排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 2 月 Feb. 2014 | 第 32 卷 第 2 期 Vol. 32 No. 2

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.12.0197


操信春

# 基于 DEA 的灌区生产效率分析——以江苏省为例

操信春[1,2]，吴普特[1,2,3]，王玉宝[1,2]，赵西宁[2,3]，刘静[2]
（1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院，陕西 杨凌 712100；3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心，陕西 杨凌 712100）

**摘要**：针对当前灌区农业生产效率评价多采用单项投入与产出指标的不足，引入数据包络分析（DEA）方法，设定表征生产效率的投入产出指标体系，利用 CCR 模型对江苏省 35 个灌区相对生产效率进行了比较研究. 相对效率分析表明，江苏省综合效率整体不高，灌区间差异较大，全省平均值为 0.634，其中 3 个灌区为 DEA 有效；不同区域农业生产技术的利用及推广程度相当，灌区相对生产效率的不均衡主要由生产规模不合理引起. 可以通过减少投入来提升非 DEA 有效灌区的生产效率，所有非 DEA 有效灌区改进生产效率能节约的有效灌溉面积、水资源及农业人口分别占投入量的 20.7%，13.3%，9.4%. 相对 DEA 效率的比较可为灌区生产效率的改进途径、农业节水潜力的计算等提供新的思路.

**关键词**：灌区；生产效率；数据包络分析；江苏省；水土资源
**中图分类号**：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)02-0173-06

操信春，吴普特，王玉宝，等. 基于 DEA 的灌区生产效率分析——以江苏省为例[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(2)：173-178.

# Analysis of production efficiency of irrigation districts based on DEA method: Take Jiangsu province as an example

*Cao Xinchun*[1,2], *Wu Pute*[1,2,3], *Wang Yubao*[1,2], *Zhao Xining*[2,3], *Liu Jing*[2]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid regions of China, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract**: Most agricultural production efficiency evaluations of irrigation district are based on single input and output index now. We used data envelopment analysis (DEA) method and set the input and output index system which can represent the characterization of production efficiency, after that we compared the relative production efficiency of 35 irrigation districts in Jiangsu using the CCR model as an example. Results showed that the comprehensive efficiency of Jiangsu province was not high; The differences between irrigation area were large; The average value of the comprehensive efficiency of Jiangsu was 0.634; Three irrigation districts were DEA effective; The popularization and utilization of agricultural production technology in different region were at the same rate; The imbalance of relative production efficiency of irrigation districts was mainly caused by the unreasonable production scale; We can increase the production efficiency of DEA ineffective irrigation area by reducing the input; The ef-

**收稿日期**：2012-12-04；**网络出版时间**：2014-01-18
**网络出版地址**：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.12.0197.html
**基金项目**："十二五"国家科技支撑计划项目(2011BAD29B09)；国家自然科学基金资助项目(50809055)；教育部、国家外国专家局"111"计划项目(B12007)
**作者简介**：操信春(1986—)，男，江西鄱阳人，博士研究生(xin07605017@163.com)，主要从事农业水土资源管理研究.
吴普特(1963—)，男，陕西杨凌人，研究员，博士生导师(通信作者，Gjzwpt@vip.sina.com)，主要从事节水农业与水土保持研究.

fective irrigation area, water resources and agricultural population we can saved in all the DEA ineffective irrigation districts were accounts for 20.7%, 13.3% and 9.4% respectively by improving production efficiency when compared with the input. The comparison of the relative DEA efficiency can provide a new method for irrigation production efficiency improvement and the calculation of agricultural water saving potential.

