

基于 DEA 的黑河中游灌区水资源配置效率时空分异

蒙古军, 汪疆玮, 尤南山, 王雅, 周朕

(北京大学 城市与环境学院 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘 要:绿洲农业用水效率的提高是协调干旱区经济发展与生态建设的关键。以黑河中游农业绿洲 24 个灌区为研究对象, 以基础地理信息数据、土地覆被数据和绿洲灌区统计数据等为数据源, 基于数据包络分析(DEA)研究了灌区农业水资源配置效率的时空分异, 以及各灌区影响水资源配置效率的主要因素。结果表明: (1) 各灌区水资源配置效率存在明显的时空差异。平川、罗城、大堵麻、盈科、板桥、蓼泉、梨园河、六坝等灌区水资源配置效率较高, 而马营河、老军、洪水河、童子坝河、西浚、上三、安阳、鸭暖、新坝等灌区水资源配置效率较低。各灌区水资源配置效率均值从 2008 年的 0.797 提高到 2012 年的 0.848, 空间差异进一步缩小; (2) 各灌区水资源配置要素普遍投入过大, 水利设施建设及引水密度均超过了灌区实际需求, 尤其是山丹县和民乐县的引水密度过大, 甘州和高台部分灌区则表现为干渠密度、支斗渠密度明显超过实际需求; (3) DEA 最优解显示, 灌渠密度普遍饱和, 部分灌区引水密度过大, 大部分灌区引水密度与投入产出效率最高之间存在 34.8% 的下调空间。因此, 合理分配有限的水资源、大力推广节水工程及措施, 是提高绿洲水资源利用效率的主要途径。

关键词:水资源配置效率; 绿洲灌区; 时空分异; DEA; 黑河中游

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)01-0173-08

Spatiotemporal Differentiation of Water Allocation Efficiency in Oasis Irrigated Areas in the Middle Reaches of the Heihe River

MENG Jijun, WANG Jiangwei, YOU Nanshan, WANG Ya, ZHOU Zhen

(Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education,

School of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The improvement of water use efficiency on oasis agriculture is the key process in coordination economic development and ecological construction in the arid zones. We focused on the 24 oasis irrigated areas in the middle reaches of the Heihe River. Based on the basic geographic information data, the land cover data and statistic data in oasis irrigated areas, we analyze the spatiotemporal differentiation of water allocation efficiency in the oasis agriculture, and probes into the main factors limiting the water allocation efficiency in each oasis irrigated area. The main conclusions are as follows: (1) The water allocation efficiency in each oasis irrigated area has significant spatiotemporal differentiation. The water allocation efficiency in Pingchuan, Luocheng, Daduma, Yingke, Banqiao, Liaoquan, Liyuanhe, Liuba, etc., is relatively higher; but in the irrigated areas such as Mayinghe, Laojun, Hongshuihe, Tongzibahe, Xijun, Shangsang, Anyang, Ya'nan, Xinba, it is relatively lower. Water allocation efficiency increases from 0.797 in 2008 to 0.848 in 2012, spatial differentiation has narrowed. (2) Too many water allocation elements have been put into the oasis irrigated area universally, water conservancy facilities and water diversion density exceed the actual demand in irrigated areas; specifically, in the Shandan County and the Minle County, water diversion density is oversize, but in the Ganzhou County and Gaotai County, main canal density and branch and lateral canal density obviously exceed the demand. (3) The optimal solution of DEA shows that irrigation channel density is universally saturated in a part of irrigated areas, water diversion density is oversize, in the most areas, it should be reduced by 34.8% comparing with the best input-output efficiency. Therefore, allocating limited water resources in the irrigated areas reasonably, popularizing water saving projects and measures industriously

收稿日期: 2015-12-11

修回日期: 2016-03-19

资助项目: 国家自然科学基金“水资源约束下黑河中游土地利用的生态适应性研究”(41371097)

第一作者: 蒙古军(1971—), 男, 甘肃张掖人, 副教授, 主要从事土地利用变化与生态系统管理研究。E-mail: jijunm@pku.edu.cn

通信作者: 尤南山(1993—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统管理及土地生态。E-mail: nanshany@pku.edu.cn

are the main methods to improve oasis water use efficiency.

Keywords: water allocation efficiency; oasis irrigated area; spatiotemporal differentiation; data envelopment analysis (DEA); the middle reaches of the Heihe River.

