

基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价

刘 静^{1,2,3}, 吴普特^{1,2,3}, 王玉宝²,
赵西宁^{2,3}, 操信春^{2,3}, 孙世坤^{2,3}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
3. 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 杨凌 712100)

摘要: 为了科学评判农业生产水平, 实现资源优化配置, 该文运用数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA), 同时考虑蓝水、绿水等多种要素, 分析了河套灌区 5 个区域 2000 - 2008 年的农业生产相对效率, 并对非 DEA 有效决策单元 (decision making unit, DMU) 提出建议。结果表明: 各区域农业生产综合效率差异不显著。杭后和五原效率的提高主要取决于能否有效利用生产技术, 而生产规模是影响前旗效率的主要因素。为实现 DEA 有效, 21 个非 DEA 有效 DMU 的各投入平均调整幅度分别为 16.66% (蓝水), 22.23% (绿水), 19.46% (盐渍化灌溉面积), 20.66% (非盐渍化灌溉面积) 和 23.82% (农业人口)。灌区应该调整产业结构, 改善灌溉设施, 加强土地管理, 同时在现有绿水资源利用情况下, 建立节水高效型种植结构。该研究为探寻河套灌区农业高效生产模式, 指导其他灌区农业系统改善提供参考。

关键词: 灌溉; 水; 数据包络分析; 农业生产效率; 河套灌区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.09.014

中图分类号: S277.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-09-0110-09

刘 静, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于数据包络分析的河套灌区农业生产效率评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 110 - 118.

Liu Jing, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Assessment of agricultural productive efficiency for Hetao Irrigation District based on data envelopment analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(9): 110 - 118. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

科学评判农业生产水平, 明确农业发展中存在的问题, 是实现资源节约型和环境友好型农业的重要前提。现有的农业生产评价研究多涉及土地资源^[1]、水资源^[2]、机械动力^[3]以及化肥^[4]等单一生产要素, 难以反映多投入多产出的复杂农业系统的综合效率。同时对水资源要素的分析多集中于蓝水资源^[5] (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) 的利用效率^[6-9], 对绿水资源^[5] (降水下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) 分析不足^[10-11]。相对蓝水, 绿水通常拥有较低的机会

成本, 同时绿水的使用对环境影响相对较小^[12-13], 是农业系统的重要投入要素。数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 由著名运筹学家 Charnes 和 Cooper 提出^[14], 能衡量拥有多个输入和输出变量的不同决策单元 (decision making unit, DMU) 的相对生产效率, 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, 在国内外管理科学、系统工程和决策分析、评价技术等领域已有大量成功应用的案例^[15-19]。可在综合考虑蓝水、绿水和其他生产要素基础上, 尝试将 DEA 运用于复杂农业系统的生产效率分析, 并给出优化方案。

我国耕地总面积的 50% 为灌溉农田, 灌溉消耗了全国用水量的 60% 以上, 生产了超过 3/4 的粮食。作为粮食生产和资源管理的重要单元, 灌区的农业生产效率评价及资源优化配置成为研究的重点对象。河套灌区位于内蒙古西部黄河冲积平原, 是中国三大灌区之一, 同时也是北方重要的农业生产基地, 其农业生产效率的提高具有重要战略意义。本文同时考虑蓝水、绿水等多种生产要素, 在建立效率评价投入产出指标体系基础上, 运用 DEA 分析

收稿日期: 2013-11-26 修订日期: 2014-03-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD29B09); 教育部、国家外国专家局“111”计划 (B12007); 西北农林科技大学青年学术骨干项目和基本科研业务费资助项目

作者简介: 刘 静 (1986 -), 女, 河北沧州人, 博士生, 主要从事农业水土资源管理方面的研究。杨凌 西北农林科技大学 水土保持研究所, 712100。Email: baanjingliuxia@126.com

通信作者: 吴普特 (1963 -), 男, 陕西武功人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水农业与水土保持方面的研究。杨凌 西北农林科技大学 水土保持研究所, 712100。Email: gjzwpt@vip.sina.com

河套灌区 5 个区（县、旗）2000 - 2008 年的农业生产相对效率，并针对非 DEA 有效 DMU 提出相应改进建议，以期为探寻河套灌区农业高效生产模式，指导其他灌区的农业生产系统改善提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区位于 40°19' ~ 41°18' N，106°20' ~ 109°19' E，是亚洲最大的自流引水灌区，也是我国 3 个特大型灌区之一。横跨临河区、磴口县、杭锦后旗、五原县和乌拉特前旗 5 个区（县、旗）（下文简称临河、磴口、杭后、五原和前旗），现有灌溉面积 57.4 万 hm²。灌区光热资源丰富，土地资源辽阔，主要种植小麦、玉米和向日葵，是内蒙古西部农业发展的主要区域，也是我国北方重要的粮油生产基地。灌溉方式以传统漫灌为主，资源浪费严重。现有农业生产效率改善多针对传统蓝水资源，对机会成本和环境影响较小的绿水资源重视不足。绿水资源的合理利用将减少蓝水用量，缓解现有水资源压力，同时节约的蓝水资源可用于其他非农业生产活动，促进灌区整体可持续发展^[20]。

