

文章编号:0559-9350(2020)10-1189-10

水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价

操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 任杰, 郭相平

(河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为综合评价稻田水资源利用效率, 优选高效灌排模式, 本文基于水足迹理论, 考虑水资源利用率、水资源产出效益和水量及环境效益3个方面, 构建稻田水资源利用效率综合评价指标体系, 利用层次分析法和模糊综合评价模型对2015—2018年各处理稻田水资源利用效率进行综合评价, 并与单个指标的评价进行对比。结果显示: 各处理作物水足迹年均值分别为976.8(浅水勤灌)、1008.7(浅湿灌溉)、954.4(控制灌溉)和792.6 mm(蓄水-控灌), 蓝、绿及灰水比例年均值分别为16.4%、40.9%和42.7%; 水资源产出效益在水资源利用效率评价中占据首要位置; 各处理稻田水资源利用效率综合评分值在2.8058~3.9432之间, 等级为中或中高, 优选出的高效灌排模式为蓄水控灌; 作物水分利用效率、作物水足迹与综合评价的对比表明水资源利用效率综合评价至关重要。基于水足迹的稻田水资源利用效率评价能够为农业用水效率评价提供一种新视角, 为农业节水尤其是水稻节水的科学研究和决策提供实践依据。

关键词:农业用水效率; 蓝绿水; 作物水足迹; 灌排模式; 综合评价

中图分类号: S274

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200260

1 研究背景

因水稻喜湿耐淹的特性, 生育期天然降水往往难以满足其需水特征, 发展灌溉的同时满足排水条件是水稻种植过程中的基本要求^[1]; 同时, 化肥作为水稻增产保产的有效途径, 正被过度施用, 从而增加了农业面源污染的风险^[2]。因此, 在节约水资源、提高产量的同时降低对环境的负面影响是稻田水资源利用效率评价和提升的目标。在田间水肥运移过程和水分耗用量核算的基础上进行指标构建和分析是农业用水效率评价研究的一般路径^[3-4]。传统农业用水效率研究经历了由单一的灌溉效率或水分生产力指标向综合评价发展的过程^[5]; 稻田用水效率评价也实现了由节水灌溉到节水减排控污多重需求的转变^[6]。水稻具有明显的两栖性, 不同生育期对土壤水分的要求不同, 适宜的水分亏缺在复水后水稻表现出补偿效应。因此, 通过改变灌溉排水模式来调控稻田水肥运移过程, 是稻田水分管理和污染控制的主要措施, 也得到了广泛认可^[7-9]。然而, 节水与控污效果往往独立评价而难以直接比较, 无法为用水效率和灌排模式选择提供全局信息。

水足迹概念的出现为全面评价农业用水及其效率提供了全新的方法。作物水足迹为农作物生育期消耗和污染的水资源总量, 由蓝水足迹(灌溉水消耗量)、绿水足迹(有效降水消耗量)和灰水足迹(农田释放污染物所需的水资源量)3个部分组成^[10-11]。与传统方法相比, 区分蓝、绿水资源的不同属性的基础上同时量化农业生产对水资源数量和质量的影响是水足迹理论的进步之处^[12-13]。因此, 不同区域尺度上作物水足迹及其组成的表现均得到国内外学者的分析^[14-16]。在此基础上, 已有学者探索基于水足迹的农业用水和节水评价研究。吴普特等^[17]提出3种不同作物生产水足迹量化方法, 以适应不

收稿日期: 2020-04-21; 网络首发时间: 2020-09-30

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200929.0910.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979074); 国家重点研发计划项目(2018YFF0215702); 中央高校基本科研业务费专项(B200202095)

作者简介: 操信春(1986-), 教授, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

同评价目标和尺度；Cao等^[18]和Wang等^[19]在田间和区域尺度上进行了水稻作物生产水足迹和水分生产率指标的对比分析；操信春等^[20-21]将作物水足迹分别与灌溉发展程度、水资源禀赋结合，建立农业用水效果评价和水短缺指标，全面评估区域农业用水效率；Mekonnen等^[22]划定作为生产水足迹标准，为农业节水服务。此外，田间管理和节水灌溉对作物水足迹影响研究也开始受到关注^[23-24]。作物水足迹在农业用水效率评价和水资源管理中的优势正在慢慢显现。然而，当前研究大多强调作物水足迹本身，将水足迹理论与传统范式相结合，既能量化农业用水和作物产出，又能分析环境影响，可为农业用水效率评价提供新视角。

本文通过不同灌排模式下的稻田试验，观测各处理的水、肥运移和农作物产量指标并进行气象数据收集，从水资源利用率、水资源产出效益、水量及环境效益3个方面出发，形成合理的评价指标体系，进行基于水足迹的稻田水资源利用效率评价，分析水足迹框架下稻田水资源高效利用的灌排模式。