**Key words**: irrigation district; production efficiency; data envelopment analysis; Jiangsu province; water and soil resources

在我国,灌溉农田约占耕地总面积的一半,灌溉消耗了全国用水量的60%以上,生产了超过3/4的粮食和种植了大部分的经济作物. 作为粮食生产和农业资源管理的重要单元,灌区的农业资源优化配置及生产效率成为研究的重点对象. 衡量与评价灌区生产效率的角度较多,主要有作物需水特性与作物产量水平[1]、不同尺度的水分生产率[2-3]、基于不同目标和优化模型的水土资源优化配置或农业种植结构调整[4],以及不同方法的农业节水潜力计算[5-6]等. 以往的研究主要偏重对某一灌区内的生产效率提高途径的探索或不同灌区间某单一产出指标的比较,不同灌区间基于多种投入、产出指标的综合效率的比较相对较少. 数据包络分析[7](data envelopment analysis, DEA)能衡量拥有多个输入和输出变量的不同决策单元(decision making units, DMU)间相对生产效率,该方法优点在于可以针对多项投入和多项产出指标,并且不需要假设具体的生产函数形式,已广泛用于企业生产、工程管理等领域的方案选择或绩效评价[8-10].

江苏省是我国的经济强省和农业大省,社会经济发展和农业生产之间存在资源竞争,同时,水资源环境问题也日趋严重,面临进一步提高农业资源的生产效率问题[11]. 文中在建立灌区生产效率投入-产出指标的基础上,选取江苏省35个大中型灌区为对象,运用DEA分析方法中的CCR模型对灌区生产效率进行比较分析.

## 1 研究方法

### 1.1 灌区生产效率的DEA模型

把每个灌区看作1个决策单元(DMU),运用由Fare等[12]改造的方法构造1个生产最佳前沿面,把每个灌区的生产同前沿面进行比较,从而测度每个灌区的相对效率. 落在生产最佳前沿面上灌区的效率值为1,称为DEA有效单元,其他效率值介于0~1. 文中利用DEA方法的CCR模型比较不同评价单元生产的效率相对有效性. 假设共有 $n$ 个DMU,每个单元DMU选出了 $i$ 个投入 $j$ 个产出指标,则第 $p$ 个DMU的效率值[13](综合DEA效率):

$$\max h_p = \frac{\sum_{j=1}^{S} U_j Y_{jp}}{\sum_{i=1}^{m} V_i X_{ip}},$$

$$\text{S.T. } h_p = \frac{\sum_{j=1}^{S} U_j Y_{jk}}{\sum_{i=1}^{m} V_i X_{ik}} \leqslant 1, \forall k, k = 1,2,\cdots,n,$$

$$U_j \geqslant \varepsilon > 0, \forall j, j = 1,2,\cdots,n,$$

$$V_i \geqslant \varepsilon > 0, \forall i, i = 1,2,\cdots,n, \quad (1)$$

式中:$X_{ik}$ 为第 $k$ 个DMU第 $i$ 项投入;$Y_{jk}$ 为第 $k$ 个DMU第 $j$ 项产出;$V_i$ 为第 $i$ 项投入的权重;$U_j$ 为第 $j$ 项产出权重;$h_p$ 为第 $p$ 个DMU的效率值;$\varepsilon$ 为非阿基米德无穷小量. $h_p$ 测度的是投入转化为产生的综合效率($ET$),可将其进一步分解为纯技术效率($EPT$)与规模效率($ES$),即 $ET = EPT \times ES$. 纯技术效率衡量的是生产领域中技术更新速度的快慢和技术推广的有效程度,根据规模效率则可以判断各灌区处在递增或递减的规模报酬区间.

将式(1)转为线性方程式,并根据线性规划对偶理论,进一步获得对偶式方程,可以计算灌区生产效率非有效灌区的松弛变量与剩余变量[13]:

$$\min \lambda_p - \varepsilon\left[\sum_{i=1}^{m} \left| S_i^- + \sum_{j=1}^{S} S_j^+\right.\right],$$

$$\text{S.T. } \lambda_p X_{ip} - \sum_{k=1}^{n} \theta_k X_{ik} = S_i^-,$$

$$\sum_{k=1}^{n} \theta_k Y_{ik} - Y_{jp} = S_j^+,$$

$$\theta_k \geqslant 0, \quad k = 1,2,\cdots,n,$$

$$S_i^- \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,n,$$

$$S_j^+ \geqslant 0, \quad j = 1,2,\cdots,n, \quad (2)$$

式中:$\lambda_P$ 为第 $p$ 个DMU乘数;$\theta_k$ 为第 $k$ 个DMU参考集的权重;$S_i^-$ 为第 $i$ 项投入的松弛变量;$S_j^+$ 为第 $j$ 项产出的剩余变量. 松弛变量为达到同等产出的情

形下,投入要素的可减少量,可为灌区提高生产效率提供改进的方向.

