

基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化

邵东国, 乐志华, 徐保利, 胡能杰, 田旖旎

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 随着人们对提高农业生产效率方法的不断探索, 水稻生产模式正发生很大变化, 并由化肥农药高投入的传统农业向生态环保的有机农业转变, 但有机稻需耗水特性及其适宜的灌溉制度研究较少。为揭示有机稻耗水规律及不同降水年型下的灌水与产量关系, 2015—2016 年在湖北省漳河灌区开展了有机稻灌溉试验研究, 统计分析了有机稻与普通稻的需耗水差异, 获得了有机稻耗水及其产量特性, 提出了基于 AquaCrop 模型与熵值法耦合的有机稻灌溉制度多目标多情景优化方法。结果表明: 1) 有机稻与普通稻需水量无显著差异, 但前者的排水量显著高于后者, 且前者排水中的氮磷浓度均显著降低。有机稻产量为普通稻产量的 84%, 但单方灌水产值高 28.5% ($P<0.05$), 具有显著的经济效益。2) 优化后中国南方灌区有机稻适宜的优化灌溉制度为: 枯水年, 108% (以 RAW 计, 下同) 的土壤含水率控制下限、30 mm 的灌水定额、灌水 8~9 次, 平水年 113.85% 的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、灌水 6~7 次; 丰水年, 116.92% 的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、灌水 3~4 次。该文为选择节水、高产的有机稻灌溉方案提供参考。

关键词: 灌溉; 耗水; 模型; 熵值法; 有机稻; Aqua Crop; 灌溉制度多目标优化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.015

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-19-0114-09

邵东国, 乐志华, 徐保利, 胡能杰, 田旖旎. 基于 AquaCrop 模型的有机稻灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 114—122. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.015 http://www.tcsae.org

Shao Dongguo, Le Zhihua, Xu Baoli, Hu Nengjie, Tian Yini. Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 114—122. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.19.015 http://www.tcsae.org

0 引 言

近年来, 随着人们对传统水稻生产环境污染认识的深入以及对安全、优质、生态的粮食产品重视程度的不断提高^[1-2], 生态高值的农业发展模式逐渐成为未来农业科技战略的选择^[3-4], 有机稻则是其中的典型代表之一^[5]。在巨大的市场发展潜力和良好的经济效益驱动下, 有机稻栽培面积在中国广大稻区日益扩大, 至 2016 年全国稻田生态种养应用面积超过 80 万 hm^2 ^[6], 有机稻种植面积超过 126 万 hm^2 ^[5]。有机稻是一种生态型水稻种植模式, 与传统水稻种植不同, 有机稻在整个生育期内不使用任何肥料、农药、生长调节剂等物质, 遵循自然规律和生态原理实现水稻可持续生产过程^[5]。在诸多田间灌溉试验研究中, 统计发现传统水稻生产模式全生育期长度为 90~100 d^[7-8], 有机稻模式则为 120~130 d^[9-10], 随着作物生长进程、生育阶段长度及各阶段分布日期的改变, 有机水稻需水量、需水强度、需水峰值及水分敏感期等较传统水稻模式均会有所不同^[11], 但相关研究少见报道。针对有机稻模式, 当前国内外学者们研究集中在有机稻品种选育、田间养分效率、环境效益、病虫害控制、稻

米品质等方面, 尚缺少有机稻需耗水及灌溉制度优化的研究^[9-10,12-13]。

目前, 学者们已提出不少灌溉制度优化算法及模拟模型^[8,14], 其中 AquaCrop 模型由于能够准确地模拟农田水分平衡及作物生长, 被广泛应用于水肥对土壤-作物系统影响的研究中^[15]。与其他作物模型相比, AquaCrop 模型具有输入参数少、简捷易操作, 同时又能满足大田作物生长模拟精度要求。通过对模型参数进行率定, 模型能够较准确预测不同灌水处理下作物产量差异及土壤含水率状况, 可用于灌溉制度的优化。Geerts 等将 AquaCrop 模型应用于不同旱作物的水肥管理模拟优化中^[16-18], 模型已得到广泛的验证; Mainuddin 等也利用 AquaCrop 模型研究不同气候、不同水肥条件下水稻的优化管理制度^[19-20], 验证模型在水稻中的适用性, 但国内尚缺乏 AquaCrop 模型在水稻生长模拟及灌水优化中的应用研究。水稻灌溉制度优化的诸多研究中, 大多以灌水量、产量或水分生产率等单一目标为优化对象^[8,21], 而稻田排水作为营养元素流失的主要途径, 是衡量稻田减排的重要指标^[22], 但综合考虑灌水、排水、产量的多目标灌溉制度优化的研究较少。

本文以湖北漳河灌区水稻种植区的有机稻为研究对象, 基于 2015 年田间试验分析有机稻模式的耗水特性, 根据 2016 年 5 种灌水处理率定并验证 AquaCrop 模型, 并构建多目标优化函数, 以灌水、排水、产量为目标综合评价不同灌溉情景, 确定适宜的灌溉制度, 为有机稻

收稿日期: 2018-02-02 修订日期: 2018-06-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51439006); 国家自然科学基金面上项目 (51379150)

作者简介: 邵东国, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源高效利用及其生态环境效应研究。Email: dgshao@whu.edu.cn

节水灌溉、安全高效生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015—2016 年 5—10 月在漳河灌区谭店示范区进行，试验区位于湖北省荆门市掇刀区双喜街道（30.91N、112.16E），北依漳河灌区总干渠，东邻凤凰水库，距漳河水库 13.6 km，灌溉水源充足；离荆门市区 8.4 km，交通十分方便。本区属长江中下游亚热带季风气候类型，气候温和、无霜期长、雨量充沛、较为湿润。本区内多年平均气温 15.8 ℃，最高月平均气温 27.7 ℃，多年无霜期为 267 d，多年平均降雨量 903.3 mm，多年平均蒸发量 1 413.9 mm，年日照总时数 1 300~1 600 h，潮湿系数小于 1。试验区耕地土层较厚，耕作层较深，质地黏重，透水性较差，保水、保肥、抗旱能力较强。干旱时板结坚硬，容易发生裂缝，遇水则较柔软易耕，肥力较高，易于种植水稻。试验区土壤饱和体积含水率 0~35 cm 为 50%，35~100 cm 为 54%；田间持水率 0~35 cm 为 39%，35~100 cm 为 50%；凋萎系数 0~35 cm 为 23%，35~100 cm 为 32%。