2 研究方法

2.1 试验布设与观测 试验于2015—2018年在河海大学江宁节水园区内进行。试验共设有4种灌排模式处理：浅水勤灌(frequent and shallow irrigation, FSI)、浅湿灌溉(wet-shallow irrigation, WSI)、控制灌溉(controlled irrigation, CI)和蓄水-控灌(rain-catching and controlled irrigation, RC-CI)。灌排控制指标参考了彭世彰等^[6]和郭相等^[8]的文献资料。试验设3个重复，各有底试验小区面积一致(图1)。全生育期人工拔草，除灌排标准外其余农技措施均相同。4年试验水稻在6月中下旬移栽，10月下旬收获，生育期内分别施以基肥、返青肥、分蘖肥和穗肥，其中基肥为复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15%:15%:15%)施用量300 kg/hm²，返青肥、分蘖肥、穗肥均为尿素(含氮量≥46.2%)，施用量分别为：150、125和150 kg/hm²。

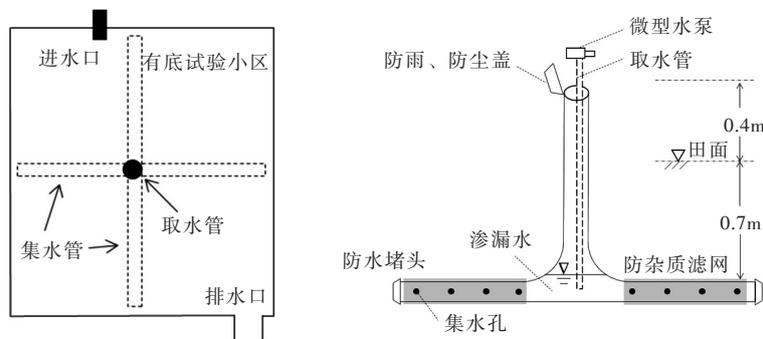


图1 试验小区布置示意

观测指标和测定方面，土壤水分情况：每日上午8时测定，当田面有水层时，通过标准钢尺读取水层深度，遇明显降雨进行加测；当田面无水层时，利用埋设在土壤中0~30 cm的TDR探头进行土壤含水率测定。灌溉和排水情况：参照灌排控制标准，记录每次的灌排水时间和灌排水量。生育期每3 d排地下水一次，到生育期末补测一次，所有排水均取样进行氮素测试。氮素浓度测试：水样中总氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，铵氮测定采用纳氏试剂比色法，硝氮测定采用紫外分光光度法。水样采集后尽量2 h内进行测试分析，若水样较多，放入冰柜于4℃低温保存，24 h内处理完毕。产量：水稻完熟期，按面积单打单收换算实际产量。在中国气象数据网上搜集试验区附近气象站点的降雨量资料。

2.2 作物水足迹计算 以稻田水量平衡为基础计算农作物水足迹，包含蓝、绿和灰水足迹^[17]：

$$CWF = CWF_{\text{blue}} + CWF_{\text{green}} + CWF_{\text{grey}} \quad (1)$$

式中： CWF 为作物水足迹； CWF_{blue} 为蓝水足迹； CWF_{green} 为绿水足迹； CWF_{grey} 为灰水足迹，单位均为mm。对于考虑水肥利用全过程的稻田系统，各组分计算方法为：

$$CWF_{\text{blue}} = \sum_{t=1}^T ET_t^{\text{b}} \quad (2)$$

$$CWF_{\text{green}} = \sum_{t=1}^T ET_t^{\text{g}} \quad (3)$$

$$CWF_{\text{grey}} = \frac{\sum_{t=1}^T (C_{N[t]}^{\text{s}} \times V_{N[t]}^{\text{s}} + C_{N[t]}^{\text{u}} \times V_{N[t]}^{\text{u}})}{C_{\text{max}} - C_{\text{net}}} \quad (4)$$

式中： T 为核算时段的总天数； ET_t^{b} 和 ET_t^{g} 分别为第 t 天田间蒸散发水量中来自灌溉和天然降水的部分； $C_{N[t]}^{\text{s}}$ 与 $C_{N[t]}^{\text{u}}$ 分别为第 t 天地表排水与地下排水中氮素浓度，mg/L； $V_{N[t]}^{\text{s}}$ 和 $V_{N[t]}^{\text{u}}$ 分别为第 t 天地表排水与地下排水水量，mm； C_{max} 为环境容许最大浓度，以《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中的地表水V类水质规定的总氮的浓度上限作为 C_{max} 代入公式计算，即2.0 mg/L； C_{net} 为污染物自然界本底浓度，mg/L，试验灌溉水来源为自来水，取本底浓度为0。田间每日蓝绿水足迹按日降水与灌水对田间水分平衡各要素的贡献比例计算：

$$\begin{cases} ET_t^{\text{b}} = ET_t \times \frac{F_{t-1}^{\text{b}}}{F_{t-1}} \\ ET_t^{\text{g}} = ET_t \times \frac{F_{t-1}^{\text{g}}}{F_{t-1}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： F_{t-1}^{b} 、 F_{t-1}^{g} 和 F_{t-1} 分别为第 $t-1$ 天田间水量、田间水量中蓝水和绿水含量，单位均为mm。