### 1.2　指标选择与数据来源

能够作为区域农业生产投入、产出的指标众多,可以根据研究问题的需要和数据的可获得性进行选取. 考虑灌区的特点并突出水、土资源的重要性和稀缺性[14],文中选取灌区有效灌溉面积、蓝水(灌溉用水量)、绿水(有效降水)及灌区农业人口数量作为灌区生产效率的投入指标. 蓝水是降水形成径流后进入河道、湖泊或地下含水层形成的地表水和地下水,即传统的水资源;绿水是降水中下渗到非饱和土壤层中用于植物生长,以蒸、散发形式垂向进入大气的不可见水[15-16]. 兼顾灌区在粮食生产中的重要作用与其社会效益,将粮食产量和农业总产值作为产出指标. 建立的灌区生产效率 DEA 模型中投入指标 $I_1$ 为有效灌溉面积、$I_2$ 为蓝水投入、$I_3$ 为绿水投入、$I_4$ 为农业人口,产出指标 $O_1$ 为农业生产总值、$O_2$ 为粮食总产量.

以 2009 年作为江苏省大中型灌区生产效率比较的研究年份,各灌区的有效灌溉面积、农业人口数量、农业生产总值、粮食产量、蓝水量及计算绿水所需的耕地面积均来源于各灌区管理局的统计数据. 绿水总量为平均有效降水与耕地面积的乘积,各灌区有效降水采用美国农业部土壤保持局推荐、当前得到公认和普遍推荐的方法[17]计算:

$$P_e=\begin{cases}\dfrac{P(4.17-0.02P)}{4.17}, & P<83,\\ 41.7+0.1P, & P\geqslant 83,\end{cases}\qquad(3)$$

式中:$P$,$P_e$ 分别为旬降水量和旬有效降水量,mm. $P$ 来自中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn,2011 年 4 月下载),与灌区所在行政区的气象站点对应.

## 2　结果与分析

### 2.1　灌区间的相对生产效率

利用 DEAP2.1 软件,选择 CCR 型计算出了江苏省 2009 年 35 个大中型灌区的 DEA 综合效率、纯技术效率及规模效率值,并判断出各灌区所处的规模报酬区间,如表 1 所示.