1.2 试验设计

试验设计 2 种水稻种植模式，其中有机稻模式进行 2 a 试验，普通稻模式进行 1 a 试验；基于 2015 年试验分析有机稻同普通稻的耗水差异，基于 2016 年试验优化有机稻灌溉制度。有机稻试验作物品种选用当地普遍种植的“鄂中五号”，并采用有机耕作模式，即在有机稻栽培过程中不使用化肥农药，以翻耕的红花草为基肥（撒种密度为 22.5 kg/hm²），分蘖肥和拔节肥施用湖北省农科所研制的有机肥料（有机质≥45%，主要成份为鸡禽粪便等混合物），施肥量为 4 500 kg/hm²，与当地有机稻的高产

施肥量一致；稻田进行人工除草，使用杀虫灯进行虫害控制，其他农事操作均符合中国有机农业生产标准（GB/T 19630.1-2011）^[23]。普通稻试验品种也选择“鄂中五号”，化肥农药施用则控制与当地普通稻高产施肥量一致，施用 3 次尿素（含氮 46.4%），总纯氮量为 145 kg/hm²（基肥 50%，分蘖肥 30%，拔节肥 20%），使用农药杀虫除草。

灌水控制时，2015 年有机稻和普通稻均采用浅湿灌溉，稻田分蘖后期晒田，黄熟期自然落干至收割，在其余生育期以田间水层作为灌水控制指标，在田面维持 20~50 mm 水层，降雨若超过水层上限则进行排水；2016 年有机稻则设置 5 种灌溉定额，不同生育阶段的灌水量见表 1，灌水时间返青期为 6 月 1 日、分蘖期为 6 月 15 日和 6 月 23 日，孕穗期为 7 月 31 日、抽穗期为 8 月 20 日、乳熟期为 8 月 8 日和 9 月 5 日。试验期间 2 种水稻的移栽插秧的日期根据当地实际生产确定，各生育阶段的时间见表 2。

田间试验均在野外进行，有机稻和普通稻的泡田定额、翻耕方式、移栽时稻田水深均一致，试验小区面积均在 30~35 m² 之间，各处理均设置 3 次重复。

表 1 2016 年有机稻田田间试验灌水量

Table 1 Description of water irrigation treatments for organic rice in 2016

处理 Treatment	返青期 Returning green stage/mm	分蘖期 Tillering stage/mm	孕穗期 Booting stage/mm	抽穗期 Earing stage /mm	乳熟期 Milk stage /mm	黄熟期 Yellow- ripe stage/mm	合计 Total /mm
T1	30	120	50	50	80	0	330
T2	30	80	30	30	60	0	230
T3	0	60	20	15	25	0	120
T4	0	20	10	10	10	0	50
T5	0	0	0	0	0	0	0

表 2 水稻生育期

Table 2 Growth stage of rice

水稻类型 Type of rice	年份 Year	返青期 Returning green stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Earing stage	乳熟期 Milk stage	黄熟期 Yellow-ripe stage	全生育期 Whole growth period/d
有机稻 Organic rice	2016	05-21—06-02	06-03—07-13	07-14—08-08	08-09—08-24	08-25—9-10	09-11—10-04	137
	2015	06-04—06-16	06-17—07-23	07-24—08-13	08-14—08-25	08-26—9-11	09-12—10-07	127
普通稻 Traditional rice	2015	05-25—06-03	06-04—07-11	07-12—07-31	08-01—08-15	08-16—08-31	09-01—09-12	111

1.3 测定项目与测定方法

气象资料：田间设置雨量桶测降水，其他数据采用附近的漳河工程管理局团林灌溉试验站监测资料。

土壤水分及灌水监测：每日 08:00 和 18:00 利用竖尺或美国 Spectrum 公司的 TDR300 测定田间水层高度或 10 cm 土层深度处土壤含水率，灌溉水量直接由安装在灌溉管道上的水表读出。

作物需水量（蒸发蒸腾量）：根据田间水量平衡原理计算逐日的水稻需水：

$$ET_i + W_{i+1} = W_i + P_i + M_i - D_i - DP_i \quad (1)$$

式中 W_i 、 W_{i+1} 分别表示第 i 天和第 $i+1$ 天田间可供利用的水量，mm； M_i 表示灌溉水量，mm； P_i 表示第 i 天的降

雨量，mm； ET_i 表示第 i 天的作物需水量，mm； D_i 表示第 i 天的排水量，mm； DP_i 表示第 i 天的渗漏量，参照 Li 等^[24-25]的测定方法，mm。

田间排水量及排水水质：采用闸门控制排水，集中在可监测时间进行田间排水并进行排水取样化验，采用全自动连续流动化学分析仪（SEAL AA3 型，德国布朗卢比公司）测定化验总氮、总磷含量，排水量按下面公式计算：

$$D_i = 1\,000v_iA_i\Delta t / A_F \quad (2)$$

式中 v_i 表示第 i 次监测的平均流速，由美国便携式杆式流速仪 FP101 测定，m/s； A_i 表示第 i 次监测的过水断面面积，m²； Δt 表示测定总时间，s； A_F 表示试验田面积，m²。

株高、分蘖数：每 15 d 用精度为 0.01 m 卷尺测量株高、分蘖数，每个小区随机取 10 穴测量，结果取平均值。

生物量及产量：每块试验田每 15 d 选取 3 株有代表性植株，从茎基部剪下，获得完整的冠部，放入烘箱内，在 105 °C 下杀青，用恒温 (85 °C) 烘至恒质量后称质量。水稻收获后，在每个试验田内都选取 3 个有代表性的 1 m² 样方，脱粒并经自然风干后 (平均含水率约为 8.0%) 称质量，并折算成每公顷的产量，并调研水稻当年市场价格。每个样方随机选取 10 株样品同时测定株高、穗长。

1.4 数据分析

采用 SPSS 数据统计分析软件与 Excel 相结合，对数据统计分析、作图等。

2 基于 AquaCrop 与熵值法耦合的的灌溉制度优化方法

考虑到有机稻是绿色有机农业发展的根本要求，其灌溉用水管理既要高产高效又要节水减排，有时也存在高产与节水减排的矛盾。为此，本文通过设计多种不同的灌溉水平，采用多目标多情景优化方法进行有机稻灌溉制度优化，具体思路是：首先构建率定 AquaCrop 作物生长模型，然后设计 70 种的田间灌溉情景，其次对不同情景下作物生长以及排水进行模拟计算，得到不同情景下的灌水产量以及灌排关系；最后以水稻产量、灌水量、排水量为优化目标，建立基于熵值法的多目标优化函数，综合评价确定有机稻的最优灌溉情景。

