**文章编号**:1000-7601(2023)05-0080-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.05.09

# 滴灌脐橙产量和品质的水肥生产函数研究

邓庆玲[1],崔宁博[1],陈 飞[1],李小孟[2],胡笑涛[3],
黎秋刚[2],官 民[2],李明红[2],曾 云[2],王 燕[2]

(1.四川大学水利水电学院,水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065;2.泸州市经济作物站,四川 泸州 646000;3.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

**摘 要**:以‘纽荷尔’脐橙为试材,在 2020 年 4 月—2021 年 12 月抽梢开花期(I)、幼果期(II)、果实膨大期(III)和果实成熟期(IV)分别设置高水和低水 2 个亏水处理(灌水量分别为对照处理的 70%和 55%),高肥、中肥和低肥 3 个施肥处理(施肥量分别为对照处理的 80%、60%和 40%),以正常水肥管理为对照(CK)。CK 处理 I~IV 期灌水量分别为136.43、204.65、272.86、136.43 $m^3 \cdot hm^{-2}$,施肥量分别为 380.00、645.00、1550.00、400.00 $kg \cdot hm^{-2}$。基于 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟脐橙产量和品质与不同生育期耗水耗肥量的关系,进而评价模型预测性能与敏感性。研究表明:脐橙产量、单果质量和可溶性糖均对 III 期水、肥亏缺最敏感;维生素 C 对Ⅲ期水分亏缺最敏感,对 IV 期肥料亏缺最敏感;可滴定酸对Ⅱ期水分亏缺最敏感,对 IV 期肥料变化最敏感。W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能较好地模拟脐橙产量(决定系数 $R^2=0.76\sim0.90$,均方根误差 $RMSE=0.030\sim0.045$,平均绝对误差 $AAE=0.023\sim0.036$,建模效率 $EF=0.74\sim0.88$,一致性指数 $d_{IA}=0.91\sim0.96$),其中 W×F-Minhas 模型表现最佳;W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能很好地模拟脐橙果实含水量($R^2=0.87\sim0.94$,$RMSE=0.010\sim0.011$,$AAE=0.008\sim0.009$,$EF=0.85\sim0.88$,$d_{IA}=0.96\sim0.97$),同时可较好地模拟单果质量和可滴定酸含量($R^2=0.54\sim0.65$,$RMSE=0.026\sim0.050$,$AAE=0.023\sim0.040$,$EF=0.42\sim0.65$,$d_{IA}=0.86\sim0.92$)。W×F-Minhas 和 W×F-Rao 模型分别在模拟可溶性糖和维生素 C 时表现最佳,$R^2$ 分别为 0.46 和 0.51。综上所述,推荐使用 W×F-Minhas 模型模拟脐橙产量和果实品质,以实现脐橙节水提质高效发展。

**关键词**:脐橙;水肥生产函数;滴灌;产量;品质

**中图分类号**:S664.4;S275.6 **文献标志码**:A

# Study on water and fertilizer production function for yield and quality of navel orange under drip irrigation

DENG Qingling[1], CUI Ningbo[1], CHEN Fei[1], LI Xiaomeng[2], HU Xiaotao[3], LI Qiugang[2], GUAN Min[2], LI Minghong[2], ZENG Yun[2], WANG Yan[2]

(1. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering*, *College of Water Resource & Hydropower*, *Sichuan University*, *Chengdu*, *Sichuan* 610065, *China*; 2. *Luzhou Economic Crops Station*, *Luzhou*, *Sichuan* 646000, *China*; 3. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas*, *Ministry of Education*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

**Abstract**: ‘Newhall’ navel orange was used as the test material. Two water deficit levels (high and low water treatment, noted as HW and LW, and the perfusion volume was 70% and 55% of CK, respectively) and three fertilization levels (high, medium and low fertilizer, noted as HF, MF and LF, were applied at 80%, 60% and 40% of CK, respectively) were set at the shoot flowering stage (I), young fruit stage (II), fruit expansion stage (III) and fruit maturity stage (IV). The fertilizer application rates were 80%, 60% and 40% of CK, respectively with control treatment (CK). The irrigation amounts of CK treatment were 136.43, 204.65, 272.86 $m^3 \cdot hm^{-2}$ and 136.43