稻田日蒸发蒸腾量根据每日稻田水量平衡计算：

$$P_t + I_t = ET_t + SD_t + DP_t + \Delta F_t \quad (6)$$

式中： P 、 I 、 SD 和 DP 分别为降水量、灌溉水量、地表排水量和深层渗漏量； ΔF_t 为第 t 天稻田田间水量变化，即 $\Delta F_t = F_{t+1} - F_t$ ，用水层深度表示，单位均为mm。

根据田间蓝绿水利用与分解构建日步长水动态平衡方程，土壤初始有效水含量和初始水层划归为绿水，可求出每日田间蓝绿水量：

$$\begin{cases} F_t^{\text{b}} = F_{t-1}^{\text{b}} + (P_t + I_t - SD_t) \times \frac{I_t}{P_t + I_t} - (DP_t + ET_t) \times \frac{F_{t-1}^{\text{b}}}{F_{t-1}} \\ F_t^{\text{g}} = F_{t-1}^{\text{g}} + (P_t + I_t - SD_t) \times \frac{I_t}{P_t + I_t} - (DP_t + ET_t) \times \frac{F_{t-1}^{\text{g}}}{F_{t-1}} \end{cases} \quad (7)$$

作物生产水足迹(crop production water footprint, WFP)的值 WFP 用作物水足迹和产量(Y)的比值来计算，衡量作物对水资源的利用效率：

$$WFP = 10 \times \frac{CWF}{Y} \quad (8)$$

式中 WFP 的单位 m^3/kg ，10是单位转换系数。

2.3 层次分析法与模糊综合评价 考虑稻田水资源利用效率评价的特点，本文选择层次分析法和模糊综合评价模型计算综合评价值并判断水资源利用效率等级。

(1)层次分析法。层次分析法是一种定性定量相结合的多属性决策分析方法。该方法克服了定量权重确定方法中追求数据统计规律而忽视了决策者偏好的不足，被学者广泛用于水资源利用效率评价中^[25]。其基本步骤如下：

①首先建立多层次的结构。本研究根据稻田水资源利用效率的性质和高效用水的目标，考虑水资源利用的3个方面，选择13个基础指标，并根据指标的相互联系与区别构建三个层次的指标体系。

②按照Saaty标度(1-9)定量化，形成判断矩阵。为了综合不同专家的判断，本研究将专家咨询法和层次分析法结合起来，编制专家打分表，通过专家咨询和几何平均数的方法确定判断矩阵。本文实际发出专家打分表12份，收回12份。根据此次建立的评价指标体系，对指标层建立3个判断矩

阵，准则层建立1个判断矩阵，共4个判断矩阵。

③在得到各层指标的判断矩阵后，即可通过 MATLAB 计算判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及其对应的特征向量 w_i ，即该矩阵中各因素的权重。

④判断矩阵的一致性检验。

(2)模糊综合评价。模糊综合评价是以模糊数学为基础，根据给出的评价标准和实测值，经过模糊变换对研究问题做出评价的一种方法。基本步骤如下：①确定各层的权重系数 A ；②计算单因素指标层隶属度，推求评判矩阵 R ；③建立模型，计算综合评价值。

按公式 $P=B \circ S=A \circ R \circ (1, 2, 3, 4, 5)^T$ 计算评价得分值。其中在计算目标层的综合评价值时，需根据实际情况对准则层隶属度进行归一化。最后根据评价值判断等级并选择高效灌排模式，综合评分值越大表明效率越高。

3 综合评价指标体系

3.1 评价指标体系的建立 通过分析总结农业用水效率评价研究现状，本文指标体系建立原则如下：(1)体现稻田水资源利用效率评价的目标和内涵；(2)指标体系在全面反映稻田水资源利用效率特性的前提下，尽量减少指标数目；(3)指标特殊性与普遍性相统一；(4)指标要具有一定的实用性和可操作性。