在西北干旱区,农业灌溉是用水大户。但受传统灌溉方式和技术水平的影响,农业用水效率一直较低^[1],导致水资源浪费严重,经济效益低下。一般来说,农业用水效率是指每消耗1单位水资源而生产的粮食数量^[2],受到灌溉措施^[3]、耕作方式^[4]、施肥与灌溉的时间安排^[5]以及农田水利基础设施的建设^[6]等诸多因素影响。大量研究表明,农业用水效率提升具有很大的潜力^[2,6-7],农业用水效率的研究,对调整干旱区用水配置模式、实现水资源持续利用具有重要的理论意义。

近年来,学者们从技术效率和经济效率两方面展开了农业用水效率的研究。技术效率从水分循环、灌溉过程等研究提高水资源配置效率的途径^[8-9],侧重于对各种灌溉技术效率的实证研究^[10]。经济效率则基于农户投入产出的视角来衡量灌溉的经济性,强调灌溉带来最大的经济产出,而非使用最少的水资源^[11]。区域尺度经济效率的研究更多采用数据包络分析(DEA)、随机前沿方法(SFA)、改进物元模型以及灰色关联等分析农业用水投入产出效率。如采用DEA方法^[1]或DEA-Malmquist指数法分析了我国农业产出技术效率的发展趋势及区域差异^[12-13];采用SFA方法分析了灌溉用水效率^[7,14]、区域差异^[2];李绍飞^[15]提出了灌区农业用水效率评价指标体系及标准,建立了确定灌区农业用水效率等级的改进模糊物元模型;胡广录等^[16]应用灰色关联分析法研究了黑河流域洪水河灌区的小麦生产水分生产率。

黑河中游是黑河流域人类活动最为密集、绿洲最为集中、经济最为发达的地区,也是主要耗水区和水资源调控关键区。“九七”甘蒙分水方案实施后,黑河中游人均水量和亩均水量仅为全国平均水平的57%和29%,属于典型的资源型缺水地区。2002年水利部将甘肃省张掖市确定为农业节水的第一个试点单位。但是随着张掖绿洲的扩张,农业发展对水资源需求激增,高效利用水资源已经成为黑河中游农业生产与生态建设亟待解决的问题。基于此,本文采用DEA方法研究黑河中游灌区农业水资源配置效率的时空分异,以及各灌区影响水资源配置效率的主要因素,结果对提高水资源利用效率、实现区域水资源优化配置具有重要的借鉴意义。

1 研究区概况与数据来源

黑河是我国西北地区第二大内陆河,地跨青、甘、

内蒙3省(区)。黑河中游位于河西走廊中段,地理坐标为 $97^{\circ}20'$ — $102^{\circ}12'E$, $37^{\circ}28'$ — $39^{\circ}57'N$;在行政区划上包括甘肃省张掖市的甘州区、临泽县、高台县、民乐县、山丹县以及肃南裕固族自治县的明花区,总面积约为1.96万 km^2 。黑河中游属于温带大陆性干旱气候,年降水量104~328 mm,年蒸发量1 639~2 341 mm。地势南高北低,东高西低,其中部为绿洲、戈壁相间分布的走廊平原。黑河中游绿洲灌渠发达,是我国传统的农业生产基地,目前也是我国制种玉米的主要产地。

本文所用的黑河中游基础地理信息数据(包括行政区划、河流水系等)、灌区矢量数据(包括干渠、支斗渠)和土地利用数据(2007年、2011年)均来源于中国科学院寒区旱区科学数据中心的“数字黑河”项目。其中,土地利用数据基于Landsat和ETM遥感影像,结合野外考察验证,建立的土地利用/覆被影像和矢量数据库,解译精度达93%,空间分辨率为 $30 m \times 30 m$ 。土壤数据来源于FAO基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1),土地质量依此获得;DEM数据来自国家科学数据服务平台(<http://www.cnisc.cn/zcfw/sjfw/gjksjxx/>),分辨率为 $30 m \times 30 m$,坡度和海拔从中提取;气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://www.escience.gov.cn/>)中1999—2012年“中国地面气候资料日值数据集(V3.0)”,选择与研究区相关的11个气象站点,插值计算获得多年平均降水和多年平均实际蒸散。灌区统计数据(包括干渠、支斗渠、地下水埋深、地表水引用、地下水引用、作物单产等)均来源于甘肃省张掖市水务局“水利管理年报”(2008年、2012年)。

黑河中游现有的灌区边界,水利部门以行政管辖区全覆盖的特点进行划分,导致各灌区内包含大量的荒漠和草地,不能真实反映灌区的实际范围。基于此,本文根据黑河中游2007年、2011年土地覆被图,提取其中的耕地做空间并集,然后向外缓冲100 m,作为绿洲灌区的实际范围(图1)。共获得24个灌区,以此来探讨水资源配置效率。

2 研究方法

2.1 数据包络分析

数据包络分析(data envelopment analysis,简称DEA)是一种基于相对效率的分析方法,针对具有相同类型的多投入、多产出的决策单元(decision mak-

ing unit, 简称 DMU), 评价其是否满足相对有效的非参数统计方法。通过对比决策单元组的投入产出比, 得出每个决策单元的投入产出效率^[17-18]。其思路是基于线性规划理论的模型, 试图表现出各决策单元在投入产出过程中的相对有效性。在本研究中, DEA 值越高说明该 DMU 所代表的灌区水资源配置效率越高。松弛变量衡量各个投入变量距离其线性最优的差异, 其值越大, 代表其影响配置效率的程度越大。具体方法如下:

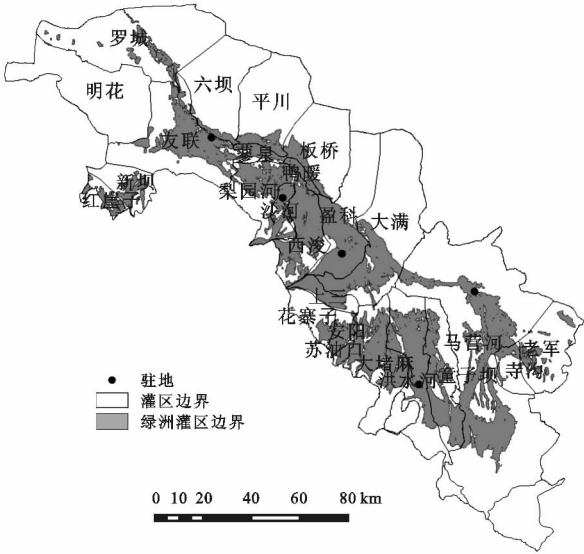


图 1 黑河中游绿洲灌区边界

设有 n 个决策单元, 每个单元均有 m 个类型的“输入”, 以及 s 种类型的“输出”。其中 X_{ij} 是第 j 个决策单元对第 i 种类型输入量, $X_{ij} > 0$; Y_{rj} 为第 j 个决策单元对第 r 种类型输出量, $Y_{rj} < 0$ 。若用 v_i 表示第 i 项的投入权值, u_r 表示第 r 项的产出权值, 则第 j 个决策单元的投入产出比 h_j 的表达式为:

$$h_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \quad (j=1, 2, 3, \dots) \tag{1}$$

通过适当选取 $v_i (i=1, 2, \dots)$ 和 $u_r (r=1, 2, \dots)$ 使其满足 $h_j \leq 1 (j=1, 2, \dots)$, 则在 $h_j (j=1, 2, \dots)$ 单元组中满足 $h_x = 1$ 的 DMU 被称为 DEA 有效单元, 对第 j_0 个 DMU 的绩效评价可归结为以下的优化模型 C²R:

$$\max h_j = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \tag{2}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1 \\ v_i \geq 0 \end{cases} \quad (i, j=1, 2, 3, \dots) \tag{3}$$

Charnes 等^[19]引入了非阿基米德无穷小量 ϵ (即

小于任何正数且大于 0 的数), 实现了 DEA 模型的求解。

$$(D_{c^2R}^e) \begin{cases} \min [\theta - \epsilon(\hat{e}^T s^- + e^T s^+)] \\ \sum_{j=1}^n x_j \lambda_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{j=1}^n y_j \lambda_j - s^+ = y_0 \\ \lambda_j \geq 0; j=1, 2, \dots, n; s^- \geq 0; s^+ \geq 0; \theta \in E^1 \end{cases} \tag{4}$$

式中: $\hat{e} = (1, 1, \dots, 1)^T \in E^m, e = (1, 1, \dots, 1)^T \in E^s; s^-$ 和 s^+ 表征投入产出变量的松弛变量。当第 j 个决策单元存在一个最优解 θ 和 $\lambda_j (j=1, 2, \dots, n)$, 满足 $\theta=1, s^- = s^+=0$, 则第 j 个决策单元 DEA 有效。其中, 松弛变量用来反映该决策单元的投入产出指标距 DEA 有效的差距, 某要素松弛变量为 0, 表示该要素对该决策单元的投入产出比没有限制性影响, 反之则认为该要素是限制该决策单元达到 DEA 有效的主要因素。

2.2 水资源配置效率的概念模型

数据包络分析应用于水资源配置效率评估, 是将水资源配置的影响因素和结果模拟决策单元的投入和产出。一切影响水资源配置的因素均可作为投入因素, 而灌区粮食产量可以用来模拟其实际产出。农业用水效率受气候、地形、土壤及水利设施等因素的综合影响^[6]。参考相关研究^[7,15,20], 通过对指标的筛选和相关性验证, 投入指标包括水资源配置因素和灌区地理特征, 其中水资源配置因素包括水利设施(干渠密度、支斗渠密度)和水量引用(地表水引用密度和地下水引用密度之和), 地理特征包括土地特征(平均海拔、平均坡度、地下水埋深和土地质量)和气候条件(多年平均降水、多年平均实际蒸散)。以各灌区粮食单产作为衡量水资源配置效率的产出指标。24 个灌区 2008 年、2012 年各指标值见表 1。本文采用 DEAP 2.1, SPSS 和 Excel 软件, 进行灌区水资源配置效率的数据包络分析。

3 结果与分析

3.1 水资源配置效率及其差异

通过 DEA 分析, 得到黑河中游各灌区 2008 年、2012 年的水资源配置 DEA 效率。DEA 效率值反映了灌区在所有灌区中的投入产出效率的相对大小, DEA 效率值越高, 反映灌区的水资源配置效率越高。由附图 4 可知, 黑河中游各灌区水资源配置效率存在明显的时空差异。平川、罗城、大堵麻、盈科、板桥、蓼泉、梨园河、六坝等灌区水资源配置效率较高, 而马营河、老军、洪水河、童子坝河、西浚、上三、安阳、鸭暖、新坝等灌区水资源配置效率较低。2008—2012 年, 部分灌区水资源配置效率有所提高, 如大堵麻、洪水