**收稿日期**:2022-09-13 **修回日期**:2022-11-27

**基金项目**:(四川大学-泸州)科技创新研发项目(2019CDLZ-10)

**作者简介**:邓庆玲(1998-),女,四川达州人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:dengqingling98@163.com

**通信作者**:崔宁博(1981-),男,陕西凤翔人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:cuiningbo@126.com

$m^3 \cdot hm^{-2}$ at stage I-IV, respectively, and the fertilizer amounts were 380.00, 645.00, 1550.00 kg · $hm^{-2}$ and 400.00 kg · $hm^{-2}$, respectively. W×F-Jensen, W×F-Minhas and W×F-Rao models were used to simulate the relationship between yield and quality of navel orange and water and fertilizer consumption at different growth stages, and to evaluate the prediction performance of the models. It was found that navel orange yield, fruit mass and soluble sugar were most sensitive to water and fertilizer deficit in stage III. Vitamin C was most sensitive to water deficit in stage III and fertilizer change in stage IV. Titratable acid was most sensitive to water deficit in stage I and stage IV, and most sensitive to fertilizer change in stage IV. W×F-Jensen, W×F-Minhas and W×F-Rao models established in this study simulated navel orange yield well, with $R^2 = 0.76 \sim 0.90$, $RMSE = 0.030 \sim 0.045$, $AAE = 0.023 \sim 0.036$, $EF = 0.74 \sim 0.88$, $d_{IA} = 0.91 \sim 0.96$, among which W×F-Minhas model was the best. W×F-Jensen, W×F-Minhas and W×F-Rao models could well simulate the water content of navel orange fruit, showing $R^2 = 0.87 \sim 0.94$, $RMSE = 0.010 \sim 0.011$, $AAE = 0.008 \sim 0.009$, $EF = 0.85 \sim 0.88$, $d_{IA} = 0.96 \sim 0.97$, which better simulated the fruit weight and titratable acid content. $R^2 = 0.54 \sim 0.65$, $RMSE = 0.026 \sim 0.050$, $AAE = 0.023 \sim 0.040$, $EF = 0.42 \sim 0.65$, $d_{IA} = 0.86 \sim 0.92$. W×F-Minhas 和 W×F-Rao models had the best performance when simulating soluble sugar and vitamin C, with $R^2$ of 0.46 and 0.51, respectively. In conclusion, W×F-Minhas model was recommended to simulate navel orange yield and fruit quality to realize the efficient development of navel orange with water saving and quality improvement.

**Keywords**: navel orange; water and fertilizer production function; drip irrigation; yield; quality

‘纽荷尔’脐橙(Newhall navel orange)产量稳定,环境适应性良好,在重庆、江西、四川、湖北、湖南和广西地区广泛栽培。作为我国栽培面积最大的脐橙品种,其肉质脆嫩多汁,酸甜可口,深受种植者、商家和消费者青睐[1]。此外,脐橙果实中富含维生素 C、糖类、氨基酸等多种人体必需的营养物质及膳食纤维,可预防坏血病和提高人体免疫力[2]。南方山丘区作为‘纽荷尔’脐橙主产区之一,降雨量大但时空分布不均,频发的季节性干旱和工程性缺水仍严重限制脐橙生产。此外,大多数果园仍然采用大水漫灌方式,严重降低了脐橙产量和品质。因此,模拟脐橙果实产量、品质与水肥耦合的关系,实现脐橙绿色高效发展是亟待解决的问题。

作物生长发育过程中,果实物理结构的形成和果实品质主要化学成分的累积、分解不完全同步,致使其不仅与可利用水量有关,更取决于灌溉水在不同生长阶段的分配[3]。为了量化不同生育期水分与作物产量之间的关系,作物水分生产函数被广泛研究[4],主要概括为加法模型(如 Blank、Singh、Stewart 模型)和乘法模型(如 Jensen、Minhas、Rao 模型)。前者认为各阶段亏缺灌溉对作物产量的影响是独立的,忽略了各阶段的交互效应,这也是加法模型模拟精度较低的原因之一;而乘法模型在一定程度上弥补了加法模型的不足,认为不同生长阶段水分亏缺对作物生长发育的影响是相互的,这也更符合作物生长发育对水分亏缺的响应规律[5]。前人已对水分生产函数在不同谷物类作物和蔬菜上的应用进行了研究。尹希等[6]使用 Jensen、Minhas 和 Blank 等 5 种水分生产函数模型研究了南方旱稻的水分-产量关系;汪顺生等[7]和邵颖[8]分别建立了宽沟条件下冬小麦全生育期与分生育阶段的水分生产函数,并利用动态规划法优化了陕西泾惠渠灌区冬小麦灌溉制度;陶延怀等[9]对 5 种水分生产函数模型进行分析评价,推荐 Minhas 模型模拟非充分灌溉条件下大豆产量;任秋实等[10]利用水分生产函数研究了不同生育期水分亏缺处理对宁夏扬黄灌区马铃薯作物耗水量和产量的影响;陈盛等[11]构建作物盐分生产函数研究了番茄产量与盐分的关系。