**表 1　江苏省 2009 年 35 个灌区 DEA 效率的计算结果**

**Tab.1　Production efficiency of 35 irrigation districts in Jiangsu province in 2009**

| 灌区名 | *ET* | *EPT* | *ES* | 规模收益 | 灌区名 | *ET* | *EPT* | *ES* | 规模收益 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高邮灌区 | 0.989 | 1.000 | 0.989 | 递减 | 渠南灌区 | 0.476 | 0.612 | 0.779 | 递增 |
| 白屈港灌区 | 0.322 | 0.718 | 0.448 | 递增 | 清水坝灌区 | 0.622 | 1.000 | 0.622 | 递增 |
| 高邮灌区宝应片 | 0.537 | 0.573 | 0.937 | 递增 | 淮涟灌区 | 0.362 | 0.475 | 0.761 | 递增 |
| 船行灌区 | 0.463 | 1.000 | 0.463 | 递增 | 洪金灌区 | 0.906 | 1.000 | 0.906 | 递增 |
| 淳东灌区 | 0.372 | 1.000 | 0.372 | 递增 | 周桥灌区 | 0.790 | 1.000 | 0.790 | 递增 |
| 堤东灌区 | 0.890 | 1.000 | 0.890 | 递减 | 涟东灌区 | 0.590 | 0.965 | 0.611 | 递增 |
| 阜宁渠南灌区 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 不变 | 涟西灌区 | 0.547 | 0.844 | 0.649 | 递增 |
| 来龙灌区 | 0.674 | 0.781 | 0.863 | 递增 | 竹络坝灌区 | 0.627 | 1.000 | 0.627 | 递增 |
| 盱眙清水坝灌区 | 0.622 | 1.000 | 0.622 | 递增 | 石梁河水库灌区 | 0.859 | 0.878 | 0.978 | 递增 |
| 三层灌区 | 0.418 | 0.829 | 0.505 | 递增 | 小塔山水库灌区 | 0.960 | 1.000 | 0.960 | 递增 |
| 五岸灌区 | 0.605 | 1.000 | 0.605 | 递增 | 沭新渠灌区 | 0.805 | 0.931 | 0.865 | 递增 |
| 柴塘灌区 | 0.567 | 0.761 | 0.745 | 递增 | 沭南灌区 | 0.697 | 0.782 | 0.891 | 递增 |
| 沂北灌区 | 0.583 | 0.758 | 0.769 | 递增 | 如海灌区 | 0.581 | 1.000 | 0.581 | 递减 |
| 城黄灌区泰兴片 | 0.401 | 0.605 | 0.664 | 递增 | 众程灌区 | 0.590 | 1.000 | 0.590 | 递增 |
| 城黄灌区姜堰片 | 0.470 | 0.701 | 0.671 | 递增 | 运南提水灌区 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 不变 |
| 沿运灌区兴化片 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 不变 | 宿城区运南灌区 | 0.399 | 1.000 | 0.399 | 递增 |
| 江都沿运灌区 | 0.426 | 0.861 | 0.494 | 递增 | 沂北灌区新沂片 | 0.519 | 0.877 | 0.591 | 递增 |
| 皂河灌区 | 0.532 | 0.963 | 0.553 | 递增 | | | | | |

表 1 显示,阜宁渠南灌区、沿运灌区兴化片及运南提水灌区的综合效率值为 1.000,为 DEA 有效,说明这 3 个灌区实现了现有产出水平(粮食产量和农业总产值)下,有效灌溉面积、蓝水(灌溉水)等 4 种资源的投入最小. 其他灌区则需通过减少投入或增加产出来提升相对效率. 灌区生产效率的 DEA 综合效率值在 0.322 ~ 1.000 变化,全省平均值为 0.634,灌区间差别较大的同时整体水平不高. 32 个非有效灌区中,仅 6 个 DEA 综合效率大于 0.800,21 个介于 0.400 ~ 0.700,占总数的 65.6%.

各个灌区的纯技术效率值均较高,全省平均值为 0.883,明显高于综合效率值. 根据各灌区值的分

布,高邮灌区、船行灌区等17个灌区达到1.000,远高于DEA有效的灌区个数.超过0.900和0.800的灌区个数分别为3,5,还有6个介于0.700~0.800.仅4个灌区不足0.700,其中淮涟灌区最小,为0.475,也是唯一一个不足0.500的灌区.纯技术效率总体较高说明江苏省灌溉农田上的生产水平总体较高,农业技术的更新和推广较快,这与该省的经济发展程度较高有关.

根据规模效率,各个灌区值的大小分布与综合效率较一致,亦说明省内技术差异对灌区生产效率的影响较小.3个DEA有效灌区处于规模报酬不变区间,说明农用生产规模相比于其他灌区合理;白屈港灌区、高邮灌区宝应片、船行灌区等绝大多数(29个)非DEA有效单元处于规模报酬递增阶段,这些灌区的生产规模偏小,扩大生产投入有利于生产效率的提高;高邮灌区、堤东灌区及如海灌区处于规模报酬递减阶段,生产规模偏大,增大资源投入将使相对效率进一步下降.

### 2.2 灌区生产效率的优化

生产效率为非DEA有效灌区都是因为投入转化为产出的能力有限,与DEA有效的灌区相比,至少1项投入要素存在冗余,即松弛变量.利用CCR模型求得各非DEA有效灌区转变为有效DMU时的松弛变量$S_i^-$的取值,结果见表2.