2.1 AquaCrop 模型及其参数

AquaCrop 是联合国粮农组织 (FAO) 于 2009 年推出的一个基于水分驱动的日尺度作物模型，是一个广泛用于草本作物，包括蔬菜、粮食、饲料、水果、油、根和块茎作物的通用模型。AquaCrop 模型试图在准确性、简易性、稳定性和易用性之间达成平衡，帮助实际生产中的用户，如水资源管理、灌溉组织人员和政策专家们使用该模型进行规划和情景分析。近年来，该模型已被广泛应用于地模拟不同气候条件、栽培管理、水分胁迫和氮素限制条件下的水稻、小麦、玉米等粮食作物的生长发育、蒸发蒸腾量和土壤水分平衡^[15-20]。

AquaCrop 模型的产量通过生物量计算得到，计算公式为：

$$Y = B \cdot HI \quad (3)$$

$$B = WP \cdot \sum T_r \quad (4)$$

式中 B 为地上部生物量，kg/m²； WP 为水分生产率，kg/(m²·mm)； T_r 为实际蒸腾量，mm； Y 为作物产量，kg/m²； HI 为作物收获指数，%。其中 WP 是模型中非常重要的参数，其值随年平均 CO₂ 浓度及作物品种的不同而发生变化。其通常被表示为 WP^* ，在数值上 WP^* 被量化为地上部生物量与 “ T_r/ET_0 ” 的比值，在特定气候条件下对某一特定作物品种而言其为常数，其演化计算过程见文献[26]。

AquaCrop 模型模型包括作物生长、田间管理、水分胁迫、植株氮素平衡以及土壤水分平衡在内的多个模拟

模块。模型运行所需输入数据包括 4 类，作物参数、气象参数、土壤参数和田间管理参数。作物参数包括种植密度、冠层增长和衰减系数、生育期天数、冠层覆盖度参数等；气象参数包括日最高、最低温、日降水量、平均风速、ET₀ 值等；土壤参数包括土壤类型、土壤质地、饱和含水率、田间持水率等；田间管理数据包括耕作方式、灌溉水量、灌溉日期等。

2.2 模拟灌溉情景设计

灌水模拟情景设计主要考虑 2 个因素，灌溉时的土壤含水率和灌水定额，情景设计时土壤含水率尽可能涵盖该地区水稻生育期内可能经历的最低和最高水分胁迫程度，灌水定额情景设计应涵盖田间可实现的最小灌溉定额和最大灌溉定额。模型中输入的土壤含水率需要表示为 RAW (readily available soil water) 的百分比，RAW 的大小为田间持水率与凋萎系数之差的一半。土壤体积含水率设计为 RAW 的 80%、120%、140%、160%、170%、180%、190%、200%、210%、220%，灌水定额包括 30、40、50、60、70、80、100 mm，交叉后共 70 种模拟灌溉情景。模型模拟时间为 1981—2016 年，通过绘制皮尔逊-III 型曲线选择频率 $P'=25\%$ 为丰水年、 $P'=50\%$ 为中水年、 $P'=75\%$ 为枯水年，在 3 种降水年型中各选择 2 个典型年份的模拟数据进行有机稻灌溉增产潜力分析，其中丰水年选择 1997 年 (832.8 mm) 和 1987 年 (688.8 mm)、平水年选择 2006 年 (445.8 mm) 和 2007 年 (606.3 mm)、枯水年选择 1981 年 (301.5 mm) 和 1985 年 (359.4 mm)。

2.3 基于熵值法的多目标优化函数

熵值法是一种根据各指标所含信息变异程度来确定权重的一种方法，利用信息熵描述样本数据变化的相对速率，系数越接近于 1，距目标就越近；系数越接近于 0，距目标就越远^[27]。函数构建时灌溉情景表示为第 k 个情景，不同灌溉情景下的产量、灌水量、排水量表示为第 k 个情景的第 j 项指标，产量越大越优，灌水量和排水量为越小越优，函数构建如下：

$$F_k = \sum_{j=1}^n \omega_j p_{kj} \quad (5)$$

$$\omega_j = \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p_{kj} / np_{kj}}{\sum_{j=1}^n \left(1 + \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p_{kj} / np_{kj} \right)} \quad (6)$$

式中 F_k 表示第 k 个灌溉情景的综合评价价值，越大越优； ω_j 表示第 j 项指标的权重； p_{kj} 表示第 k 个情景中第 j 项指标标准化后的值，标准化过程见文献[28]； n 表示指标数且 $n=3$ ， m 表示情景数且 $m=70$ 。

3 结果与分析

3.1 有机稻耗水及性状特性分析

2015 年试验结果发现，有机稻返青至乳熟需水量 525.96 mm，普通稻则为 460.17 mm，2 种模式间的需水量差异没有达到显著水平 ($P>0.05$)，但有机稻全生育期

共需 127 d, 显著大于普通稻 (111 d) ($P<0.05$)。研究认为有机稻同普通稻生育期长度差异的主要原因是施用肥料的差异, 有机肥含有丰富的有机质和各种养分, 肥效长, 可为作物直接提供养分; 但有机肥养分含量低, 肥效缓慢, 难以完全满足作物生长旺盛时期对养分的需求, 延缓了水稻的生长进程, 从而增加水稻生育期长度, 稻田耗水也相应发生变化。计算分析稻田水量平衡各要素发现, 有机稻模式的灌水量、排水量、渗漏量均显著大于普通稻模式 ($P<0.05$), 其中有机稻灌水量 420 mm, 较普通稻增加 78.7%, 渗漏量增加 37.6%。有机稻的排水量为 99.61 mm, 较普通稻增加 3 倍; 测定分析 2 种模式地面排水水质发现 (表 3), 有机稻的总氮、总磷浓度均值分别为 0.91、0.05 mg/L, 其中总氮浓度较普通稻降低 0.35 mg/L, 总磷浓度降低 0.05 mg/L。结果表明有机稻模式同普通稻模式在水稻生育期长度、稻田灌排水特性等方面均存在较大差异; 有机稻稻田灌水、排水、渗漏量均较大, 尚存在优化的空间。

