

我国粮食主产区农业水资源利用效率评价

王震, 吴颖超, 张娜娜, 闵兴华, 曹磊, 赵言文

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 研究我国粮食主产区 13 个省份 2001—2011 年农业水资源利用效率, 旨在明确各省份农业水资源利用效率提升的潜力。[方法] 采用 DEA(数据包络分析)交叉评价模型。[结果] (1) 2001—2011 年我国粮食主产区农业水资源利用效率普遍偏低, 且各省份之间的差异较为显著; (2) 吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江省(区)属于“低投入低产出”类型, 四川、河南、安徽、江西、河北和江苏省属于“高投入高产出”类型; (3) 我国粮食主产区农业水资源利用效率整体处于“低投入低产出”阶段, 农业水资源利用效率具有很大的提升空间。[结论] DEA 交叉效率评价模型实现了对所有决策单元效率的完全排序和效率评价; 虚拟决策单元的引入明确了研究区域内各单元农业水资源利用的提升潜力和改进方向。

关键词: 粮食主产区; 农业水资源; DEA; 交叉评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0292-05

中图分类号: X821

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.055

Evaluation on Agricultural Water Utilization Efficiency in Major Grain Producing Areas

WANG Zhen, WU Yingchao, ZHANG Nana, MIN Xinghua, CAO Lei, ZHAO Yanwen

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] Studying the agricultural water utilization efficiency of 13 provinces in major grain producing areas from 2001 to 2011 in order to further clarify the improvement potential of agricultural water utilization efficiency. [Methods] By using DEA(data envelopment analysis) cross-evaluation model, the article took 13 provinces in major grain producing areas in China as the objects. [Results] (1) The efficiencies of agricultural water utilization were generally low from 2001 to 2011, and had significant differences among these provinces; (2) Provinces or autonomous regions of Inner Mongolia, Hubei, Jilin, Hu'nan, Shandong, Liaoning and Heilongjiang belonged to “low input and low output” type; provinces of Sichuan, He'nan, Anhui, Jiangxi, Hebei and Jiangsu belonged to the “high input and high output” type. (3) The efficiency of agricultural water utilization was overall in the “low input and low output” stage and has great improvement potentiality. [Conclusion] The DEA cross-evaluation performed well on the evaluation of utilization efficiency of all decision-making units; The potential utilization increments and ways of improvement were clarified by introducing virtual decision-making units.

Keywords: major grain producing areas; agricultural water resources; DEA; cross-evaluation model

2011 年我国水资源总量为 $2.30 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中地表水 $2.22 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 地下水 $7.20 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。水资源分布特点表现为总量并不丰富, 人均占有量更低, 我国水资源总量居世界第 6 位, 人均占有量为 2 240 m^3 , 约为世界人均的 1/4, 在世界银行连续统计的 153 个国家中居第 88 位; 空间分布不均, 水土资源配

置错位, 由于南北气候上的差异, 我国降水量从东南沿海向西北内陆依次递减, 长江流域及其以南地区国土面积只占全国的 36.5%, 其水资源量占全国的 81%, 淮河流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%, 其水资源量仅占全国水资源总量的 19%; 年内年际分配不匀, 旱涝灾害频繁, 大部分地区年内连

收稿日期: 2014-03-02

修回日期: 2014-03-20

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

第一作者: 王震(1988—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为生态农业、水土保持、环境规划与环境影响评价。E-mail: wangzhen200715@163.com。

通信作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 教授, 博士生导师, 主要从事环境生态学、生态农业、水土保持。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

续 4 个月降水量占全年的 70% 以上, 连续丰水或连续枯水较为常见; 农业用水短缺, 浪费严重, 农田灌溉水的利用效率只有 30%~40%, 每生产 1 g 粮食要补充水 1.23 m³, 比美国、加拿大高出 1.76 倍。农业是我国最大的用水户, 占总用水量的 65% 左右, 我国粮食主产区属农业发达地区, 农业是支柱产业, 但农业单位产值耗水量很高, 属典型资源拉动农业产业发展地区。随着工业和城市化进程的发展, 工农业用水竞争加剧, 可供利用的农业用水量将进一步降低, 加大了农业水资源不足的矛盾。在农业和工业、城市用水的竞争中, 农业用水显然处于不利地位, 农业用水被挤占将不可避免。从工业化国家的发展规律来看, 农业用水量所占比例一般会随着经济发展逐步减少, 农业用水将面临更趋严峻的形势。因此如何解决农业灌溉用水问题, 已成为当今人们面临的迫切任务。

