

稻田水资源利用效用的灌排模式响应

李玥瑶¹，吴梦洋¹，操信春¹，汤树海²

(1. 河海大学农业科学与工程学院,南京 210098;2. 涟水县水利科学研究所,江苏 淮安 223200)

摘要：为全面揭示稻田水资源利用效用,在观测浅水勤灌(FI)、浅湿灌溉(WI)、控制灌溉(CI)和蓄水控灌(RI)处理试验小区田间水量平衡的基础上,建立了灌溉水、降水消耗通量区分方法及其利用效用评价指标体系,分析了水资源利用效用的灌排模式响应。结果表明:田间灌溉水和降水消耗量、有效利用率及水分生产力均受灌排模式的影响;2017—2018 年各处理水资源消耗量为 695.9~999.1 mm,其中 CI 处理水资源消耗量最低,并且消耗结构更加合理。CI 处理的灌溉水生产力(IWP,5.392 kg/m³)、降水生产力(PWP,1.539 kg/m³)以及水资源生产力(WRP,1.364 kg/m³)综合表现出其水资源产出能力最强;灌溉效率(IE)、降水利用率(PE)及广义水利用系数(GE)的平均值分别为 0.472,0.406,0.693,且处理间的差异小于产出能力指标。基于灌溉水、降水消耗通量区分的水资源利用效用评价指标体系可以真实而全面地衡量农业生产中水资源表现,特别是在降水频繁的生育季。研究结果可为农业用水效率评价和稻田灌排模式制定提供理论基础。

关键词：广义水资源；农业用水效率；评价指标；稻田；灌排模式

中图分类号:S271 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2022)03-0213-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.03.031

Experimental Study on Effect of Irrigation Mode on Generalized Water Resources Utility in Paddy Rice Field

LI Yueyao¹, WU Mengyang¹, CAO Xinchun¹, TANG Shuhai²

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;

2.Lianshui Water Conservancy Research Institute, Huai'an, Jiangsu 223200)

Abstract: The aim of current study was to reveal the utility of irrigation and rain water resources in paddy fields. Based on the observation of the field water balance in experimental plots with frequent and shallow irrigation (FI), wet-shallow irrigation (WI), controlled irrigation (CI) and rain-catching and controlled irrigation (RI) treatments, this study established the classification method of consumption fluxes of irrigation water and precipitation and the evaluation index system of utilization utility. The response of irrigation and drainage mode of water resources utilization was analyzed. The results showed that water consumption, effective utilization rate and water productivity were all affected by irrigation and drainage mode. In 2017—2018, the water resources consumption of all treatments varied in the range of 695.9~999.1 mm, among which the water resources consumption in CI treatment were the lowest, and the consumption structure was more reasonable. The irrigation water productivity (IWP, 5.392 kg/m³), the precipitation productivity (PWP, 1.539 kg/m³) and the water resources productivity (WRP, 1.364 kg/m³) in CI treatment all showed the highest water resources production capacity. The irrigation efficiency (IE), precipitation use rate (PE) and generalized water efficiency (GE) were 0.472, 0.406 and 0.693, respectively, which the differences among treatments were less than the differences among treatments about productivity indexes. The water resources utility evaluation index system based on the distinction between irrigation water and precipitation consumption flux could truly measure the performance of water resources in agricultural production, especially in the growing season with frequent precipitation. The results can provide theoretical basis for the evaluation of agricultural water resources utility and the formulation of paddy field irrigation and drainage mode.

Keywords: generalized water resources; agricultural water efficiency; evaluation index; paddy field; irrigation and drainage mode

收稿日期:2021-11-02
资助项目:国家自然科学基金项目(51979074)
第一作者:李玥瑶(1999—),女,硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究。E-mail:liyueyao131@126.com
通信作者:操信春(1986—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究。E-mail:caoxinchun@hhu.edu.cn

农业用水是水资源消耗最主要的部分,占全球总用水量的 70%^[1]。农业水资源的可持续发展是保障粮食高产稳产的重要前提。中国广义农业水资源中超过 50%来源于耕地的有效降水^[2],同时降水对山水林田湖草生命共同体的系统治理和生态维护都十分关键^[3-5]。然而,受到技术方法和理论研究的局限,当前在田间尺度上节水评价与用水管理多是通过减少灌溉水来实现的^[6-7]。因此对包含降水的农业广义水资源利用效用进行全面评价是农业水资源可持续利用决策的现实要求,也是对新时期治水方针的响应。近年来,农业用水及其效率的评价对象由灌溉水的单一评价向包含降水在内的广义水评价扩展^[8-10],评价指标由传统灌溉效率和作物水分利用效率转向多水源的水资源效用及其对水环境的影响^[11-13]。这丰富了水资源利用的评价内涵、扩展了指标的时空尺度,也增加了农业水资源利用效用的维度^[14-15]。一直以来,关于农业水资源利用量和利用效率评价指标的定义还没有统一的标准^[16]。但不同空间尺度下的农业水资源利用效用的评估内容主要包括水资源利用量、水资源利用程度以及水资源产出能力的 3 个方面^[17]。已有研究^[13-14,18]利用全生育期灌溉水和降水投入的比例粗略计算出各平衡要素来自灌溉水和降水的部分,缺少伴随水稻生长进程以水分迁移完整过程为基础的灌溉水和降水精准划分。