根据以上原则，本文建立了由目标层、准则层、指标层三个层次组成的指标体系框架如表1所示。其中目标层反映稻田水资源利用的综合水平，是稻田水资源利用过程中水资源、经济及生态环境协调发展的综合体现。准则层由水资源利用率、水资源产出效益、水量及环境效益3个准则组成。本研究中水资源利用率指稻田系统中水资源利用程度的总体情况。水资源产出效益指各项与水资源相关的投入所对应的产出效益。水量及环境效益是指水稻生产全过程中的各项水量指标以及生产过程产生的环境影响。指标层是描述稻田水资源利用效率的一组基础指标，本文在理论分析、文献查阅和咨询专家基础上，反复研究，选择能表征稻田水资源利用效率的13个指标。

表1 综合评价指标体系框架

目标层	准则层	指标层	单位	计算方法
稻田水资源利用效率	水资源利用率	田间灌溉效率		蓝水足迹与进入田间灌水量的比值
		降水利用率		绿水足迹与全生育期降雨量的比值
		广义水资源利用系数		蓝、绿水足迹占进入田间的广义水资源总量的比例
		水足迹有效率		蓝、绿水足迹与作物水足迹的比值
	水资源产出效益	作物生产水足迹	m^3/kg	作物水足迹与产量的比值
		灌溉水分生产率	kg/m^3	作物产量与灌溉用水量的比值
		劳动生产率	$kg/(hm^2 \cdot 人次)$	产量与灌排水次数和的比值
		作物水分利用效率	kg/m^3	作物产量和作物蒸发蒸腾量的比值
	水量及环境效益	作物水足迹	mm	作物蓝、绿、灰水足迹的和
		灌溉水量	mm	即全生育期单位农田净灌溉用水量
		节水量	$\%$	以作物蓝水足迹与绿水足迹和的最大值为基准计算节水量
		总氮淋失量	kg/hm^2	地表排水和地下排水总氮淋失量的和
		灰水比例	$\%$	作物生产水足迹中生产灰水足迹所占的比例

3.2 指标的评级标准 参考已有的成果^[26]和咨询专家，确定指标等级标准，指标的等级阈值按照 I (低)、II (中低)、III (中)、IV (中高)、V (高)5级标准分别确定，具体划分如表2所示。

3.3 指标的权重 根据层次分析法确定的指标权重见表3。各判断矩阵和总体的随机性一致比例CR均满足要求，通过一致性检验。从表3可知：水资源产出效益权重较大，表明专家对水资源产出的重视程度，也与中国水资源短缺和粮食安全的基本情况相符。水量及环境效益比水资源利用率的权重

表2 体系指标评分标准

指标	类型	I	II	III	IV	V
田间灌溉效率	正	< 0.600	0.600 ~ 0.700	0.700 ~ 0.800	0.800 ~ 0.900	> 0.900
降水利用率	正	< 0.500	0.500 ~ 0.600	0.600 ~ 0.700	0.700 ~ 0.800	> 0.800
广义水资源利用系数	正	< 0.500	0.500 ~ 0.567	0.567 ~ 0.633	0.633 ~ 0.700	> 0.700
水足迹有效率	正	< 0.600	0.600 ~ 0.650	0.650 ~ 0.700	0.700 ~ 0.750	> 0.750
作物生产水足迹	逆	> 1.45	1.30 ~ 1.45	1.15 ~ 1.30	1.00 ~ 1.15	< 1.00
灌溉水分生产率	正	< 1.00	1.00 ~ 1.15	1.15 ~ 1.30	1.30 ~ 1.45	> 1.45
劳动生产率	正	< 300	300 ~ 600	600 ~ 900	900 ~ 1200	> 1200
作物水分利用效率	正	< 1.00	1.00 ~ 1.20	1.20 ~ 1.40	1.40 ~ 1.60	> 1.60
作物水足迹	逆	> 990.0	860.0 ~ 990.0	730.0 ~ 860.0	600.0 ~ 730.0	< 600.0
灌溉用水量	逆	> 8500	7000 ~ 8500	5500 ~ 7000	4000 ~ 5500	< 4000
节水量	正	< 15.0	15.0 ~ 20.0	20.0 ~ 25.0	25.0 ~ 30.0	> 30.0
总氮淋失量	逆	> 25.00	20.00 ~ 25.00	15.00 ~ 20.00	10.00 ~ 15.00	< 10.00
灰水比例	逆	> 40.0	35.0 ~ 40.0	30.0 ~ 35.0	25.0 ~ 30.0	< 25.0

高 44.8%。水量及环境效益包含水稻全生育期实际消耗水量和环境影响两个方面，其次环境治理正在成为日益重要的话题，对环境影响的量化和评价自然也成为主要内容。在水资源利用率各指标中，广义水资源利用系数权重最大，因为该指标涵盖蓝、绿水资源，内容更为丰富。在水资源产出效益各指标中，作物生产水足迹权重最大，作物水分利用效率次之，灌溉水分生产率再次，最后是劳动生产率。作物生产水足迹是全面衡量水资源产出效益的指标，已广泛应用于农业水资源利用效率的评价中。在水量及环境效益各指标中，灌溉用水量最大，其次是作物水足迹，然后是总氮淋失量，最后是节水量和灰水比例。灌溉用水量是水稻生产耗水最直接的反映，与农业生产投入的关系也最为紧密。总氮淋失量权重大于节水量则体现了对农业生产用水有了更新的认识，强调农业生产中水资源可持续利用。