1.2 研究方法

根据 DEA 的评价原理和研究目的，本文首先将农业生产各投入产出指标代入 CCR 模型（式（3）^[21-22]）和 BCC 模型（式（5）^[21-22]），以待评价 DMU 效率为目标函数，所有 DMU 效率为约束条件，通过调整各投入产出项权重系数，获得不同的投入产出组合，在所有 DMU 效率不大于 1 前提下，遵循待评价 DMU 效率最大化原则^[14]，最终确定灌区 5 个区（县、旗）2000 - 2008 年，共 45 个 DMU 的农业生产综合效率 θ ，纯技术效率 δ 和规模效率 γ 。（从投入角度，综合效率是获得当前产出水平的理想最小投入和实际投入的比率，从产出角度，综合效率是当前投入水平下，实际产出和可获得理想最大产出的比率，它可以进一步分解为纯技术效率和规模效率^[14,18,22]。纯技术效率指的是生产领域中技术更新速度的快慢和技术运用的有效程度^[14,18,22]，农业生产领域涉及节水技术、耕作技术等。规模效率衡量的是生产规模大小的有效程度，即生产规模与投入产出要素的协调程度^[14,18,22]，在农业生产中需要考虑作物种植面积、水资源投入等多方面内容。）之后根据非 DEA 有效 DMU 在相对有效平面上的投影结果（式（4）^[21-22]），确定灌区各农业投入要素的调整量和调整幅度。

第 1 个 DEA 模型称作 CCR 模型，由于其在避

免主观因素、简化运算和减少误差等方面有着不可低估的优越性，在过去的几十年得到了广泛的发展和运用。假设存在 n 个 DMU $D_j = 1, 2, \dots, n$ 。结合研究目的和生产系统特点，同时考虑数据可获得性，确定各投入、产出项^[21]。一般投入项为成本型指标，表示对“资源”的耗费，产出项为收益型指标，表示消耗了“资源”之后，获得的“成效”^[22-23]。同时，投入、产出项的个数应遵循 DEA 模型要求，二者之和小于 DMU 个数的 50%。假设最终确定每个 DMU 有 m 项投入、 s 项产出。对于待评价决策单元 D_k ，其综合效率 θ 可定义为

$$\theta = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \tag{1}$$

式中： x_{ik} 和 y_{rk} 分别为 D_k 的第 i 个投入量和第 r 个产出量； v_i 和 u_r 分别为 m 项投入和 s 项产出的非负权重，其数值根据以下优化模型确定：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max \quad \theta = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rk}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ik}} \\ \text{s.t.} \quad \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ u_r \geq 0, \quad r = 1, 2, \dots, s \\ v_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \tag{2}$$

该分式规划 CCR 模型可以转换为含有非阿基米德无穷小量的线性规划模型：

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left[\theta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \right] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, \quad r = 1, 2, \dots, s \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ s_i^-, s_r^+ \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, \dots, s \end{array} \right. \tag{3}$$

式中： θ 为被评价 D_k 的综合效率值； λ_j 为投入产出指标的权重系数； s_i^- ， s_r^+ 为松弛变量； ε 为非阿基米德无穷小量，一般取 10^{-6} ； x_{ij} ， y_{rj} 为 D_j 中第 i 个投入量和第 r 个产出量； x_{ik} ， y_{rk} 为 D_k 中第 i 个投入量和第 r 个产出量。该模型是用来评价 DMU 总体效率的，其最优解为 $(\hat{\theta}, \hat{\lambda}, \hat{s}^-, \hat{s}^+)$ ，有效性判断为：

1) 当 $\hat{\theta}=1$ 且 $\hat{s}^- = \hat{s}^+ = 0$ 时, 表示 D_k 为 DEA 有效。

2) 当 $\hat{\theta}=1$ 且 $\hat{s}^- \neq 0$ 或 $\hat{s}^+ \neq 0$ 时, 表示 D_k 为弱 DEA 有效。

3) 当 $\hat{\theta}<1$ 时, 表示 D_k 为非 DEA 有效。

松弛变量是表征决策单元各投入产出项与其在相对有效平面上投影差异的重要指标。若 D_k 为非 DEA 有效, 可以通过下面的公式来改进, 令:

$$\begin{cases} x_0^* = \hat{\theta}x_0 - \hat{s}^- \\ y_0^* = y_0 + \hat{s}^+ \end{cases} \quad (4)$$

