

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.01.029

# 灌排模式对稻田作物水足迹的影响

吴梦洋 操信春 任杰

(河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 设置浅水勤灌(FSI)、浅湿灌溉(WSI)、控制灌溉(CI)和蓄水控灌(RC-CI)4种灌排模式,于2017—2018年进行了桶栽观测试验,利用作物水足迹计算方法量化蓝、绿、灰水足迹,分析灌排模式对水稻水足迹及其组成的影响。结果表明:在不同灌排模式下,水稻作物水足迹、组成及其效率均存在差异。所有处理水足迹的范围为846.3~1132.3 mm,RC-CI处理水足迹最小,而FSI最大。FSI、WSI、CI、RC-CI作物生产水足迹年均值分别为1.26、1.18、1.06、1.08 m<sup>3</sup>/kg。在水足迹组成方面,蓝、绿、灰水足迹比例分别为10.9%~22.3%、28.8%~44.1%和39.4%~55.0%。FSI处理蓝水比例最大,RC-CI处理绿水比例占有优势。蓄水控灌降低了水稻作物水足迹,其用水结构更为合理,减小了机会成本,能够较好地实现节水减排。本研究可为选择水稻高效灌排模式和农业节水策略制定提供参考。

**关键词:** 作物水足迹; 水稻; 灌排模式; 节水减排

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)01-0256-07

OSID:



## Effects of Irrigation and Drainage Modes on Crop Water Footprint in Rice Production

WU Mengyang CAO Xinchun REN Jie

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

**Abstract:** Water footprint quantifies water resource consumption and nitrogen emission simultaneously during crop growth and provides a new method for irrigation and drainage modes evaluation in paddy rice field. Experiments were conducted during two consecutive years (2017 and 2018). Paddy rice was grown under four irrigation and drainage modes in microplots at the same location in each year. These treatments were frequent and shallow irrigation (FSI), wet-shallow irrigation (WSI), controlled irrigation (CI) and rain-catching and controlled irrigation (RC-CI). The general objectives were to calculate and analyze crop water footprint indicators, evaluate effect of modes on these indicators and choose efficient mode. The effect of the treatments on blue water footprint, green water footprint, grey water footprint, crop water footprint ( $W_F$ ) and its composition, and water footprint of production ( $W_{FP}$ ) was evaluated. These indicators were apparently different.  $W_F$  of all treatments was within 846.3 ~ 1132.3 mm.  $W_F$  of RC-CI treatment was the smallest while annual  $W_F$  of FSI treatment was the largest. The average annual  $W_{FP}$  were 1.26 m<sup>3</sup>/kg (FSI), 1.18 m<sup>3</sup>/kg (WSI), 1.08 m<sup>3</sup>/kg (RC-CI) and 1.06 m<sup>3</sup>/kg (CI), respectively. The percentage of blue, green and grey  $W_F$  were 10.9% ~ 22.3%, 28.8% ~ 44.1% and 39.4% ~ 55.0%, respectively. The percentage of blue  $W_F$  was the largest for FSI treatment and that of green  $W_F$  was superior for RC-CI treatment. RC-CI treatment reduced  $W_F$  and opportunity cost. Besides,  $W_{FP}$  of CI treatment and RC-CI treatment was close and relatively small. On the whole, RC-CI should be adopted to save water and reduce pollution caused by nitrogen emission. The research result can provide references for the selection of efficient rice irrigation and drainage mode and the formulation of agricultural water-saving strategies.

**Key words:** crop water footprint; paddy rice; irrigation and drainage mode; water saving and pollution reduction

收稿日期: 2020-03-31 修回日期: 2020-04-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51979074)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202095、2019B81414)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19\_0524)

**作者简介:** 吴梦洋(1993—),女,博士生,主要从事农业节水研究,E-mail: wumengyang0108@hhu.edu.cn

**通信作者:** 操信春(1986—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水资源高效利用研究,E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