**表2 非DEA有效灌区投入指标的松弛变量**

**Tab.2 Values of slack variables of input indices in lowly efficient irrigation districts** $hm^3$

| 灌区名 | $S_1^-$ | $S_2^-$ | $S_3^-$ | $S_4^-$ | 灌区名 | $S_1^-$ | $S_2^-$ | $S_3^-$ | $S_4^-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 高邮灌区 | 2 020 | 2 060 | 1 290 | 0 | 渠南灌区 | 5 930 | 600 | 40 | 0 |
| 白屈港灌区 | 1 240 | 0 | 0 | 3 560 | 清水坝灌区 | 6 620 | 0 | 570 | 0 |
| 高邮灌区宝应片 | 0 | 1 210 | 100 | 6 800 | 淮涟灌区 | 5 800 | 60 | 170 | 0 |
| 船行灌区 | 5 060 | 240 | 100 | 0 | 洪金灌区 | 10 740 | 1 370 | 850 | 0 |
| 淳东灌区 | 4 170 | 20 | 480 | 0 | 周桥灌区 | 10 180 | 1 220 | 620 | 0 |
| 堤东灌区 | 21 320 | 0 | 1 610 | 0 | 涟东灌区 | 0 | 0 | 60 | 2 850 |
| 阜宁渠南灌区 | 0 | 0 | 0 | 0 | 涟西灌区 | 3 900 | 0 | 0 | 2 610 |
| 来龙灌区 | 8 910 | 1 650 | 0 | 2 400 | 竹络坝灌区 | 4 330 | 0 | 0 | 1 800 |
| 盱眙清水坝灌区 | 6 620 | 0 | 570 | 0 | 石梁河水库灌区 | 11 070 | 760 | 0 | 17 710 |
| 三层灌区 | 5 270 | 310 | 80 | 0 | 小塔山水库灌区 | 5 210 | 550 | 0 | 21 180 |
| 五岸灌区 | 13 430 | 440 | 540 | 0 | 沭新渠灌区 | 12 830 | 840 | 430 | 0 |
| 柴塘灌区 | 2 500 | 300 | 0 | 10 550 | 沭南灌区 | 7 890 | 0 | 0 | 7 150 |
| 沂北灌区 | 4 630 | 200 | 0 | 6 860 | 如海灌区 | 130 | 810 | 0 | 6 010 |
| 城黄灌区泰兴片 | 6 130 | 470 | 0 | 9 850 | 众程灌区 | 4 390 | 1 500 | 10 | 0 |
| 城黄灌区姜堰片 | 0 | 0 | 20 | 2 390 | 运南提水灌区 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 沿运灌区兴化片 | 0 | 0 | 0 | 0 | 宿城区运南灌区 | 10 | 260 | 0 | 0 |
| 江都沿运灌区 | 1 270 | 10 | 0 | 30 | 沂北灌区新沂片 | 3 300 | 330 | 0 | 490 |
| 皂河灌区 | 5 980 | 440 | 0 | 1 420 | | | | | |

表2显示,32个非有效灌区中的29个存在不同数量有效灌溉面积的剩余,其中最小为宿城区运南灌区的10 $hm^3$,最大为堤东灌区的21 320 $hm^3$;宿城区运南灌区的有效灌溉面积的松弛变量占投入比重最小,约0.1%,高邮灌区最大,达51.5%,说明在得到当前产出的条件下,如果该灌区生产效率达到DEA有效灌区水平,可以节约超过一半的有效灌溉面积.23个灌区的蓝水投入存在过量,最小值为江都沿运灌区的0.01亿$m^3$,17个灌区在1.00亿$m^3$以下,只有高邮灌区超过了2.00亿$m^3$,为2.06亿$m^3$;蓝水松弛变量$S_2^-$占总投入比重介于0.4%~47.7%变化,说明不同规模大小灌区间灌溉水资源浪费情况差异较大,这一方面与不同地区的水资源丰富程度直接相关,也由灌区灌溉设施的保障程度、灌溉水利用率决定.17个灌区存在正的绿水松弛变量$S_3^-$,数据均较小,除高邮灌区和堤东灌区外均不足1.00亿$m^3$,占原投入量的比重大多在35%以下,仅洪金灌区达到44.3%;绿水是作物生长过程中有效利用的降水资源,其利用率不高可能与农产品的单产水平不一致或农作物种类不同从而经济价值差异有关.农业人口存在松弛变量$S_4^-$的灌区数也为17个,由于灌区间农业人口密度差异相对较小,各灌区$S_4^-$值及占投入值的比重均较小,前者大多不超过10万,后者多在15%以下.