水稻占中国粮食总产量的 35%,是我国最主要的粮食作物之一。水稻种植过程涉及到与农业水资源利用相关的完整过程,因此本文选取水稻为研究对象。改变灌溉排水模式是研究稻田水分运移和利用效用的主要手段,已在水稻增产、节水及控污减排等方面进行大量探索^[19-21]。不同灌排模式下的水资源消耗及其利用效率也是该领域的重要研究方向。

表 1 不同灌溉模式下的灌排标准

处理	灌溉控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FI	灌水上限/mm	30	30	50	40	40	0
	灌水下限/mm	10	0.6 θ_s ~10	10	10	10	(0.6~0.7) θ_s
	蓄雨上限/mm	40	100	150	200	200	0
WI	灌水上限/mm	30	20	20	30	30	0
	灌水下限/mm	20	(0.7~0.9) θ_s	0.9 θ_s	θ_s	0.8 θ_s	(0.7~0.8) θ_s
	蓄雨上限/mm	40	60	100	100	80	0
CI	灌水上限/mm	30	θ_s	θ_s	θ_s	θ_s	0.8 θ_s
	灌水下限/mm	10	(0.6~0.7) θ_s	(0.7~0.8) θ_s	0.8 θ_s	0.7 θ_s	自然落干
	蓄雨上限/mm	40	60	80	80	80	0
RI	灌水上限/mm	30	θ_s	θ_s	θ_s	θ_s	0.8 θ_s
	灌水下限/mm	10	(0.6~0.7) θ_s	(0.7~0.8) θ_s	0.8 θ_s	0.7 θ_s	自然落干
	蓄雨上限/mm	80	150	200	200	200	0

注:灌水上下限和蓄雨上限用田间水面深度表示; θ_s 为土壤饱和含水率。

Zhuang 等^[7]模拟了节水灌溉模式对全国水稻用水效率和产量的影响,并评价了节水灌溉技术在不同区域的适用性;朱成立等^[22]借助试验手段观测了田沟尺度控制灌排模式的节水减污效应;操信春等^[23]结合数学分析方法提出了田间水资源利用效率综合评价的水足迹框架。以往的研究虽然在农田节水减排方面取得了重要进展,但是在区分灌溉水和降水的利用上只是进行简单假设,难以全面而真实地对水资源利用效用进行揭示。本研究通过观测不同灌排模式下的稻田水量平衡过程,构建灌溉水、降水资源消耗分解的计算方法,从利用量、利用程度和产出能力 3 个层次构建水资源效用评价指标,分析灌排模式对稻田水资源来源利用效用的影响,以期为农业水资源高效利用理论的发展和水稻节水减排实践提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验布设

试验于 2017—2018 在涟水水利科学研究所的试验田内进行,该研究站位于江苏省淮安市涟水县朱码镇境内,地理位置坐标是 119°16′33″E,33°50′45″N。试验区土质为壤土,土壤容重为 1.42 g/cm³,田间持水率(质量含水率)为 27.9%,pH 为 6.82,有机质质量分数为 2.19%。采用当地常用的 4 种灌排模式:浅水勤灌(FI)、浅湿灌溉(WI)、控制灌溉(CI)和蓄水控灌(RI)的模式,设置 4 个处理、4 个重复进行水稻控制排水试验,各处理水分控制指标见表 1。本试验的水稻种植采用桶栽的方式,测桶内侧长×宽×高为 90 mm×68 mm×67 mm。试验测桶除灌排模式不同外(图 1),其他管理措施一致。2017 年和 2018 年水稻分别于 6 月 17 日和 6 月 15 日移栽,行株距为 20 cm×15 cm,每穴 3 株,10 月 20 日和 10 月 12 日收割。

1.2 测定指标

- (1)土壤水分:每日上午 8:00,当田面有水层时,利用钢尺人工读取水层的深度,遇降雨进行加测。当田面没有水层时,利用 TDR 探头进行土壤水分测定,在测桶中心处 0~30 cm 的土壤预埋 1 组 TDR 探头。
- (2)灌水和排水:参照各处理灌排控制标准,当田面水层深度低于灌水下限时,需要及时补水以达到灌水上限;若田面水层深度大于最大蓄雨深度时,需要及时排水,使水层深度降至蓄雨上限。每次灌排后做好灌溉排水的时间和灌溉排水量的记录。
- (3)渗漏量:通过在桶底埋置三通管来模拟蒸渗仪测量渗漏量。三通管中的水面线要始终保持在桶内土面以下的 30 cm 左右。
- (4)产量:在水稻收割前,对每个处理的水稻进行单打单收,待水稻自然晒干后测定该测桶内的水稻实际产量。
- (5)降水量:通过试验站雨量筒观测。