## 0 引言

水稻是中国主要粮食作物之一<sup>[1]</sup>,其种植面积超过 3 000 万  $\text{hm}^2$ 。与其他作物不同,水稻耐淹喜湿的特征使其在生育期内消耗大量的水。另外,化肥的过度使用和不合理的灌排加剧了稻田氮磷的流失,造成周围水体和土壤的污染<sup>[2]</sup>。改变灌排模式是稻田水肥调控的主要手段。大量研究表明,选择合理的灌排模式有利于水稻节水高产,降低氮素淋溶造成的环境污染<sup>[3-7]</sup>。不同灌排模式下作物生长、耗水及氮磷排放的研究得到研究者关注,如彭世彰等<sup>[8]</sup>从作物需水量角度分析了控制灌溉的节水效应,俞双恩等<sup>[9]</sup>探究了不同灌排模式下水稻株高和茎蘖生长规律,乔欣等<sup>[10]</sup>以氮磷流失量为指标研究了不同灌排模式之间的差异。然而,已有研究选取指标相对单一,无法综合判断不同灌排模式下水稻的节水减排效果。水足迹能够同时量化田间作物生长过程对水资源及水环境的影响<sup>[11]</sup>,有望为稻田灌排模式评价提供新的途径。水足迹由蓝水足迹、绿水足迹与灰水足迹组成,其中蓝、绿水足迹分别表示作物生长过程中消耗的灌溉水和降水,灰水足迹则表示在给定自然本底浓度和现有环境水质标准下,吸收污染物排放所需的水量<sup>[12]</sup>。农业水足迹占据人类生产和消费水足迹的绝大部分,因此农作物水足迹评估成为水足迹领域研究的重要内容,其核算尺度也涉及国家、省区、流域、灌区及田间等<sup>[13-15]</sup>。在作物水足迹评估的基础上,基于水足迹理论的农业水管理已成为重要研究方向。付强等<sup>[16]</sup>和操信春等<sup>[17]</sup>利用水足迹方法评价了粮食生产中的农业水资源利用效率;冯东溥等<sup>[18]</sup>揭示了水足迹时空变化的原因;轩俊伟等<sup>[19]</sup>发现,采取调整

农作物种植比例、减少氮肥使用量等措施能有效减少区域农业用水量;王玉宝等<sup>[20]</sup>探索了气候变化对旱作玉米水足迹及用水效率的影响;卓拉等<sup>[21]</sup>模拟了不同灌溉方式下旱地作物生产水足迹的表现。在水足迹视角下农业水资源利用的可持续性开始受到关注<sup>[22]</sup>。然而,将水足迹应用于灌排模式选择,以减小农业用水量和面源污染的研究鲜见报道,使其优势难以得到发挥。本研究基于稻田作物水足迹计算方法,量化水稻水足迹并分析不同灌排模式的差异,明晰水稻真实消耗的水资源及其类型,以期为稻田节水减排提供理论与实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况与方案设计

试验于 2017—2018 年在河海大学江宁节水园区(31°57'N,118°50'E)内进行。桶栽试验土壤取自节水园区内,土壤干容重为  $1.31 \text{ g/cm}^3$ ,土壤饱和和质量含水率为 38.2%,类型为黏壤土,全磷、速效磷、全氮、速效氮质量比分别为 33.0、10.37、62.9、47.4  $\text{mg/kg}$ ,有机质质量分数为 2.40%,pH 值 8.10。

试验共设 4 种灌排模式: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),灌排控制指标参照文献[23-25,8],具体灌排标准见表 1。试验设 4 个处理,3 个重复,各试验小区面积一致,全生育期人工拔草,除灌排标准外其余农技措施均相同,每个试验测坑外设置保护带减少组间和外界环境的相互影响,同步观测各处理水稻植株的生长与系统水分等指标。2017 年水稻 6 月 21 日移栽,10 月 24 日收割。2018 年水稻 6 月 26

表 1 不同灌排模式下的灌排标准

Tab. 1 Differential standards of different irrigation and drainage modes

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
FSI	灌水上限	30mm	30mm	50mm	40mm	40mm	0mm
	灌水下限	10mm	10mm ~ 60% $\theta_s$	10mm	10mm	10mm	(60% ~ 70%) $\theta_s$
	蓄雨上限	40mm	100mm	150mm	200mm	200mm	0mm
WSI	灌水上限	30mm	20mm	20mm	30mm	30mm	0mm
	灌水下限	20mm	(70% ~ 90%) $\theta_s$	90% $\theta_s$	100% $\theta_s$	80% $\theta_s$	(70% ~ 80%) $\theta_s$
	蓄雨上限	40mm	60mm	100mm	100mm	80mm	0mm
CI	灌水上限	30mm	0mm	0mm	0mm	0mm	80% $\theta_s$
	灌水下限	10mm	(60% ~ 70%) $\theta_s$	(70% ~ 80%) $\theta_s$	80% $\theta_s$	70% $\theta_s$	自然落干
	蓄雨上限	40mm	60mm	80mm	80mm	80mm	0mm
RC-CI	灌水上限	30mm	0mm	0mm	0mm	0mm	80% $\theta_s$
	灌水下限	10mm	(60% ~ 70%) $\theta_s$	(70% ~ 80%) $\theta_s$	80% $\theta_s$	70% $\theta_s$	自然落干
	蓄雨上限	80mm	150mm	200mm	200mm	200mm	0mm