综上所述,水分生产函数能够量化作物产量与不同生长阶段耗水量的关系,有利于农业用水管理,提高水分利用率,实现作物节水、提质、稳产的目的。然而上述研究大多仅考虑了水分对作物产量的影响,对肥料的涉及较少;此外,由于果实品质对水肥一体化的响应规律复杂,致使模拟果实品质与不同阶段水肥关系的研究也鲜有报道。随着农业管理措施的升级以及消费者对农产品品质要求的提高,作物水分品质函数的相关研究亟待开展。因此,本研究旨在构建 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟脐橙产量和果实品质与不同生育期滴灌水肥一体化的响应关系,评价 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型对滴灌水肥一体化下脐橙产量和果实品质的预测性能,进而提出最优水肥-产量/品质模型以量化脐橙产量和果实品质与不同生育期水肥耦合

的关系。研究可为南方季节性干旱区脐橙生产提供理论指导。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

试验于 2020 年 4 月—2021 年 12 月在四川省泸州市江阳区黄舣镇进行,试验地土壤类型为壤土,土质松细度适中,结构良好,田间持水量为 35%(体积含水率),pH 为 6.0。黄舣镇海拔 243 m,气候温和,年平均气温 17.6℃,年日照时数 1 077.4 h,年平均降水量约 1 000 mm,试验区基础设施良好,采用垄土栽培。

## 1.2 试验设计

试验柑橘品种为 7 年生‘纽荷尔’脐橙,砧木为香橙,分别在抽梢开花期、幼果期、果实膨大期和果实成熟期 4 个生育期设置高水(HW)和低水(LW)2 个亏水处理(灌水量分别为对照处理的 70% 和 55%),高肥(HF)、中肥(MF)和低肥(LF)3 个施肥处理(施肥量分别为对照处理的 80%、60% 和 40%),以正常水肥管理为对照(CK)。CK 处理单次灌水定额分别为:抽梢开花期(I)136.43 $m^3 \cdot hm^{-2}$、幼果期(II)204.65 $m^3 \cdot hm^{-2}$、果实膨大期(III)272.86 $m^3 \cdot hm^{-2}$、果实成熟期(IV)136.43 $m^3 \cdot hm^{-2}$;施肥量按照安杰农业有限公司提供的水溶肥配方施加:I 期纯 N、P、K 分别为 34.2、34.2、34.2 $kg \cdot hm^{-2}$,II 期分别为 18.0、45.5、18.0 $kg \cdot hm^{-2}$,III 期分别为 200.0、200.0、395.0 $kg \cdot hm^{-2}$,IV 期分别为 75.5、185.5、210.5 $kg \cdot hm^{-2}$。水肥耦合处理组合分别为:低水低肥(LWLF)、低水中肥(LWMF)、低水高肥(LWHF)、高水低肥(HWLF)、高水中肥(HWMF)、高水高肥(HWHF)。根据当地灌溉经验和指导,将田间持水量的 60%作为本研究中 CK 处理的灌溉施肥下限,其他处理灌溉施肥时间与 CK 处理相同,施肥量为等量均次施加。每 3 棵树为 1 个小区,每个处理 3 个小区,各处理单次灌水量及次数和各生育期总施肥量见表 1。

**表 1 滴灌脐橙不同水肥一体化处理各生育期灌水量及施肥量**

Table 1 Irrigation and fertilizer amount of different treatments for navel orange at different growth stage under drip irrigation