(x_0^*, y_0^*) 为 (x_0, y_0) 相对有效平面上的投影, 即为 DEA 有效。

CCR 模型可以用来衡量综合效率。综合效率小于 1, 即该 DMU 为非 DEA 有效时, 说明该 DMU 并未落在相对有效平面上, 现有投入产出组合并不是最优组合, 这可能是技术因素造成的, 也可能是规模因素造成的^[14,22]。在 CCR 模型的基础上增加了凸性假设 $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$, 并将综合效率 θ 改为纯技术效率 δ , 就得到 BCC 模型。

$$\begin{cases} \min \left[\delta - \varepsilon \left(\sum_{i=1}^m s_i^- + \sum_{r=1}^s s_r^+ \right) \right] \\ \text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \delta x_{ik}, \quad i=1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{rk}, \quad r=1, 2, \dots, s \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad j=1, 2, \dots, n \\ s_i^-, s_r^+ \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m, r=1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (5)$$

使用 BCC 模型可以评价各 DMU 的纯技术效率 δ 。 $\delta=1$, 纯技术有效; $\delta<1$, 纯技术无效。 BCC 模型下的 DEA 有效, 是纯技术有效, 但不一定是规模有效。 令 $\gamma=\theta/\delta$, 则 γ 为规模效率。 $\gamma=1$, 规模有效; $\gamma<1$, 则规模无效。 CCR 模型和 BCC 模型二者配合使用, 便可评价每个 DMU 的综合效率 θ , 纯技术效率 δ 和规模效率 γ 。

1.3 指标选择与数据来源

考虑灌区农业生产特点、突出水土资源的重要性和稀缺性^[24], 同时结合数据可获得性, 本文选取蓝水使用量 (亿 m^3)、绿水使用量 (亿 m^3)、盐渍化灌溉面积 (万 hm^2)、非盐渍化灌溉面积 (万 hm^2) 及农业人口数量 (万人) 作为农业生产效率评价的投入指标。 考虑河套灌区种植结构的时空差异, 将小麦产量 (万 t)、玉米产量 (万 t)、其他

粮食作物产量 (万 t)、油葵产量 (万 t) 和其他经济作物产量 (万 t) 作为产出指标。 在灌区农业生产效率分析过程中, 投入指标 5 项, 产出指标 5 项, 投入项个数+产出项个数 < DMU 个数/2, 满足 DEA 分析要求。

绿水使用量为有效降水与耕地面积的乘积, 各地区的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^[25]计算:

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P)/4.17 & P < 83 \\ 41.7 + 0.1P & P \geq 83 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_e 为旬有效降水量, mm; P 为旬降水量, mm。

河套灌区各区 (县、旗) 的蓝水使用量、盐渍化及非盐渍化灌溉面积等数据来自《内蒙古河套灌区供排水运行管理资料汇编》和《巴彦淖尔市水利统计资料汇编》, 农业人口及各作物产量数据来自《巴彦淖尔统计年鉴》。 灌区各区 (县、旗) 的降水量来自中国气象科学数据共享服务网^[26]。

2 结果与分析

2.1 灌区农业生产相对效率 (综合效率、纯技术效率和规模效率)

选择投入主导型 CCR 模型对所收集的数据进行计算, 得到河套灌区 5 个区 (县、旗) 2000 - 2008 年的农业生产综合效率 (表 1)。 结合 BCC 模型, 将综合效率进一步分解为纯技术效率和规模效率, 计算结果见表 2。

表 1 2000 - 2008 年河套灌区各区 (县、旗) 农业生产综合效率

年份 Year	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	1.000	0.883	1.000	0.772	0.897
2001	1.000	0.910	0.899	0.827	0.764
2002	0.922	0.713	0.744	0.756	0.679
2003	0.975	0.785	0.956	0.794	0.712
2004	0.939	1.000	0.949	1.000	0.848
2005	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2006	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2007	1.000	0.968	1.000	1.000	1.000
2008	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均 Average	0.982	0.918	0.950	0.905	0.878

分析综合效率、纯技术效率和规模效率发现, 约 50% 的 DMU (24 个) 表现为 DEA 有效。 说明这些 DMU 蓝水、绿水、盐渍化灌溉面积、非盐渍化灌溉面积和农业人口 5 种投入得到了充分利用和合理配置, 同时获得了较好的产出。 而其他 DMU