表3 各个层次评价指标权重

目标层	准则层	本层权重	指标层	本层权重	指标权重
稻田 水资源 利用 效率	水资源利用 率	0.2025	田间灌溉效率	0.2284	0.0463
			降水利用率	0.2096	0.0424
			广义水资源利用系数	0.3921	0.0794
			水足迹有效率	0.1699	0.0344
	水资源产出 效益	0.5043	作物生产水足迹	0.3617	0.1823
			灌溉水分生产率	0.1893	0.0955
			劳动生产率	0.1806	0.0911
			作物水分利用效率	0.2684	0.1354
	水量及环境 效益	0.2932	作物水足迹	0.2307	0.0676
			灌溉用水量	0.2493	0.0731
			节水量	0.1540	0.0452
			总氮淋失量	0.2182	0.0640
			灰水比例	0.1478	0.0433

4 作物水足迹及其组成

2015—2018年各处理 CWF 及其组成如图 2 所示。各年份处理间的 CWF 均存在差异，说明灌排模式能够对水稻水足迹产生影响。然而，灌排模式间的 CWF 及其组成的大小关系随着年份发生改变。

图2显示,除2017年外,处理间CWF的大小关系均表现为WSI>CI>FSI>RC-CI;2015年CWF均低于1000mm,其中RC-CI、FSI、CI的值分别比WSI(953mm)减少了20.8%、2.6%和2.5%;2016年处理间差异明显大于2015年,后三者分别在WSI处理(1028.7mm)的基础上降低了34.4%、13.7%及3.3%,其中RC-CI的674.7mm为所有观测结果的最小值;2018年各处理作物水足迹均超过了900mm(图2(d)),普遍高于前3年,其中WSI处理达到了1132.3mm。由图2(c)可知,2017年RC-CI的CWF为846.3mm,仍为最低处理;FSI的CWF达1022.6mm,超过WSI的936.3mm成为水稻作物水足迹最高的灌溉模式。