水资源是农业发展的基础资源, 提高水资源利用效率已成为摆在农业生产及粮食安全面前亟待解决的问题。很多学者^[1-7]采取不同研究方法从不同层面、不同尺度研究了水资源利用效率, 研究方法包括神经网络法、遗传投影寻踪法、GIS 软件、比值分析法、包络分析法(DEA)、生产函数法及层次分析法等。

考虑到既往的评价方法都有其局限性, 本研究在

$$\begin{cases} \min Y_k^T \\ s. t. Y_j^T u \leq X_j^T v \quad (1 \leq j \leq n, Y_i^T u = E_{ii} X_i^T v, X_i^T v = 1, u \geq 0, v \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

利用公式(1)的最优解 u_{ik}^* 和 v_{ik}^* , 求出交叉评价矩阵: $E_{ik} = Y_k^T u_{ik}^*$ 由交叉评价价值构成交叉评价矩阵:

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{m1} & E_{m1} & \cdots & E_{mn} \end{bmatrix}$$

式中主对角线元素 E_{ii} 为自我价值, 非对角线元素 $E_{ik} (i \neq k)$ 为交叉评价价值。E 的第 i 列是诸决策单元对 DUM_i 的评价价值, 这些值越大, 说明 DUM_i 越优。因此, 将 E 的第 i 列的平均值 e_i 作为衡量 DUM_i 优劣的一项指标, e_i 越大说明 DUM_i 越优, 从而有效地实现传统 DEA 有效 DUM 的区分问题。

1.2 指标选取

农业水资源利用指标体系是由若干相互联系、互相补充、具有层次性和结构性的指标组成, 是衡量农业水资源高效利用各截面及其指标的有机集合, 必须能够综合反映农业水资源的利用水平^[9]。指标选取遵循科学性、系统性、代表性和数据可获取性等基本原则^[9-10]。本研究在参考相关文献的基础上^[1,9,11], 以我国粮食主产区 13 个省份为研究对象, 综合考虑农业水资源利用资金、人才、资源和技术等各方面投

综合考虑传统 DEA 评价模型优势的基础上, 引入 DEA 交叉评价模型, 克服传统 DEA 无法区分有效单元之间优劣的不足, 以期能够较好地实现对所有决策单元效率的完全排序和效率评价。并运用该模型, 对我国粮食主产区(包括河北、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、江苏、安徽、江西、山东、河南、湖北、湖南和四川等省区)13 个省份 2001—2011 年期间农业水资源利用效率进行评价, 对各省区农业水资源利用情况对比分析, 及时发现差距和问题, 并引入 4 类虚拟决策单元, 明确了我国粮食主产区各省份农业水资源利用目前所处阶段以及未来发展潜力和改进方向, 研究结果对于提高各省份农业水资源利用效率、提高农业竞争力和可持续发展能力具有重要意义。

1 研究方法

1.1 DEA 交叉评价模型

考虑到实际问题中, 采用传统 DEA 模型分析方法较多 DMU 都能取到最大效率值 1, 无法对 DMU 的优劣进行有效区分。为此, 引入对抗性交叉评价(aggressive cross-evaluation)机制^[8]:

首先, 给定 $i \in \{1, 2, \dots, n\}, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ 求解线性规划:

入, 根据《中国水资源公报》《中国统计年鉴》以及各省份水资源公报和统计年鉴, 选取投入指标主要包括: 农作物播种面积、农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量反映自然资源投入, 农业固定资产投资反映资本投入, 农业在岗职工人数反映劳动力投入, 化肥施用量、有效灌溉面积、节水灌溉面积反映技术要素投入。产出指标选择农业生产总值、农村居民人均农业收入、农作物产量综合反映物质成果及非物质成果(表 1)。

