

基于绿色生产和资源协同的农业水土资源利用效率研究

刘畅^{1,2} 江恩慧^{1,3} 刘淑雅⁴ 屈博^{1,3} 常布辉^{1,2}

(1. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河南省农村水环境治理工程技术研究中心, 郑州 450003;

3. 水利部黄河下游河道与河口治理重点实验室, 郑州 450003; 4. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 从水土资源协同投入和“经济-社会-生态”效益产出的全局角度分析宏观区域的农业水土资源利用效率, 对于农业生产可持续性具有重要价值。本文结合广义水资源概念及农业生产中的“多投入-多产出”特征, 阐明了农业水土资源利用效率的内涵, 利用数据包络分析法构建了超效率-基于松弛变量(Super-SBM)模型和超效率-考虑非期望产出-基于松弛变量(Super-Undesirable-SBM)模型用于测算生产配置效率概念的农业水土资源利用效率, 并以山东省引黄灌区为例, 测算了研究区51个县域的不考虑生态效益的农业水土资源利用效率(WLUE)、考虑生态效益的农业水土资源利用效率(WLUEE)、水资源利用效率损失(WUEL)和耕地资源利用效率损失(LUEL)。结果表明: 所有县域中, 只有东明县和桓台县WLUE和WLUEE均大于1, 实现了DEA有效, 河口区的WLUE最小, 历城区的WLUEE最小。各县域分为绿色高效型、普通高效型、绿色低效型和普通低效型4种类型, 且绿色高效型和普通高效型县域水资源利用水平更高, 绿色低效型和普通低效型县域耕地利用水平更高。提出了不同类型县域农业水土资源利用效率的针对性改善措施, 为农业水土资源利用效率研究提供新的视角, 研究成果有利于促进研究区农业生产的可持续发展。

关键词: 水土资源; 利用效率; 数据包络分析; 生态效益

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)11-0369-10

OSID: 

Agricultural Water and Land Resources Utilization Efficiency Based on Green Production and Resources Synergy

LIU Chang^{1,2} JIANG Enhui^{1,3} LIU Shuya⁴ QU Bo^{1,3} CHANG Buhui^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China

2. Henan Engineering Research Center of Rural Water Environment Improvement, Zhengzhou 450003, China

3. Key Laboratory of Lower Yellow River Channel and Estuary Regulation, Zhengzhou 450003, China

4. College of Hydrological and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: It is important to analyze the efficiency of agricultural water and land resources utilization in macro-regions from the perspective of synergistic inputs and “economic – social – ecological” benefits for the sustainability of agricultural production. The connotation of agricultural water and land resources use efficiency was clarified by combining the broad concept of water resources and the characteristics of “multiple inputs – multiple outputs” in agricultural production, the super slacks based measure (Super – SBM) model and super undesirable slacks based measure (Super – Undesirable – SBM) model were constructed by using data envelopment analysis to measure the production allocation efficiency. The Super – SBM model and Super – Undesirable – SBM model were used to measure the efficiency of agricultural water and land resources utilization of the concept. Agricultural water and land resources utilization efficiency without considering ecological benefits (WLUE), agricultural water and land resources utilization efficiency with considering ecological benefits (WLUEE), water resource utilization efficiency loss (WUEL) and arable land resource utilization efficiency loss (LUEL) were measured for 51 counties in the study area, taking the Shandong Yellow Diversion Irrigation District as an example. By

收稿日期: 2022-05-20 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42041004)和河南省青年人才托举工程项目(2022HYTP023)

作者简介: 刘畅(1991—),男,助理工程师,博士,主要从事农业水土资源综合利用研究,E-mail: changliuhhu@163.com

通信作者: 江恩慧(1963—),女,教授级高级工程师,主要从事流域系统治理研究,E-mail: jiangenhui@hky.yrcc.gov.cn

comparing and analyzing the WLUE and WLUEE measurement results, WUEL and LUEL decomposition results, the characteristics of agricultural water and soil resource utilization and the size difference of the two resource utilization efficiency losses in each county of the study area were revealed, and the counties of the study area were classified into four types: green and efficient production type, ordinary efficient production type, green and inefficient production type and ordinary inefficient production type. The targeted improvement measures for agricultural soil and water resource use efficiency in each county and a perspective for the study of agricultural soil and water resource utilization efficiency were proposed. The research results were conducive to promoting the sustainable development of agricultural production in the study area.

Key words: water and land resources; utilization efficiency; data envelopment analysis; ecological benefits

0 引言

到 2050 年,全球水资源和粮食需求将比目前的需求高 70% ~ 90%,而亚洲地区,可供进一步开发的耕地十分有限^[1]。水和土地资源是农业生产的两个基础资源,在我国水资源和耕地资源日益紧张、粮食安全问题逐渐引起人们重视背景下,提高水和土地资源的利用效率是保障我国粮食安全以及水土资源可持续利用的基本途径之一,而科学全面地测算农业水土资源效率是实现农业水土资源高效利用的前提。

目前国内外学者在农业水土资源利用效率方面已经做了大量的研究工作。国外方面,GADANAKIS 等^[2]利用数据包络分析法(Data envelopment analysis,DEA)对英格兰不同流域的 66 个农场的农业水资源利用效率进行测算。BORGIA 等^[3]结合聚类分析法和数据包络分析法,对毛里塔尼亚不同灌区水稻灌溉的水资源利用效率进行测算评估,确定了低效率灌区的改善方案。KARAGIANNIS 等^[4]利用随机前沿分析法测算了突尼斯 144 个柑橘农场的灌溉水资源利用效率。LILIENFELD 等^[5]基于美国堪萨斯州 43 个灌区的面板数据测算了其农业水资源利用效率,发现不同灌溉系统类型对农业水资源利用效率的影响没有明显不同。AUZINS 等^[6]对综合评价法、模型法、指标体系法等土地利用效率测算方法进行了汇总,构建了土地利用效率测算分类框架。国内方面,王震等^[7]利用改进的 DEA 模型测算了我国 13 个省份的农业水资源利用效率,明确了各省份农业水资源利用潜力和改进方向。游和远等^[8]将 COD 排放量等污染物排放量作为产出变量,通过构建 DEA 模型测算了我国 31 个省市区土地利用生态效率。张红梅等^[9]采用两维图论聚类 and GIS 空间分析相结合的方法,基于耕地“质量-产出-效率”的分区指标进行耕地利用综合分区。总体来看,目前国内外学者对农业水、土单一资源利用效率