水稻测产结果显示 (表 4), 有机稻同普通稻的株高、产量均存在显著差异 ($P<0.05$), 其中有机稻株高均值为 106.58 cm, 高出普通稻 7.6%; 空壳率高于普通稻 10.5%,

千粒质量与普通稻无显著差异, 有机稻产量 7 903.50 kg/hm², 仅为普通稻模式 (9 410.10 kg/hm²) 的 84%, 同 Way 等^[29-30]的研究结果一致。有机稻市场价格 7.20 元/kg, 产值达 5.69 万元/hm², 是普通稻 (2.48 万元/hm²) 的 2.29 倍, 单方灌水产值 13.54 元/m³ (产值/灌水量), 较普通稻增加 28.5%。有机稻模式较普通稻模式稻田耗水虽有增加, 但单方水产值却上升, 故有机稻模式对提质增收、提高农村经济效益有积极作用。

表 3 稻田耗水过程及排水水质
Table 3 Process of water use in rice field and drainage water quality

处理 Treatment	需水量 Water requirement/mm	灌水量 Irrigation /mm	排水量 Water discharge /mm	渗漏量 Leakage /mm	总氮 TN (mg·L ⁻¹)	总磷 TP (mg·L ⁻¹)
有机稻 Organic rice	525.96a	420.00a	99.61a	195.48a	0.91b	0.05b
普通稻 Traditional rice	460.17a	235.00b	23.75b	138.34b	1.26a	0.10a

注: 同列数字后字母相同, 表示各处理间无显著性差异 ($P>0.05$), 下同。
Note: Numbers in the same column followed by the same letter are not significantly different ($P>0.05$), the same below.

表 4 普通稻和有机稻水稻性状特征
Table 4 Characteristics of traditional and organic rice

处理 Treatment	空秕率 Empty- percent	穗长 Spike length/cm	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	株高 Plant height/cm	分蘖数 Tiller number (/个·m ⁻²)	千粒质量 Thousand kerner weight/g	单价 Price (元·kg ⁻¹)	产值 Total output/ (万元·hm ⁻²)	单方灌水产值 Irrigation output per square meter/(元·m ⁻³)
有机稻 Organic rice	0.063a	21.66a	7 903.50a	106.58a	323a	26.80a	7.20a	5.69a	13.54a
普通稻 Traditional rice	0.057b	20.41a	9 410.10b	99.10b	304a	27.32a	2.64b	2.48b	10.55b

3.2 有机稻灌溉制度优化

3.2.1 模型率定与验证

有机稻模式改变了水稻的生长进程及耗水特性, 针对普通水稻设计的优化灌溉制度难以适用于有机稻模式, 因此优化有机稻模式的灌溉制度对实现稻田的节水增效具有重要的作用。文中选择 2016 年有机稻田间试验处理 1 的数据对 AquaCrop 模型进行率定, 将模拟得到的土壤含水率、作物产量、作物地上生物量同实测值比较, 相应调整模型中冠层增长和衰减系数、作物水分胁迫响应系数、作物收获指数等其他作物参数, 使两者充分接近为止, 率定后的部分参数见表 5。保持率定后的基本参数不变, 将 2016 年有机稻试验处理 2~处理 5 的数据输入模型中进行验证, 模拟结果与实测数据进行对比, 验证模型精度。模拟值与实测值的吻合程度采用相对均方根误差 (relative root mean squared error, RRMSE)、模型效率 (Nash-Sutcliffe efficiency, EF) 和决定系数 (coefficient of determination, R^2) 对模型运行效果进行评价^[31-32]。模拟及评价结果见图 1, 比较水稻产量、土壤含水率、地上生物量的实测值和模拟值, 发现实测的数据点均落在模拟值线附近, 决定系数和模型效率均在 0.7 以上, 相对均方根误差 0.15~0.28, 产量模拟 R^2 、EF、RRMSE 分别为 0.98、0.95、0.15。模拟值与实测值之间有较好一致性。以上模拟结果表明, 率定后 AquaCrop 模型能够较好模拟有机稻的作物生长过程以及水分产量关系。

表 5 率定后的 AquaCrop 模型输入参数值
Table 5 Input values used in AquaCrop model after calibration

参数 Model parameters	定义 Definition	取值 Value
K_{cTr}	冠层覆衰老前的作物系数	1.10
WP	标准化水分生产效率/(g·m ⁻²)	18.0
I_{HI}	HI 的最大允许增长率/%	15
$P_{exp, upper}$	水分对冠层生长影响上限	0.60
$P_{exp, lower}$	水分对冠层生长影响下限	0.10
$P_{sto, upper}$	水分对气孔开度影响上限	0.50
$P_{sen, upper}$	水分对冠层衰老影响上限	0.60
T_{min}	最低有效积温/℃	10.0
CC_x	最大冠层覆盖/%	95
CGC	冠层覆盖增长系数/%	7.7
CDC	冠层覆盖衰减系数/%	7.1
HI_0	参考收获指数/%	47

3.2.2 有机稻灌溉制度优化

图 2 为模拟的 3 种降水年型下 70 种灌溉组合有机稻的产量随灌溉定额的变化关系以及拟合后的相关函数。由图分析可知, 有机稻产量随灌溉定额的变化分为 2 个阶段: 一是迅速增加阶段, 在这一阶段随着灌溉定额的增加有机稻产量迅速增加; 二是产量稳定阶段, 当灌溉定额达到某一程度以后, 继续增加灌溉定额增产作用就不明显, 产量稳定在较高水平或轻微增长。模拟结果可以得到: 枯水年以 1981 年和 1985 年为例, 有机稻生育

期内降水少, 水分亏缺严重, 雨养产量很低, 补充灌溉 250 mm 后产量可达到 7 300 kg/hm² 以上, 灌溉增产潜力很大, 每补充灌溉 100 mm, 产量增加 3 000 kg/hm² 左右; 平水年份以 2006 年和 2007 年为例, 有机稻雨养条件下的产量分别为 5 607、5 841 kg/hm², 补充灌溉到最高产量

水平范围需要灌水 150 mm 左右, 每补充灌溉 100 mm 可以提高产量 1 800 kg/hm² 左右; 丰水年份以 1987 年和 1997 年为例, 有机稻雨养条件下产量分别为 6 767、4 481 kg/hm², 补充灌溉到最高产量范围需要补灌 50 mm 左右, 每补充灌溉 50 mm, 可提高产量 950 kg/hm² 左右。