河、童子坝、盈科、西浚、上三、安阳、花寨子、梨园河、友联、六坝、新坝和红崖子灌区；但部分灌区水资源配置效率呈下降趋势，如马营河、寺沟、老军、大满、板桥、鸭暖、蓼泉和沙河。

各区县水资源配置效率存在明显的时空差异。2008 年临泽县水资源配置效率最高，DEA 有效的灌区占该区域所有灌区的 2/3，配置效率均值为 0.965；民乐县水资源配置效率最低，其效率均值仅为 0.657。

2012 年高台县各灌区水资源配置效率最高，DEA 有效的灌区占该区域所有灌区的 3/5，灌区配置效率均值为 0.928；民乐县、甘州区、临泽县灌区水资源配置效率较高，DEA 均值均在在 0.8 以上。总体来看，灌区水资源配置效率均值由 2008 年的 0.797 提高到 2012 年的 0.848，有一定的优化趋势。民乐、甘州与高台部分灌区的水资源配置效率明显提高，各区县内灌区水资源配置效率差异减小。

表 1 黑河中游各灌区水资源配置投入产出模型指标值

灌区		作物单产/ (kg·km ⁻²)		干渠密度/ (km·km ⁻²)		支斗渠密度/ (km·km ⁻²)		地下 水埋	海拔 ^① / m	坡度 ^① / (°)	土地 质量 ^②	平均实 际蒸散 ^① / mm	多年平 均降水 ^① / mm	地表水引用密度/ (m ³ ·km ⁻²)	地下水引用密度/ (m ³ ·km ⁻²)
		2008 年	2012 年	2008 年	2012 年	2008 年	2012 年	深 ^① /m							
山丹县	马营河	455788	430344	0.2	0.3	0.6	0.3	88	2257	4.33	75	803	234	0.16	0.03
	寺沟	560476	521282	0.2	0.2	0.6	0.3	100	2171	5.67	78	734	229	0.00	0.01
	老军	510728	417836	0.3	0.4	0.8	0.7	100	2231	5.41	71	681	219	0.01	0.01
	均值	508997	456487	0.2	0.3	0.6	0.4	96	2220	5.14	75	739	227	0.06	0.01
	苏油口	541392	687402	0.7	0.8	0.9	0.9	150	2215	4.53	69	793	269	0.00	0.00
民乐县	大堵麻	616000	1344232	0.9	1.2	2.2	2.8	143	2095	3.81	70	790	250	0.04	0.00
	洪水河	560935	539139	0.4	0.4	0.9	0.7	133	2059	3.20	78	792	240	0.22	0.01
	童子坝	460695	443122	0.2	0.3	0.3	0.4	131	2352	3.76	74	817	254	0.13	0.01
	均值	544756	753474	0.6	0.7	1.1	1.2	139	2180	3.83	73	798	253	0.10	0.00
	大满	892722	979109	0.2	0.2	0.6	0.6	39	1516	2.86	73	772	158	0.09	0.08
甘州区	盈科	1122901	1193371	0.5	0.5	1.7	1.7	21	1467	3.06	78	821	136	0.45	0.20
	西浚	815787	1114881	0.7	0.7	4.5	5.2	26	1505	3.46	79	772	153	0.07	0.33
	上三	833326	1052908	0.8	0.8	4.0	2.7	144	1625	2.91	75	835	201	0.23	0.01
	安阳	633406	639812	0.5	0.5	1.5	1.8	150	2032	5.14	71	739	246	0.05	0.00
	花寨子	556920	581398	0.2	0.2	0.3	0.4	150	2053	5.31	70	755	248	0.01	0.00
临泽县	均值	809177	926913	0.5	0.5	2.1	2.0	88	1699	3.79	74	782	190	0.15	0.10
	平川	1064351	1289936	0.2	0.9	0.3	0.2	5	1372	3.08	78	755	118	0.03	0.02
	板桥	1240019	812248	0.1	0.1	0.4	0.3	11	1394	3.92	71	700	118	0.29	0.00
	鸭暖	985068	916454	1.2	1.1	2.7	1.3	8	1389	3.56	76	800	121	0.02	0.16
	蓼泉	1107983	1000450	0.6	0.7	0.4	0.5	4	1367	2.38	69	786	122	0.02	0.06
高台县	沙河	1187075	929954	0.5	0.6	1.4	0.9	15	1455	3.02	79	767	141	0.09	0.20
	梨园河	1001759	701965	1.8	1.8	5.3	3.9	12	1454	2.77	70	738	143	0.24	0.14
	均值	1097709	941835	0.7	0.9	1.7	1.2	9	1405	3.12	74	758	127	0.11	0.10
	友联	848953	1004987	1.7	1.7	7.8	7.7	7	1363	2.16	64	747	138	1.11	0.58
	六坝	793176	889256	0.5	0.5	0.2	0.1	3	1347	2.12	74	688	119	0.09	0.01
高台县	罗城	1195440	1041326	0.5	0.5	0.1	0.1	5	1300	2.40	58	658	168	0.01	0.00
	新坝	738440	708078	0.4	0.4	0.9	0.9	100	1935	4.06	75	692	213	0.20	0.00
	红崖子	744064	708011	0.5	0.5	1.1	1.1	100	2248	3.96	68	695	233	0.04	0.00
	均值	864015	870332	0.7	0.7	2.0	2.0	43	1639	2.94	68	696	174	0.29	0.12
	均值	811142	831146	0.6	0.6	1.6	1.5	68	1758	3.62	73	760	186	0.15	0.08