从全省所选灌区分析,以DEA有效灌区的生产效率为标准,达到当前农业生产总值和粮食总产量的产出的情形下,有效灌溉面积、蓝水、绿水及农业人口等4种投入要素的可减少量分别为1 990.6,

15.65,7.54 亿 $m^3$ 及 103.66 万人,分别占原始投入的 20.7%,15.7%,10.1%,9.4%.

## 3 结　论

本研究结合灌区的投入指标产出的实际特点,突出农业水土资源的重要性,以灌区的有效灌溉面积、蓝水、绿水及农业人口作为投入指标,以粮食总产量和农业总值为产出指标,给出了基于数据包络分析(DEA)的灌区相对生产效率评价模型,并以江苏省35个大中型灌区为例进行了实证研究.该省相对的综合效率总体不高且灌区间差别较大,全省在0.322~1.000变化,平均值为0.634,3个灌区为DEA有效.由于各地区的农业技术水平差别不大,技术有效的灌区达17个,不同区域农业生产技术的利用及推广程度相当,灌区间纯技术效率的差距小于规模效率,区域相对生产效率的不均衡主要由生产规模不合理引起.

通过对投入指标的松弛变量的求解,可以寻求非DEA有效灌区改进生产效率达到DEA有效条件下各投入指标的可减少量,为资源的合理配置和节水潜力的计算提供新的思路.总体上,各灌区生产效率均达到DEA有效、得到当前的产出时,可减少超过1/5的有效灌溉面积的投入,同时,可将接近10%的农业人口转移到其他行业中.水资源的减少可以看成是发展技术和改进管理下的节水潜力,32个灌区灌溉水(蓝水)和绿水(有效降水)的可节约量分别为15.65,7.54 亿 $m^3$,总节水潜力占原始投入的比例为13.3%.

### 参考文献(References)


[1] 贾宏伟, 卢成. 基于非充分灌溉理论的水稻田间水利用效率的计算方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 38-41.
Jia Hongwei, Lu Cheng. Calculation method of field water use efficiency of rice based on the theory of deficit irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 38-41. (in Chinese)

[2] 崔远来,董斌,李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报,2006,37(1):45-51.
Cui Yuanlai, Dong Bin, Li Yuanhua. Variation of water productivity in different spatial scales[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 45-51. (in Chinese)

[3] 操信春, 吴普特, 王玉宝,等. 中国灌溉水粮食生产率及其时空变异[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(3): 356-361.
Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Spatial and temporal variation of crop water productivity in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(3): 356-361. (in Chinese)

[4] 冯峰,许士国. 灌区水资源综合效益的改进多级模糊优选评价[J]. 农业工程学报,2009,25(7):56-61.
Feng Feng, Xu Shiguo. Improved fuzzy-optimized multilevel evaluation for comprehensive benefit of water resources in irrigation area[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7):56-61. (in Chinese)

[5] 刘路广,崔远来,王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法[J]. 水科学进展,2010, 22(5): 696-702.
Liu Luguang,Cui Yuanlai,Wang Jianpeng. New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle[J]. Advances in Water Science,2010, 22(5): 696-702. (in Chinese)

[6] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁,等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报,2003, 19(1): 54-58.
Fu Guobin, Li Lijuan, Yu Jingjie,et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 54-58. (in Chinese)

[7] Banker R D, Charnes A, Cooper W W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1984, 30(9): 1078-1092.