注:“mm”表示田面水深单位,“%”表示表层 30 cm 土壤的含水率占土壤饱和含水率  $\theta_s$  的百分比。

日移栽,10月20日收割。水稻生长过程中根据生育期施肥,其中基肥为复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O比例为15%:15%:15%),施用量300 kg/hm<sup>2</sup>,返青肥、分蘖肥、穗肥均为尿素(含氮质量分数大于等于46.2%),施用量分别为150、125、150 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.2 指标及测定

(1)土壤水分情况:每日08:00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。

(2)灌溉和排水情况:参照各处理灌排控制标准,当田面水层或土壤含水率降至灌水下限时,灌水至上限(考虑天气情况),若某次或当日降雨使水层深度超过蓄雨上限,则及时排水至蓄雨上限,记录每次的灌排水时间和灌排水量。桶栽试验时,桶底埋置了三通管,模拟蒸渗仪,为保持三通管中水面线在桶内土壤表面以下30 cm左右,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含量测试。

(3)氮素含量测试:水样中总氮含量测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法<sup>[26]</sup>,铵氮含量测定采用纳氏试剂比色法<sup>[27]</sup>,硝氮含量测定采用紫外分光光度法<sup>[28]</sup>。水样采集后尽量2 h内进行测试分析,若水样较多,可放入冰柜于4℃低温保存,24 h内处理完毕。

(4)产量:水稻完熟期,按每桶面积单打单收换算实际产量。

(5)气象资料: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。

## 1.3 作物生产水足迹计算

以稻田水量平衡为基础计算农作物水足迹(Water footprint, WF),衡量作物生产过程中实际消耗的水量,其等于蓝水足迹、绿水足迹与灰水足迹的和<sup>[29]</sup>,即

$$W_F = W_{F_{blue}} + W_{F_{green}} + W_{F_{grey}} \quad (1)$$

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

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

$$W_{F_{grey}} = \frac{\sum_{t=1}^T (C_{N,t}^{(S)} R_t^{(S)} + C_{N,t}^{(u)} R_t^{(u)})}{C_{max} - C_{nat}} \quad (4)$$

式中  $W_F$ ——农作物水足迹,mm

$W_{F_{blue}}$ ——蓝水足迹,mm

$W_{F_{green}}$ ——绿水足迹,mm

$W_{F_{grey}}$ ——灰水足迹,mm

$ET_t^{(b)}$ 、 $ET_t^{(g)}$ —— $t$ 日灌溉水、降水的蒸发蒸腾量,mm

$C_{N,t}^{(S)}$ 、 $C_{N,t}^{(u)}$ ——地表、地下排水中氮素质量浓度,mg/L

$R_t^{(S)}$ 、 $R_t^{(u)}$ ——地表、地下排水量,mm

$C_{max}$ ——环境容许最大质量浓度,mg/L

$C_{nat}$ ——自然本底浓度,mg/L

灰水足迹按地表和地下排水中的氮素含量计算,以GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的地表水V类水质规定的总氮质量浓度上限(2.0 mg/L)作为 $C_{max}$ 代入公式计算;污染物的自然本底浓度取0 mg/L。

田间每日蓝、绿水足迹按日降水与灌溉水对田间水分平衡各要素的贡献比例计算,即

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

式中  $F_{t-1}$ —— $t-1$ 日田间水量,mm

$F_{t-1}^{(b)}$ 、 $F_{t-1}^{(g)}$ ——田间水量中蓝、绿水量,mm

稻田日蒸发蒸腾量根据每日稻田水量平衡计算,即

$$P_t + I_t = ET_t + R_t^{(S)} + D_t + \Delta F_t \quad (6)$$

式中  $P_t$ ——降水量,mm

$I_t$ ——灌溉水量,mm

$D_t$ ——深层渗漏量,mm

$\Delta F_t$ ——稻田田间水量变化量,mm

根据田间蓝绿水利用与分解构建日步长水分动态平衡方程,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,计算式为

$$\begin{cases} F_t^{(b)} = F_{t-1}^{(b)} + (P_t + I_t - R_t^{(S)}) \frac{I_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{F_{t-1}^{(b)}}{F_{t-1}} \\ F_t^{(g)} = F_{t-1}^{(g)} + (P_t + I_t - R_t^{(S)}) \frac{I_t}{P_t + I_t} - (D_t + ET_t) \frac{F_{t-1}^{(g)}}{F_{t-1}} \end{cases} \quad (7)$$