则需要通过减少投入或者增加产出来提高农业生产相对效率。

从表 1 可看出,灌区各区(县、旗)2005 - 2008 年的农业生产综合效率要明显高于之前年份 ($\alpha=0.05$)。其中前旗 2005 - 2008 年的平均农业生产综合效率较 2000 - 2004 年均值提高了 0.220,其他地区分别提高了 0.170(五原),0.134(杭后),0.090(临河)和 0.033(磴口)。这主要是由于近年灌区大力发展现代农业,加强对农业生产系统投入资源的管理和利用,农业生产水平不断提高。灌区 5 个区(县、旗)的综合效率差异不明显 ($\alpha=0.05$),多年平均值除前旗稍低外(0.878),其他地区均大于 0.9。

在 45 个 DMU 中,纯技术有效和规模有效的分

别为 32 和 24 个,占 DMU 总数的 71.11%和 53.33%(表 2)。近年灌区各区(县、旗)的纯技术效率和规模效率表现出不同程度的增大趋势,前者主要是由于灌区加大农业科技投入,重视农业先进技术推广,后者则与灌区不断调整农业生产规模,优化投入产出结构密不可分。杭后和五原的多年平均纯技术效率要稍低于其他地区,前旗的规模效率要低于其他 4 个地区。说明杭后和五原农业生产效率的提高主要取决于这些地区能否有效利用生产技术,实现产出最大化,而生产规模的合理性是影响前旗农业生产效率的主要因素。进一步分析各 DMU 所处的规模报酬区间发现,前旗 2005 - 2008 年生产规模相对合理,其余年份均处于规模报酬递增区间,应该扩大规模以提高农业生产效率。

表 2 2000 - 2008 年河套灌区各区(县、旗)农业生产纯技术效率和规模效率

Table 2 Pure technology efficiency and scale efficiency for agricultural production of counties in Hetao irrigation during 2000 - 2008

年份 Year	纯技术效率 Pure technology efficiency					规模效率 Scale efficiency				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	1.000	0.891	1.000	0.780	1.000	1.000	0.991	1.000	0.990	0.897
2001	1.000	0.911	1.000	0.846	0.935	1.000	0.999	0.899	0.977	0.817
2002	0.959	0.723	0.755	0.782	0.917	0.961	0.986	0.985	0.967	0.741
2003	1.000	0.792	1.000	0.820	1.000	0.975	0.992	0.956	0.968	0.712
2004	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.939	1.000	0.949	1.000	0.848
2005	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2006	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2007	1.000	0.998	1.000	1.000	1.000	1.000	0.969	1.000	1.000	1.000
2008	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
平均 Average	0.995	0.924	0.973	0.914	0.984	0.986	0.993	0.977	0.989	0.891

注: ↑ 表示规模报酬递增; → 表示规模报酬不变; ↓ 表示规模报酬递减。

Note: ↑ means the DMU is operating in an area of increasing returns to scale; → means the DMU is operating in an area of constant returns to scale; ↓ means the DMU is operating in an area of decreasing returns to scale.

2.2 灌区农业生产效率优化

对生产效率为非 DEA 有效的 DMU 在相对有效平面上进行投影,得到各投入项的调整量。根据调整量和各投入项的原始值,得到其调整幅度。表 3 ~ 7

分别列出了蓝水使用量、绿水使用量、盐渍化灌溉面积、非盐渍化灌溉面积和农业人口数量的调整量和调整幅度。

表 3 非 DEA 有效的 DMU 蓝水使用量的调整量和调整幅度

Table 3 Changing value and changing proportion for blue water volume of DEA-ineffective DMU

年份 Year	调整量 Changing value/(10 ⁸ m ³)					调整幅度 Changing proportion/%				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	-	2.17	-	3.38	0.56	-	16.58	-	23.46	10.29
2001	-	1.12	1.11	2.38	1.09	-	8.98	12.75	17.35	23.70
2002	0.49	3.57	3.29	3.43	1.52	7.81	28.71	35.29	24.38	32.15
2003	0.12	2.22	0.33	2.36	0.96	2.55	21.45	4.39	20.61	28.78
2004	0.32	-	0.50	-	0.66	6.04	-	6.19	-	15.18
2007	-	0.36	-	-	-	-	3.24	-	-	-
平均 Average	0.31	1.89	1.31	2.89	0.96	5.47	15.79	14.66	21.45	22.02

注:“-”说明该 DMU 为 DEA 有效,因此无调整量和调整幅度。

Note:“-” means DMU is DEA-effective, consequently, the values for changing value and changing proportion are zero.