的研究相对较多,而关于农业水土资源综合利用效率研究相对较少,对水土资源在农业生产中的紧密联系重视不足。然而,水资源和土地资源存在相互依存和相互制约的紧密关系,把水土资源作为一个整体研究更有利于发挥农业水土资源系统的综合效能^[10-12]。此外,大多学者都认可 DEA 模型对于农业水土资源利用效率研究具有较强的适用性,如何针对农业生产特征选择合适的 DEA 模型形式仍有待进一步研究。

鉴于我国农业生产中水土资源供需紧张和生态环境负效应日益显著的现状,本文以山东省引黄灌溉区域的 51 个县域为研究对象,结合蓝水、绿水、灰水的概念及农业水土资源利用中的“多投入-多产出”特征,改进传统农业水土资源利用效率测算中的投入产出项设定,以“粮食产值-粮食产量-碳排放和面源污染”代表“经济-社会-生态”效益产出,基于数据包络分析法提出考虑绿色生产和水土资源协同的农业水土资源利用效率测算模型,从宏观角度统筹衡量两种效率测算结果和两种资源利用效率损失的分解结果,诊断分析各县域农业生产中水资源或土地资源利用过程中存在的问题及其节约潜力,以期对山东省引黄灌区的水土资源管理提供决策支持和科学依据。

1 研究对象

研究对象为山东省引黄灌溉区,地理位置位于东经 114°49' ~ 119°06',北纬 34°33' ~ 38°13'。黄河是研究区最主要的灌溉地表水源,黄河下游河床较高且径流量大,为当地农业生产提供了便利的引水条件和重要的灌溉水源保障。黄河水源从菏泽市东明县流入研究区,在东营市垦利区入海。引黄灌区呈条带状分布于黄河两岸,大部分区域属于黄泛冲积平原,只有在大汶河流域的部分区域属于山地丘陵。气候类型为暖温带半湿润季风气候,多年平均降水量在 550 ~ 680 mm 之间且年内分布不均,夏季

降水量集中,6—9 月降水量占全年总量 72% 以上,3、4 月降水量不足全年总量的 9%,春旱现象较为严重。区域年平均光照时数在 2 300~2 700 h 之间,大于 10℃ 积温为 4 400~5 000℃,光热条件适宜植物生长和农作物复种。冬小麦和夏玉米轮作是研究区最主要的种植制度。2004 年以后,随着政府对于粮食生产的重视和粮食补贴等利好政策的推行,研究区粮食播种面积开始逐渐增长,因此本文以冬小麦和夏玉米代表粮食作物分析农业水土资源利用效率。

研究区涉及山东省 9 个市(地),54 个县(区),65 处灌区。一个灌区可能包含多个行政区,而一个行政区也可能处于多个灌区。考虑到本研究涉及的农业生产要素较多,农业资源的配置离不开行政管理者的统筹协调,本文将一个县域作为一个基本单元。由于济南市历下区、市中区、天桥区、槐荫区农业生产规模较小,在济南市水资源公报中合并为一个基本单元统计,本文参照其做法同样将该 4 个区合并为一个基本单元,称为市区四区。综上,本文共选取 51 个基本单元,如图 1 所示。

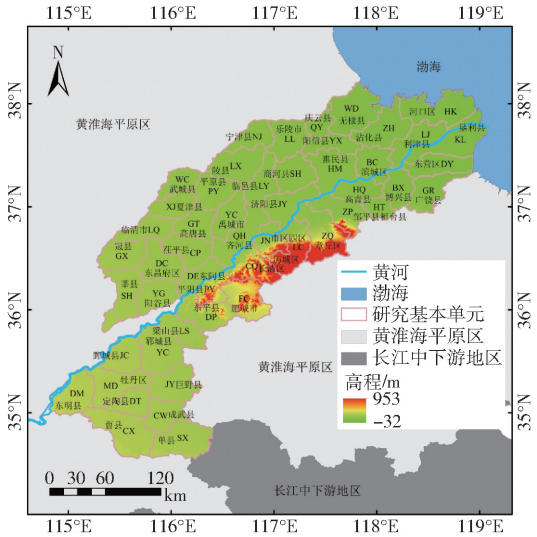


图 1 研究区基本单元名称和代号

Fig. 1 Name and code of basic unit of study area

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文选取 2018 年作为现状年,调研搜集了山东省引黄灌区自然地理情况和农业生产情况相关数据。农作物产量、农作物播种面积以及农村用电量、农用柴油量、化肥施用量(折吨)、农药施用量等数据来源于各地市的统计年鉴。最低气温、最高气温、平均相对湿度、平均风速、日照时数、降水量、蒸发量、气压等数据来源于国家气象科学数据共享服务中心提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。

粮食价格数据源于《中国农产品价格调查年鉴》。农作物灌溉定额数据来源于山东省水利科学研究院提供的《山东省主要农作物灌溉定额》。作物播种日期、作物生育期参照相关学者在山东省农作物需水量调查研究中成果^[13]。国际粮农组织在 FAO56 文件中推荐了 84 种作物的标准作物系数,根据研究区气候、土壤、作物和灌溉条件修正获取,具体修正方法参照文献^[14]。

2.2 投入项与产出项

(1) 水资源投入项

广义农业水资源包括蓝水资源和绿水资源,能够更全面反映形成农作物经济产量的总耗水量^[15]。因此,本文将广义农业水资源作为水资源投入项,计算式为

$$x_{li} = W_{green,i} + W_{blue,i} \tag{1}$$

式中 x_{li} ——第 i 个县域的农业水资源投入量, m^3
 $W_{green,i}$ ——第 i 个县域农业绿水资源投入量, m^3
 $W_{blue,i}$ ——第 i 个县域农业蓝水资源投入量, m^3