| 处理 Treatment | 抽梢开花期 I Flowering stage | | 幼果期 II Young fruit stage | | 果实膨大期 III Fruit expansion stage | | 果实成熟期 IV Fruit maturity stage | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 灌水量 Irrigation /($m^3 \cdot hm^{-2}$) | 施肥量 Fertilizer /($kg \cdot hm^{-2}$) | 灌水量 Irrigation /($m^3 \cdot hm^{-2}$) | 施肥量 Fertilizer /($kg \cdot hm^{-2}$) | 灌水量 Irrigation /($m^3 \cdot hm^{-2}$) | 施肥量 Fertilizer /($kg \cdot hm^{-2}$) | 灌水量 Irrigation /($m^3 \cdot hm^{-2}$) | 施肥量 Fertilizer /($kg \cdot hm^{-2}$) |
| T1(I-LWLF) | 68.22 | 152.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T2(I-LWMF) | 68.22 | 228.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T3(I-LWHF) | 68.22 | 304.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T4(I-HWLF) | 68.22 | 152.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T5(I-HWMF) | 102.32 | 228.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T6(I-HWHF) | 102.32 | 304.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T7(II-LWLF) | 136.43 | 380.00 | 102.33 | 258.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T8(II-LWMF) | 136.43 | 380.00 | 102.33 | 387.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T9(II-LWHF) | 136.43 | 380.00 | 102.33 | 516.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T10(II-HWLF) | 136.43 | 380.00 | 153.49 | 258.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T11(II-HWMF) | 136.43 | 380.00 | 153.49 | 387.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T12(II-HWHF) | 136.43 | 380.00 | 153.49 | 516.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |
| T13(III-LWLF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 136.43 | 620.00 | 136.43 | 400.00 |
| T14(III-LWMF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 136.43 | 930.00 | 136.43 | 400.00 |
| T15(III-LWHF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 136.43 | 1240.00 | 136.43 | 400.00 |
| T16(III-HWLF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 204.65 | 620.00 | 136.43 | 400.00 |
| T17(III-HWMF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 204.65 | 930.00 | 136.43 | 400.00 |
| T18(III-HWHF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 204.65 | 1240.00 | 136.43 | 400.00 |
| T19(IV-LWLF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 68.22 | 160.00 |
| T20(IV-LWMF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 68.22 | 240.00 |
| T21(IV-LWHF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 68.22 | 320.00 |
| T22(IV-HWLF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 102.32 | 160.00 |
| T23(IV-HWMF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 102.32 | 240.00 |
| T24(IV-HWHF) | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 102.32 | 320.00 |
| CK | 136.43 | 380.00 | 204.65 | 645.00 | 272.86 | 1550.00 | 136.43 | 400.00 |

试验在避雨条件下进行,相邻地块用宽 30 cm、深 60 cm 的排水沟隔离,以防止土壤水分的横向交换。试验区果树等间距布置,株行距 2.5 m×3.0 m,株高 2.25~2.53 m,株径 21~23 cm,为避免处理间相互影响,采用保护行隔离。试验采用滴灌,灌水毛管采用 Φ16 规格,每个处理安装 1 根滴管,以 40 cm 为半径绕树周围环形布置,每棵树设 10 个滴头,滴头间距 25 cm,滴头为内嵌式,滴头型号采用压力补偿式滴头,滴头流量为 1.6 L·$h^{-1}$,工作水头为 7~8 m。其余农艺管理措施均相同。

### 1.3　土壤含水率测定

以直径为 4 cm 的土钻在滴头下方附近 5~10 cm 处取 0~60 cm 土壤(间隔 10 cm),采用烘干法测定土壤含水率,恒温箱温度设定 110℃,烘干时间为 24 h。

### 1.4　产量测定

测量每个处理每棵树的产量并折算为公顷产量,测产时间与当地采摘时间相同。

### 1.5　品质测定

果实成熟后,同一天分别在各小区每棵树的上、中和下部各取一个果实为待测样。用分析天平测其平均质量作为单果质量;采用烘干法测定果实含水量,鲜果在 105℃干燥 30 min,再在 70℃干燥至恒重;分光光度法测定果实维生素 C 和可溶性糖含量;使用 0.1 mol·$L^{-1}$ NaOH 溶液滴定法测定果实可滴定酸含量。

### 1.6　耗水量计算

采用式(1)计算柑橘耗水量:

$$ET_a = I + P + U - R_f - D + W_o - W_f \tag{1}$$

式中,$ET_a$为柑橘的耗水量(mm);$I$ 为灌水量(mm);$P$ 为降水量(mm);$U$ 为地下水补给量(mm);$R_f$为地表径流(mm);$D$ 为深层渗漏(mm);$W_o$和 $W_f$分别为各阶段开始和结束时的土壤含水量(mm)。试验在避雨条件下进行,没有降雨;灌溉方式为滴灌,因此忽略径流和深层渗漏;地下水埋深超过 12 m,忽略地下水补给,即 $P=0$,$R_f=0$,$U=0$,$D=0$。上式可简化为:

$$ET_a = I + W_o - W_f \tag{2}$$

### 1.7　生产函数模型

(1)W×F-Jensen 模型参考了 Jensen 模型[12],计算式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n}\left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^{\gamma_i}\left(\frac{F_{ai}}{F_{mi}}\right)^{a_i} \tag{3}$$

式中,$\gamma_i$ 为 W×F-Jensen 模型不同生育期水分敏感指数;$a_i$ 为 W×F-Jensen 模型不同生育期肥料敏感指数;$i$ 为生育期编号;模拟产量时 $Y_a$、$Y_m$分别为各处理和充分灌溉施肥的产量(kg·$hm^{-2}$),模拟品质时 $Y_a$、$Y_m$分别为各处理和充分灌溉施肥的果实品质;$ET_a$、$ET_m$ 分别为各处理、充分灌溉的耗水量(mm);$F_a$、$F_m$分别为各处理和充分灌溉的施肥量(kg·$hm^{-2}$);$n$ 为作物生育期数,本研究中取 $n=4$。