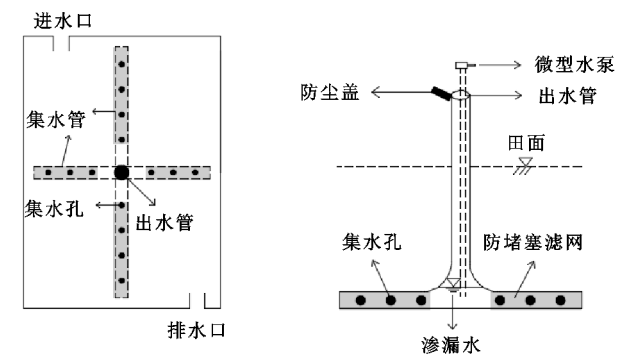


图 1 试验测桶布置示意

1.3 水资源消耗与利用效率指标计算

(1)田间耗水量。田间耗水量 WRC 可定义为田间水资源被使用或排出后不可再利用的部分^[16]。田间水分消耗途径有蒸发蒸腾和深层渗漏 2 种。

$$WRC=ET+LEA$$

式中:WRC 为田间耗水量(mm);ET 为田间蒸散量(mm);LEA 为田间渗漏量(mm)。

$$ET=\sum_{t=1}^T ET_t$$

$$LEA=\sum_{t=1}^T LEA_t$$

式中:T 为核算时段的总天数;ET_t 为第 t 天的田间蒸散量(mm);LEA_t 为第 t 天的田间渗漏量(mm)。

每日的田间蒸散量根据稻田日水量平衡方程计算。

$$PRE_t+IRR_t=ET_t+DRA_t+LEA_t+FWD_t-FWD_{t-1}$$

式中:PRE_t 为第 t 天的降水量(mm);IRR_t 为第 t 天的灌水量(mm);DRA_t 为第 t 天的地表排水量(mm);FWD_t 为在第 t 天结束时田间水层深度(mm);FWD_{t-1}

为第 t-1 天结束时田间水层深度(mm)。

田间每日蒸散量和渗漏量中来自灌溉水和降水的部分均通过前 1 天结束时田间水层中灌溉水和降水的比例进行计算。

$$\begin{cases} ET_t^I=ET_t\times\frac{FWD_{t-1}^I}{FWD_{t-1}} \\ ET_t^P=ET_t\times\frac{FWD_{t-1}^P}{FWD_{t-1}} \\ LEA_t^I=LEA_t\times\frac{FWD_{t-1}^I}{FWD_{t-1}} \\ LEA_t^P=LEA_t\times\frac{FWD_{t-1}^P}{FWD_{t-1}} \end{cases}$$

式中:ET_t^I 和 ET_t^P 分别为第 t 天田间蒸散量中来自灌溉水和降水的部分(mm);LEA_t^I 和 LEA_t^P 分别为第 t 天田间渗漏量中来自灌溉水和降水的部分(mm);FWD_{t-1}^I 和 FWD_{t-1}^P 分别为第 t-1 天结束时田间水层中灌溉水和降水的含量(mm)。构建日尺度的水量平衡方程,设定田间初始水层全部为降水,通过日灌溉水与降水对田间水分平衡各要素的贡献比例,分离出每日田间灌溉水和降水的量。

$$\begin{cases} FWD_t^I=FWD_{t-1}^I+IRR_t-(DRA_t+ET_t+LEA_t)\times\frac{FWD_{t-1}^I}{FWD_{t-1}} \\ FWD_t^P=FWD_{t-1}^P+PRE_t-(DRA_t+ET_t+LEA_t)\times\frac{FWD_{t-1}^P}{FWD_{t-1}} \end{cases}$$

(2)田间水资源利用效率。水资源利用效率包括水资源产出能力和有效利用程度 2 个方面。本文选取灌溉水生产力(IWP)、降水生产力(PWP)、水资源生产力(WRP)3 个水资源产出能力指标。其中灌溉水生产力定义为单位灌溉水有效投入量的粮食产量。降水生产力定义为单位降水有效投入量的粮食产量,计算公式为:

$$IWP=\frac{Y}{10(IRR-DRA_I)}$$

$$PWP=\frac{Y}{10(PRE-DRA_P)}$$

式中:Y 为单位产量(kg/hm²);IRR 为灌溉水投入量(mm);DRA_I 为灌溉水的地表排水量(mm);PRE 为降水投入量(mm);DRA_P 为降水的地表排水量(mm)。

$$\begin{cases} DRA_I=\sum_{t=1}^T DRA_t^I \\ DRA_P=\sum_{t=1}^T DRA_t^P \end{cases}$$

式中:DRA_t^I 为每日灌溉水的地表排水量(mm);DRA_t^P 为每日降水的地表排水量(mm)。每日地表排水量中来自灌溉水和降水的部分均通过土壤总含水量和前 1 天结束时田间水层中灌溉水和降水的比例

进行计算。

$$\begin{cases} \text{DRA}_t^I = \text{DRA}_t \times \frac{\text{FWD}_{t-1}^I}{\text{FWD}_{t-1}} \\ \text{DRA}_t^p = \text{DRA}_t \times \frac{\text{FWD}_{t-1}^p}{\text{FWD}_{t-1}} \end{cases}$$