注：①“地下水埋深”、“海拔”、“坡度”、“实际蒸散”、“降水”均通过 ArcGIS 分类区统计 zonal 工具计算每个灌区内所有栅格对应地理要素的平均值。②从《张掖土壤志》及中国土壤数据集中提取了土壤类型、表层土壤质地、有机碳、有效含水量、pH 值作为土壤质量的评价因子，参考全国《农用地分等规程》中对于西北区土壤指标分级的标准，确定评价因子的约束方向及权重，采用阈值性加权指数法对因子进行综合；求出各个灌区平均值作为土地质量分值。

3.2 水资源配置效率影响因素

DEA 数据包络分析中,松弛变量反映了投入变量离线性最优的差距,值越大,代表其影响水资源配置效率的程度越大。松弛变量为 0 则表示该投入单

元的投入不影响实际效率。松弛变量能反映出该决策单元的投入产出对 DEA 效率的影响。各灌区 2008 年、2012 年水资源配置的 DEA 效率和主要松弛变量见表 2。

表 2 黑河中游各灌区 2008 年、2012 年 DEA 效率及主要指标松弛变量

灌区		DEA 效率		干渠密度/(km·km ⁻²)		支斗渠密度/(km·km ⁻²)		引水密度/(m ³ ·m ⁻²)	
		2008 年	2012 年	2008 年	2012 年	2008 年	2012 年	2008 年	2012 年
山丹县	马营河	0.682	0.542	0.000	0.000	0.178	0.156	0.000	0.870
	寺沟	0.925	0.848	0.000	0.000	0.168	0.218	0.000	0.530
	老军	0.804	0.567	0.036	0.000	0.165	0.044	0.000	0.964
	均值	0.804	0.652	0.012	0.000	0.170	0.139	0.000	0.788
民乐县	苏油口	0.556	0.980	0.196	0.293	0.082	0.000	0.000	0.183
	大堵麻	0.902	0.931	0.786	0.378	2.100	1.125	0.000	0.685
	洪水河	0.557	0.721	0.000	0.000	0.310	0.153	0.000	0.601
	童子坝	0.611	0.717	0.000	0.000	0.159	0.000	0.000	0.705
甘州区	均值	0.657	0.837	0.246	0.168	0.663	0.320	0.000	0.544
	大满	0.994	0.875	0.000	0.000	0.437	0.288	0.000	0.370
	盈科	0.908	0.919	0.000	0.077	1.143	0.574	0.001	0.404
	西浚	0.610	0.834	0.199	0.306	3.010	3.520	0.114	0.586
临泽县	上三	0.577	0.833	0.145	0.191	1.417	2.962	0.660	0.112
	安阳	0.451	0.556	0.000	0.000	0.707	0.651	0.154	1.190
	花寨子	0.781	1.000	0.000	0.000	0.197	0.000	0.000	0.000
	均值	0.720	0.836	0.057	0.096	1.152	1.333	0.155	0.444
高台县	平川	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	板桥	1.000	0.916	0.000	0.000	0.000	0.151	0.000	0.577
	鸭暖	0.829	0.730	0.633	0.726	0.738	1.798	0.216	0.304
	蓼泉	1.000	0.987	0.000	0.298	0.000	0.000	0.000	0.351
高台县	沙河	1.000	0.760	0.000	0.208	0.000	0.832	0.000	0.040
	梨园河	0.963	0.999	1.296	1.411	3.060	5.150	0.000	0.169
	均值	0.965	0.899	0.322	0.441	0.633	1.322	0.036	0.240
	友联	0.806	1.000	0.955	0.000	6.040	0.000	0.713	0.000
高台县	六坝	0.901	0.990	0.069	0.248	0.000	0.034	2.961	0.647
	罗城	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	新坝	0.599	0.648	0.000	0.000	0.174	0.196	0.172	0.041
	红崖子	0.663	1.000	0.000	0.000	0.403	0.000	0.000	0.000
	均值	0.794	0.928	0.205	0.050	1.323	0.046	0.769	0.138

由表 2 可知,2008 年和 2012 年,黑河中游所有灌区干渠密度、支斗渠密度和引水密度 3 个水资源配置特征要素的松弛变量均≥0,说明部分灌区基础设施投入过大,引水密度远超过实际需求,水资源配置要素效率不高,具有优化空间。鉴于气候条件和土地特征等灌区自然地理条件在大的空间尺度上往往不可调控,本文通过对投入指标体系中的“水资源配置因素”的松弛变量的分析,进一步揭示黑河中游水资源配置效率时空差异的内在原因。