(2)W×F-Minhas 模型参考了 Minhas 模型[13],计算式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n}\left(1-\left(1-\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^2\right)^{\delta_i}\left(1-\left(1-\frac{F_{ai}}{F_{mi}}\right)^2\right)^{b_i} \tag{4}$$

式中,$\delta_i$ 为 W×F-Minhas 模型不同生育期水分敏感指数;$b_i$ 为 W×F-Minhas 模型不同生育期肥料敏感指数。

(3)W×F-Rao 模型参考了 Rao 模型[13],计算式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^{n}\left(1-\lambda_i\left(1-\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)\right)\left(1-c_i\left(1-\frac{F_{ai}}{F_{mi}}\right)\right) \tag{5}$$

式中,$\lambda_i$ 为 W×F-Rao 模型不同生育期水分敏感指数;$c_i$ 为 W×F-Rao 模型不同生育期肥料敏感指数。

### 1.8　模型敏感性分析

本研究对 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟脐橙产量和品质时求解得到的水、肥敏感指数进行敏感性分析,进而探明其稳定性。不同生育期相对耗水量和施肥量均为 0.7,水、肥敏感指数为本文 1.7 小节获得的相应基础值。水、肥敏感指数以±5%的间隔在±20%的范围内调整,其他因素保持不变。模型对某一因子的敏感性由归一化敏感性指数($SC$)量化,Chen 等[14]对 $SC$ 的定义如下:

$$SC = \frac{\Delta S/S}{\Delta P/P} \tag{6}$$

式中,$S$ 为各因素初始值模拟的产量或果实品质参数相对值;$\Delta S$ 为初始水(肥)敏感指数增加 $\Delta P$ 后产量/品质的改变量;$\Delta P$ 为水(肥)敏感指数的改变量;$P$ 是水/肥敏感指数的初始值。最终 $SC$ 值为整个波动范围内的平均值。

### 1.9　模型评价

基于 2021 年 4 月—2021 年 12 月的田间实测数据验证水肥-产量/品质模型性能,包括以下统计指标:线性回归系数($b$)、决定系数($R^2$)、均方根误差($RMSE$)、平均绝对误差($AAE$)、建模效率($EF$)和一致性指数($d_{IA}$)评价模型的性能,计算公式分别如式(7)~(12)所示:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i S_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i^2} \tag{7}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - b M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \bar{S})^2} \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2}{n}} \tag{9}$$

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |S_i - M_i| \tag{10}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{M})^2} \tag{11}$$

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \tag{12}$$

式中，$M_i$ 和 $S_i$ 分别是实测值和模拟值；$\bar{M}$ 和 $\bar{S}$ 分别是实测值和模拟值的平均值；$n$ 是样本数。

## 2 结果与分析

### 2.1 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型水、肥敏感指数求解

表 2 为 2020 年 4—12 月田间实测数据求解得到的脐橙 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟产量时不同生育阶段的水、肥敏感系数以及模型拟合的决定系数 $R^2$。由表 2 看出，模拟产量时，W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型的最大水分敏感系数均出现在 III 期，其次为 II 期，这表明果实膨大期水分亏缺对脐橙产量影响最大，是其需水关键期。3 种水肥生产模型的肥料敏感系数最大值也均出现在Ⅲ期，最小值在 IV 期，表明果实膨大期也是脐橙需肥关键期。3 种水肥模型均能较好地拟合脐橙产量与不同生育期水肥的关系（$R^2 = 0.79 \sim 0.86$），其中 W×F-Minhas 模型表现最佳。

表 3 为 2020 年 4—12 月田间实测数据求解得到的脐橙 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟时果实品质（单果质量、果实含水量、可溶性糖、维生素 C 和可滴定酸）时不同生育期水、肥敏感系数及模型拟合的决定系数 $R^2$。W×F-Jensen 和 W×F-Minhas 模型模拟果实品质时的水分敏感指数表明，单果质量对 III 期水分亏缺最敏感，而 W×F-Rao 模型表明其对 I 期最敏感。3 个水肥模型的敏感指数均表明，脐橙果实含水量和可溶性糖对 III 期水、肥亏缺最敏感，说明果实膨大期水分亏缺对脐橙果实含水量和可溶性糖影响最大，是其需水需肥关键期。果实维生素 C 和可滴定酸含量分别对 III 期和 II 期水分亏缺最敏感，均对 IV 期肥料亏缺最敏感。此外，由表 3 可知，W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能很好地拟合单果质量、果实含水量和可滴定酸与不同生育期水肥耦合的关系，$R^2$ 分别达到了 0.88～0.88、0.90～0.93 和 0.80～0.91。W×F-Jensen 和 W×F-Minhas 模型在拟合可溶性糖与不同生育期水肥耦合关系时表现较好，$R^2$ 分别为 0.57 和 0.64；W×F-Minhas 和 W×F-Rao 模型在拟合维生素 C 与不同生育期水肥耦合关系时表现较好，$R^2$ 分别为 0.52 和 0.53。