绿水资源投入量是指降水实际补充到作物根层非饱和土壤中用于作物生长的水量,即作物种植期的有效降水量。各县域粮食生产中的绿水资源投入量根据有效降水量和粮食作物的播种面积求得,计算方法为

$$W_{green,i} = \sum_{c=1}^C A_{i,c} P_{e,i,c} / 10 \tag{2}$$

式中 C ——粮食作物的种类数量
 $A_{i,c}$ ——第 i 个县域第 c 种粮食作物的播种面积, hm^2
 $P_{e,i,c}$ ——第 i 个县域第 c 种粮食作物生育期内的有效降水量, mm

采用 CROPWAT 8.0 软件根据美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)推荐的方法计算有效降水量,该方法以旬为步长,采用土壤水平衡法,综合考虑作物腾发、降水和灌溉等因素用于估算有效降水量^[16]。计算公式为

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P) / 4.17 & (P < 83) \\ 41.7 + 0.1P & (P \geq 83) \end{cases} \tag{3}$$

式中 P_e ——有效降水量, mm
 P ——降水量, mm

蓝水资源投入量即农业灌溉用水量。本文首先根据各农作物的毛灌溉定额和种植面积数据获得农业灌溉用水量在各农作物间的分配比例,然后根据农业灌溉用水量统计数据推求各县域粮食生产中的蓝水资源投入量,具体计算方法为^[17]

$$W_{blue,i} = \sum_{c=1}^C \alpha_{i,c} W_{IR,i} \tag{4}$$

其中
$$\alpha_{i,c} = \frac{I_{i,c} A_{i,c}}{\sum_{c=1}^{C'} I_{i,c} A_{i,c}} \quad (5)$$

式中 C' ——所有农作物的种类数量
 $\alpha_{i,c}$ ——第 i 个县域的第 c 种农作物灌溉用水量占农业灌溉用水量的比例
 $W_{IR,i}$ ——第 i 个县域的农作物灌溉用水量, m^3
 $I_{i,c}$ ——第 i 个县域的第 c 种农作物的灌溉定额, m^3/hm^2

(2) 耕地资源投入项

在农业生产实践中存在复种和套种的种植模式,同时有些地区存在耕地弃种、抛荒的现象,直接使用耕地面积并不能准确代表耕地资源的实际投入情况,因此选择作物播种总面积作为耕地资源投入。耕地资源投入量 x_{2i} 的计算方法为

$$x_{2i} = \sum_{c=1}^C A_{i,c} \quad (6)$$

(3) 社会效益产出项

粮食产量是指年度内收获的全部粮食数量,按收获季节分为夏收粮食和秋收粮食^[18]。粮食产量的计算方法为

$$y_{1i} = \sum_{c=1}^C y_{1,i,c} \quad (7)$$

式中 y_{1i} ——第 i 个县域的粮食产量, t
 $y_{1,i,c}$ ——第 i 个县域的第 c 种粮食作物的产量, t

(4) 经济效益产出项

粮食产值是以货币形式反映县域年度内粮食产出的总价值,体现县域在该年度粮食生产活动的规模和总量,粮食产值计算方法为

$$y_{2i} = \sum_{c=1}^C y_{1,i,c} P_{r,i,c} \quad (8)$$

式中 y_{2i} ——第 i 个县域的粮食产值, 元
 $P_{r,i,c}$ ——第 i 个县域的第 c 种粮食作物的价格, 元/ t

参照 2018 年《中国农产品价格调查年鉴》中山东省粮食价格,小麦单价为 2 580 元/ t ,玉米单价为 1 990 元/ t 。

(5) 碳排放生态效益非期望产出项

碳排放是关于温室气体排放的一个总称或简称。碳排放量反映农业生产活动对全球气候变暖的负效应。在农业水土开发利用过程中,灌溉、农业机械、化肥、农膜的使用必然会产生不同程度的碳排放。本文将碳排放量作为农业水土资源利用效率测算体系一项非期望产出,用于代表生态效益的负

效应。

农业生产活动碳排放量可以根据全球增温潜势参数统一折算为二氧化碳当量($CO_2 - eq$)。政府间气候变化专门委员会(IPCC)提出可以通过叠加不同类型农业生产资料的碳排放系数和化石能源投入量求得粮食生产中的碳排放量,其公式为

$$b_{1,i} = \sum_{e=1}^E \frac{A_i}{A_i^*} \beta_e E_{i,e} \quad (9)$$

式中 $b_{1,i}$ ——第 i 个县域的碳排放量, kg
 E ——农业能源种类数量
 $E_{i,e}$ ——第 i 个县域第 e 种农业能源使用量, kg
 A_i ——第 i 个县域粮食作物播种面积, hm^2
 A_i^* ——第 i 个县域所有农作物播种面积, hm^2
 β_e ——第 e 种类型的农业能源的二氧化碳折算系数

依据文献[19-24]的研究成果确定研究区农业能源的碳排放系数。

(6) 面源污染生态效益非期望产出项

采用灰水排放量衡量面源污染。灰水是指为将粮食生产过程中因施用化肥和农药产生的面源污染物稀释至环境允许下的最大浓度所需要的水资源^[25]。灰水是一种非消耗用水,反映了粮食生产过程面源污染对生态环境的负面影响程度。在华北平原地区粮食生产中氮肥过量施用的问题最严重,因此本文基于化肥中总氮的投入量计算粮食生产中的灰水排放量,计算公式为

$$b_{2,i} = \frac{\alpha P_{N,i}}{1\,000(c_{\max} - c_{\text{nat}})} \quad (10)$$

式中 $b_{2,i}$ ——第 i 个县域灰水排放量, m^3
 $P_{N,i}$ ——第 i 个县域粮食生产中的总氮投入量, kg
 α ——总氮淋洗率
 $c_{\max}$ ——水体容许的最大总氮质量浓度, mg/L
 c_{nat} ——总氮在自然水体中的本底浓度, mg/L

氮素移动出作物根系活动层以外则视为淋洗。华北地区的冬小麦-夏玉米轮作体系总氮淋洗率 α 平均值为 25%^[26]。研究区对于农业灌溉水质的总氮质量浓度没有明确标准。根据《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》,农业总氮排放质量浓度限值为 60 mg/L ,本文将 $c_{\max}$ 设为 60 mg/L 。在缺失测量数据的情况下,假设 c_{nat} 为 0 mg/L 。