作物生产水足迹衡量作物水资源利用效率,用作物水足迹和产量的比值来计算,计算式为

$$W_{FP} = 10 W_F / Y \quad (8)$$

式中  $W_{FP}$ ——作物生产水足迹,m<sup>3</sup>/kg

$Y$ ——作物产量,kg/hm<sup>2</sup>

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田水量平衡参数

表2为2017—2018年各处理水稻水量平衡参数。由表2可知,对于灌水次数,RC—CI最小,CI次之。灌溉用水量由大到小依次为FSI、WSI、CI、

表 2 2017—2018 年各处理水量平衡参数

Tab.2 Water balance parameters of each treatment in 2017 and 2018

年份	处理	灌水次数	灌溉用水量/mm	地表排水次数	地表排水量/mm	地下排水量/mm	总蒸发蒸腾量/mm
2017	FSI	13	410.7 <sup>a</sup>	3	113.3 <sup>b</sup>	385.7 <sup>a</sup>	562.3 <sup>a</sup>
	WSI	14	374.3 <sup>b</sup>	4	131.9 <sup>a</sup>	316.8 <sup>b</sup>	567.7 <sup>a</sup>
	CI	7	227.7 <sup>c</sup>	4	86.2 <sup>c</sup>	282.5 <sup>c</sup>	496.6 <sup>b</sup>
	RC-CI	7	225.9 <sup>c</sup>	2	71.5 <sup>c</sup>	305.4 <sup>b</sup>	483.6 <sup>b</sup>
2018	FSI	11	412.9 <sup>a</sup>	2	72.9 <sup>b</sup>	334.8 <sup>a</sup>	566.3 <sup>a</sup>
	WSI	9	391.9 <sup>b</sup>	3	146.0 <sup>a</sup>	296.4 <sup>b</sup>	526.3 <sup>b</sup>
	CI	7	297.2 <sup>c</sup>	3	147.6 <sup>a</sup>	256.5 <sup>c</sup>	475.7 <sup>d</sup>
	RC-CI	5	214.3 <sup>d</sup>	0	0 <sup>c</sup>	293.9 <sup>b</sup>	499.0 <sup>c</sup>

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

RC-CI, FSI 和 WSI 在较长时间内田面具有水层, 蒸发蒸腾量和渗漏量均较大, 灌溉用水量因此较大。RC-CI 具有较大的蓄雨上限, 能够较好地积蓄雨水, 因此灌水次数和灌溉用水量都最小。对于地表排水次数, RC-CI 最小, FSI 其次, CI 与 WSI 相同。对于地表排水量, RC-CI 最小, 原因同样是 RC-CI 具有较大的蓄雨上限, 尤其是 2018 年整个生育期田面水层没有超过蓄雨上限。地下排水量由大到小依次为 FSI、WSI、RC-CI、CI, 根据表 1, CI 处理不同生育期灌水上限、灌水下限和蓄雨上限都较低, 因此田面水层较薄或没有水层, 并且水层停留时间较短, 减

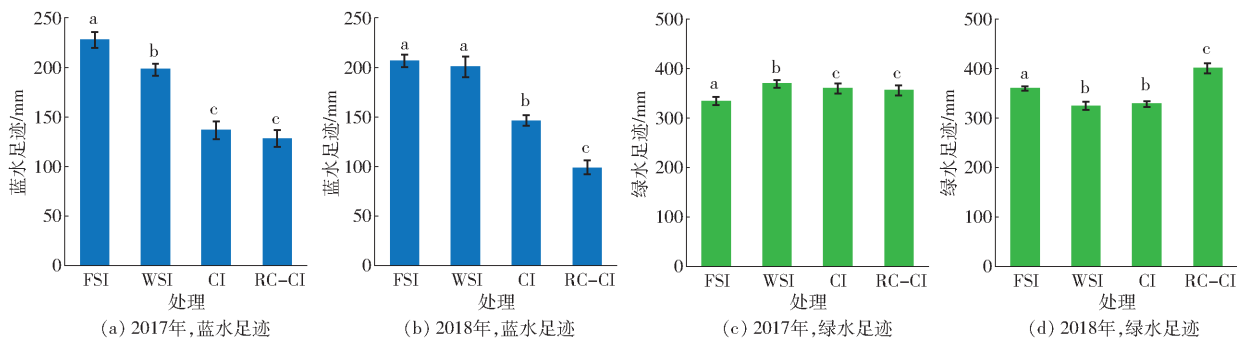


图 1 2017—2018 年各处理作物蓝、绿水足迹

Fig. 1 Blue and green water footprints of each treatment in 2017 and 2018

综合以上分析可知, 不同灌排模式对水稻蓝、绿水足迹影响显著。各处理蓝水足迹由大到小依次为 FSI、WSI、CI、RC-CI。FSI 和 WSI 蓝水足迹较大的原因是灌溉用水量和总蒸发蒸腾量都较大。RC-CI 处理灌溉用水量最小, 另外根据 2.1 节的分析, 该处理总蒸发蒸腾量不高, 蓝水足迹因此最小。对于绿水足迹 RC-CI 处理最大, 主要受地表排水的影响。