### 2.2 模型表现

基于 2021 年 4—12 月获得的田间实测数据，验证了脐橙 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟产量和果实品质时的性能（表 4）。结果表明，W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能较好的模拟脐橙产量（$b = 0.99$，$R^2 = 0.76 \sim 0.90$，$RMSE = 0.030 \sim 0.045$，$AAE = 0.023 \sim 0.036$，$EF = 0.74 \sim 0.88$，$d_{IA} = 0.91 \sim 0.96$），各模型都具有较高的精度，其中 W×F-Minhas 模型表现最佳。综上所述，推荐用 W×F-Minhas 模型模拟脐橙产量。

**表 2 滴灌脐橙产量 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型水、肥敏感指数**

Table 2 Water and fertilizer deficit sensitivity index of W×F-Jensen/Minhas/Rao for navel orange yield under drip irrigation

| 指标 Parameter | 模型 Model | 水分敏感指数 Water deficit sensitivity index | | | | 肥料敏感指数 Fertilizer deficit sensitivity index | | | | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ | |
| 产量 Yield | W×F-Jensen | 0.064 | 0.138 | 0.220 | 0.070 | −0.054 | 0.047 | 0.112 | −0.014 | 0.82** |
| | W×F-Minhas | 0.159 | 0.394 | 0.605 | 0.171 | −0.072 | 0.108 | 0.255 | 0.007 | 0.86** |
| | W×F-Rao | 0.106 | 0.160 | 0.247 | 0.099 | −0.115 | 0.073 | 0.168 | −0.036 | 0.79** |

注：W×F 表示水肥交互；**表示实测值与模拟值之间的关系达到了极显著水平（$P<0.01$）。下同。

Note: W×F represents water and fertilizer interaction. **represents the relationship between measured values and simulated valueshas reached a highly significant level ($P<0.01$). The same below.

**表 3　滴灌脐橙果实品质 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型水、肥敏感指数**

Table 3　Water and fertilizer deficit sensitivity index of W×F-Jensen/Minhas/Rao for navel orange fruit quality under drip irrigation

| 指标 Index | 模型 Model | 水分敏感指数 Water deficit sensitivity index | | | | 肥料敏感系数(指数) Fertilizer deficit sensitivity index | | | | $R^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ | |
| 单果质量 Single fruit mass | W×F-Jensen | -0.138 | 0.032 | 0.141 | 0.022 | 0.020 | -0.042 | 0.038 | 0.003 | 0.88** |
| | W×F-Minhas | -0.268 | 0.089 | 0.328 | 0.052 | 0.001 | -0.076 | 0.110 | 0.008 | 0.88** |
| | W×F-Rao | -0.232 | 0.051 | 0.196 | 0.031 | 0.056 | -0.076 | 0.039 | 0.007 | 0.88** |
| 果实含水量 Fruit water content | W×F-Jensen | 0.011 | 0.044 | 0.081 | 0.035 | 0.002 | -0.003 | 0.047 | -0.004 | 0.93** |
| | W×F-Minhas | 0.032 | 0.115 | 0.213 | 0.078 | 0.013 | 0.006 | 0.108 | 0.007 | 0.90** |
| | W×F-Rao | 0.014 | 0.059 | 0.101 | 0.050 | 0.002 | -0.007 | 0.069 | -0.010 | 0.93** |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content | W×F-Jensen | -0.025 | -0.006 | 0.557 | -0.077 | 0.086 | -0.085 | -0.222 | -0.079 | 0.57** |
| | W×F-Minhas | 0.067 | 0.113 | 1.216 | -0.119 | 0.127 | -0.208 | -0.298 | -0.153 | 0.64** |
| | W×F-Rao | -0.111 | -0.052 | 0.792 | -0.117 | 0.177 | -0.106 | -0.646 | -0.126 | 0.60** |
| 维生素 C 含量 Vitamin C content | W×F-Jensen | 0.054 | 0.035 | 0.289 | 0.082 | -0.009 | 0.013 | -0.023 | -0.247 | 0.49** |
| | W×F-Minhas | 0.185 | 0.213 | 0.719 | 0.172 | -0.027 | -0.015 | 0.012 | -0.429 | 0.52** |
| | W×F-Rao | 0.037 | -0.023 | 0.373 | 0.326 | 0.008 | 0.060 | -0.087 | -0.708 | 0.53** |
| 可滴定酸含量 Titratable acid content | W×F-Jensen | 0.032 | 0.156 | 0.030 | 0.132 | 0.035 | 0.069 | 0.042 | 0.103 | 0.90** |
| | W×F-Minhas | 0.092 | 0.377 | 0.119 | 0.331 | 0.085 | 0.175 | 0.094 | 0.248 | 0.80** |
| | W×F-Rao | 0.031 | 0.198 | 0.025 | 0.166 | 0.056 | 0.100 | 0.067 | 0.142 | 0.91** |

