污染 | 土壤侵蚀 | 施工扬尘 | 噪声振动 | 植被破坏 |
| 1 | −39.61[b] | −29.46 | −55.74[a] | −12.45 | −8.35 | −45.11[b] | −14.58 | −21.77 | −28.31 | −23.29 | −5.77 |
| 2 | −70.83[a] | −13.68 | −23.45 | −33.39[b] | −22.03 | −22.96 | −34.61[b] | −7.37 | −3.15 | −12.22 | −21.31 |
| 3 | −50.35[a] | −59.44[a] | −47.43[a] | −22.18 | −16.21 | −15.47 | −40.46[b] | −12.45 | −13.89 | −6.53 | −9.88 |
| 9 | −32.54[b] | −35.16[b] | −42.23[b] | −19.26 | −12.66 | −36.25[b] | −30.11[b] | −28.11 | −22.46 | −14.44 | −8.71 |
| 10 | −31.67[b] | −21.67 | −24.89 | −9.47 | −19.34 | −18.87 | −60.87[a] | −13.35 | −8.54 | −9.05 | −24.73 |

注:① 本表只选取 QTFP<1 的爆破点;② 按照冗余率大小进行排序,选取部分数据进行标识;③ a 表示最主要因素,b 表示次要因素。

根据表 7 可知,①资源投入过多和非期望产出过量是本文部分弃渣场施工效益率低的主要原因。②造成施工效益率低的主要影响因素依此是土地、燃油、水污染、施工用电、劳动力。③合理减少资源的投入且提高投入资源的利用率(四节),同时减少环境负产出(环保),做到资源环境的可持续发展是提高弃渣场施工综合效益率的有效途径。

## 4　结 论

(1) 参考传统经济学 MPI 模型,基于绿色施工理念,引入施工所致的非期望产出要素,考虑资源的投入利用率并结合动态投入的长远效应,建立铁路弃渣场施工 Malmquist 模型,可以充分解释铁路弃渣场“资源效率—环境效率—经济效率”三位一体的动态施工综合效益。

(2) 参阅线路工程弃渣场施工方案,初选出与其相关的 103 个因子,邀请 11 位行业专家根据本文建立的 QMPI 模型筛选出 25 个主要变量,分别作为投入、产出和动态要素的二级指标。这些指标的确定有助于施工单位在弃渣场的施工过程中分清施工主次,合理制定施工方案,确保项目的经济和社会效益。

(3) 基于极差最大化组合赋权法和 DEA−SOLVER PRO 软件平台进行弃渣场施工效益率的测算。测算结果表明,施工综合效益率与资效效率(REC)和环效效率(EEC)呈整体正相关,即绿色施工会促进施工综合效益率。同时,提升“四节”会促进“一环保”,从而共同作用于更高的施工效益。通过对投入/产出冗余率的分析,也进一步验证了这一结论。极差最大化组合赋权法的运用,既有效克服了主观因素的决策失误,也避免了数据偏差而产生的评判错误,并保证了评价结果的科学性。

(4) 本文选取的动态要素只考虑了部分固定资产,而在工程项目的实际施工中,动态投入往往更为繁杂,应对动态要素变量进行进一步的研究优化,提高模型的精度。

[ 参 考 文 献 ]


[1] 石杨子. 成兰铁路弃渣场生态修复技术方案初步研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.

[2] 朱艳玲. 山丘区铁路工程弃渣场分类及防护措施[J]. 安徽农业科学,2012,40(10):6142-6144.

[3] 王明慧,蒋树平,张桥,等. 山区高速铁路弃渣场选址分析[J]. 铁道工程学报,2013,30(4):18-20.

[4] 王冠琪. 铁路工程沟道弃渣场选址及工程措施布设分析[J]. 四川建筑,2015,35(4):133-135.

[5] 鲍学英,杨姝,王起才. 基于灰色聚类法的铁路绿色施工等级评价研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(7):106-110.

[6] 杨立中,贺玉龙,熊春梅,等. 绿色铁路理论及评价[M]. 成都:西南交大出版社,2014.

[7] 戚湧,张明,李太生. 基于 Malmquist 指数的江苏创新资源整合共享效率评价[J]. 中国软科学,2013(10):101-110.

[8] 潘丹,应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证:基于非期望产出的 SBM 模型分析[J]. 生态学报,2013,33(12):3837-3845.

[9] 郭亚军. 综合评价理论、方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:44-51.

[10] Lv Wendeng, Hong Xiaoxin, Fang Kuangnan. Chinese regional energy efficiency change and its determinants analysis: Malmquist index and Tobit model[J]. Annals of Operations Research, 2015,228(1):9-22.

[11] Jia Zhengyuan, Li Chuancai, Yuan Di. Analysis of total factor energy efficiency of manufacturing Industry in Shandong Province based on Malmquist Index Empirical study[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011,84/85:747-751.

[12] Hadad M D, Hall M J B, Kenjegalieva K A, et al. Productivity changes and risk management in Indonesian banking: A Malmquist analysis [J]. Applied Financial Economics, 2011,21(12):847-861.

[13] Oh D H. A global Malmquist-Luenberger productivity index[J]. Journal of Productivity Analysis, 2010,34(3):183-197.

[14] Tone K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.

[15] 张建辉. 基于定向技术距离函数和 Malmquist 指数的全要素生产率研究[D]. 成都:四川大学,2005.