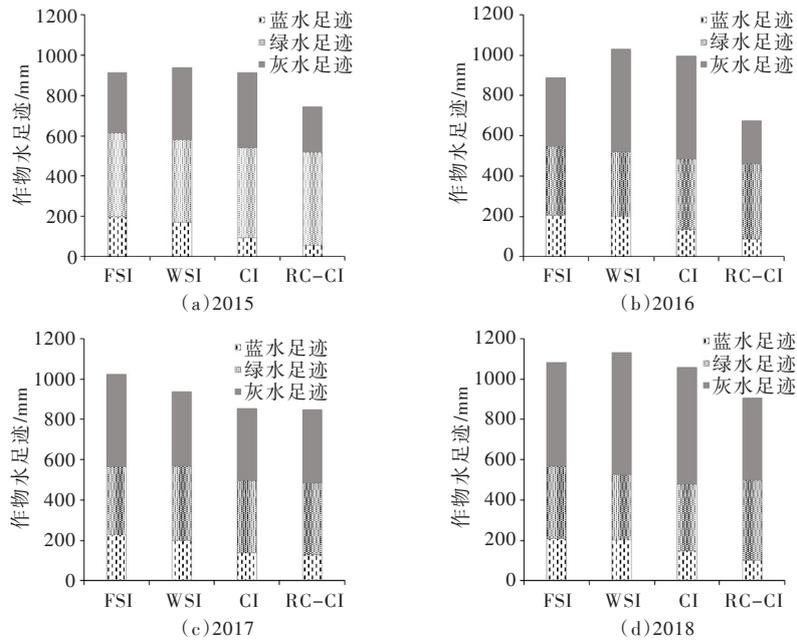


图2 2015—2018各处理水稻水足迹及组成

从年均情况看,4种灌溉模式的CWF分别为976.8(FSI)、1008.7(WSI)、954.4(CI)和792.6(RC-CI)mm,前三者较为接近,以水足迹为标准的高效灌排模式为蓄水控灌。然而,作物水足迹组成在年份和处理间存在复杂的大小关系。总体上看,蓝水在所有处理中的占比最小,2015与2017年各处理绿水均占主导地位,其余年份表现为灰水比例最大。所有处理蓝水足迹比例均值仅为16.4%,最大值和最小值出现在2016年的FSI(23.0%)和2015年的RC-CI(7.4%)处理。绿水和灰水足迹比例均值分别为40.9%和42.7%,总体上较为接近。但二者的关系存在较大不确定性,如2015年RC-CI处理的绿水比例高达63.2%,高出灰水足迹比例(30.3%)32个百分点,而在2018年的CI处理中,绿水和灰水比例分别为31.1%和55.0%,前者比后者低23.9%。蓝水足迹的降低是传统农业节水的主要目标;绿水具有较低的机会成本,水足迹大小接近的同时增大绿水足迹比例有利于降低成本;而灰水足迹的控制是实现水资源高效可持续利用的重要需求。不同灌排模式下水足迹及其组成关系错综复杂,也体现了基于水足迹的农业用水效率综合评价的现实意义。

5 综合评价结果

由于建立的指标体系具有层次关系,计算隶属度和综合评价值也需要分层进行,即从指标层开始算起,随后依次是准则层和目标层,最后按照建立的模型计算综合效率评价值,结果列于表4。

从表4可知,2015、2016年各处理模糊综合评分值大小依次为RC-CI>CI>WSI>FSI,等级为3级或4级。当年RC-CI处理的作物生产水足迹、劳动生产率、作物水足迹、灌溉用水量、总氮淋失量和灰水比例较其他处理均拥有明显优势,使得综合评分值和评价等级最高。2017年各处理综合评分值大小依次为CI>RC-CI>WSI>FSI,评价等级为3级或4级。CI与RC-CI处理相比,水资源产出效益上

表4 2015—2018年稻田水资源利用效率综合评价结果

年份	处理	综合评分值	模糊综合评价等级	等级描述
2015	浅水勤灌	3.0263	3级	中
	浅湿灌溉	3.2549	3级	中
	控制灌溉	3.4725	3级	中
	蓄水-控灌	3.9432	4级	中高
2016	浅水勤灌	3.1034	3级	中
	浅湿灌溉	2.8319	3级	中
	控制灌溉	3.1180	3级	中
	蓄水-控灌	3.7370	4级	中高
2017	浅水勤灌	2.8740	3级	中
	浅湿灌溉	3.2715	3级	中
	控制灌溉	3.8010	4级	中高
	蓄水-控灌	3.7723	4级	中高
2018	浅水勤灌	2.8058	3级	中
	浅湿灌溉	2.9402	3级	中
	控制灌溉	3.3077	3级	中
	蓄水-控灌	3.6614	4级	中高

注：评价等级 I—V 的阈值分别为 1.0000~1.5000、1.5000~2.5000、2.5000~3.5000、3.5000~4.5000 和 4.5000~5.0000，分别对应水资源利用效率等价为低、中低、中、中高和高。

具有较大优势，但这种优势被劳动生产率和节水量的劣势抵消了，使得二者整体表现即综合评分值接近，评价等级相同；CI与其他处理相比，作物生产水足迹、劳动生产率、作物水分利用率、作物水足迹(图2(c))、灌溉用水量、节水量均具有优势，因此综合评分值和评价等级较高。2015—2017年大多数处理的评价等级为3级，这是因为较高等级和较低等级的指标权重较大且接近。2018年各处理综合评分值大小和评价等级关于与前2年类似，而导致结果的原因不尽相同。与其他处理相比，2018年RC-CI处理的降水利用率、广义水资源利用系数、劳动生产率、作物水足迹、灌溉用水量、总氮淋失量和灰水比例拥有显著优势，综合评分值和评价等级最高。其余处理评价等级均为3级，原因是田间灌溉效率、降水利用率、广义水资源利用系数、作物生产水足迹、劳动生产率和节水量向第3级聚集，这些指标权重超过了0.5000。2015、2016和2018年RC-CI占优势的指标权重接近或超过一半，而2017年CI和RC-CI处理的各指标呈现此强彼弱、总体接近的特点，这些表现均反映在综合评价价值和等级确定上，综合评价结果具有可信度。本研究在日步长上观测作物水足迹及其相关指标的决定参数，数据可靠性强于基于作物模型和灌溉制度假设的模拟评估方法^[11,16]，也保障了评价结果与实际情况的吻合程度。

蓄水控灌和控制灌溉全生育期灌水上、下限相同，说明稻田仍有较长时间处于无水层状态，土壤透气性得到良好的保障。在南京，乃至整个江淮之间的气候呈现出雨热同期的特点，降雨大多集中于7、8月，对应水稻的分蘖期和拔节孕穗期，分蘖期蓄水深度大，一定程度上可以减少无效分蘖，拔节孕穗期是水稻需水关键期，此时大量的降雨可以明显减少灌溉用水量和灌水次数，节省劳动力和成本。蓄水控灌对于雨水的集蓄，在短时间内虽会增加渗漏，但在较深的水层中，作物对氮磷的吸收以及硝化、反硝化作用降低氮素浓度更加明显，有效减少农业生产对环境的影响。蓄水控灌虽然造成了一定程度的减产，可能是干旱胁迫降低了水稻的耐淹能力，但耗水量却有明显的降低，使该处理水资源利用效率整体上升。