2.3 效率测算模型构建

在实际农业生产中,生产区域的农业水资源投入和耕地资源投入一般情况很难实现等比例的缩减

或扩增,同时农业生产过程中不可避免会产生面源污染与碳排放等生态环境问题。因此,本文采用数据包络分析法构建了 Super - SBM(超效率-基于松弛变量)模型和 Super - Undesirable - SBM(超效率-考虑非期望产出-基于松弛变量)模型分别用于测算不考虑生态效益的农业水土资源利用效率(WLUE)和考虑生态效益的农业水土资源利用效率(WLUEE)^[27-28]。

(1) Super - SBM 模型

如果研究对象有 n 个决策单元、 m 个投入项和 s 个产出项,则投入矩阵和产出矩阵表示为 $\mathbf{X}=[x_{ji}]\in\mathbf{R}^m$ 和 $\mathbf{Y}=[y_{ri}]\in\mathbf{R}^{s\times n}(j=1,2,\cdots,m;r=1,2,\cdots,s;i=1,2,\cdots,n)$ 。 x_{ji} 表示第 i 个决策单元的第 j 项投入, y_{ri} 表示第 i 个决策单元的第 r 项产出。Super - SBM 模型可以表示为

$$\left\{\begin{array}{l} \min WLUE = 1 - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{s_j^-}{x_{ji_0}} \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq i_0}^n x_{ji} \lambda_i + s_j^- = x_{ji_0} \\ \lambda_i \geq 0 \\ s_j^- \geq 0 \\ s_r^+ \geq 0 \end{cases} \end{array}\right. \quad (11)$$

式中 s_j^- ——第 j 个投入项的松弛变量
 s_r^+ ——第 r 个产出项的松弛变量
 λ_i ——各县域投入产出向量线性组合后投影对象的权系数

不考虑生态效益的农业水土资源利用效率有两个投入项:水资源投入和耕地资源投入;有两个产出项:粮食产量和粮食产值,故本文 m 和 s 均取值为 2。山东省引黄灌溉区的决策单元为 51 个县域,故 $n=51$ 。 $s_1^-/(mx_{ji_0})$ 即为第 i_0 个决策单元的水资源投入效率损失(WUEL), $s_2^-/(mx_{ji_0})$ 即为第 i_0 个决策单元的耕地资源投入效率损失(LUEL)。

(2) Super - Undesirable - SBM 模型

Super - SBM 模型没有考虑非期望产出情况,因此碳排放量和面源污染并没有纳入测算体系。非期望产出作为一种非常规的产出项,一共有 3 种处理方式:①将非期望产出作为投入处理^[29]。②将非期望产出进行倒数或负值处理,从而转化为期望产出^[30]。③通过调整模型结构,将非期望产出直接作为产出变量处理^[31]。在投入角度的超效率测算模型中,第 2 种和第 3 种处理非期望产出的方式容易出现无可行解的情况,因此本文采用第 1 种处理方式构建 Super - Undesirable - SBM 模型测算,模型表

达式为

$$\left\{\begin{array}{l} \min WLUEE = 1 - \frac{1}{m+k} \left(\sum_{j=1}^m \frac{s_j^-}{x_{ji_0}} + \sum_{p=1}^k \frac{s_p^{b-}}{b_{pi_0}} \right) \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1, i \neq i_0}^n x_{ji} \lambda_i + s_j^- = x_{ji_0} \\ \sum_{i=1, i \neq i_0}^n b_{pi} \lambda_i + s_p^{b-} = b_{pi_0} \\ \lambda_i \geq 0 \\ s_j^- \geq 0 \\ s_p^{b-} \geq 0 \end{cases} \end{array}\right. \quad (12)$$

式中 k ——非期望产出数量
 s_p^{b-} ——第 p 个非期望产出项的松弛变量

3 结果与讨论

3.1 WLUE 和 WLUEE 测算结果

利用式(1)~(10)计算得到山东省引黄灌溉区的 51 个县域投入项和产出项(图 2),然后将投入项和产出项数值分别代入 Super - SBM 模型和 Super - Undesirable - SBM 模型测算得到 51 个县域的 WLUE 和 WLUEE 的测算结果(图 3)。

如图 2 所示,受农业生产规模影响,水资源投入量与粮食播种面积之间、粮食产量与粮食产值之间、碳排放与灰水排放量之间均具有较强的匹配性。研究区水资源投入量为 178.02 亿 m^3 ,粮食播种总面积为 475.87 万 hm^2 ,粮食总产量为 2 956.55 万 t,粮食总产值为 674.02 亿元,碳排放总量为 1 234.13 万 t,灰水排放量为 29.75 亿 m^3 。在水资源投入中,各个县域的绿水利用量明显大于蓝水利用量,研究区绿水资源投入总量为 112.98 亿 m^3 ,而蓝水资源投入总量仅为 65.04 亿 m^3 ,由此可知绿水资源在粮食生产中占据非常重要的地位。在有效降水差异较大的大尺度区域,仅用蓝水计算农业用水效率难以反映真实的用水水平,将广义农业水资源作为 DEA 模型的水资源投入项能更准确地测算农业水土资源利用效率。

由数据包络分析法原理可知,若效率大于等于 1,则说明资源实现了最优的配置利用,称为 DEA 有效。从 WLUE 的测算结果来看(图 3),东明县和桓台县的 WLUE 大于 1,说明这两个县域达到了 DEA 有效。在不考虑生态效益的条件下,这两个县的农业水土资源利用水平在所有县域中最理想。河口区的 WLUE 最低,说明该区域农业水土资源利用的生产力水平较差。河口区位于滨海地区,土地盐碱化严重,导致耕地资源效率损失较高。此外,当地地表水的含盐量较高,地表径流难以利用,地下水矿化度