**表 4　滴灌脐橙产量、品质 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型拟合优度评价指标**

Table 4　Goodness-of-fit index of W×F-Jensen/Minhas/Rao models of navel orange yield and fruit quality under drip irrigation

| 指标 Index | 模型 Model | $b$ | $R^2$ | *RMSE* | *AAE* | *EF* | $d_{IA}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 产量 Yield | W×F-Jensen | 0.99 | 0.81** | 0.041 | 0.032 | 0.79 | 0.93 |
| | W×F-Minhas | 0.99 | 0.90** | 0.030 | 0.023 | 0.88 | 0.96 |
| | W×F-Rao | 0.99 | 0.76** | 0.045 | 0.036 | 0.74 | 0.91 |
| 单果质量 Single fruit mass | W×F-Jensen | 1.00 | 0.65** | 0.050 | 0.040 | 0.64 | 0.86 |
| | W×F-Minhas | 0.99 | 0.64** | 0.050 | 0.038 | 0.63 | 0.86 |
| | W×F-Rao | 1.00 | 0.65** | 0.049 | 0.040 | 0.65 | 0.86 |
| 果实含水量 Fruit water content | W×F-Jensen | 1.00 | 0.90** | 0.010 | 0.008 | 0.87 | 0.96 |
| | W×F-Minhas | 1.01 | 0.94** | 0.010 | 0.008 | 0.88 | 0.97 |
| | W×F-Rao | 1.00 | 0.87** | 0.011 | 0.009 | 0.85 | 0.96 |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content | W×F-Jensen | 0.96 | 0.33* | 0.108 | 0.081 | 0.20 | 0.76 |
| | W×F-Minhas | 0.95 | 0.46** | 0.102 | 0.075 | 0.28 | 0.78 |
| | W×F-Rao | 0.97 | 0.37* | 0.102 | 0.078 | 0.29 | 0.79 |
| 维生素 C 含量 Vitamin C content | W×F-Jensen | 0.99 | 0.47** | 0.116 | 0.080 | 0.47 | 0.76 |
| | W×F-Minhas | 0.98 | 0.50** | 0.114 | 0.077 | 0.49 | 0.76 |
| | W×F-Rao | 1.00 | 0.51** | 0.112 | 0.078 | 0.51 | 0.80 |
| 可滴定酸含量 Titratable acid content | W×F-Jensen | 0.99 | 0.62** | 0.030 | 0.023 | 0.52 | 0.89 |
| | W×F-Minhas | 0.99 | 0.65** | 0.026 | 0.021 | 0.63 | 0.92 |
| | W×F-Rao | 0.98 | 0.54** | 0.033 | 0.026 | 0.42 | 0.87 |

W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能很好地模拟脐橙果实含水量($b$ 为 1.00~1.01,$R^2$ 为 0.87~0.94,*RMSE* 为 0.010~0.011,*AAE* 为 0.008~0.009,*EF* 为 0.85~0.88,$d_{IA}$ 为 0.96~0.97);较好地模拟单果质量和可滴定酸含量($b$ 为 0.98~1.00,$R^2$ 为 0.54~0.65,*RMSE* 为0.026~0.050,*AAE* 为 0.023~0.040,*EF* 为 0.42~0.65,$d_{IA}$ = 0.86~0.92)。W×F-Jensen 模型在模拟维生素 C 含量时表现较差($b$ = 0.99,$R^2$ = 0.47,*RMSE* = 0.116,*AAE* = 0.08,*EF* = 0.47,$d_{IA}$ = 0.76),而 W×F-Minhas 和 W×F-Rao 模型表现相对较好($R^2$ > 0.50)。3 个水肥模型在模拟可溶性糖时表现较差($b$ 为 0.96~0.97,$R^2$ 为 0.33~0.46,*RMSE* 为 0.112~0.116,*AAE* 为 0.077~0.080,*EF* 为 0.20~0.29,$d_{IA}$ 为 0.76~0.79);其中 W×F-Minhas 模型表现相对最好($R^2$ = 0.46)。综上所述,推荐用 W×F-Minhas 模型来模拟脐橙果实品质。