(1) 黑河中游各灌区干渠密度存在明显的时空

分异。干渠密度对各灌区水资源配置效率存在一定的影响。松弛变量均值和 0 松弛变量数显示,2008 年甘州区、山丹县干渠密度较为合理,临泽县和民乐县部分灌区干渠密度过大,水利设施建设投入过大,与灌区实际农业产出不匹配。尤其是大堵麻、鸭暖、梨园河、友联灌区干渠密度松弛变量过大。2012 年干渠密度松弛变量较 2008 年有明显好转的趋势,0 松弛变量比例变大,且松弛变量均值减少。山丹县、民乐县、高台县的干渠密度的调整提高了灌区水资源配置的投入产出效率,友联、大堵麻灌区的松弛变量

减少明显。松弛变量显示梨园河灌区的干渠密度仍维持较高水平,基础设施投入与区域实际产出存在不匹配现象。

(2) 黑河中游各灌区支斗渠密度松弛变量对各灌区水资源配置效率存在影响。松弛变量均值和 0 松弛变量数显示,2008 年各灌区普遍存在支斗渠密度过大的现象,0 松弛变量灌区占有所有灌区的比重为 25%。其中甘州区和高台县部分灌区,例如大堵麻、盈科、上三、梨园河、友联灌区等存在明显的支斗渠密度过大现象,松弛变量均超过 1。2012 年松弛变量均值有所减少,0 松弛变量灌区占有所有灌区的比重为 45.8%。其中,大堵麻、友联灌区松弛变量明显减少,灌区支斗渠密度调整成效显著;西浚、上三、梨园河灌区支斗渠密度松弛变量较 2008 年更高,灌区水资源配置效率受支斗渠密度的影响明显。

(3) 黑河中游灌区水资源配置效率受引水密度的影响随着时间增长呈现明显的增大趋势。2008 年 0 松弛变量灌区占有所有灌区的 66.7%,除高台县六坝灌区之外,各灌区引水密度松弛变量均较小,说明引水密度并非制约水资源配置效率的关键因素。2012

年引水密度松弛变量均值除高台外,均呈现增加趋势,说明各灌区水资源配置效率明显受到引水密度的影响,其中马营河、大堵麻、童子坝老军、安阳等灌区松弛变量较大。

3.3 基于 DEA 有效的水资源配置指标修正

数据包络分析的理想值被认为是评价单元最优的投入值,通过调整灌区水资源配置要素的投入值,提升水资源配置效率。理想值与实际值的差值(即调整值),可反映该灌区的投入指标距离投入产出效率最高的差距,进而作为水资源配置要素修正的依据。

由表 3 可知,2008 年黑河中游水资源配置效率的 3 个指标中,支斗渠密度指标调整幅度最大,结果显示大部分灌区支斗渠密度过高,有 62.5%的灌区,支斗渠密度可调整幅度达到 70%以上;其中,甘州区西浚、上三、安阳灌区支斗渠密度超标严重,与其实实际农业生产条件极不匹配。干渠密度也对配置效率存在一定影响,部分灌区存在干渠密度过大的问题,其中,大堵麻、鸭暖、友联、梨园河灌区需调整幅度达到 70%以上。引水密度超标最为严重的是六坝灌区,超标率达到 72.7%;上三、安阳灌区引水密度超标率也超过了 60%。

表 3 黑河中游 2008 年水资源配置效率指标调整

灌区		干渠密度			支斗渠密度			引水密度		
		实际值/	理想值/	调整比/	实际值/	理想值/	调整比/	实际值/	理想值/	调整比/
		(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%	(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%	(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%
山丹县	马营河	0.25	0.17	31.60	0.34	0.05	84.10	0.99	0.68	31.80
	寺沟	0.18	0.17	7.80	0.27	0.08	70.00	1.09	1.01	7.50
	老军	0.35	0.25	30.00	0.67	0.37	44.20	0.92	0.74	19.60
	苏油口	0.82	0.26	68.30	0.86	0.40	53.80	1.41	0.78	44.40
民乐县	大堵麻	1.20	0.30	75.30	2.83	0.45	84.10	0.99	0.89	9.80
	洪水河	0.39	0.22	44.40	0.74	0.10	86.20	1.48	0.82	44.30
	童子坝	0.25	0.15	38.80	0.36	0.06	83.10	1.25	0.76	39.00
	大满	0.18	0.18	0.60	0.60	0.16	73.50	1.97	1.96	0.60
甘州区	盈科	0.47	0.43	9.10	1.66	0.36	78.10	2.76	2.50	9.30
	西浚	0.68	0.22	68.20	5.22	0.17	96.70	3.05	1.75	42.80
	上三	0.81	0.32	60.20	2.65	0.11	95.80	3.32	1.26	62.20
	安阳	0.45	0.20	54.90	1.76	0.09	95.10	2.73	1.08	60.50
临泽县	花寨子	0.20	0.16	22.00	0.36	0.08	76.70	1.33	1.04	21.90
	平川	0.94	0.94	0.00	0.19	0.19	0.00	2.51	2.51	0.00
	板桥	0.11	0.11	0.00	0.27	0.27	0.00	3.29	3.29	0.00
	鸭暖	1.12	0.30	73.60	1.27	0.32	75.20	3.16	2.40	23.90
高台县	蓼泉	0.65	0.65	0.00	0.52	0.52	0.00	2.43	2.43	0.00
	沙河	0.57	0.57	0.00	0.87	0.87	0.00	1.72	1.72	0.00
	梨园河	1.83	0.47	74.50	3.85	0.65	83.10	1.51	1.46	3.60
	友联	1.65	0.38	77.30	7.73	0.19	97.50	2.67	1.44	46.10
高台县	六坝	0.47	0.36	24.50	0.13	0.12	10.00	4.71	1.29	72.70
	罗城	0.45	0.45	0.00	0.14	0.14	0.00	1.76	1.76	0.00
	新坝	0.39	0.23	40.00	0.86	0.34	60.30	2.65	1.42	46.60
	红崖子	0.48	0.32	33.80	1.08	0.31	71.00	1.64	1.09	33.70