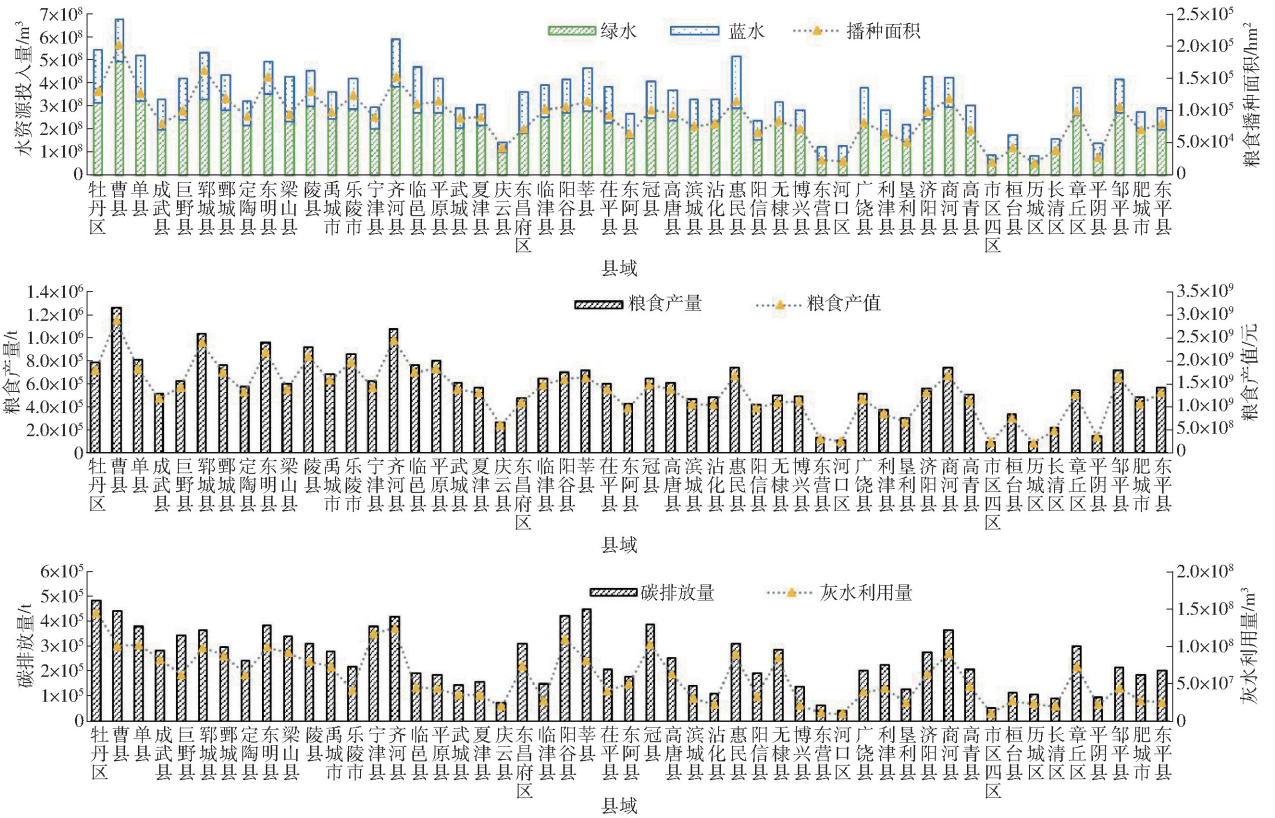


图2 51个县域投入项和产出项的计算结果

Fig.2 Results of input terms and output terms for 51 counties

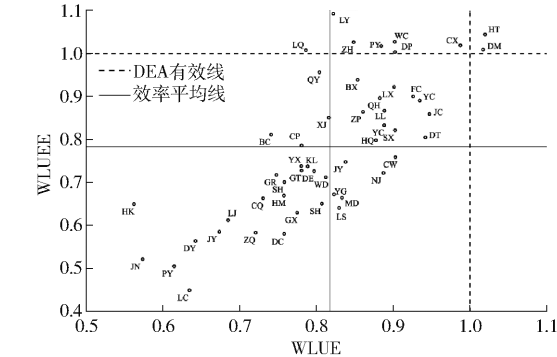


图3 51个县域WLUE和WLUEE测算结果

Fig.3 Results of WLUE和WLUEE for 51 counties

高,多为苦咸水,不宜于灌溉,当地灌溉主要依靠王庄灌区和东水源灌区引入的黄河水。综合所述,河口区较差的水土资源条件导致其WLUE最低。

从WLUEE的测算结果来看(图3),除了东明县和桓台县的WLUEE大于1,曹县、临邑县、平原县、武城县、沾化县也大于1,说明在考虑生态效益的情况下,该7个县域的农业水资源利用效率均达到了DEA有效。临邑县的WLUE只有0.822,略高于所有县域的平均水平,但是WLUEE为1.092,达到了所有县域的最高水平,说明临邑县在水土资源的利用过程中对生态环境的保护能力较强,但生产力水平并不高。历城区的WLUEE最低,即在考虑生态效益的情况下,该区域农业水土

资源利用水平在所有县域中最低,说明该区域在农业生产中,碳排放量和灰水排放量等非期望产出较多。历城区北邻黄河,南部为山地丘陵带,区内海拔变化幅度较大,农业生产中电力灌溉和农业机械等农业能源的使用量较大,导致其对生态环境的负效应也比较大。

3.2 WUEL和LUEL分解结果

根据投入角度的Super-SBM模型中水资源投入和耕地资源投入的松弛变量,计算得到WUEL和LUEL。WUEL和LUEL根据决策单元到同一生产前沿面不同方向投影的相对距离得到,二者具有统一度量标准,因而通过对比WUEL和LUEL也可以实现两种资源利用水平的相互对比。如图4所示,从具体县域的效率损失分解结果来看,河口区的WUEL最大。河口区位于滨海地区,土地盐碱化严重,在盐碱地处理过程中大量引水灌溉,从而导致其WUEL最大。市区四区的LUEL最大。市区四区是济南市的主要城区,耕地资源较小且分布零散,同时位于丘陵地区,地形条件较差,从而导致其LUEL最大。阳谷县、东阿县、茌平县、东昌府区和临邑县的WUEL大于平均水平,而LUEL小于平均水平,说明这些县域在耕地资源利用方面具有更强的优势,未来应更加重视提高农业节水能力。单县、牡丹区、沾化县、无棣县、巨野县、商河县、夏津县和梁山县的