水资源生产力 WRP 的含义是单位田间耗水量的粮食产量,用产量和田间耗水量的比值来计算^[24]。计算公式为:

$$\text{WRP} = \frac{Y}{10\text{WRC}}$$

式中:WRP 为水资源生产力(kg/m³);Y 为产量(kg/hm²)。

衡量田间水资源有效利用程度,本文选取了灌溉效率(IE)、降水利用率(PE)、广义水利用系数 3 个指标进行分析。灌溉效率通过灌溉水的田间蒸散量和灌溉水投入量的比值进行计算。降水利用率通过降水的田间蒸散量与降水投入量的比值计算。计算公式为:

$$\begin{aligned} IE &= \frac{ET_I}{IRR} \\ PE &= \frac{ET_P}{PRE} \end{aligned}$$

表 2 2017—2018 年各处理水量平衡参数

年份	处理	降水量 (PRE)/mm	灌水量 (IRR)/mm	地表排水量 (DRA)/mm	田间渗漏量 (LEA)/mm	田间蒸散量 (ET)/mm	产量(Y)/ (kg·hm ⁻²)
2017	FI	998.0	430.1a	292.3a	484.9a	514.2a	9694.2a
	WI	998.0	335.4b	290.7a	432.1b	478.2a	10730.3a
	CI	998.0	181.8c	323.4a	274.9d	442.5b	10098.6a
	RI	998.0	81.4d	166.0b	316.5c	450.3b	8695.7b
2018	FI	634.2	458.5a	70.7a	412.6a	488.6a	8629.7a
	WI	634.2	361.9b	78.7a	349.6b	456.0b	9420.4a
	CI	634.2	261.4c	84.6a	282.0c	413.9c	9183.0a
	RI	634.2	222.6c	0b	313.3c	435.0c	8109.1b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$)。下同。

由表 2 可知,灌排模式对各水量平衡参数影响显著。RI 和 CI 处理的 IRR 较其他处理显著减少,LEA 和 ET 在各处理中也相对较低。相比 FI 和 WI 处理,RI 和 CI 处理能够依据水稻的需水规律,进行田间水资源调控,减少 IRR 的投入;同时 RI 和 CI 处理的稻田除了返青期外田间不再设有水层,因此 ET 相对较低。在灌水上下限相同的情况下,RI 处理较 CI 处理提高了蓄水深度,因此其 LEA 也更大。田间耗水量(WRC)由 ET 和 LEA 2 部分构成,从水资源消耗的情况看,2017—2018 年各处理 ET 占 WRC 的比例均超过了 50%,蒸散发是水资源消耗的主要途径。CI 处理的 ET 在 WRC 中的占比在各处理中最大,RI 处理次之。由于蒸散发是作物生产过程中的必要消耗,ET 在 WRC 中的比例越大,表明更多的

改进的广义水利用系数(GE)是衡量广义水资源利用程度的指标,通过田间耗水量与农业广义水资源投入量的比值来计算。其中广义水资源投入量由灌溉水和降水 2 部分组成。计算公式为:

$$GE = \frac{\text{WRC}}{\text{IRR} + \text{PRE}}$$

式中:IRR 为灌溉水投入量(mm);PRE 为降水投入量(mm)。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26 软件进行数据分析和图表绘制。影响因素的显著性分析采用逐步线性回归方法。

2 结果与分析

2.1 稻田水量平衡参数及产量

稻田的水量平衡是稻田水资源消耗和利用的基础,同时产量也是衡量水资源利用效率的重要因素。表 2 为 2017—2018 年各处理稻田水量平衡参数及产量的差异。通过对稻田的水量平衡分析,可以获取不同灌排模式对各水量平衡要素以及田间耗水量的影响。

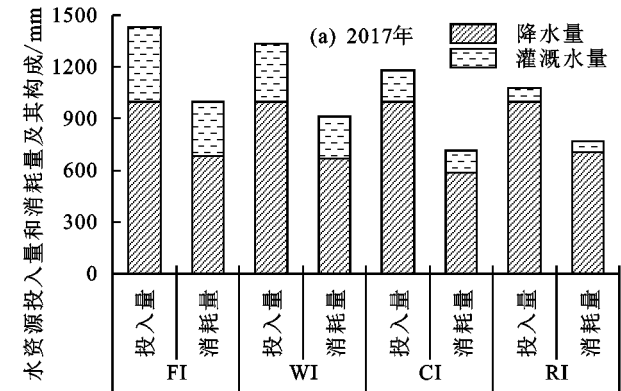
水资源在作物生产过程发挥了作用,因此 CI、RI 处理的水资源消耗结构更加合理。

从表 2 还可以看出,2017—2018 年 WI 的产量 Y 在各处理中最大,CI 处理次之,并且与 WI 处理的差异不超过 6%,但已有研究^[19]表明,CI 处理相较于 WI 能够显著提高茎秆抗倒伏能力,所以综合考虑下 CI 模式能够更好地保证高产稳产。