注:调整比为调整值和实际值的比例,下表同。

表 4 显示,2012 年除少数灌区之外,黑河中游各灌区干渠密度、支斗渠密度、引水密度指标均超标,影响灌区水资源配置效率。干渠密度调整幅度最大的是鸭暖灌区和梨园河灌区,干渠密度超标率达 80% 以上。甘州区西浚、上三、安阳灌区的支斗渠密度仍然偏大,远远超过灌区农业生产的需求;马营河、老军、安阳灌区引水密度超标率达 70% 以上,水资源引用过量;罗城、红崖子灌区引水密度较低,需要提高灌区引水量。

表 4 黑河中游 2012 年水资源配置效率指标调整

灌区		干渠密度			支斗渠密度			引水密度		
		实际值/	理想值/	调整比/	实际值/	理想值/	调整比/	实际值/	理想值/	调整比/
		(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%	(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%	(km·km ⁻²)	(km·km ⁻²)	%
山丹县	马营河	0.19	0.10	46.20	0.61	0.17	71.60	3.35	0.95	71.70
	寺沟	0.18	0.15	13.70	0.56	0.26	54.10	2.41	1.52	37.00
	老军	0.33	0.19	43.90	0.76	0.39	48.80	3.25	0.88	72.90
民乐县	苏油口	0.72	0.41	42.40	0.87	0.85	2.30	1.66	1.44	13.10
	大堵麻	0.88	0.44	49.60	2.15	0.88	59.10	1.90	1.08	43.10
	洪水河	0.42	0.30	27.30	0.94	0.53	43.90	1.90	0.77	59.50
甘州区	童子坝	0.23	0.17	29.20	0.28	0.20	27.90	2.70	1.23	54.40
	大满	0.19	0.16	14.40	0.64	0.27	57.70	1.32	0.79	40.30
	盈科	0.47	0.36	23.70	1.72	1.01	41.30	1.55	1.02	34.30
临泽县	西浚	0.69	0.26	61.90	4.47	0.21	95.40	1.89	0.99	47.60
	上三	0.84	0.51	39.60	3.98	0.35	91.10	1.62	1.24	23.50
	安阳	0.46	0.26	44.80	1.52	0.20	87.10	3.43	0.72	79.00
高台县	花寨子	0.20	0.20	0.00	0.31	0.31	1.00	2.51	2.51	0.10
	平川	0.17	0.16	2.90	0.27	0.27	0.00	0.96	0.96	0.20
	板桥	0.11	0.10	11.60	0.35	0.17	52.00	1.29	0.60	53.30
高台县	鸭暖	1.18	0.14	88.60	2.72	0.19	93.10	1.39	0.71	48.80
	蓼泉	0.60	0.30	50.70	0.37	0.37	1.20	1.30	0.93	28.10
	沙河	0.54	0.20	62.20	1.38	0.22	84.30	1.12	0.81	27.80
高台县	梨园河	1.75	0.34	80.70	5.34	0.18	96.60	1.03	0.86	16.80
	友联	1.65	1.65	0.00	7.83	7.83	0.10	1.38	1.38	0.10
	六坝	0.46	0.21	55.00	0.20	0.16	17.50	1.45	0.79	45.70
高台县	罗城	0.48	0.48	0.30	0.14	0.14	0.90	1.23	1.23	-0.40
	新坝	0.39	0.25	35.10	0.88	0.37	57.70	1.26	0.78	38.40
	红崖子	0.48	0.48	-0.40	1.08	1.08	0.00	1.17	1.17	-0.20

4 结论与讨论

(1) 黑河中游灌区水资源配置效率存在明显的时空差异。平川、罗城、大堵麻、盈科、板桥、蓼泉、梨园河、六坝等灌区水资源配置效率较高,而马营河、老军、洪水河、童子坝河、西浚、上三、安阳、鸭暖、新坝等灌区水资源配置效率较低。总体看来,临泽县和高台县灌区水资源配置效率较高,民乐县和山丹县灌区水资源配置效率较低。水资源配置效率从 2008 年的 0.797 提高到 2012 年的 0.848,且空间差异进一步缩小。