图 2 为 2017—2018 年水稻各处理灰水足迹及其显著性分析结果。水稻灰水足迹范围为 335.8 ~

少了渗漏量, 地下排水量也因此减少。对于总蒸发蒸腾量, FSI 和 WSI 比其他处理高, 原因是土壤表面经常有水层或经常被湿润。

## 2.2 作物蓝、绿、灰水足迹

观测结果显示, 所有对象的水稻水足迹变化范围为 846.3 ~ 1 132.3 m。图 1 (图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同) 为 2017—2018 年各处理水稻蓝、绿水足迹及其显著性分析结果。水稻蓝、绿水足迹范围分别为 98.9 ~ 227.5 mm、325.5 ~ 400.1 mm。由图 1a 可知, 2017 年灌排模式对水稻各处理蓝水足迹影响显著, 各处理蓝水足迹由大到小依次为 FSI、WSI、CI、RC-CI, RC-CI、CI、WSI 蓝水足迹分别比 FSI 减少 43.6%、39.8%、12.9%。由图 1b 可知, 2018 年灌排模式对水稻各处理蓝水足迹影响显著, 各处理蓝水足迹由大到小依次为 FSI、WSI、CI、RC-CI, RC-CI、CI、WSI 蓝水足迹分别比 FSI 减少 52.2%、29.1%、3.0%。由图 1c 可知, 2017 年灌排模式对水稻各处理绿水足迹影响显著, 各处理绿水足迹由大到小依次为 WSI、CI、RC-CI、FSI, FSI、RC-CI、CI 绿水足迹分别比 WSI 减少 9.4%、3.8%、2.7%。由图 1d 可知, 2018 年灌排模式对水稻各处理绿水足迹影响显著, 各处理绿水足迹由大到小依次为 RC-CI、FSI、CI、WSI, WSI、CI、FSI 绿水足迹分别比 RC-CI 减少 18.6%、17.8%、10.2%。

605.9 mm。由图 2a 可知, 2017 年灌排模式对水稻灰水足迹影响显著, 各处理灰水足迹由大到小依次为 FSI、WSI、RC-CI、CI, CI、RC-CI、WSI 灰水足迹分别比 FSI 减少 22.7%、21.2%、19.9%。对于地表排水灰水足迹, 其由大到小依次为 FSI、WSI、CI、RC-CI, RC-CI、CI、WSI 地表排水灰水足迹分别比 FSI 减少 61.7%、56.2%、21.3%。对于地下排水灰水足迹, 其由大到小依次为 FSI、RC-CI、CI、WSI, WSI、CI、RC-CI 地下排水灰水足迹分别比 FSI 减少 19.3%、6.1%、1.2%。各处理灰水足迹的主要组成

部分为地下排水灰水足迹。由图 2b 可知,2018 年灌排模式对水稻灰水足迹影响显著,各处理灰水足迹由大到小依次为 WSI、CI、FSI、RC - CI, RC - CI、FSI、CI 灰水足迹分别比 WSI 减少 32.8%、14.6%、4.2%。对于地表排水灰水足迹,其由大到小依次为 WSI、CI、FSI、RC - CI, RC - CI、FSI、CI 地表排水灰水足迹分别比 WSI 减少 100%、21.9%、0.8%。对于地下排水灰水足迹,其由大到小依次为 RC - CI、FSI、WSI、CI, CI、WSI、FSI 地下排水灰水足迹分别比 RC - CI 减少 81.2%、76.0%、70.4%。FSI、WSI、CI 灰水足迹的主要组成部分为地表排水灰水足迹, RC - CI 处理生育期内水层没有超过蓄雨上限,未产生地表排水,因此只有地下排水灰水足迹。