表 1 农业水资源效率评价指标体系

指标类型	指标构成	指标性质及含义
投入指标	农作物播种面积	自然资源投入
	农田灌溉用水量	
	农田灌溉耗水量	
	农业固定资产投资	资本投入
	农业在岗职工人数	劳动力投入
	农业机械总动力	技术投入
化肥施用量		
有效灌溉面积		
产出指标	节水灌溉面积	经济总量
	农业生产总值	
	农村居民人均农业收入	
	农作物产量	物质总量

1.3 数据来源

以我国粮食主产区 13 个省份为研究对象,以 2001—2011 年历年《中国水资源公报》《中国统计年鉴》以及各省历年水资源公报和统计年鉴为基础数据。基于 DEA 交叉模型对我国粮食主产区 2001—2011 年农业水资源利用效率计算和分析,以便对粮食主产区农业水资源利用效率进行正确的评价,为农业水资源利用效率的提高提供有力的数据参考。

2 结果与分析

2.1 农业水资源利用概况

通过对我国粮食主产区 13 个省份 2001—2011 年农业水资源投入要素统计分析得出,近年来我国粮食主产区不断加大农业水资源利用资金、资源以及技术等方面投资,大力推进农业现代化建设进程,积极开发耕地资源,不断引进先进农业灌溉、生产推广技

术,农业固定资产投资、农作物播种面积、农业机械总动力、有效灌溉面积、化肥施用量、节水灌溉面积呈逐年递增趋势。

随着农业机械化、产业化体系的逐渐完善,农业从业人员冗余问题日益突出,农业在岗职工数量得到合理优化裁剪,呈现下降趋势。但随着农作物播种面积的增加农田灌溉用水量、农田灌溉耗水量基本保持不变,这就使得农田灌溉出现一定的用水短缺现象,特别是内蒙古、河南、湖北和湖南地区农田灌溉用水、耗水已成下降趋势的省区,农业用水短缺现象尤为严重。解决农业灌溉用水问题、提高农业水资源利用效率,已成为当今人们面临的迫切任务。

2.2 农业水资源利用效率自我评价

利用传统 DEA 自我评价模型^[12-14],运用 Matlab 软件对我国粮食主产区 13 个省份 2001—2011 年农业水资源利用效率进行自我评价(表 2)。

表 2 我国粮食主产区农业水资源利用效率自我评价

省区	水资源利用效率											
	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	均值
吉林	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
内蒙古	0.969	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	0.974	1.000	0.950	0.919	0.981	0.981
湖北	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
湖南	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
山东	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
辽宁	1.000	0.992	0.935	0.886	0.937	0.973	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.975
黑龙江	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
四川	0.991	0.950	1.000	0.929	0.976	0.997	1.000	1.000	0.990	1.000	0.937	0.979
河南	0.855	0.998	1.000	0.861	0.969	0.941	1.000	0.968	0.970	1.000	1.000	0.960
安徽	1.000	1.000	1.000	1.000	0.944	0.947	0.959	1.000	0.937	0.948	0.927	0.969
江西	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
河北	0.887	1.000	1.000	0.889	1.000	0.993	1.000	1.000	0.976	0.844	0.736	0.939
江苏	1.000	1.000	0.836	1.000	1.000	0.984	0.924	0.820	0.858	0.798	0.890	0.919
年度均值	0.977	0.995	0.982	0.966	0.987	0.987	0.989	0.984	0.975	0.962	0.959	0.979