表 3 显示, 21 个非 DEA 有效的 DMU 中, 有 12 个的蓝水可节约量超过了 1 亿 m³, 其中最大的

为杭后 2002 年 (3.57 亿 m^3)。磴口在 2003 年的蓝水调整量在 21 个 DMU 中最小, 为 0.12 亿 m^3 , 仅为最大值的 3.41%。相对原始投入量, 各 DMU 的蓝水使用量调整幅度差异较大, 2/3 DMU 调整幅度均大于 10%。这与河套灌区普遍存在的大水漫灌现象及较低的灌溉水资源利用效率有关。前旗的多年平均灌溉水利用系数为 0.34, 明显低于灌区平均水平 0.41, 使得其多年平均蓝水调整幅度 (22.02%) 显著高于磴口、杭后和临河 ($\alpha=0.05$)。五原为灌区最大的蓝水资源使用地区, 其蓝水使用量约占灌区总量的 1/3。大量蓝水资源供应前提下, 灌溉设施保障不足, 资源浪费现象较其他地区更为突出,

平均蓝水调整幅度高达 21.45%。

表 4 显示, 为实现 DEA 有效, 磴口 2004 年的绿水使用量需减少 0.01 亿 m^3 , 而五原在 2002 年绿水资源的可节约量高达 0.93 亿 m^3 。除了降雨量差异造成的绿水使用量不同外, 这也与绿水资源利用效率有关, 五原 2002 年和前旗 2003 年超过 50% 的绿水资源都没有被合理利用, 而杭后 2007 年绿水资源的调整幅度仅为 3.12%。绿水是作物生产过程中利用的有效降水, 不同地区多年平均绿水利用存在 8% ~ 40% 的冗余, 可能与种植结构、作物单产等与农业产出不匹配, 绿水投入转化为产出能力有限, 降低了绿水资源的利用效率有关。

表 4 非 DEA 有效的 DMU 绿水使用量的调整量和调整幅度

Table 4 Changing value and changing proportion for green water volume of DEA-ineffective DMU

年份 Year	调整量 Changing value/($10^8 m^3$)					调整幅度 Changing proportion/%				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	-	0.07	-	0.56	0.07	-	12.16	-	48.53	10.86
2001	-	0.05	0.10	0.29	0.50	-	9.26	10.40	24.06	41.97
2002	0.04	0.24	0.41	0.93	0.37	12.62	28.96	27.64	51.25	31.89
2003	0.02	0.20	0.05	0.71	0.76	6.97	21.79	4.46	33.42	51.57
2004	0.01	-	0.05	-	0.30	6.44	-	4.72	-	24.66
2007	-	0.03	-	-	-	-	3.12	-	-	-
平均 Average	0.02	0.12	0.15	0.62	0.40	8.68	15.06	11.81	39.31	32.19

注: “-” 说明该 DMU 为 DEA 有效, 因此无调整量和调整幅度。

Note: “-” means DMU is DEA-effective, consequently, the values for changing value and changing proportion are zero.

从表 5 可看出, 非 DEA 有效 DMU 的盐渍化灌溉面积调整量的变化区间为 [0, 1.00] 万 hm^2 。其中临河 2002 和 2004 年, 前旗 2000 - 2003 年的盐渍化灌溉面积可节约量在 0.5 万 hm^2 以上。与盐渍化灌溉面积的原始投入量相比较, 前旗地区的平均盐渍化灌溉面积调整幅度大于 30%, 说明在得到

当前产出的条件下, 如果该地区的农业生产效率达到 DEA 有效水平, 可以节约超过 1/3 的盐渍化灌溉面积。如此高比例的盐渍化灌溉面积冗余, 主要是由于该地区农业生产管理模式相对粗放, 土地资源管理和有效利用不足, 单位土地面积产出能力较低。

表 5 非 DEA 有效的 DMU 盐渍化灌溉面积的调整量和调整幅度

Table 5 Changing value and changing proportion for irrigation areas with salinization problem of DEA-ineffective DMU

年份 Year	调整量 Changing value/($10^4 hm^2$)					调整幅度 Changing proportion/%				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	-	0.16	-	0.26	0.87	-	11.71	-	22.80	38.93
2001	-	0.12	0.33	0.20	0.63	-	9.00	10.13	17.34	28.05
2002	0.01	0.40	0.84	0.28	0.72	7.90	28.75	25.63	24.39	32.09
2003	0	0.30	0.40	0.24	1.00	2.59	21.47	12.08	20.61	44.67
2004	0.01	-	0.72	-	0.43	6.16	-	21.77	-	19.34
2007	-	0.04	-	-	-	-	3.22	-	-	-
平均 Average	0.01	0.20	0.57	0.25	0.73	5.55	14.83	17.40	21.29	32.62

注: “-” 说明该 DMU 为 DEA 有效, 因此无调整量和调整幅度。

Note: “-” means DMU is DEA-effective, consequently, the values for changing value and changing proportion are zero.