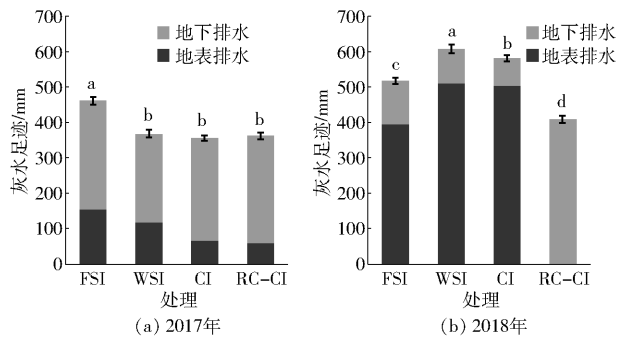


图 2 2017—2018 年各处理作物灰水足迹

Fig. 2 Grey water footprint of each treatment in 2017 and 2018

综合以上分析可知,不同灌排模式对水稻灰水足迹影响显著,RC - CI 处理灰水足迹最小,主要和排水有关。2017 年各处理地下排水灰水足迹大于地表排水灰水足迹,原因是地表排水距离施肥时间较远,相比较 2018 年,较多的氮素从地下淋失。

### 2.3 作物生产水足迹及其组成

FSI、WSI、CI、RC - CI 年均作物生产水足迹分别为 1.26、1.18、1.06、1.08  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。图 3 为 2017—2018 年各处理作物生产水足迹及其差异的显著性分析结果。由图 3a 可知,2017 年灌排模式对水稻各处理作物生产水足迹影响显著,其由大到小依次为 FSI、WSI、RC - CI、CI, CI、RC - CI、WSI 作物生产水足迹分别比 FSI 减少 22.3%、17.4%、10.7%。由图 3b 可知,2018 年灌排模式对水稻各处理作物生产水足迹影响显著,其由大到小依次为 FSI、WSI、CI、RC - CI, RC - CI、CI、WSI 作物生产水足迹分别比 FSI 减少 11.5%、10.7%、2.3%。综合以上分析可知,不同灌排模式对水稻作物生产水足迹影响显著,所有重复作物生产水足迹的范围为 0.94 ~ 1.31  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,FSI 处理生产水足迹最大,说明该处理水稻水资源利用效率最低。FSI 处理作物生产水足迹较高的原因主要是蒸发蒸腾量和灌溉用水量较大,与

RC - CI 相比,FSI 处理作物生产水足迹较高的原因还包括灰水足迹较大。WSI 处理作物生产水足迹较高的原因主要是蒸发蒸腾量和灰水足迹较大。

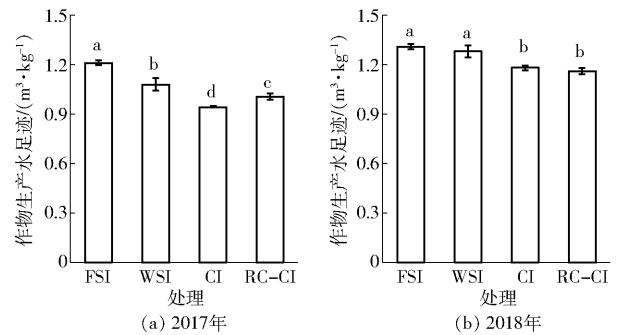


图 3 2017—2018 年各处理作物生产水足迹

Fig. 3  $W_{FP}$  of each treatment in 2017 and 2018

图 4 为 2017—2018 年各处理水足迹组成比例,分析组成有助于研究水足迹影响因素。绿水源于降水,不需要通过工程措施来获取,即绿水机会成本较小,绿水比例增加意味着水资源综合利用效益提高。蓝水和绿水统称为消耗性用水,灰水则是稀释性用水,消耗性用水比例的增加相当于更多的水资源在作物生育期发挥了作用,有利于水稻生长。由图 4a 可知,2017 年各处理灰水比例均超过 39.4%,灰水比例和绿水比例总体接近,蓝水比例最小。由图 4b 可知,各处理灰水比例均接近 50%,CI 处理更是达到 55.0%。各处理水足迹组成成分最主要是灰水足迹,其次是绿水足迹,最后是蓝水足迹。就水足迹组成而言,蓝水足迹比例最小,总体在 10.9% ~ 22.3% 之间,绿水足迹比例则在 28.8% ~ 44.1% 之间,充分证明了降雨对于作物生长的重要程度。灰水足迹比例在 39.4% ~ 55.0% 之间,2018 年灰水比例普遍大于 2017 年,这与降雨量密不可分。