2.2 不同灌排模式田间水资源投入量和消耗量及其构成

田间水资源由灌溉水和供给作物生长发育过程中蒸散发消耗的降水构成,也称为广义水资源投入量^[25]。对稻田水资源迁移的分析也是稻田水资源消耗及利用效率评价的基础。由图 2 可知,2017 年各处理田间水资源的投入量的变化范围为 1 079.4~1 428.1 mm,其中 RI

处理的投入量在各处理中最少,CI 处理次之。2018 年降水量较 2017 年减少 44.5%,田间水资源投入量也明显减少,各处理的大小关系与 2017 年一致。2017 年各处理田间耗水量(WRC)的变化范围为 717.4~999.1 mm,CI 处理最小,RI 处理次之;2018 年各处理 WRC 的变化范围为 695.9~901.2 mm,各处理间大小关系与 2017 年相同。由于 RI 和 CI 处理的田面水层深度较低,蓄水深度又相对较高,一定程度减少了田间蒸散量,降低了田间渗漏量,所以 WRC 在各处理中也相对较低。从田间水



资源的消耗结构看,各处理降水消耗量的占比均超过了 50%,平均值达到 595.2 mm。2017—2018 年 RI 处理降水消耗量平均占比为 84.8%,在各处理中最大,CI 处理次之。这说明 RI 和 CI 处理更有利于传统意义上的灌溉水节约,同时田间灌溉消耗的成本就越低。此外,2018 年各处理 WRC 中降水的平均占比相较 2017 年降低了 11.0%,这表示降水投入量减少带来的广义水资源投入量结构的改变也会影响到田间水资源消耗的结构。

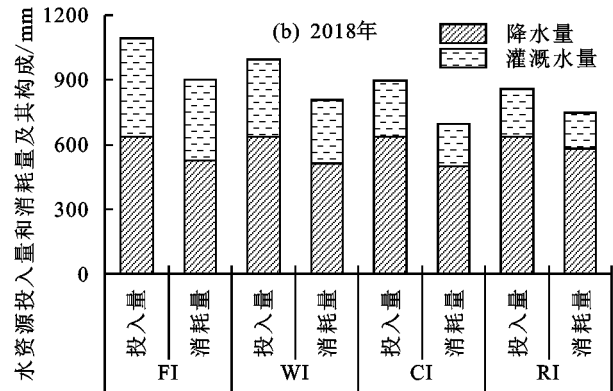


图 2 2017—2018 年各处理田间水资源投入量和消耗量及其构成

2.3 灌排模式对水资源利用效率指标的影响

水资源利用效率的评价包含水资源产出能力和利用程度 2 方面。由表 3 可知,灌排模式对产出能力的各项指标影响显著。RI 处理的 IWP 年均值为 8.042 kg/m³,在各处理中最大;CI 处理次之,其 IWP 年均值为 5.392 kg/m³。2018 年各处理灌溉水投入量的差异显著性较 2017 年减弱,所以 IWP 的差异也相对减少。同时还可以看出,2017—2018 年各处理 PWP 的变化范围为 1.0~1.7 kg/m³。CI 处理的 PWP 年均值为 1.539 kg/m³,WI 处理次之,这 2 个处理间的差异不超过 5%。2018 年的 PWP 较 2017 年整体有所提高,这说明降水投入量的相对减少可能有助于 PWP 的提升。2017—2018 年各处理 WRP 的变化范围为 0.96~1.41 kg/m³,其中 CI 处理的 WRP 均在各处理中最大,年均高达 1.364 kg/m³,WI、RI、FI 的 WRP 分别比 CI 处理减少了 13.8%,20.2%,29.2%。综合以上分析,灌排模式对水分生产力影响显著,CI 处理下稻田水资源产出能力较强。

基于水资源利用的有效程度层面本文选取了灌溉效率(IE)、降水利用率(PE)、广义水利用系数(GE),探究灌排模式对利用程度的相关指标的影响。由表 4 可知,CI 处理的 IE 年均均为 0.472,在各处理中最高,RI 处理次之,这 2 个处理 IE 间的差异不超过 3%,因此 CI 处理和 RI 处理灌溉水的有效利用程度较高。2017—2018 年 RI 处理的 PE 在各处理中最

大,年均值为 0.464;CI 处理次之,其 PE 的年均值为 0.406,可以看出 RI 和 CI 处理对降水的利用程度较高。此外 2017—2018 年 GE 的变化范围为 0.608~0.873,RI 处理的 GE 在各处理中最大,平均比 FI、WI、CI 处理高出 3.5%,5.6%,12.7%。由于 CI 处理的田间耗水量(WRC)较其他处理的减少程度比 CI 处理广义水资源投入量较其他处理的减少程度小很多,所以导致 GE 也在各处理中最低,年均值为 0.693。

表 3 2017—2018 年各处理稻田水资源产出能力
相关指标的差异 单位:kg/m³

年份	处理	IWP	PWP	WRP
2017	FI	2.774d	1.233c	0.970c
	WI	4.066c	1.378b	1.179b
	CI	7.270b	1.407a	1.408a
	RI	12.440a	1.031d	1.134b
2018	FI	1.882d	1.531b	0.958c
	WI	2.603c	1.696a	1.169b
	CI	3.513b	1.671a	1.320a
	RI	3.643a	1.278c	1.084c