表 6 显示，为实现 DEA 有效，五原在 2003 年的非盐渍化灌溉面积需要减少 6.09 万 hm²，而杭后在 2007 年的非盐渍化灌溉面积调整量仅为 0.37 万 hm²。与非盐渍化灌溉面积的原始投入量相比较，

约 50% 的非 DEA 有效 DMU 的非盐渍化灌溉面积调整幅度大于 20%，其中前旗在 2003 年，调整幅度高达 43.35%。如此高比例的非盐渍化灌溉面积冗余，主要与土地管理重视不足，资源利用效率低有关。

表 6 非 DEA 有效的 DMU 非盐渍化灌溉面积的调整量和调整幅度

Table 6 Changing value and changing proportion for irrigation areas without salinization problem of DEA-ineffective DMU

年份 Year	调整量 Changing value/(10 ⁴ hm ²)					调整幅度 Changing proportion/%				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	-	1.47	-	4.48	0.60	-	11.70	-	25.87	10.28
2001	-	1.96	0.85	3.00	1.86	-	15.24	10.14	17.32	32.67
2002	0.51	3.66	2.15	4.23	1.95	8.36	28.74	25.64	24.45	34.11
2003	1.17	4.07	1.20	6.09	2.21	20.73	33.17	14.30	35.90	43.35
2004	0.89	-	0.43	-	0.94	15.60	-	5.07	-	18.08
2007	-	0.37	-	-	-	-	3.21	-	-	-
平均 Average	0.86	2.31	1.16	4.45	1.51	14.90	18.41	13.79	25.89	27.70

注：“-”说明该 DMU 为 DEA 有效，因此无调整量和调整幅度。

Note: “-” means DMU is DEA-effective, consequently, the values for changing value and changing proportion are zero.

从表 7 可看出，为实现 DEA 有效，磴口 2002、2003 和 2004 年，临河 2003 和 2004 年农业人口需要减少的数量均小于 1 万人。而前旗在 2000 和 2003 年，农业人口的冗余数量均超过了 5 万人。随着产业部门间劳动力配置的不断优化，农业劳动力的生产效

率不断提高，近年灌区各地区的农业人口数量调整比例较之前年份有所降低。为实现 DEA 有效，前旗的农业人口平均需要减少 39.58%，高于其他地区，这主要是由于该地区产业结构相对单一，大量人口以农业生产为主，劳动力利用效率要低于其他区域。

表 7 非 DEA 有效的 DMU 农业人口数量的调整量和调整幅度

Table 7 Changing value and changing proportion for agricultural labor of DEA-ineffective DMU

年份 Year	调整量 Changing value/(10 ⁴ person)					调整幅度 Changing proportion/%				
	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi	磴口 Dengkou	杭后 Hanghou	临河 Linhe	五原 Wuyuan	前旗 Qianqi
2000	-	1.89	-	2.61	5.27	-	15.90	-	22.82	42.01
2001	-	1.73	1.59	2.34	4.78	-	14.36	10.11	19.46	38.48
2002	0.58	3.53	3.86	3.24	4.89	13.25	30.03	25.62	27.17	40.50
2003	0.81	3.73	0.63	3.90	6.00	20.36	32.38	4.43	32.93	51.20
2004	0.62	-	0.69	-	2.92	17.04	-	5.07	-	25.72
2007	-	1.27	-	-	-	-	11.35	-	-	-
平均 Average	0.67	2.43	1.69	3.02	4.77	16.88	20.80	11.31	25.59	39.58

注：“-”说明该 DMU 为 DEA 有效，因此无调整量和调整幅度。

Note: “-” means DMU is DEA-effective, consequently, the values for changing value and changing proportion are zero.

当前产出条件下，为实现农业生产 DEA 有效，非 DEA 有效 DMU 的 5 种资源平均调整幅度分别为 16.66% (蓝水资源)，22.23% (绿水资源)，19.46% (盐渍化灌溉面积)，20.66% (非盐渍化灌溉面积) 和 23.82% (农业人口)。农业人口的高调整比例反映了灌区产业结构调整的重要性，而水土资源的大幅冗余，显示了灌区水土资源投入存在一定的盲目性。这除了与灌区灌溉设施保障不足、土地资源管理重视不够有关外，还可能与灌区绿水资源的不确定性有关。河套灌区降雨年际变化大、变异系数高，

年内时空分布不均^[27]。为保证作物产量和经济收益，在绿水资源不确定条件下，当地农民一般会扩大灌溉面积、增加灌溉量，容易使得灌溉水和土地资源投入出现冗余，当实际绿水资源小于预期值时，农业产出减小，灌溉水资源和土地资源利用效率进一步降低。当绿水资源大于预期值时，易出现绿水资源利用程度不高，冗余比例进一步增加。相对蓝水资源，绿水资源的机会成本和环境影响都较小，但现阶段，绿水调控通常相对困难且效果不佳，水资源冗余比例的减少主要取决于蓝水资源能否