从表 2 可以看出,2001—2011 年我国粮食主产区农业水资源利用效率总体保持相对平稳的发展态势。2001—2011 年农业水资源利用效率 DEA 有效的省份数目分别为 8, 10, 11, 8, 9, 7, 10, 11, 7, 9, 8。其中,吉林、湖北、湖南、山东、黑龙江和江西省始终处于 DEA 有效,说明其农业水资源投入产出处于合理状态;其他省份部分年份保持 DEA 有效,部分年份处于 DEA 无效;这些省份应当借鉴吉林、湖北、湖南等省份农业水资源利用经验,优化农业水资源利用结构,保持合理投入产出水平。

$$DMU_A = \{ \max X_{1j}, \max X_{2j}, \dots, \max X_{mj}, \min Y_{1j}, \min Y_{2j}, \dots, \min Y_{sj} \}$$

$$DMU_B = \{ \min X_{1j}, \min X_{2j}, \dots, \min X_{mj}, \max Y_{1j}, \max Y_{2j}, \dots, \max Y_{sj} \}$$

$$DMU_C = \{ \max X_{1j}, \max X_{2j}, \dots, \max X_{mj}, \max Y_{1j}, \max Y_{2j}, \dots, \max Y_{sj} \}$$

$$DMU_D = \{ \min X_{1j}, \min X_{2j}, \dots, \min X_{mj}, \min Y_{1j}, \min Y_{2j}, \dots, \min Y_{sj} \}$$

2.3 农业水资源利用效率交叉评价

通过表 2 可以初步了解我国粮食主产区农业水资源利用效率的基本情况,但是,传统 DEA 方法对于 DEA 有效的 DMU 之间如何区分和各 DMU 农业水资源利用效率提高的潜力空间等问题均无法做出进一步回答。为此,采用交叉评价机制,以实现 DEA 有效的 DMU 之间的排序,并引入虚拟 DMU,以明确各 DMU 提升的空间。虚拟 DMU 的投入产出构建方法为:

式中: $j=1,2,\dots,n$; $\max X_{mj}, \min X_{mj}$ ——第 m 个投入变量中的最大值和最小值; $\max Y_{sj}, \min Y_{sj}$ ——第 s 个产出变量中的最大值和最小值; DMU_B ——理想决策单元; DMU_A ——高投入低产出类决策单元; DMU_C ——高投入高产出类决策单元; DMU_D ——低投入低产出类决策单元。虚拟决策单元的增加则给诸决策单元提供了理想的参照物,虽然虚拟决策单元是理想化的决策单元,它的映射不具有实际指导意义,但是指明了各决策单元农业水资源利用效率提升的潜力。

根据交叉评价模型的定义,运用 Matlab 软件对 2001—2011 年我国粮食主产区 13 个省份及 4 个虚拟 DMU 的农业水资源利用效率进行交叉评价。同时,以 4 个虚拟决策单元为参照物,采用 SPSS 软件对交叉评价的结果进行聚类分析。

从总体特征来看,交叉评价方法较好地实现了决策单元排序的问题,并且对于非 DEA 决策单元的排序没有太大影响(表 2—3)。吉林省在 6 个传统 DEA 有效地 DMU 中农业水资源利用效率更为突出,江苏省则在所有 DMU 中农业水资源利用效率最低。我国经济社会保持快速稳定发展,但农业水资源投入要素的利用不够合理,农业水资源利用效率相对于理想决策单元而言仍然处于较低水平,2001 和 2011 年我国粮食主产区农业水资源利用效率仅达到理想 DMU 的 26.8% 和 26.1%。如果加大力度改变现有的粗放的农业水资源利用方式,积极开展节水工程,我国粮食主产区农业水资源利用效率将有很大的提

升空间。

从聚类分析结果来看,吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江等省区属于“低投入低产出”类型,四川、河南、安徽、江西、河北和江苏等省份属于“高投入高产出”类型。四川、河南、安徽、江西、河北和江苏省在改革开放以来,相对于其他省份而言在资金、人才、资源和技术的吸收引进方面具有一定的优势,所以,山东、河南、浙江、安徽、江西、河北和江苏等省区处于“高投入高产出”阶段。吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江等省区近年来不断加大农业固定资产投资,农业产业化、机械化水平逐年提高,特别是吉林、辽宁和黑龙江等省份紧紧抓住国家大力实施东北老工业基地振兴、高度重视保障国家粮食安全、全面推进现代农业建设等重大发展机遇,立足自身资源优势和产业优势,不断加大农村经济结构战略性调整,大力推进农业产业化经营,突出发展优质粮食、农产品加工业和绿色食品产业等主导产业,农田灌溉基础设施建设配套完整,农业在岗职工、农业固定资产投资合理优化,逐步形成了一套相对完整的、科学合理的农业生产保障体系。吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江等省区农业水资源利用效率就投入、产出量来说较四川、河南等 6 个省份达到更合理水平,但同时也存在一定的问题:农业投入相对不足,农田水利先进基础设施建设滞后,农业科技应用水平偏低,同时受到气候条件制约、土地资源条件限制,使得吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江等省区处于“低投入低产出”阶段。