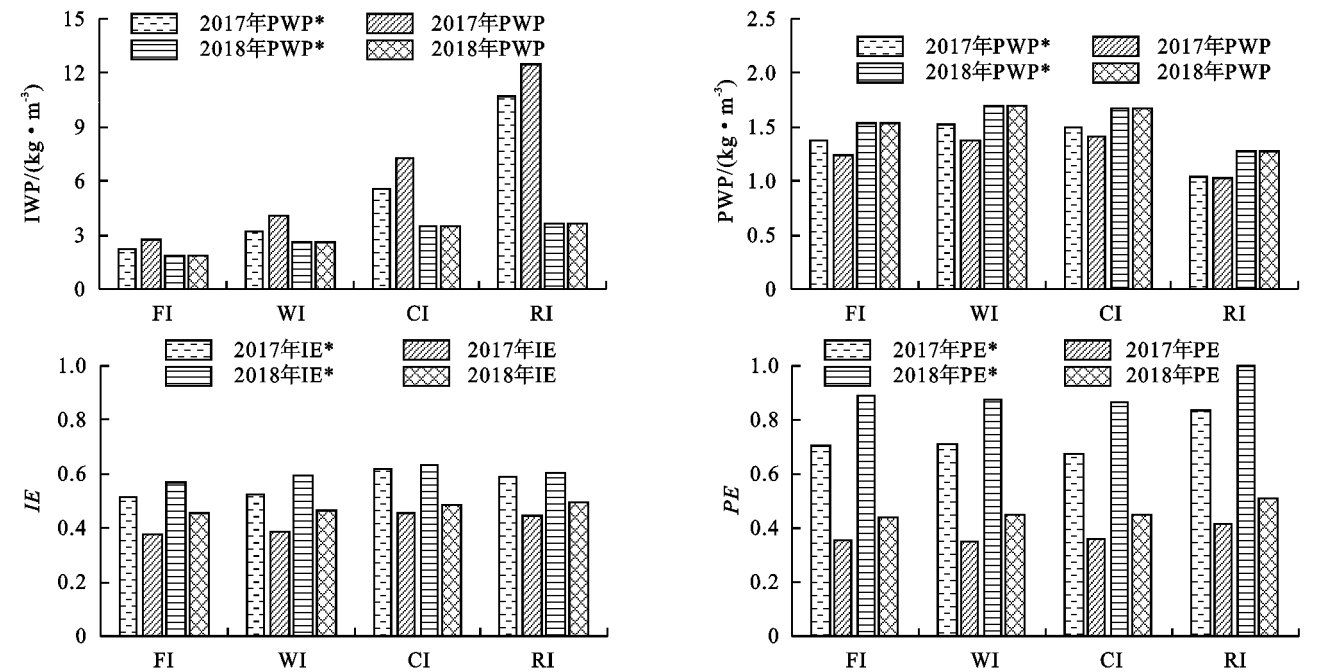
通过分析发现,水资源利用程度也受到灌排模式的影响,但处理间的差异小于产出能力指标间的差异。RI 和 CI 处理下的 IE、PE 均较高,但是 CI 处理下的 GE 最低,RI 处理的 GE 在各处理中最高。综合来看,RI 处理下稻田水资源利用程度更高,同时说明增加一定的储雨库容,不仅能提高降水的利用率,对整个田间水资源的利用程度也有所提高。

3 讨论

常用的农业用水效率评价指标的传统算法是通过全生育期总的灌溉水和降水投入比例,粗略计算出田间耗水量中灌溉水和降水的部分,没有考虑到灌溉水和降水在整个生育进程中各自的作用。而本文在计算水资源效用评价指标时是以区分整个生育期灌溉水和降水通量为切入点,并逐日追踪稻田水量平衡要素。现将传统方法计算出的用水效率指标与本文计算出的用水效率指标进行比较。

表 4 2017—2018 年各处理稻田水资源利用程度的指标差异

年份	处理	IE	PE	GE
2017	FI	0.377b	0.353b	0.700a
	WI	0.387b	0.349b	0.683a
	CI	0.457a	0.360b	0.608b
	RI	0.445a	0.415a	0.710a
2018	FI	0.457b	0.440b	0.825b
	WI	0.468b	0.452b	0.809b
	CI	0.487a	0.452b	0.777c
	RI	0.495a	0.512a	0.873a



注:带*的是利用传统方法计算得到的指标。

图 3 2017—2018 年传统算法下的利用效率指标与改进指标的对比

此外,有别于常用的单一水资源利用效率评价指标,本文从水资源“利用量—利用程度—产出能力”3个层次更加全面地对水资源效用进行了分析评价。在所选的评价指标中,IWP和PWP反映的是灌溉水和降水有效投入量的产出能力,这2个指标各处理间的差异与WRP所反映出的各处理水资源产出能力的差异基本一致,能看出CI处理下稻田水资源产出能力最强;IE和PE反映出的灌溉水和降水的有效