(2) 水资源配置普遍存在投入过大的特点,水利设施建设及引水密度超过灌区实际需求。总体来看,山丹县和民乐县的引水密度过大,灌区投入与实际产出不匹配,以马营河、老军灌区最为典型;甘州区和高

台县等黑河沿岸部分灌区,则表现为干渠密度、支斗渠密度明显超过实际需求。

(3) DEA 最优解显示,黑河干流灌区干渠密度超标严重,超标率达 80% 以上;甘州区灌区支斗渠密度明显偏大,超标率达 70%;除罗城、红崖子灌区之外,大部分灌区都存在引水密度超标的现象,尤其是山丹县、民乐县的部分灌区引水密度超标现象最为严重。因此,黑河中游灌渠密度普遍饱和,部分灌区引水密度过大。

本文界定的灌区范围比水利部门划定的灌区范围要小很多,故使干渠密度、支斗渠密度比统计数据要高出许多,但更能反映水资源配置因素的真实情况,也更有利于探索水资源配置效率的限制因素。西北干旱区是我国最具节水潜力的区域^[2],农业水资源

高效利用是全面加强用水效率、控制红线管理、推进节水型社会建设的关键环节。黑河中游农业用水效率的提升多来自技术效率(如制度创新)^[21],应在现有水资源利用政策、节水农业政策下,加强农业技术进步,协调技术与制度建设,进一步挖掘节水潜力。黑河中游水资源配置效率与耕地扩张之间存在紧密的相关性。近年来,随着节水型试点的深入开展,中游地区提出了“三禁三压三扩”的政策,建立试验基地,开展玉米制种、蔬菜花卉制种、葡萄、啤酒花等作物推广试验及灌溉定额核定,推广垄作沟灌、小畦灌溉、地膜覆盖及喷灌、滴管、管道输水等节水措施,取得了一定成效;但是一些灌区,如山丹、民乐及远离黑河干流的安阳、梨园河等灌区,引水密度较大,灌区仍呈现明显的耕地扩张趋势,加剧了业已严峻的水资源矛盾。因此,合理分配有限的水资源,进一步推进灌区节水配套改造,如河道治理、用水取水计量设施建设,加强生态建设与退耕封育工程,协调耕地扩张和生态保护的用水矛盾,从而实现绿洲灌区水土资源的时空平衡。

参考文献:

- [1] 孟令杰. 中国农业产出技术效率动态研究[J]. 农业技术经济, 2000(5):1-4.
- [2] 王学渊, 赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素: 基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J]. 农业经济问题, 2008, 29(3):10-18.
- [3] 张耀先, 张建国, 王林英. 旱地农业高效用水技术措施[J]. 中国水土保持, 2003(11):34-35.
- [4] Huang M, Dang T, Gallichand J, et al. Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(3):267-278.
- [5] Li F M, Wang P, Wang J, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 67(2):77-88.
- [6] Kaneko S, Tanaka K, Toyota T, et al. Water efficiency of agricultural production in China: regional comparison from 1999 to 2002 [J]. *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 2004, 3(3/4):231-251.
- [7] 王晓娟, 李周. 灌溉用水效率及影响因素分析[J]. 中国农村经济, 2005(7):11-18.
- [8] Wang Z, Zerihun D, Feyen J. General irrigation efficiency for field water management[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 30(2):123-132.
- [9] Ali M H, Shui L T, Yan K C, et al. Modeling water balance components and irrigation efficiencies in relation to water requirements for double-cropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 46(2):167-182.
- [10] Batchelor C, Lovell C, Murata M. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens [J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 32(1):37-48.
- [11] Burke S, Mulligan M, Thornes J B. Optimal irrigation efficiency for maximum plant productivity and minimum water loss[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 40(2):377-391.
- [12] 李周, 于法稳. 西部地区农业生产效率的DEA分析[J]. 中国农村观察, 2005(6):2-10.
- [13] 陈文江, 曹威麟. 改善中国农业用水管理的对策研究[J]. 科技进步与对策, 2006, 23(2):30-32.
- [14] 刘军, 朱美玲, 贺诚. 新疆棉花节水技术灌溉用水效率与影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(2):115-119.
- [15] 李绍飞. 改进的模糊物元模型在灌区农业用水效率评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11):175-181.
- [16] 胡广录, 赵文智, 武俊霞. 绿洲灌区小麦水分生产率及其影响因素的灰色关联分析[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2):369-375.
- [17] 杨开忠, 谢燮. 中国城市投入产出有效性的数据包络分析[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(3):45-47.
- [18] 汪疆玮, 蒙吉军. 基于DEA的乌审旗退耕政策实施效率的多尺度差异及影响因素分析[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(4):73-80.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 佟金萍, 马剑锋, 王慧敏, 等. 农业用水效率与技术进步: 基于中国农业面板数据的实证研究[J]. 资源科学, 2014, 36(9):1765-1772.