表 3 我国粮食主产区农业水资源效率交叉评价

省区	水资源利用效率												所属层次
	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	均值	
吉林	0.426	0.427	0.437	0.406	0.382	0.358	0.361	0.376	0.373	0.379	0.359	0.389	DMU_D
内蒙古	0.374	0.361	0.374	0.341	0.361	0.342	0.339	0.332	0.295	0.323	0.307	0.341	DMU_D
湖北	0.266	0.281	0.274	0.341	0.303	0.309	0.308	0.293	0.281	0.325	0.308	0.299	DMU_D
湖南	0.227	0.235	0.218	0.284	0.283	0.293	0.310	0.329	0.310	0.335	0.302	0.284	DMU_D
山东	0.291	0.252	0.257	0.252	0.239	0.257	0.255	0.259	0.262	0.274	0.326	0.266	DMU_D
辽宁	0.293	0.321	0.276	0.241	0.277	0.248	0.247	0.235	0.240	0.269	0.275	0.266	DMU_D
黑龙江	0.246	0.289	0.303	0.294	0.275	0.265	0.257	0.242	0.219	0.251	0.236	0.262	DMU_D
四川	0.235	0.286	0.270	0.216	0.242	0.225	0.252	0.253	0.233	0.240	0.210	0.242	DMU_C
河南	0.217	0.229	0.230	0.209	0.201	0.211	0.216	0.217	0.222	0.258	0.299	0.228	DMU_C
安徽	0.223	0.246	0.203	0.235	0.184	0.195	0.204	0.218	0.215	0.207	0.211	0.213	DMU_C
江西	0.237	0.214	0.193	0.211	0.206	0.216	0.218	0.213	0.215	0.211	0.184	0.211	DMU_C
河北	0.192	0.167	0.177	0.187	0.171	0.182	0.187	0.188	0.184	0.193	0.215	0.186	DMU_C
江苏	0.261	0.248	0.146	0.196	0.148	0.166	0.158	0.173	0.147	0.163	0.162	0.179	DMU_C
年度均值	0.268	0.274	0.258	0.263	0.252	0.251	0.255	0.256	0.246	0.264	0.261	0.259	
DMU_A	0.066	0.064	0.060	0.056	0.051	0.055	0.053	0.050	0.050	0.052	0.053	0.055	
DMU_B	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
DMU_C	0.199	0.208	0.216	0.183	0.176	0.190	0.190	0.191	0.190	0.206	0.210	0.196	
DMU_D	0.338	0.302	0.271	0.299	0.294	0.286	0.281	0.260	0.263	0.255	0.250	0.282	

3 对策和建议

(1) 对于四川、河南、安徽、江西、河北和江苏“高投入高产出”省份应合理控制农业水资源利用量和劳动力的过多投入,实行灌溉预报和动态配水,做到适时、适量灌溉,并实时调整渠道流量和轮灌组合,避免渠道流量过大或者过小,减少输水的损失,同时鼓励技术创新,提高技术进步在农业水资源利用中的贡献。

(2) 对于吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江“低投入低产出”省份应进一步加大农业资金、人才、资源和技术的投入,提高农业产业化、机械化水平,完善农田水利基础设施体系。特别是黑龙江地区应积极调整作物种植结构,研究并推行组合作物种植,根据地区特点选育需水的高峰与降水同期的品种,可充分利用光、热、水资源并有利于提利于提高作物的复种指数。同时通过改良作物品种,减少高耗水作物的种植面积,减少灌溉定额,为灌区高效率利用水资源创造条件。