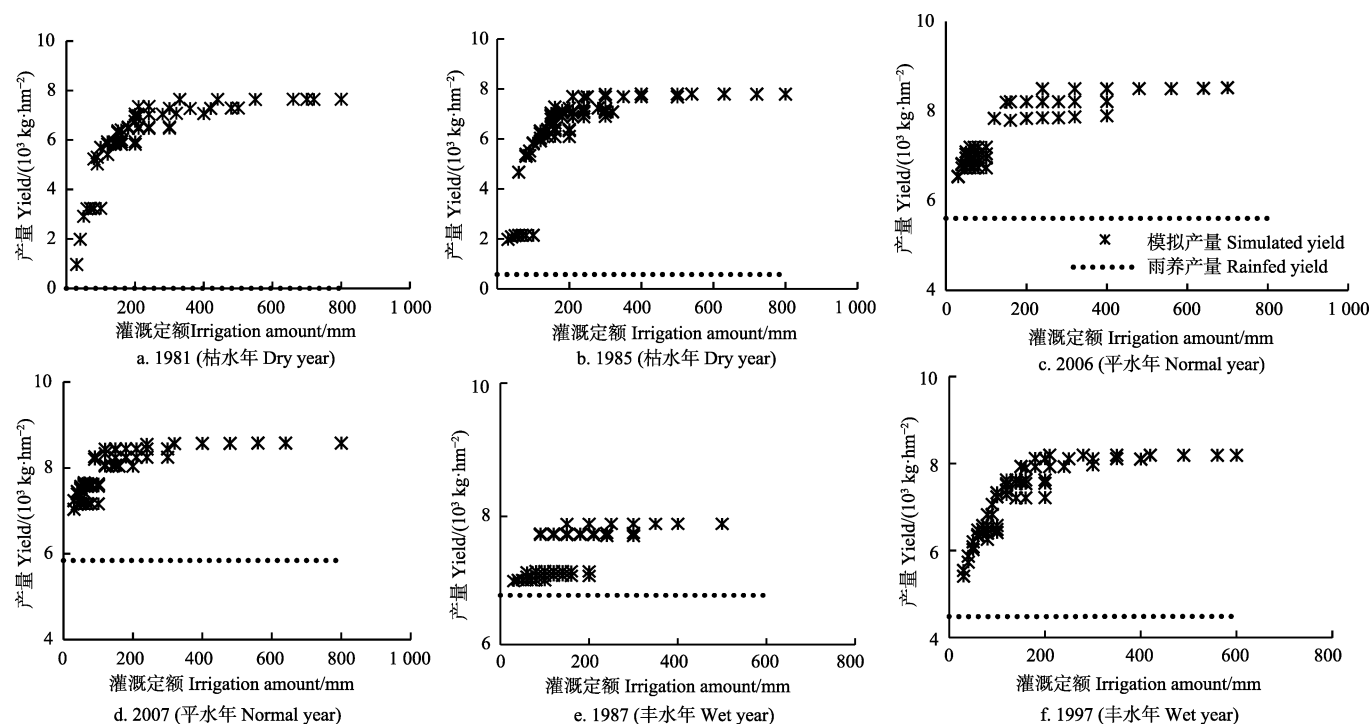
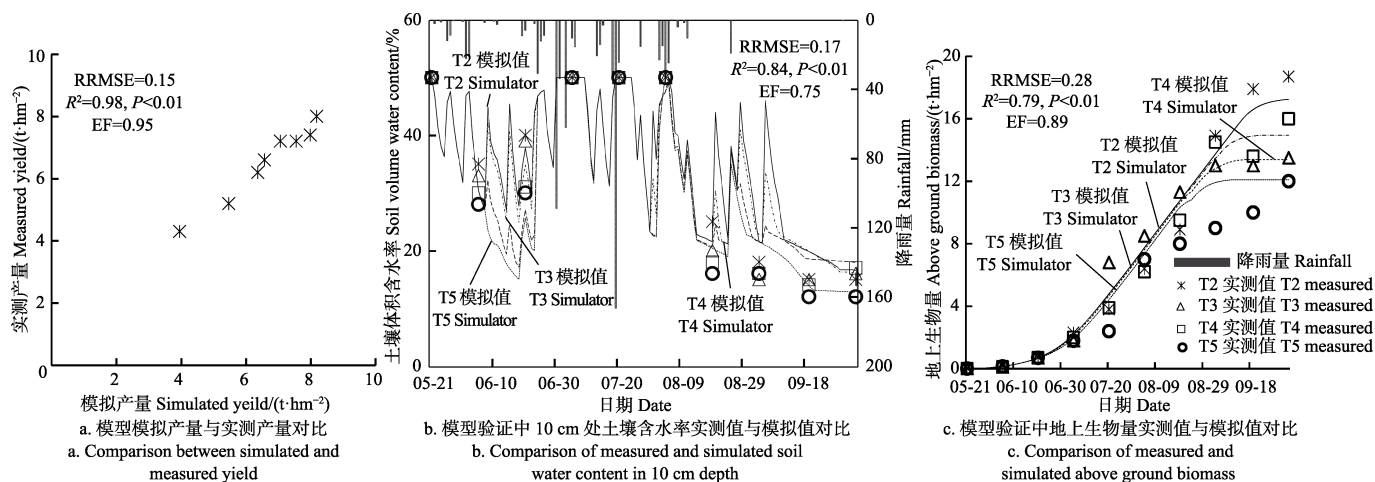


表 6 为 2016 年有机稻田间实测数据, 表 7 为优化后的灌溉制度。通过构建的多目标优化函数计算各年份下 70 种灌溉情景的综合评价价值 F , 得到 1981—2016 年每年的模拟情景中 F 值最大的灌溉情景, 并依据不同的降水年型对优选出的灌溉情景取平均值, 获得多目标优化下不同降水年型的优化灌溉制度。灌溉制度优化后, 2016 年模型模拟的稻田排水为 71.90 mm, 较 2016 年的高产处

理 T1 减少 12.9 mm; 2015 年模型模拟稻田排水量为 20.00 mm, 比 2015 年田间试验实测排水量 (99.61 mm) 降低 79.61 mm, 说明灌溉制度优化后可明显减小有机稻的稻田排水, 通过消减排水间接达到减排效果。2015 年、2016 年模型模拟的有机稻灌溉定额均为 200.00 mm, 较 2015 年未优化时的实测灌水量 (420 mm) 低 60%, 较 2016 年高产处理 T1 的灌水量 (330 mm) 低 24%, 但模拟产