有效利用。种植结构调整是实现区域灌溉水资源高效利用的重要方式之一。未来河套灌区应统筹考虑社会发展、经济效益、生态环境保护等因素,大力发展低耗水高产出型作物,建立节水高效型种植结构,从而减少水土资源冗余比例,优化现有的农业投入产出结构,提高农业生产效率。

3 结 论

结合灌区农业生产特点,突出水土资源的重要性,以蓝水使用量、绿水使用量、盐渍化灌溉面积、非盐渍化灌溉面积及农业人口为投入指标,小麦、玉米、其他粮食作物、油葵和其他油料作物产量为产出指标,基于数据包络分析评价了河套灌区 5 个区(县、旗)2000 - 2008 年的农业生产相对效率,同时对无效决策单元在相对有效平面上进行投影,得到各投入项的调整量和调整幅度,为灌区农业生产调整和资源合理配置提供建议。

45 个 DMU 中 24 个表现为 DEA 有效。灌区各区(县、旗)2005 - 2008 年的农业生产综合效率、纯技术效率和规模效率明显高于之前年份($\alpha=0.05$)。综合效率区域差异不显著($\alpha=0.05$),多年平均值除前旗稍低外(0.878),其他地区均大于 0.9。杭后和五原农业生产效率的提高主要取决于这些地区能否有效利用生产技术,实现产出最大化,而生产规模的合理性是影响前旗农业生产效率的主要因素。

现有农业生产条件下,灌区各投入资源均存在不同程度的冗余现象。根据投影结果,21 个非 DEA 有效 DMU 的 5 种资源平均调整幅度分别为 16.66% (蓝水资源), 22.23% (绿水资源), 19.46% (盐渍化灌溉面积), 20.66% (非盐渍化灌溉面积)和 23.82% (农业人口)。河套各地区应该调整产业结构,改善灌溉设施,加强土地管理,以实现资源优化配置。此外,现有绿水资源利用情况下,节水高效型种植结构的建立,也将有利于减少灌溉水资源冗余,促进农业生产效率的提高。

[参 考 文 献]

- [1] 游和远,吴次芳,李宁,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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 309 - 315. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵晨,王远,谷学明,等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1636 -

1644.

Zhao Chen, Wang Yuan, Gu Xueming, et al. Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1636 - 1644. (in Chinese with English abstract)

- [3] 张宗毅,曹光乔. “十五”期间中国农机化效率及其地区差异[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 284 - 289.
Zhang Zongyi, Cao Guangqiao. Chinese agricultural mechanization efficiency and its regional differences during the Tenth Five-Year Plan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 284 - 289. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈云坪,马伟,王秀,等. 基于 PLS 的土壤养分与小麦产量空间相关关系研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 159 - 164.
Chen Yunping, Ma Wei, Wang Xiu, et al. Relationship between Soil Nutrient and Wheat Yield Based on PLS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 159 - 164. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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.
- [6] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 1 - 7.
Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Analysis on temporal and spatial differences of water productivity in irrigation districts in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 许迪,龚时宏,李益农,等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. 水利学报, 2010, 41(6): 631 - 639.
Xu Di, Gong Shihong, Li Yinong, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631 - 639. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈皓锐,黄介生,伍靖伟,等. 灌溉用水效率尺度效应研究评述[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 872 - 880.
Chen Haorui, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Review of scale effect on the irrigation water use efficiency[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 872 - 880. (in Chinese with English abstract)
- [9] 谢先红,崔远来. 灌溉水利用效率随尺度变化规律分布式模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 681 - 689.
Xie Xianhong, Cui Yuanlai. Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different