(3) 各省份要以实现农业节水为目标,加大节水工程建设力度,利用先进技术促进经济向低耗水发展,因地制宜,大力发展喷灌、滴灌、微灌、地埋管道、渠道防渗等农业节水灌溉技术,根据水源状况、种植结构、地形地貌和经济条件,因地制宜,多措并举开展节水工程建设。在地形复杂、水源条件差的地区,发展滴灌、渗灌等灌溉方式,并调整农作物布局,选用耐旱高效品种,推广秸秆、地膜覆盖,提高土壤蓄水保墒能力;在开采地下水的井灌区,发展地下管道输水;在以河水为水源的地表水灌区,发展混凝土防渗渠道,减少在输送过程中的损失。大力发展节水灌溉,实施节约用水战略,不断提高水资源的利用效率,建立节水型社会,是缓解水资源供需矛盾、实现水资源可持续利用的有效措施和根本出路。

4 结论

(1) 通过 DEA 交叉模型得出,我国粮食主产区农业水资源利用效率普遍较低,且各省之间的差异较为显著,农业水资源利用效率存在很大的提升空间。

(2) 通过引入 4 类虚拟决策单元聚类分析得出,吉林、内蒙古、湖北、湖南、山东、辽宁和黑龙江等省区属于“低投入低产出”类型,四川、河南、安徽、江西、河北和江苏等省份属于“高投入高产出”类型,我国粮食主产区整体处于“低投入低产出”类型。

(3) 本研究采用 DEA 交叉效率评价模型,实现

了对所有决策单元效率的完全排序和效率评价,克服了传统 DEA 无法区分有效单元之间优劣的不足。同时,引入虚拟决策单元明确了研究区域内各单元农业水资源利用的提升潜力和改进方向,为今后各单元制定和调整农业水利发展政策提供了科学依据。考虑 DEA 交叉评价方法各要素之间的权重是采用内生法确定的,但是农业水资源利用效率各评价要素间是相互影响、相互制约的,如何合理有效地评价农业水资源利用效率,是今后进一步研究的方向。

[参 考 文 献]

- [1] 刘渝,杜江,张俊飏. 湖北省农业水资源利用效率评价[J]. 中国人口·资源与环境,2007,17(6):60-65.
- [2] 封志明,郑海霞,刘宝勤. 基于遗传投影寻踪模型的农业水资源利用效率综合评价[J]. 农业工程学报,2005,21(3):66-70.
- [3] 殷欣,刘小刚,张焉,等. 基于投影寻踪的云南省农业水资源效率评价[J]. 水土保持通报,2013,33(5):271-275.
- [4] 王秀芬,陈百明,毕继业. 基于县域尺度的中国农业水资源利用效率评价[J]. 灌溉排水学报,2012,31(3):6-10.
- [5] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784.
- [6] 廖虎昌,董毅明. 基于 DEA 和 Malmquist 指数的西部 12 省水资源利用效率研究[J]. 资源科学,2011,33(2):273-279.
- [7] 于法稳,李来胜. 西部地区农业资源利用的效率分析及政策建议[J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(6):35-39.
- [8] 彭育威,吴守宪,徐小湛. 利用 Matlab 进行 DEA 交叉评价分析[J]. 西南民族学院学报:自然科学版,2004,30(5):553-556.
- [9] 刘渝,杜江. 湖北省农业水资源利用效率的实证分析[J]. 中国农村水利水电,2011(1):37-39.
- [10] 刘军,朱美玲. 农业用水效率评价指标体系研究[J]. 节水灌溉,2013(5):61-63.
- [11] 黄初龙,邓伟. 农业水资源可持续利用评价指标体系构建与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:39-42.
- [12] 杨斌. 2000—2006 年中国区域生态效率研究:基于 DEA 方法的实证分析[J]. 经济地理,2009,29(7):1197-1202.
- [13] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA-Solver Software [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] 许建伟,许新宇,陈兴鹏,等. 基于 DEA 交叉模型的甘肃省城市效率评价[J]. 自然资源学报,2013,28(4):618-624.