量均不低于 2015—2016 年的试验产量，说明优化后的灌溉制度不仅可以保证有机稻的高产，而且能够实现稻田的节水灌溉。

为指导未来有机稻的优化灌溉并满足高效节水减排目标，根据降水年型对优选出的灌溉情景取均值，得到丰水年、平水年、枯水年的适宜灌溉制度，见表 7。分析发现不同年型下的灌水次数为非整数，为便于生产中实际操作，丰水年灌水次数取 3~4 次、平水年 6~7 次、枯水年 8~9 次。最终得到适宜南方灌区有机稻的优化灌溉制度为：枯水年 108%的土壤含水率（以 RAW 计，下同）控制下限、30 mm 的灌水定额、灌水 8~9 次，平水年 113.85%的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、

灌水 6~7 次，丰水年 116.92%的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、灌水 3~4 次。

表 6 2016 年有机稻田间试验结果

Table 6 Experimental results of organic rice in 2016

处理 Treatment	排水量 Water discharge/mm	产量 Yield / (kg·hm ⁻²)	产值 Total output/(万元·hm ⁻²)
T1	84.80	8 004.00	5.76
T2	64.00	7 403.70	5.33
T3	60.00	6 603.30	4.75
T4	51.90	5 202.60	3.75
T5	50.00	4 302.90	3.10

表 7 不同年型下的优化灌溉制度

Table 7 Optimized irrigation schedules in different rainfall years

年型 Year type	年份 Year	评价值 Assessment value <i>F</i>	土壤含水率下限 soil moisture/%	灌水定额 Irrigating quota/mm	灌溉次数 Irrigating times/次	灌溉定额 Irrigation amount/mm	排水量 Water discharge/mm	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
丰水年 Wet year	2016	0.107	120	40	5	200	71.90	8 815.00
	2008	0.097	120	30	5	150	20.00	8 371.00
	2007	0.108	120	40	3	120	20.00	8 437.00
	1982	0.107	120	30	1	30	20.00	7 364.00
	1983	0.103	120	30	4	120	20.00	7 582.00
	1986	0.098	140	40	4	160	20.00	7 514.00
	1987	0.094	120	30	3	90	20.00	7 732.00
	1989	0.106	120	30	2	60	20.00	7 925.00
	1996	0.105	80	30	3	90	44.44	8 164.00
	1997	0.106	120	30	6	180	33.33	8 116.00
	1998	0.102	80	30	5	150	20.00	8 144.00
	2000	0.099	120	30	8	240	20.00	8 314.00
	2004	0.100	140	30	1	30	20.00	8 302.00
均值 Average value			116.92	32.31	3.85	124.62	26.90	8 060.00
平水年 Normal year	2015	0.108	120	40	5	200	20.00	8 811.00
	2013	0.126	120	30	7	210	20.00	8 592.00
	2009	0.122	120	30	7	210	20.00	8 481.00
	2006	0.124	120	30	5	150	20.00	8 198.00
	1984	0.118	120	30	7	210	20.00	7 628.00
	1988	0.125	120	40	6	240	20.00	7 776.00
	1991	0.118	120	30	5	150	20.00	7 959.00
	1992	0.123	120	30	5	150	20.00	7 917.00
	1993	0.121	120	40	4	160	20.00	7 963.00
	1994	0.120	120	30	6	180	20.00	7 859.00
	1995	0.118	80	30	8	240	20.00	8 130.00
	1999	0.120	80	30	10	300	20.00	8 216.00
	2003	0.119	120	30	6	180	20.00	8 232.00
均值 Average value			113.85	32.31	6.23	198.46	20.00	8 135.54
枯水年 Dry year	2014	0.118	80	30	7	210	15.11	8 820.00
	2012	0.117	80	30	11	330	15.11	8 742.00
	2011	0.116	120	30	9	270	15.11	8 534.00
	2010	0.114	120	30	6	180	15.11	8 320.00
	1981	0.114	120	30	7	210	15.11	7 350.00
	1985	0.112	120	30	7	210	15.11	7 698.00
	1990	0.116	120	30	13	390	15.11	7 710.00
	2001	0.113	80	30	12	360	15.11	8 307.00
	2002	0.112	120	30	7	210	15.11	8 194.00
	2005	0.111	120	30	4	120	15.11	8 218.00
均值 Average value			108.00	30.00	8.30	249.00	15.11	8 189.30

注：土壤含水率以 RAW 计。Note: Soil moisture is based on by RAW.

4 讨论

传统灌溉制度优化大多以产量最大、灌水最小或水分生产率最高为优化目标^[8,21],较少考虑田间排水优化,而通过排水释放到排水沟渠中的营养元素是稻田面源污染的重要来源^[22,33],而通过优化灌溉制度可有效减少稻田排水量,达到稻田减排目的。本文考虑排水的灌溉制度优化后,较优化前 2015—2016 年的实际稻田排水均可消减 12.9 mm 以上,可有效控制稻田水肥流失、降低面源污染风险。

2015 年试验研究结果显示在相同的灌溉控制下,虽然有机稻生育期灌水量高于普通稻、产量低于普通稻,但有机稻产值 5.69 万元/hm²,是普通稻的 2.29 倍,单方灌溉水粮食产值超出普通稻 28.5%,实现了从传统的节水增粮转变为节水增效的目标。有机稻灌溉制度优化后,2015 年和 2016 年的灌水量模拟值均低于田间试验实测值,可实现有机稻的灌溉节水。

作物生长模拟模型的使用可以大大减少试验时间及成本的投入,可以实现更多组合的优化设计,适用于较多因素、水平的试验方案模拟。Shrestha 等^[20]使用 AquaCrop 模型对尼泊尔的水稻进行模拟,水稻生物量的 R²、EF 值分别达到 0.94 和 0.92;本文将 AquaCrop 模型引入中国湖北漳河灌区的水稻模拟中,模拟值与实测值吻合度均较好,生物量的 R²、EF 值分别达到 0.79 和 0.89,验证模型在该区域水稻的适用性。

以往研究利用作物模型优化灌溉制度优化时,大多基于作物模型的模拟情景进行统计分析^[14,18],本文引入多目标优化函数同作物模型耦合,构建基于 AquaCrop 与熵值法的多目标作物模拟优化模型,为作物灌溉制度优化提供新方法。