由图3可知,采用日尺度下追踪灌溉水和降水的计算方法得到的4个效率指标与传统方法得到的对应指标在不同处理的差异情况基本一致。本文计算得到2017年各处理的IWP较传统方法的计算结果整体偏大;PWP较传统方法的计算结果整体偏小。2018年受到降水投入量减少以及分布的影响,各处理地表排水中只排了降水,所以2种方法计算得到的IWP与PWP完全相同。IE、PE在本文计算方法下得到的结果较传统方法偏低,其中2017—2018年各处理IE较传统方法平均降低了23.2%;各处理PE较传统方法平均降低49.1%。综合分析,日尺度下追踪灌溉水和降水的计算方法与传统方法计算得到的指标存在一定差异,除了IWP利用传统方法下的计算结果偏小外,其他3个指标通过传统方法计算得到的结果均较大;2017年传统方法与本文改进方法计算得到的指标差异较2018年更大。这说明以整个生育进程视角进行灌溉水和降水消耗通量的区分,能够更加真实准确地对田间水资源用水效率进行综合评价,特别是在降水频繁的生育季。

利用程度与GE反映出的广义水资源的利用程度均表明RI处理的水资源有效利用程度最大。CI处理的IE和PE仅次与RI,CI处理的GE在各处理中最低,但与RI处理间的差异不超过15%。为了从广义水资源的视角进一步对稻田高效的灌排模式进行优选,分别在3个层次中各选取一个同时涵盖降水和灌溉水的综合型评价指标。

由图4可知,在横纵坐标轴尺度相同的前提下,

各处理所代表的点在纵坐标轴方向上分布得更为密集,意味着各处理 GE 的差异小于各处理 WRP 的差异。其中 2017 年 RI 处理的 GE 最高,与其他处理的差异范围在 $1.5\% \sim 14.4\%$; CI 处理的 WRP 最高,与其他处理的差异范围在 $16.2\% \sim 31.0\%$ 。2018 年各处理 WRP 的平均差异也比各处理 GE 平均差异高出 10.9% , CI 处理的 WRP 依然最高。这说明在评价水资源利用效率时, WRP 更具有代表性。因此 CI 处理的水资源利用效率在各处理中最高。同时 2017—2018 年 CI 处理的 WRC 年均值为 706.7 mm , 在各处理中是最低的, 分别比 RI 、 WI 、 FI 处理低了 6.7% 、 17.6% 、 25.6% 。经过“利用量—利用程度—产出能力”3 个层次的综合比对, 优选出稻田高效灌排模式为控制灌溉(CI)模式。 CI 处理可以有效地减少水资源的消耗, 提高稻田水资源的产出能力。在控制灌溉模式下进一步提升广义水资源利用的潜力, 优化农业水资源管理策略也是未来仍需要努力的方向。

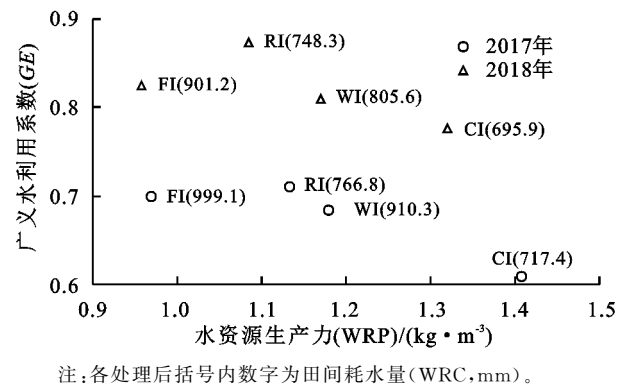


图 4 2017—2018 年各处理水资源消耗量和利用效率综合比对

4 结论

稻田水资源消耗量和利用效率指标均受到灌排模式的影响。不同灌排模式下田间降水、灌溉水的消耗量均存在较大差异, CI 处理水资源消耗量最低, 并且消耗结构更加合理。 CI 处理的稻田水资源产出能力在各处理中最强。 RI 处理的稻田水资源利用程度更高。分析表明, 产出能力的指标在评价水资源效率时更具有代表性, 结合水资源利用量优选出控制灌溉(CI)为高效稻田灌排模式。 CI 处理可以有效减少稻田水资源的消耗、提高稻田水资源利用效率, 从而更好地实现水稻种植节水、高产的目标。特别是在降水频繁的生育季, 以区分整个生育期灌溉水和降水消耗通量的水资源利用效用评价指标体系能够更加准确而全面地衡量农业生产中水资源的表现。

参考文献:

[1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报,

2014, 22(8): 880-885.

[2] Wang J X, Li Y R, Huang J K, et al. Growing water scarcity, food security and government responses in China [J]. Global Food Security, 2017, 14: 9-17.

[3] Zang C F, Liu J, Velde M, et al. Assessment of spatial and temporal patterns of green and blue water flows under natural conditions in inland river basins in North-west China [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2859-2870.

[4] Zhao A Z, Zhu X F, Liu X F, et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China [J]. Catena, 2016, 137: 318-327.

[5] Yuan Z, Xu J J, Wang Y Q. Historical and future changes of blue water and green water resources in the Yangtze River source region, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(1): 1035-1047.

[6] 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.