6 讨论

将综合评价结果与当前最常用的农业用水效率评价指标作物水分利用效率(WUE)及作物水足迹(CWF)进行比较,列于表5。依据 Spearman 等级相关系数检验, WUE、CWF 评价和综合评价排序之间的相关性系数均为 0.700,表明 WUE 与 CWF 均能一定程度反映稻田水资源利用效率,但由于对水资源占用核算,二者在处理间的表现存在差异。

表5 2015—2018年稻田水资源利用效率评价结果对比

年份	处理	综合评分值排序	WUE/(kg/m ³)	排序	CWF/mm	排序
2015	浅水勤灌	4	1.42	4	913.2	2
	浅湿灌溉	3	1.66	3	937.6	4
	控制灌溉	2	1.84	1	914.3	3
	蓄水-控灌	1	1.68	2	742.8	1
2016	浅水勤灌	3	1.58	4	887.8	2
	浅湿灌溉	4	1.69	3	1028.7	4
	控制灌溉	2	1.86	1	994.3	3
	蓄水-控灌	1	1.78	2	674.7	1
2017	浅水勤灌	4	1.50	4	1022.6	4
	浅湿灌溉	3	1.53	3	936.3	3
	控制灌溉	1	1.83	1	852.4	2
	蓄水-控灌	2	1.75	2	846.3	1
2018	浅水勤灌	4	1.46	4	1083.7	3
	浅湿灌溉	3	1.68	2	1132.3	4
	控制灌溉	2	1.89	1	1056.3	2
	蓄水-控灌	1	1.57	3	906.4	1

本文的评价指标体系是基于水资源、经济及生态环境协调发展建立的,有别于以降低水量投入和提高粮食产出为目标的农业用水评价指标。CWF 评估和提升目标旨在降低作物全生育期投入的水资源量,难以维持产量稳定;WUE 核算单位水量消耗所获得的作物产量,没有区分蓝、绿水资源属性和各自发挥的作用;此外,两者均忽视了水资源的有效利用程度和农业管理水平。可以看出评价指标体系比单一指标所涵盖的信息更为全面,并且层次分析法的运用也有效规避了主观因素对评价结果的影响。水稻不同生育期的需水特点不同,在生长过程中准确判断水稻所处生育期,确定合理的田间水位,对于保证水资源,尤其是降水资源的高效利用有重要意义。蓄水控灌会造成一定的减产,增加了推广难度,因此需要采取措施稳定产量。精细化的田间管理有利于水稻生长发育,除了除草和农药等农技措施外,改良水稻品种提高作物耐淹能力也是需要努力的方向。保证农田水利工程配套和良好运行,移栽水稻前进行土地平整提高灌水均匀度,均有利于灌排措施和效益良好发挥。不合理的施肥量和施肥方式都会导致氮素大量淋溶,因此水稻施肥需根据水稻长势,随水施肥,同时避开大量降雨,方可在确保产量的同时减少环境影响。

综上所述,基于水足迹理论进行农业用水效率综合评价更加清晰地揭示,农业节水减排需要在发展灌溉技术以提高水资源利用率、改良作物品种以维持水稻产量和提高管理水平以控制环境影响三个方面寻求提升。因此,作物水足迹、其涵盖的指标体系以及农业用水效率综合评价理念可以作为稻田工程布局、种植设计和灌溉制度制定的依据。需要注意的是,降水过程是田间水分管理决策和水肥运移规律的原动力,也是影响作物水足迹及其组成的重要因素。对区域降水进行可靠预估是基于水足迹理论和指标体系设定高效灌排模式参数时需要考虑的问题。

7 结论

试验观测的水稻作物水足迹在 674.7 ~ 1132.3 mm 之间, 灌溉排水模式对水足迹及其构成均具有重要影响。指标体系权重的计算表明水资源产出效益最受重视, 水稻生产过程中的环境问题也不可忽视。基于水足迹的稻田水资源利用效率综合评价克服了传统评价指标功能单一的问题。2015—2018 年各处理稻田水资源利用效率综合评分值在 2.8058 ~ 3.9432 之间, 综合评价等级为中高或高。水资源利用效率总体上从高到低依次为蓄水-控灌、控制灌溉、浅湿灌溉和浅水勤灌, 大部分年份的高效灌排模式为蓄水控灌。基于水足迹的农业用水效率评价为农业生产用水评估提供全面而崭新的视角, 也可为农业水资源高效可持续利用的技术开发和管理实践提供支撑。