5 结论

本研究旨在研究有机稻需耗水及其产量特性,提出有机稻灌溉制度多目标优化方法,得到适宜中国南方灌区有机稻的优化灌溉制度,得到以下结论:

1) 有机稻与普通稻需水量差异不显著,有机稻返青至乳熟需水量 525.96 mm,普通稻则为 460.17 mm;有机稻灌水量 420 mm,显著高于普通稻。有机稻、普通稻的排水量分别为 99.61 mm、23.75 mm,但有机稻排水中的总氮、总磷含量均显著低于普通稻。有机稻的产量为普通稻产量的 84%,但有机稻产值 5.69 万元/hm²,是普通稻的 2.29 倍,对获得绿色有机产品、农民增收、提高农田经济效益均有积极作用。

2) 验证 AquaCrop 模型在中国南方灌区水稻生长模拟以及灌溉制度优化中的适用性,其中产量模拟的 R²、EF、RRMSE 值分别为 0.98、0.95、0.15,可为中国水稻灌溉制度优化提供新方法。

3) 模拟得到不同降水年型下有机稻的灌溉增产潜力。有机稻在枯水年型下灌溉增产潜力最大,需补灌 250 mm,每补充灌溉 100 mm,产量增加 3 000 kg/hm²左右;平水年型补充灌溉到最高产量水平范围需要灌水 150 mm 左

右,每补充灌溉 100 mm 可以提高产量 1 800 kg/hm²左右;丰水年型补充灌溉到最高产量范围需要补灌 50 mm 左右,每补充灌溉 50 mm,可提高产量 950 kg/hm²左右。

4) 提出了基于 AquaCrop 模型和熵值法耦合的多目标多情景的灌溉制度优化方法,得到不同年型下有机稻适宜的灌溉制度:枯水年 108% (以 RAW 计,下同) 的土壤含水率控制下限、30 mm 的灌水定额、灌水 8~9 次,平水年 113.85% 的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、灌水 6~7 次,丰水年 116.92% 的土壤含水率控制下限、32.31 mm 的灌水定额、灌水 3~4 次。

[参 考 文 献]

- [1] 陆文聪, 刘聪. 化肥污染对粮食作物生产的环境惩罚效应[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1988—1994.
Lu Wencong, Liu Cong. The “environmental punishment” effect of fertilizer pollution in grain crop production[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1988—1994. (in Chinese with English abstract)
- [2] 刘钦普, 林振山, 周亮. 山东省化肥使用时空分异及潜在环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 208—214.
Liu Qinpu, Lin Zhenshan, Zhou Liang. Spatio-temporal differentiation and environmental risk assessment of fertilization in Shandong Province, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 208—214. (in Chinese with English abstract)
- [3] 赵其国, 黄季焜. 农业科技发展态势与面向 2020 年的战略选择[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 397—403.
Zhao Qiguo, Huang Jikun. The trend of agricultural science and technology development and the strategies for 2020 [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(3): 397—403. (in Chinese with English abstract)
- [4] 付恭华, 鄢帮有. 中国未来的粮食安全与生态可持续性问题的研究: 基于粮食生产过程生态足迹的实证分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1550—1556.
Fu Gonghua, Yan Bangyou. Ecological agriculture can guarantee food security in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(12): 1550—1556. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘晓梅, 余宏军, 李强, 等. 有机农业发展概述[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1303—1313.
Liu Xiaomei, Yu Hongjun, Liqiang et al. Overview of organic agriculture development[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1303—1313 (in Chinese with English abstract)
- [6] 董心普. 广西有机稻产业化发展研究[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
Dong Xinpu. Research on Development of Organic Rice Industry in Guangxi Province [D]. Nanning: Guangxi University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [7] 郑红明. 2016 年我国水稻生产发展报告[J]. 中国粮食经济, 2016(12): 37—40.
Zheng Hongming. Report on the development of rice production in China in 2016 [J]. China Grain Economy, 2016(12): 37—40. (in Chinese with English abstract)

- [8] 杨娜, 付强, 李荣东, 等. 连续蚁群算法在水稻灌溉制度优化中的应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 1): 134—138.
Yang Na, Fu Qiang, Li Rongdong, et al. Application of ant colony algorithm based continuous space in optimizing irrigation regime of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.1): 134—138. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨勇. 稻渔共作生态特征与安全优质高效生产技术研究[D]. 镇江: 扬州大学, 2004.
Yang Yong. Study on Ecological Characteristics and Technique for Safe Good Quality and High Benefit of Rice-Fish Culture[D]. Zhenjiang: Yangzhou University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [10] 陈淑峰, 孟凡乔, 吴文良, 等. 东北典型稻区不同种植模式下稻田氮素径流损失特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 728—733.
Chen Shufeng, Meng Fangqiao, Wu Wenliang, et al. Nitrogen loss characteristics via runoff in typical rice planting area in Northeast China under different planting managements[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 728—733 (in Chinese with English abstract)
- [11] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [12] 岳玉波, 沙之敏, 赵峥, 等. 不同水稻种植模式对氮磷流失特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1424—1432.
Yue Yubo, Sha Zhimin, Zhao Zheng, et al. Effects of rice cultivation patterns on nitrogen and phosphorus leaching and runoff losses[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12): 1424—1432 (in Chinese with English abstract)
- [13] 孙向平, 李国学, 孟凡乔, 等. 新疆伊犁垦区有机水稻生产养分平衡及氮素污染风险分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 158—162.
Sun Xiangping, Li Guoxue, Meng Fanqiao, et al. Nutrients balance and nitrogen pollution risk analysis for organic rice production in Yili reclamation area of Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.2): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李亚龙, 崔远来, 李远华, 等. 基于 ORYZA 2000 模型的旱稻生长模拟及氮肥管理研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 158—162.
Li Yalong, Cui Yuanlai, Li Yuanhua, et al. Growth simulation of aerobic rice and its nitrogen management on the basis of ORYZA2000[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.2): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李会, 刘钰, 蔡甲冰, 等. AquaCrop 模型的适用性及应用初探[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 28—33.
Li Hui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. The Applicability and Application of AquaCrop Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [16] Geerts S, Raes D, Garcia M. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1): 213—216.
- [17] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1275—1284.
- [18] 杨宁, 孙占祥, 张立桢, 等. 基于改进 AquaCrop 模型的覆膜栽培玉米水分利用过程模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 122—132.
Yang Ning, Sun Zhanxiang, Zhang Lizhen, et al. Simulation of water use process by film mulched cultivated maize based on improved Aqua Crop model and its verification[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.1): 122—132. (in Chinese with English abstract)
- [19] Mainuddin M, Kirby M, Chu T H. Adaptation to climate change for food security in the lower Mekong Basin[J]. Food Security, 2011, 3(4): 433—450.
- [20] Shrestha N, Raes D, Vanuytrecht E, et al. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling[J]. Agricultural Water Management, 2013, 122(2): 53—62.
- [21] 于芷婧, 尚松浩. 华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(9): 1188—1196.
Yu Zhijing, Shang Songhao. Multi-objective optimization method for irrigation scheduling of crop rotation system and its application in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9): 1188—1196. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 99—104.
Yang Shihong, Peng Shizhang, Xu Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 99—104. (in Chinese with English abstract)
- [23] 中国标准出版社. 有机产品: GB/T 19630.1-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [24] Li Chengfang, Cao Cougui, Wang Jinping, et al. Nitrogen losses from integrated rice—duck and rice—fish ecosystems in southern China[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1): 207—217.
- [25] 邵东国, 杨霞, 徐保利, 等. 南方丘陵区多层土壤结构水平向和垂向渗流特征试验与模拟研究[J]. 水利学报, 2017, 48(7): 799—807.
Shao Dongguo, Yang Xia, Xu Baoli, et al. Field experiment and simulation of lateral and vertical water flow in multi-layer soil in hilly region of southern China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(7): 799—807. (in Chinese with English abstract)
- [26] FAO. FAO Reference manual[R]. FAO, 2017.
- [27] 魏永霞, 宋族鑫, 严昌荣, 等. 基于熵权的模糊物元模型在坡耕地水土保持耕作技术模式评价中的应用[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 194—196.
Wei Yongxia, Song Zuxin, Yan Changrong, et al. Application of fuzzy matter-element model based on entropy-weight in comprehensive evaluation of sloping darmland soil and water conservation tillage technology