[7] Zhuang Y H, Zhang L, Li S S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China [J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 374-382.

[8] Hoekstra A Y. Water footprint assessment: Evolvement of a new research field [J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3061-3081.

[9] Edreira J I R, Guilpart N, Sadras V, et al. Water productivity of rainfed maize and wheat: A local to global perspective [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 364-373.

[10] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105-112.

[11] Nyathi M K, Mabhaudhi T, Van Halsema G E, et al. Benchmarking nutritional water productivity of twenty vegetables: A review [J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 248-259.

[12] Geng Q L, Ren Q F, Nolan R H, et al. Assessing China's agricultural water use efficiency in a green-blue water perspective: A study based on data envelopment analysis [J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 329-335.

[13] Zhuo L, Hoekstra A Y. The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint [J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2017, 4(2): 185-194.

[14] Wang W W, Wang J G, Cao X C. Water use efficiency and sensitivity assessment for agricultural production system from the water footprint perspective [J]. Sustainability, 2020, 12(22): e9665.

- tificial aging techniques on physicochemical properties and Pb adsorption capacities of different biochars [J]. Science of The Total Environment,2020,699:e134223.
- [10] 丛铭.生物炭及其老化对小白菜生长和土壤肥力的影响[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [11] 付强,侯仁杰,马梓昇,等.季节性冻土区不同调控模式对土壤水盐迁移协同效应的影响[J].黑龙江大学学报,2019,10(1):1-10,33.
- [12] 李宗昱,王全九,张继红,等.磁化—去电子水对盐渍化土壤水盐运移特征影响[J].水土保持学报,2021,35,174(3):290-295.
- [13] 赵航.不同生物炭调控模式对冻融土壤物理特性的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [14] Fu Q, Zhao H, Li H, et al. Effects of biochar application during different periods on soil structures and water retention in seasonally frozen soil areas [J].Science of the Total Environment,2019,694:e133732.
- [15] 李传哲,章欢,姚文静,等.生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(10):3424-3432.
- [16] 魏永霞,石国新,冯超,等.黑土区坡耕地施加生物炭对土壤结构与大豆产量的影响[J].农业机械学报,2019,50(8):309-320.
- [17] Gao Y, Li T X, Fu Q, et al. Biochar application for the improvement of water-soil environments and carbon emissions under freeze-thaw conditions: An in-situ field trial [J].Science of the Total Environment,2020,723:e138007.
- [18] Zhao J K, Ren T S, Zhang Q Z, et al. Effects of biochar amendment on soil thermal properties in the North China plain [J].Soil Science Society of America Journal,2016,80(5):1157-1166.
- [19] 付强,侯仁杰,马梓昇,等.季节性冻土区不同调控模式对土壤水盐迁移协同效应的影响[J].黑龙江大学学报,2019,10(1):1-10,33.
- [20] 高利华,屈忠义.膜下滴灌条件下生物质炭对土壤水热肥效应的影响[J].土壤,2017,49(3):614-620.
- [21] 柴冠群,赵亚南,黄兴成,等.不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J].水土保持学报,2017,31(1):296-302.
- [22] 苏旭,栾策,吴奇,等.生物炭对玉米/大豆、玉米/花生间作系统土壤水肥热及产量的影响[J].生态学杂志,2021,40(1):115-122.
- [23] 鞠文亮,荆延德.陈化处理对棉花秸秆生物炭理化性质的影响[J].环境科学学报,2017,37(10):3853-3861.
- [24] 尚杰,耿增超,赵军,等.生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J].应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
- (上接第 219 页)
- [15] Cao X C, Zeng W, Wu M Y, et al. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint [J].Journal of Cleaner Production,2021,309:e127371.
- [16] 雷波,刘钰,许迪,等.农业水资源利用效用评价研究进展[J].水科学进展,2009,20(5):732-738.
- [17] Cao X C, Zeng W, Wu M Y, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation [J].Agricultural Water Management,2020,231:e106027.
- [18] Lu Y, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: A case study in the North China Plain [J].Journal of Cleaner Production,2016,116:71-79.
- [19] 郭相平,黄双双,王振昌,等.不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(5):1-5.
- [20] Wu M Y, Cao X C, Guo X P, et al. Assessment of grey water footprint in paddy rice cultivation: Effects of field water management policies [J]. Journal of Cleaner Production,2021,313:e127876.
- [21] 俞双恩,李偲,高世凯,等.水稻控制灌溉模式的节水高产减排控污效果[J].农业工程学报,2018,34(7):128-136.
- [22] 朱成立,郭相平,刘敏昊,等.水稻沟田协同控制灌排模式的节水减污效应[J].农业工程学报 2016,32(3):86-91.
- [23] 操信春,崔思梦,吴梦洋,等.水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J].水利学报,2020,51(10):1189-1198.
- [24] Ali M K, Klein K K. Water use efficiency and productivity of the irrigation districts in southern Alberta [J]. Water Resources Management,2014,28(10):2751-2766.
- [25] 操信春,邵光成,王小军,等.中国农业广义水利用系数及时空格局分析[J].水科学进展,2017,28(1):14-21.