LUEL 大于平均水平, 而 WUEL 小于研究区的平均水平, 说明这些县域未来应该更加重视耕地管理和质量改善, 提高耕地资源的利用效率。

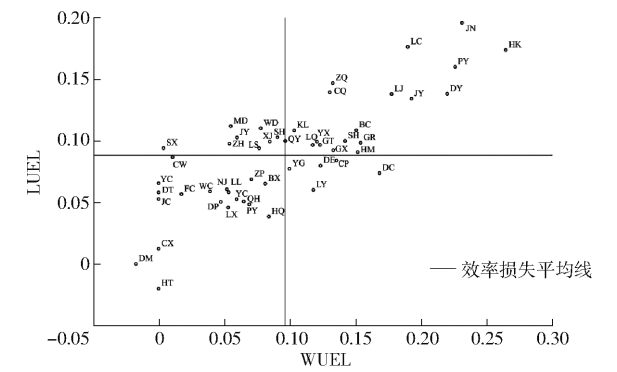


图 4 51 个县域 WUEL 和 LUEL 分解结果
Fig. 4 Results of WUEL and LUEL for 51 counties

当前学者对于水土资源紧密关系愈加关注^[32-34]。水土资源之间内在联系多、耦合关系复杂, 本文对各县域的 WUEL 和 LUEL 进行 Pearson 相关性检验后发现, 两种资源在 99% 的置信区间下具有显著相关性, 相关系数为 0.789, 该结果印证了水土资源的紧密联系。农业水土资源利用效率的提高需要增强水土资源的协同关系, 而对农业水、土单一资源利用效率分别进行研究难以衡量研究对象水、土资源之间利用水平的差异。利用 DEA 模型可以实现对投入产出项效率损失和利用过程等多种形式的分解。姜秋香等^[35]将水土资源利用过程分解为水土资源开发与经济效益转化两个子阶段, 发现黑龙江省各地市水土资源经济效益转化不平衡。栾福超等^[36]利用 DEA 模型分解了不同作物种植面积的投入冗余比例, 发现水稻的水土资源利用技术效率明显高于大豆、玉米及小麦三大旱作物。本文通过分解农业水土资源的效率损失, 确定了研究区不同县域的水土资源利用方面的技术优势, 有助于研究对象制定针对性的水土资源管理措施, 从而实现水土资源利用效率的协同提升。

3.3 农业水土资源利用分类

通过对比 WLUE 和 WLUEE, 不仅衡量出研究区不同县域农业水土生产力大小, 而且可以识别出农业水土资源利用效率较高的县域是否对生态环境造成较大的损害, 即该县域水土资源利用模式是否属于绿色生产。在当前水土资源利用效率研究中, 生态效益逐渐引起相关学者的重视, 在测算耕地利用效率时考虑到了碳排放或面源污染等生态效益的负效应^[37-38]。本文将生态效益作为非期望产出项纳入测算体系后, 又将前后结果进行了进一步对比, 根据各县域 WLUE 和 WLUEE 测算结果对比情况 (图 3), 将研究区各县域分为 4 种类型: 绿色高效

型、普通高效型、绿色低效型和普通低效型。

(1) 绿色高效型包括桓台县、东明县、曹县等 20 个县域, 位于图 3 效率平均线右上方。绿色高效型县域的 WLUEE 和 WLUE 均高于研究区平均值。该类型县域能在对生态环境造成较小影响前提下, 依然能保持较高的农业水土资源生产力, 未来可以充分利用水土资源禀赋优势, 大力发展农业生产规模, 提高区域的粮食产出。

(2) 普通高效型包括巨野县、成武县、宁津县、阳谷县、牡丹区和梁山县等 6 个县域, 位于图 3 的效率平均线右下方。普通高效型县域主要特征为 WLUEE 处于研究区平均值以下, 而 WLUE 高于研究区平均值。该类型县域农业水土资源的生产力比较高, 但对于生态环境的损害强度较大, 未来在粮食生产过程中应重视对生态环境的保护。

(3) 绿色低效型包括临清市、庆云县、夏津县、滨城区和茌平县 5 个县域, 位于图 3 的效率平均线左上方。绿色低效型县域主要特征为 WLUE 位于研究区平均值以下, 而 WLUEE 高于研究区平均值。该类型县域农业水土资源利用的生产力不高, 但在水土资源的利用过程中对生态环境的保护能力较强, 未来应该着重提高当地粮食生产能力。

(4) 普通低效型包括市区四区、平阴县、东营区等 20 个县域, 位于图 3 的效率平均线左下方, 普通低效型县域的 WLUEE 和 WLUE 均低于研究区平均值。该类型县域农业水土生产力较低, 并且农业生产对于生态环境的影响也比较大, 未来应该注重提升节水工程改造和耕地质量等级提升, 同时在保证粮食安全的前提下, 科学调整农业产业结构, 缩减农业生产规模。

从不同类型县域的空间分布来看 (图 5), 相同类型的县域具有较明显的聚集特征。高效率县域主要聚集于研究区南部、研究区西北部、鲁中丘陵与北部滨海地区的交界处, 其中, 研究区南部的普通高效型县域较多, 说明该区域虽然水土资源利用效率较高, 但农业生产对于生态环境的压力相对较大。低效率县域主要分布于鲁中丘陵、北部滨海地区、研究区西部, 其中绿色低效型县域主要聚集在研究区西南部, 说明该区域虽然水土资源利用效率较低, 但农业生产对于生态环境的压力相对较小。

本文用冷热点分析法对研究区各县域的 WLUE 和 WLUEE 进行空间统计分析, 结果如图 6 所示, WLUE 的高值 (热点) 显著聚集于研究区南部, WLUEE 的高值 (热点) 显著聚集于研究区西部, 鲁中丘陵和北部滨海地区均是 WLUE 和 WLUEE 的低

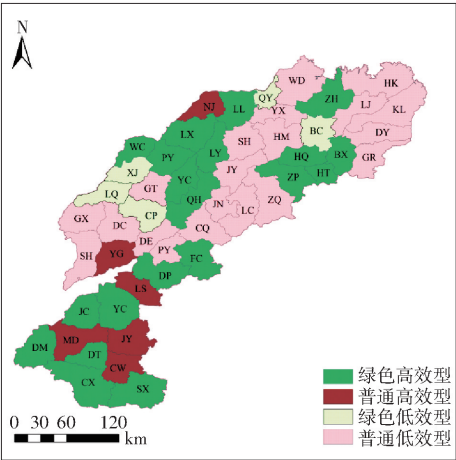


图5 研究区不同类型县域的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of different types of counties in study area