- models[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(6): 194–196. (in Chinese with English abstract)
- [28] 乐志华, 邵东国, 李浩鑫, 等. 漳河灌区节水改造综合效益评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(7): 11–14.
Le Zhihua, Shao Dongguo, Li Haoxin, et al. The comprehensive benefit evaluation of water-saving Reform of zhanghe irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(7): 11–14. (in Chinese with English abstract)
- [29] Way M O, Mc Cauley G M, Zhou X G, et al. Texas Rice Production Guidelines[M]. College Station, TX: Texas A&M Agri LifeExtens Serv Pub, 2014: 57.
- [30] Ponti T D, Rijk B, Ittersum M K V. The crop yield gap between organic and conventional agriculture[J]. Agricultural Systems, 2012, 108(4): 1–9.
- [31] Whitmore A P. A method for assessing the goodness of computer simulations of soil processes[J]. Journal of Soil Science, 1991, 42: 289–299.
- [32] Krause P, Boyle D P, Base F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences, 2005, 5: 89–97.
- [33] 陈会, 王康, 周祖昊. 基于排水过程分析的水稻灌区农田面源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 112–119.
Chen Hui, Wang Kang, Zhou Zuhao. Simulation of agricultural non-point source pollution from paddy rice irrigation district based on analyses of drainage processes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 112–119. (in Chinese with English abstract)

Optimization of irrigation scheduling for organic rice based on AquaCrop

Shao Dongguo, Le Zhihua, Xu Baoli, Hu Nengjie, Tian Yini

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Along with the continuous exploration in enhancing agricultural productivity, the traditional agriculture which needs high input of chemical fertilizer and pesticide is gradually turned into an ecologically and environmentally friendly organic agriculture. However, there are few studies on water consumption characteristics and irrigation schedule of organic rice. To reveal the pattern of water consumption and the relationship between irrigation and yield under different precipitation types, field experiments were carried out during the rice growth period in 2015–2016 in Zhanghe Irrigation District, Hubei Province. In 2015, the same rice variety was cultivated in different modes: 1) in traditional mode, the chemical fertilizer was used; 2) in organic mode, the manure was used. The irrigation schedule was similar for the both modes: to keep water depth to 20–50 mm. If the rainfall was over the 50 mm, drainage was conducted. Based on the experimental results, we analyzed the difference of water consumption between organic rice and traditional rice, and obtained information on water consumption and yield characteristics of the organic rice. Based on the results of 2015, an optimization experiment of organic rice cultivation was set up: the irrigation amount was 0, 50, 120, 230 and 330 mm, respectively. Then we proposed a multi-objective and multi-scenario optimization method of irrigation scheduling by using AquaCrop model and entropy method. One of the treatments was used for model calibration and the others were for validation. The results showed: 1) the evapotranspiration of traditional rice and organic rice from the period of steeping field and reviving to milk ripening were 420 mm and 235 mm, respectively. The drainage of organic rice and traditional rice were 99.61 and 23.75 mm, respectively. The mean TN concentration of water discharge in organic rice were lower than that in traditional rice, and the TP concentration of water discharge in organic rice were also lower than that in traditional rice. 2) The yield of organic rice accounted for 84% of the traditional rice yield, plant height were 7.6% higher than that of traditional rice, the empty shell rate were 10.5% higher than of the traditional rice. 3) the model measurement and simulation matched well with Nash-Sutcliffe efficiency above 0.7, relative root mean square of error 0.15–0.28, and coefficient of determination higher than 0.7, indicating that the model could simulate the yield well under different conditions. 4) After optimization, the irrigation schedule of organic rice in southern China were: in dry year, the lowest limit of soil volume water content were 108%RAW (readily available soil water), irrigation quota were 30 mm, frequency of irrigation were 8 to 9 times; in normal year, the lowest limit of soil volume water content were 113.85 %RAW, irrigation quota were 32.31mm, frequency of irrigation were 6 to 7 times and in wet year, the lowest limit of soil volume water content were 116.92%RAW, irrigation quota were 32.31 mm, frequency of irrigation were 3 to 4 times. The study validated the applicability of AquaCrop model in rice growth simulation and irrigation schedule optimization in China and established a method of optimizing irrigation schedule by coupling AquaCrop model and entropy method, providing technical guidance to organic rice production.

Keywords: irrigation; evapotranspiration; models; entropy method; organic rice; AquaCrop; multi-objective optimization