[8] 邓学平, 王旭, Ada Suk Fung Ng. 我国物流企业生产效率发展分析[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(5): 27-35.
Deng Xueping, Wang Xu, Ada Suk Fung Ng. Development analysis of Chinese logistics companies focusing on productive efficiency[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2009, 29(5): 27-35. (in Chinese)

[9] 邢俊. 基于样本的企业联盟效率综合评价的非参数方法[J]. 系统工程理论与实践, 31(11): 2131-2139.
Xing Jun. Non-parametric approach for evaluating alliance efficiency based on sample units[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 31(11): 2131-2139. (in Chinese)

[10] 马占新, 候翔. 具有多属性决策单元的有效性分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(2): 339-345.
Ma Zhanxin, Hou Xiang. Efficiency analysis method for

some multiple attributive decision making units[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(2): 339-345. (in Chinese)

[11] 宋晓猛, 杨小芳, 张玲, 等. 江苏省水资源承载力评价及可持续利用对策[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 72-73.
Song Xiaomeng, Yang Xiaofang, Zhang Ling, et al. Water resources carrying capacity evaluation and the sustainable utilization countermeasures of Jiangsu province[J]. Yellow River, 2009, 31(4): 72-73. (in Chinese)

[12] Fare R S, Grosskopf C A, Lovell K. Production Frontiers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[13] 游和远,吴次芳,林宁,等. 基于数据包络分析的土地利用生态效率评价[J]. 农业工程学报,2011,27(3):309-315.
You Heyuan, Wu Cifang, Lin Ning, et al. Assessment of eco-efficiency of land use based on DEA[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 309-315. (in Chinese)

[14] 耿艳辉,闵庆文,成升魁. 流域水土资源优化配置的几种方法比较[J]. 资源科学, 2007, 29(2): 193.
Geng Yanhui, Min Qingwen, Cheng Shengkui. Discussion on optimal allocation methods of water and land resources at the watershed scale[J]. Resources Science, 2007, 29(2): 193. (in Chinese)

[15] 李保国, 黄峰. 1998~2007年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575-583.
Li Baoguo, Huang Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575-583. (in Chinese)

[16] Falkenmark M, Rockström J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129-132.

[17] Petra Doll, Stefan Siebert. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1037-1048.

(责任编辑 徐云峰)

(上接第166页)

[10] William R Long, Tarboro N C. Irrigation Machine: America, 959284[P]. 1978-11-09.

[11] 刘柱国. 喷灌能源消耗对比分析[J]. 节水灌溉, 2000(1): 15-17.
Liu Zhuguo. Comparatively analyses with energy consuming in sprinkler irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2000(1): 15-17. (in Chinese)

[12] 刘晓涛. 低扬程提水灌区喷灌节能措施的探讨[J]. 喷灌技术,1991(1): 9-12.
Liu Xiaotao. Measures to save energy for sprinkler irrigation[J]. Sprinkler Irrigation Technology,1991(1): 9-12. (in Chinese)

[13] 王新坤, 袁寿其, 刘建瑞,等. 轻小型喷灌机组能耗计算与评价方法[J]. 排灌机械工程学报, 2010,28(3): 247-250.
Wang Xinkun, Yuan Shouqi, Liu Jianrui, et al. Energy consumption calculation and evaluation methods for light and small unit sprinkler system[J]. Jounrnal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 247-250. (in Chinese)

[14] 王新坤, 袁寿其, 朱兴业,等. 轻小型移动喷灌机组低能耗遗传算法优化设计[J]. 农业机械学报,2010, 40(10):58-62.
Wang Xinkun, Yuan Shouqi, Zhu Xingye, et al. Optimization of light-small movable unit sprinkler system using Genetic Agorithms based on energy consumption indicators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 14(10): 58-62. (in Chinese)

[15] 李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1173-1177.
Li Shunqun, Gao Lingxia, Chai Shouxi. Significance and interation of factors on mechanical properties of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1173-1177. (in Chinese)

[16] 李波. 基于交互正交试验的空间用谐波减速器传动性能影响因素研究[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 375-380.
Li Bo. Research of factors affecting transmission performance of harmonic drive in spacecraft based on interactive orthogonal experiment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 375-380. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)