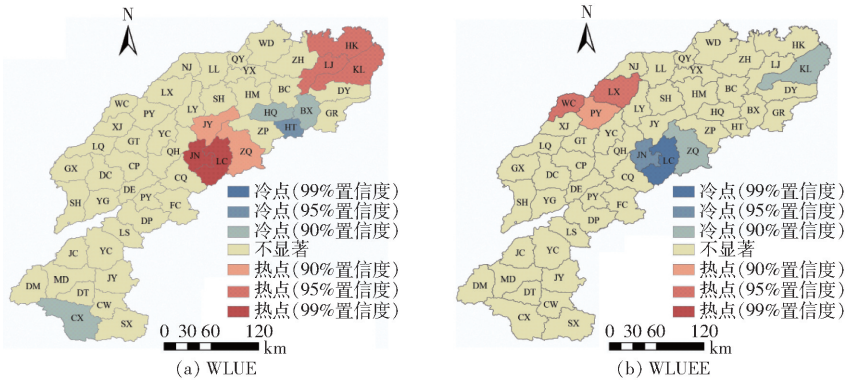


图6 研究区WLUEE和WLUE的冷热点分布
Fig.6 Cold hot spot distributions of WLUEE and WLUE in study area

表1 不同类型县域WLUE、WLUEE、WUEL、LEUL平均值

Tab.1 Mean values of WLUE, WLUEE, WUEL and LEUL for different types of counties

类型	WLUE 平均值	WLUEE 平均值	WUEL 平均值	LEUL 平均值
绿色高效型	0.909	0.931	0.040	0.051
普通高效型	0.852	0.701	0.059	0.089
绿色低效率型	0.785	0.882	0.117	0.097
普通低效率型	0.720	0.636	0.158	0.122
研究区	0.816	0.784	0.096	0.088

未来应更加重视水资源效率的提高。

4 结论

(1)在考虑生态效益的情况下,东明县、桓台县、曹县、临邑县、平原县、武城县、沾化县7个县域的农业水土资源利用效率均达到了DEA有效,其农业水土资源利用水平在所有县域中最理想,河口区受限于其较差的水土资源条件,农业水土资源利用效率最低。在不考虑生态效益的情况下,东明县和桓台县农业水土资源利用效率高于其他5个县域,历城

值(冷点)显著聚集区。结果进一步验证了研究区南部和西部均是高效率县域聚集区,但研究区西部对生态环境的压力更小。

从不同类型县域的两种资源分解结果统计特征来看(表1),绿色高效型和普通高效型县域的WUEL平均值为0.040、0.059,均小于LUEL的0.051、0.089,而绿色低效率型和普通低效率型县域的WUEL平均值为0.117、0.158,均大于LUEL的0.097、0.122。高效率县域水资源效率损失更小,说明其水资源利用水平高于耕地资源,耕地资源相比水资源具有更大的节约潜力,高效率县域未来应更加重视耕地效率的提高;低效率县域水资源效率损失更大,说明其水资源利用水平低于耕地资源,水资源相比耕地资源具有更大的节约潜力,低效率县域

区受限于其地形条件,碳排放量和灰水排放量等非期望产出较多,农业水土资源利用效率最低。

(2)阳谷县、东阿县、茌平县、东昌府区和临邑县的WUEL大于平均值,在耕地资源利用方面具有更强的优势,未来应更加重视提高农业节水能力。单县、牡丹区、沾化县、无棣县、巨野县、商河县、夏津县和梁山县的LUEL大于平均值,这些县域未来应该更加重视耕地管理和质量改善,提高耕地资源的利用效率。

(3)根据Super-SBM模型和Super-Undesirable-SBM模型测算的农业水土资源利用效率(WLUE和WLUEE),研究区51个县域可以分为绿色高效型、普通高效型、绿色低效率型和普通低效率型4种类型。绿色高效型和普通高效型县域水资源利用水平高于耕地资源,耕地资源相比水资源具有更大的节约潜力,而绿色低效率型和普通低效率型县域则相反。

(4)构建的Super-SBM模型能够测算农业水土资源利用效率,同时可以实现农业水土资源利用效率损失和耕地资源利用效率损失分解,而Super-

Undesirable - SBM 模型能够进一步将反映生态效益的非期望产出项纳入测算范围,实现了考虑生态效益的农业水土资源利用效率测算,测算结果科学准确地反映了研究区的农业水土资源利用状况。为农业水土资源利用效率研究提供新的视角,研究成果有利于促进研究区农业生产的可持续发展。

参 考 文 献

[1] BOSSION D, GEHEH K, CRITCHLEY W. Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(4): 536 - 542.

[2] GADANAKIS Y, BENNETT R, PARK J, et al. Improving productivity and water use efficiency: a case study of farms in England[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 160: 22 - 32.

[3] BORGIA C, GARCIA B M, TAO L, et al. Benchmarking for performance assessment of small and large irrigation schemes along the Senegal Valley in Mauritania[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 121: 19 - 26.

[4] KARAGIANNIS G, TZOUVELEKAS V, XEPAPADEAS A, et al. Measuring irrigation water efficiency with a stochastic production frontier[J]. *Environmental and Resource Economics*, 2003, 26(1): 57 - 72.

[5] LILIENFELD A, ASMILD M. Estimation of excess water use in irrigated agriculture: a data envelopment analysis approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1): 73 - 82.

[6] AUZINS A, GEIPELE I, STAMURE I. Measuring land-use efficiency in land management[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 804: 205 - 210.