参 考 文 献:

- [1] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 92-100.
- [2] 刘坤, 任天志, 吴文良, 等. 英国农业面源污染防控对我国的启示[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(5): 817-823.
- [3] CAO X, ZENG W, WU M, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 106027.
- [4] 杜奕良, 涂新军, 杜晓霞, 等. 基于高维 Gaussian Copula 函数的区域农田灌溉需水分析[J]. 水利学报, 2018, 49(3): 323-331.
- [5] 宋健, 李江, 杨奇鹤, 等. 基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 102-113.
- [6] 彭世彰, 艾丽坤, 和玉璞, 等. 稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 320-325.
- [7] QI D, YAN J, ZHU J. Effect of a reduced fertilizer rate on the water quality of paddy fields and rice yields under fishpond effluent irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: 105999.
- [8] 郭相平, 袁静, 郭枫, 等. 水稻蓄水-控灌技术初探[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 70-73.
- [9] 王晓玲, 郑晓通, 李松敏, 等. 农田排水沟渠底泥-间隙水-上覆水氮磷迁移转化规律研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1410-1418.
- [10] HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [11] CHAPAGAIN A, HOEKSTRA A. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70(4): 749-758.
- [12] 操信春, 邵光成, 王小军, 等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 14-21.
- [13] PELLICER M, MIGUEL M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain[J]. *Ecological indicators*, 2016, 60: 1173-1183.
- [14] MEKONNEN M, HOEKSTRA A. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(5): 1577-1600.
- [15] CAO X, WU P, WANG Y, et al. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2014, 18(8): 3165-3178.
- [16] BOCCHIOLA D. Impact of potential climate change on crop yield and water footprint of rice in the Po valley of Italy[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 139: 223-237.
- [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, 669.
- [18] CAO X, WU M, SHU R, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: a case study of irrigated paddy rice in East China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 84-93.

- [19] WANG Y, WU P, ENGEL B, et al . Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J] . Science of the Total Environment, 2014, 497/498: 1–9 .
- [20] 操信春, 任杰, 吴梦洋, 等 . 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J] . 农业工程学报, 2018, 34(5): 1–8 .
- [21] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等 . 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J] . 农业工程学报, 2019, 35(18): 94–100 .
- [22] MEKONNEN M, HOEKSTRA A . Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment[J] . Ecological Indicators, 2014, 46: 214–223 .
- [23] WANG W, ZHUO L, LI M, et al . The effect of development in water-saving irrigation techniques on spatial-temporal variations in crop water footprint and benchmarking[J] . Journal of Hydrology, 2019, 577: 123916 .
- [24] NOURI H, STOKVIS B, GALINDO A, et al . Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: The effect of soil mulching and drip irrigation [J] . Science of the Total Environment, 2019, 653: 241–252 .
- [25] RUNGSUPA S . AHP and water quality model in decision support system for sea bass sustainable culture in Bang Pakong basin Thailand[J] . Journal of Environmental Research & Development, 2009, 4(1): 34–48 .
- [26] CAO X, WU M, GUO X, et al . Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework[J] . Science of the Total Environment, 2017, 609: 587–597 .

Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory

CAO Xinchun, CUI Simeng, WU Mengyang, REN Jie, GUO Xiangping

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate agricultural water use efficiency (AWUE) of paddy rice and select efficient irrigation and drainage mode, experiments were conducted during four consecutive years (2015 to 2018). At first, water footprint and its composition of each treatment was analyzed. And then, considering water resource utilization rate, water resource output and benefit, and water volume and environmental impact, 13 indicators were selected to construct AWUE assessment system based on the water footprint theory. The calculation was done through the analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation model. The results show that annual average crop water footprints of each treatment are 976.8 (frequent and shallow irrigation), 1008.7 (wet-shallow irrigation), 954.4 (controlled irrigation) and 792.6 (rain-catching and controlled irrigation) mm, respectively. And the annual proportion of blue, green and grey water footprint are 16.4%, 40.9% and 42.7%, respectively. The comprehensive assessment value of each treatment is between 2.8058 and 3.9432, indicating AWUE grades are medium or medium-high. The optimal irrigation and drainage mode is RC-CI. The comparison of crop water use efficiency and CWF with comprehensive evaluation shows that it is essential to evaluate AWUE comprehensively. AWUE assessment based on the water footprint theory can provide a new perspective for agricultural water use efficiency evaluation. And it is also helpful for scientific researchers and decision makers on efficient water use in agriculture, especially in rice field.

Keywords: agricultural water use efficiency; blue-green water; crop water footprint; irrigation and drainage mode; comprehensive assessment

(责任编辑: 韩 昆)