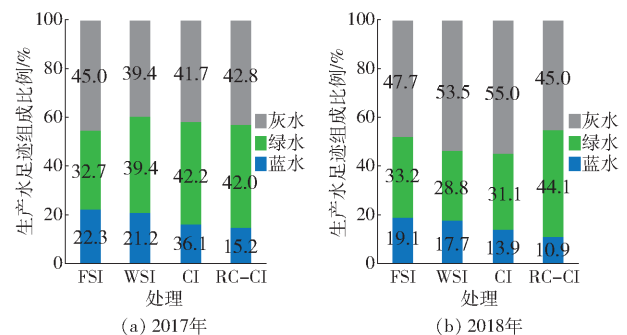


图 4 2017—2018 年各处理作物生产水足迹组成比例

Fig. 4 Water footprint composition of each treatment in 2017 and 2018

### 3 讨论

水分对于水稻生长发育至关重要,适宜的灌排模式可以保证产量,有利于节水减排。从本文研究结果看,很大一部分灌溉水没有被作物利用,形成蓝

水足迹, 浅水勤灌和浅湿灌溉不仅增加灌溉用水量和劳动强度, 经常存在的水层还增加了土壤水势梯度, 渗漏量显著提升, 同时可能携带土壤中的氮素大量淋失, 造成面源污染。绿水足迹的形成和降雨量及其分布都密不可分。2017 年降雨较 2018 年更为频繁, 峰值低, 蓄水控灌的优势不明显, 各处理绿水足迹的差异较小。地表和地下排水造成的氮素污染, 受排水量和氮素浓度的共同影响。2017 年蓄水控灌总排水量高于控制灌溉, 但灰水足迹无显著差异, 一方面蓄水控灌淹水作用较强, 促进土壤反硝化作用, 降低氮素浓度。另一方面, 由于降水集中于作物生育前期, 排水中氮素浓度偏低, 氮素排放总量下降, 这也是 2017 年整体灰水足迹小于 2018 年的主要原因。2018 年蓄水控灌通过拦蓄降雨, 减少了含高浓度氮素地表水的排放。浅水勤灌由于田面存在薄水层, 这对于维持地温, 调节田间小气候有重要意义, 但同时也会增加成本和环境负担的风险。相关研究显示控制灌溉条件下水稻的作物需水量相比浅水勤灌减少<sup>[8]</sup>, 与本文消耗性(蓝、绿)水足迹的核算结果基本一致; 郭相等<sup>[25]</sup>研究发现, 控制灌溉和蓄水控灌作物需水量没有显著差异, 也与本研究结果相吻合。然而这些研究没有分解出水资源的来源, 也没有从水量的角度来考虑灌溉排水对环境的影响。本文基于水足迹视角, 通过蓝、绿水的区分, 可以分辨出作物需水量减少的主要原因在于蓝水足迹的降低。同时, 计算

结果还显示, 水稻生产过程中灰水比例均超过 39.4%, 2018 年浅湿灌溉和控制灌溉处理灰水比例更是在 50% 以上。这说明灰水足迹在灌排模式的评价和选择中不可忽视。郝树荣等<sup>[30]</sup>考虑灌排水量、氮磷流失负荷、产量及灌溉水分生产率优选高效灌排模式。然而指标类型不同, 各指标评价结果并不总是一致, 也难以统一为同一指标, 最终选择仍受主观因素影响。水足迹理论将氮素流失统一于作物水资源耗用量之中, 为灌排模式评价和优选提供更加简单而全面的途径。

#### 4 结束语

基于农作物水足迹计算方法, 分析了 2017—2018 年各灌排模式下水稻作物的水足迹指标及组成, 结果表明, 灌排模式能够显著改变水稻作物的水足迹。水稻蓝、绿、灰水足迹范围分别为 98.9 ~ 227.5 mm、325.5 ~ 400.1 mm、335.8 ~ 605.9 mm, 所有处理水足迹的范围为 846.3 ~ 1 132.3 mm, 蓄水控灌水足迹最小。浅水勤灌、浅湿灌溉、蓄水控灌、控制灌溉生产水足迹年均值分别为 1.26、1.18、1.08、1.06 m<sup>3</sup>/kg, 蓄水控灌和控制灌溉的水资源利用效率接近。就水足迹组成而言, 蓝、绿、灰水足迹比例分别为 10.9% ~ 22.3%、28.8% ~ 44.1%、39.4% ~ 55.0%, 说明在水稻生产过程中降雨的利用和环境影响不容忽视。综合考虑作物水足迹及其组成, 蓄水控灌为符合节水减排目标的最优灌排模式。