[7] 王震,吴颖超,张娜娜,等. 我国粮食主产区农业水资源利用效率评价[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 292 - 296.
WANG Zhen, WU Yingchao, ZHANG Na'na, et al. Evaluation on agricultural water utilization efficiency in major grain producing areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 292 - 296. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 张红梅,宋戈,王思琢. 基于“质量-产出-效率”的辽宁省耕地利用分区[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 234 - 242.
ZHANG Hongmei, SONG Ge, WANG Sizhuo. Zoning of cultivated land use in Liaoning Province based on “quality - output - efficiency”[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(13): 234 - 242. (in Chinese)

[10] 宫兴龙,付强,关英红,等. 土地结构改变对水土资源平衡的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 319 - 329.
GONG Xinglong, FU Qiang, GUAN Yinghong, et al. Influence of land structure change on balance of soil and water resources [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 319 - 329. (in Chinese)

[11] 江恩慧,王远见,田世民,等. 流域系统科学初探[J]. *水利学报*, 2020, 51(9): 1026 - 1037.
JIANG Enhui, WANG Yuanjian, TIAN Shimin, et al. Exploration of watershed system science[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(9): 1026 - 1037. (in Chinese)

[12] 何国华. 我国北方地区水土资源空间优化及其生态效应系统评价[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019.
HE Guohua. Evaluation of spatial optimization of land and water resource in Northern China and its ecological effects[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese)

[13] 徐建辉,季伟,张文龙. 从作物需水量与灌溉需水量论簸箕李灌区灌溉制度的改进[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(增刊 1): 225 - 228.
XU Jianhui, JI Wei, ZHANG Wenlong. Discussion about improvement of irrigation program in Bojili Irrigation District according to crop water requirement and irrigation water demand[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(Supp. 1): 225 - 228. (in Chinese)

[14] 康绍忠,孙景生,张喜英,等. 中国北方主要作物需水量与耗水管理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2018.

[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] CAO X, WANG Y, WU P, et al. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 529: 10 - 20.

[17] 吴普特,孙世坤,王玉宝,等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 651 - 660.
WU Pute, SUN Shikun, WANG Yubao, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 651 - 660. (in Chinese)

[18] 梁流涛,曲福田,王春华. 基于 DEA 方法的耕地利用效率分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008(2): 242 - 246.
LIANG Liutao, QU Futian, WANG Chunhua. Analysis on cultivated land use efficiency based on DEA[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008(2): 242 - 246. (in Chinese)

[19] DYER J A, DESJARDINS R L. Carbon dioxide emissions associated with the manufacturing of tractors and farm machinery in Canada[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 93(1): 107 - 118.

[20] TAGHABIFAR H, MARDANI A. Prognostication of energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions analysis of apple production in West Azarbayjan of Iran using artificial neural network[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 159 - 167.

- [21] ZHANG X H, PAN H Y, CAO J, et al. Energy consumption of China's crop production system and the related emissions[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43: 111–125.
- [22] TIAN Y, ZHANG J B, HE Y Y. Research on spatial-temporal characteristics and driving factor of agricultural carbon emissions in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2014, 13(6): 1393–1403.
- [23] WANG J X, ROTHAUSEN S G, CONWAY D C, et al. China's water-energy nexus: greenhouse-gas emissions from groundwater use for agriculture[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 14035–14044.
- [24] WEST T O, MARLAND G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1–3): 217–232.
- [25] 王丹阳,李景保,叶亚亚,等. 一种改进的灰水足迹计算方法[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(12): 2120–2130.
WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. An improved calculation method of grey water footprint[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12): 2120–2130. (in Chinese)
- [26] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 684–697.
ZHAO Rongfang, CHEN Xinping, ZHANG Fusuo. Nitrogen cycling and balance in winter inter-wheat-summer-maize rotation system in Northern China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(4): 684–697. (in Chinese)
- [27] TONE K. A slacks-based measure of super-efficiency in data envelopment analysis[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 143(1): 32–41.
- [28] 谭忠昕,郭翔宇. 基于超效率DEA模型的中国粮食生产用水效率评价[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 280–288.
TAN Zhongxin, GUO Xiangyu. Evaluation and analysis of Chinese grain production water use efficiency based on super-efficiency DEA model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 280–288. (in Chinese)
- [29] FARE R. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a non-parametric approach[J]. *Review of Economics & Statistics*, 1989, 71(1): 90–98.
- [30] SEIFORD L M, ZHU J. A response to comments on modeling undesirable factors in efficiency evaluation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 161(2): 579–581.
- [31] FARE R, GROSSKOPF S, PASURKA C A. Environmental production functions and environmental directional distance functions[J]. *Energy*, 2007, 32(7): 1055–1066.
- [32] 郑久瑜,赵西宁,操信春,等. 河套灌区农业水土资源时空匹配格局研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 132–136.
ZHENG Jiuyu, ZHAO Xining, CAO Xinchun, et al. Study on spatiotemporal matching pattern of agricultural water and land resources in Hetao Irrigation District[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 132–136. (in Chinese)
- [33] 李晓燕,郝晋珉,陈爱琪. 山东省农业水土资源时空匹配格局及评价研究[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 1–11.
LI Xiaoyan, HAO Jinmin, CHEN Aiqi. Time-space matching pattern and evaluation of agricultural water and soil resources in Shandong Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(11): 1–11. (in Chinese)
- [34] 王秀丽,李程秀,刘瑜歆,等. 基于宜耕性评价的耕地利用效率分区与提升路径[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 212–218.
WANG Xiuli, LI Chengxiu, LIU Yuxin, et al. Zoning and improving path of cultivated land use efficiency based on evaluation of cultivated land suitability[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 212–218. (in Chinese)
- [35] 姜秋香,赵岫竹,王子龙,等. 基于两阶段模型的水土资源利用效率评价[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(12): 36–42.
JIANG Qiuxiang, ZHAO Youzhu, WANG Zilong, et al. Water and soil resources utilization efficiency evaluation based on two-stage model[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(12): 36–42. (in Chinese)
- [36] 栾福超,张郁,刘岳琪. 水足迹视角下三江平原地区农业水土资源配置效率研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(4): 30–35.
LUAN Fuchao, ZHANG Yu, LIU Yueqi. Research on land and water resources matching efficiency based on water footprint in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(4): 30–35. (in Chinese)
- [37] 黄祥芳. 面源污染视角下江西省耕地利用效率研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(12): 177–183.
HUANG Xiangfang. A study on efficiency of cultivated land use of Jiangxi Province from the perspective of no-point resource pollution[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(12): 177–183. (in Chinese)
- [38] 匡兵,卢新海,韩璟,等. 考虑碳排放的粮食主产区耕地利用效率区域差异与变化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 1–8.
KUANG Bing, LU Xinhai, HAN Jing, et al. Regional differences and dynamic evolution of cultivated land use efficiency in major grain producing areas in low carbon perspective[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(11): 1–8. (in Chinese)