- spatial scales[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 681 - 689. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 637 - 643.
Sun Caizhi, Chen Lixin, Liu Yuyu. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 637 - 643. (in Chinese with English abstract)
- [12] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 186 - 203.
- [13] Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(4): 887 - 894.
- [14] Charnes A, Cooper W W, Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429 - 444.
- [15] 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 with English abstract)
- [16] 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*, 2011, 31(11): 2131 - 2139.
Xing Jun. Non-parametric approach for evaluating alliance efficiency based on sample units[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2011, 31(11): 2131 - 2139. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 with English abstract)
- [18] 秦钟, 王建武, 章家恩, 等. 广东省农业循环经济发展的 DEA 分析与有效性评价[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(6): 904 - 913.
Qin Zhong, Wang Jianwu, Zhang Jiaen et al. Data envelopment analysis and efficiency evaluation on development of agricultural circular economy in guangdong[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(6): 904 - 913. (in Chinese with English abstract)
- [19] 徐丽君, 杨敏丽. 基于 Malmquist 指数法的水稻生产效率实证分析[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(Z1): 169 - 174.
Xu Lijun, Yang Minli. Analysis on paddy rice production efficiency based on malmquist index[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Z1): 169 - 174. (in Chinese with English abstract)
- [20] Sun S K, Wu P T, Wang Y B, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 444(3): 498 - 507.
- [21] 马占新, 马生昀, 包斯琴高娃. 数据包络分析及其应用案例[M]. 北京: 科学出版社, 2013:11 - 13.
Ma Zhanxin, Ma Shengyun, Bao Siqingaowa. Data Envelopment Analysis and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013:11 - 13.
- [22] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 151 - 154.
Wei Quanling. Data Envelopment Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2004: 151 - 154.
- [23] 高亮, 王继军, 梅花, 等. 基于 DEA 的安塞县商品型生态农业系统耦合效率分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1): 210 - 214.
Gao Liang, Wang Jijun, Mei Hua, et al. Analysis of the coupling efficiency of the ecological agriculture with commodity economy system in Ansai county based on DEA[J]. *Research of soil and water conservation*, 2013, 20(1): 210 - 214. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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 optimal allocation methods of water and land resources at the watershed scale[J]. *Resources Science*, 2007, 29(2): 193. (in Chinese with English abstract)
- [25] Petra D, Stefan S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 1037 - 1048.
- [26] 中国气象科学数据共享服务网 [EB/OL]. <http://cdc.cma.gov.cn>
- [27] 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 等. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(5): 825 - 831.
Hao Fanghua, Ouyang Wei, Yue Yong, et al. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 825 - 831.

Assessment of agricultural productive efficiency for Hetao Irrigation District based on data envelopment analysis

Liu Jing^{1,2,3}, Wu Pute^{1,2,3}, Wang Yubao², Zhao Xining^{2,3}, Cao Xinchun^{2,3}, Sun Shikun^{2,3}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;*

2. *Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Yangling 712100, China;*

3. *National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling 712100, China)*

Abstract: The assessment of agricultural production efficiency of Hetao irrigation district of Inner Mongolia, an important agricultural production area of China, is of great significance in guaranteeing national food security. Much attention has been paid to blue water (surface and groundwater), while the use of green water (rainwater insofar as it does not become run-off) is rarely included in the agricultural production analysis. Compared to blue water, the cost of green water is less, but its environmental impact is concerned. Consequently, this paper analyzed agricultural productive efficiency of five counties in the Hetao irrigation district during 2000-2008 using data envelopment analysis (DEA) by considering blue water, green water, and other indicators. First, the technology efficiency, pure technology efficiency, and scale efficiency were analyzed combining CCR-I and BCC-I models and then some suggestions about how to adjust the amount of input resources were provided for ineffective decision making units (DMU). Results show that: among the 45 DMUs, there were 24 DMUs that were DEA-effective. The values of technology efficiency, pure technology efficiency, and scale efficiency of five counties during the period of 2005-2008 were greater than those during the period of 2000-2004. The differences of technology efficiency in different counties were not significant and the value for Qianqi (0.878) was smaller than the other four counties, which were larger than 0.9. The agricultural productivity efficiency of Qianqi was mainly influenced by production scale and it was the application of technology for Hanghou and Wuyuan. In order to be DEA-effective, the inputs of 21 DMUs should be decreased and the decreasing proportions were 16.66% (blue water), 22.23% (green water), 19.46% (irrigation areas with salinization problem), 20.66% (irrigation areas without salinization problem) and 23.82% (agricultural population). The use of different resources was inefficient and would have an adverse effect on the development of the irrigation district. To some extent, the redundancy of water and land resources in agricultural production may be related to the characteristics of green water. The rainfall in the Hetao irrigation district was uneven both temporally and spatially. Local farmers would increase the use of blue water and land resources when they were not sure about the amount of green water that the crops could use to achieve a better harvest. As a result, the use efficiency of blue water and land resources would decrease when the grain production was lower than the expectation value, which was mainly caused by the litter rainfall. The use efficiency of green water would decrease when the expectation green water was larger than actual value. In the future, the rational distribution of labor among agricultural production and other industries would be helpful in achieving a more effective agricultural production pattern for the Hetao irrigation district. Besides, the improvements of irrigation frustration and land resources management were also needed for the Hetao irrigation district. Shift of cropping pattern to crops with lower irrigation water input and higher output would also be suggested considering the difficulty in decreasing the redundancy for green water. This study could provide some suggestions for the efficient agricultural production in the Hetao irrigation district and the improvement of the agricultural production system in other irrigation districts.

Key words: irrigation; water; data envelopment analysis; agricultural productive efficiency; Hetao irrigation district