#### 参 考 文 献

- [1] DENG N, GRASSINI P, YANG H, et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1725.
- [2] LIN X, ZHOU W, ZHU D, et al. Nitrogen accumulation, remobilization and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) under an improved irrigation practice[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(2-3): 448-454.
- [3] HE G, WANG Z, CUI Z. Managing irrigation water for sustainable rice production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245(2): 118928.
- [4] SHAO G C, WANG M H, YU S E, et al. Potential of controlled irrigation and drainage for reducing nitrogen emission from rice paddies in Southern China[J]. *Journal of Chemistry*, 2015, 2015(Special Issue): 913470.
- [5] AZIZ O, HUSSAIN S, RIZWAN M, et al. Increasing water productivity, nitrogen economy, and grain yield of rice by water saving irrigation and fertilizer-N management[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(17): 16601-16615.
- [6] CARRIJO D R, LUNDY M E, LINQUIST B A. Rice yields and water use under alternate wetting and drying irrigation: a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 173-180.
- [7] LU W, CHENG W, ZHANG Z, et al. Differences in rice water consumption and yield under four irrigation schedules in central Jilin Province, China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(4): 473-480.
- [8] 彭世彰, 朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 21-25.  
PENG Shizhang, ZHU Chengli. Experimental research on crop water requirement under water-saving irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 21-25. (in Chinese)
- [9] 俞双恩, 张梦婷, 陈凯文, 等. 灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 210-218.  
YU Shuang'en, ZHANG Mengting, CHEN Kaiwen, et al. Effects of irrigation and drainage modes and nitrogen levels on rice plant height and tiller growth dynamics[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 210-218. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20191124&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191124&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.024. (in Chinese)
- [10] 乔欣, 邵东国, 刘欢欢, 等. 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 862-868.  
QIAO Xin, SHAO Dongguo, LIU Huanhuan, et al. Study on the moving and transforming law of N and P under water-saving

- irrigation and controlled drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011,42(7): 862–868. (in Chinese)
- [11] HOEKSTRA A Y. Water footprint assessment: evolvement of a new research field[J]. *Water Resources Management*, 2017, 31(10): 3061–3081.
- [12] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 295–302. GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5):295–302. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180535&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180535&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.035. (in Chinese)
- [13] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011,15(5): 1577–1600.
- [14] CAO X C, WU M Y, 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.
- [15] YOO S H, CHOI J Y, LEE S H, et al. Estimating water footprint of paddy rice in Korea[J]. *Paddy and Water Environment*, 2014,12(1): 43–54.
- [16] 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 184–192. FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(6):184–192. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170624&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170624&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024. (in Chinese)
- [17] 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. CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(5):1–8. (in Chinese)
- [18] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠. 宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 269–277. FENG Dongpu, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan. Temporal and spatial variation characteristics and attribution analysis of wheat water footprint in Baojixia irrigation area, China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 269–277. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20171232&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171232&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.032. (in Chinese)
- [19] 轩俊伟, 郑江华, 刘志辉. 新疆主要农作物生产水足迹计算分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2014,32(6): 195–200,235. XUAN Junwei, ZHENG Jianghua, LIU Zhihui. Calculation and analysis on water footprint of main crops in Xinjiang[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014,32(6): 195–200,235. (in Chinese)
- [20] 王玉宝, 柴成亮, 张鹏, 等. 气候变化条件下旱作玉米用水效率与单产变化趋势分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(8): 210–218. WANG Yubao, CHAI Chengliang, ZHANG Peng, et al. Trend analysis of water use efficiency and yield of dryland maize under climate change[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(8): 210–218. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180825&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180825&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.025. (in Chinese)
- [21] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 264–271. ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 264–271. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190931&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190931&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.031. (in Chinese)
- [22] 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. CAO Xinchun, LIU Zhe, WU Mengyang, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(18): 94–100. (in Chinese)
- [23] 俞双恩, 张展羽. 江苏省水稻高产节水灌溉技术体系研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2002,30(6): 30–34. YU Shuang'en, ZHANG Zhanyu. Technical system of water-saving irrigation for rice planting in Jiangsu Province[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2002,30(6): 30–34. (in Chinese)
- [24] 刘复新. 水稻高产节水灌溉技术的分类研究[J]. *中国农村水利水电*, 1998(3): 10–12.
- [25] 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. GUO Xiangping, YUAN Jing, GUO Feng, et al. Preliminary study on water-catching and controlled irrigation technology of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009,25(4): 70–73. (in Chinese)
- [26] 环境保护部. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [27] 环境保护部. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [28] 国家环境保护局. 水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法: GB 7480—87[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- [29] 苏明涛, 张郁, 靳英华. 吉林省主要农作物的生产水足迹研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(7): 26–30. SU Mingtao, ZHANG Yu, JIN Yinghua. The water footprint of main crops in Jilin Province from a production perspective[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012,26(7): 26–30. (in Chinese)
- [30] 郝树荣, 王子欣, 潘永春, 等. 稻田总磷迁移规律与最佳灌排模式研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019,50(10): 306–314. HAO Shurong, WANG Zixin, PAN Yongchun, et al. Migration rule of total phosphorus in paddy fields and election of optimal irrigation and drainage mode[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 306–314. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20191035&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191035&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.035. (in Chinese)