## 2.3　模型敏感性分析

表 5 为对 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟产量和品质时求解得到的水、肥敏感指数进行敏感性分析的结果。结果表明,W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型对模拟产量时求解的Ⅰ、Ⅱ和Ⅳ期的水、肥敏感指数不敏感,*SC* 绝对值分别为 0.007~0.033,

0.010~0.050 和 0.001~0.031;3 种模型均对Ⅲ期的水分亏缺敏感指数较敏感,*SC* 绝对值为 0.057~0.080。W×F-Jensen 和 W×F-Rao 模型对Ⅲ期的肥料敏感指数不敏感,*SC* 绝对值为 0.024~0.040,W×F-Minhas 模型较敏感,*SC* 绝对值为 0.053。

W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型对模拟单果质量和果实含水量时求解的Ⅱ期和Ⅳ期水分亏缺敏感指数及Ⅰ-Ⅳ期肥料敏感指数不敏感,*SC* 绝对值为 0.001~0.022。W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型对模拟可溶性糖时求解的水分亏缺敏感指数均不敏感,*SC* 绝对值为 0.006~0.034。在模拟维生素 C 时,W×F-Minhas 模型对 Ⅳ 期水分亏缺敏感指数不敏感,*SC* 绝对值为 0.108,对Ⅰ期、Ⅱ期和Ⅲ期的肥料敏感指数不敏感,*SC* 绝对值为 0.004~0.008。在模拟可滴定酸时,W×F-Minhas 模型对Ⅰ期和Ⅲ期的水、肥敏感指数不敏感,*SC* 绝对值为0.008~0.021。

**表 5 滴灌脐橙产量、品质 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型水、肥敏感指数的敏感性**

Table 5 Sensitivity of water and fertilizer deficit sensitivity index of W×F-Jensen/Minhas/Rao for navel orange yield and fruit quality under drip irrigation

| 指标 Index | 模型 Model | 水分敏感指数 Water deficit sensitivity index | | | | 肥料敏感指数 Fertilizer deficit sensitivity index | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ | Ⅰ期 Stage Ⅰ | Ⅱ期 Stage Ⅱ | Ⅲ期 Stage Ⅲ | Ⅳ期 Stage Ⅳ |
| 产量 Yield | W×F-Jensen | -0.023 | -0.049 | -0.078 | -0.025 | 0.019 | -0.017 | -0.040 | 0.005 |
| | W×F-Minhas | -0.033 | -0.050 | -0.080 | -0.031 | 0.033 | -0.022 | -0.053 | 0.011 |
| | W×F-Rao | -0.015 | -0.037 | -0.057 | -0.016 | 0.007 | -0.010 | -0.024 | -0.001 |
| 单果质量 Single fruit mass | W×F-Jensen | 0.049 | -0.011 | -0.050 | -0.008 | -0.007 | 0.015 | -0.014 | -0.001 |
| | W×F-Minhas | 0.065 | -0.016 | -0.062 | -0.009 | -0.017 | 0.022 | -0.012 | -0.002 |
| | W×F-Rao | 0.025 | -0.008 | -0.031 | -0.005 | 0.001 | 0.007 | -0.010 | -0.001 |
| 果实含水量 Fruit water content | W×F-Jensen | -0.004 | -0.016 | -0.029 | -0.012 | -0.001 | 0.001 | -0.017 | 0.001 |
| | W×F-Minhas | -0.004 | -0.018 | -0.031 | -0.015 | -0.001 | 0.002 | -0.021 | 0.003 |
| | W×F-Rao | -0.003 | -0.011 | -0.020 | -0.007 | -0.001 | -0.001 | -0.010 | -0.001 |
| 可溶性糖含量 Soluble sugar content | W×F-Jensen | 0.009 | 0.002 | -0.199 | 0.027 | -0.031 | 0.030 | 0.079 | 0.028 |
| | W×F-Minhas | 0.032 | 0.015 | -0.312 | 0.034 | -0.056 | 0.031 | 0.162 | 0.036 |
| | W×F-Rao | -0.006 | -0.011 | -0.115 | 0.011 | -0.012 | 0.020 | 0.028 | 0.014 |
| 维生素 C 含量 Vitamin C content | W×F-Jensen | -0.019 | -0.012 | -0.103 | -0.029 | 0.003 | -0.005 | 0.008 | 0.088 |
| | W×F-Minhas | -0.011 | 0.007 | -0.126 | -0.108 | 0.008 | 0.004 | -0.004 | 0.114 |
| | W×F-Rao | -0.017 | -0.020 | -0.068 | -0.016 | -0.001 | -0.006 | 0.008 | 0.067 |
| 可滴定酸含量 Titratable acid content | W×F-Jensen | -0.011 | -0.056 | -0.011 | -0.047 | -0.012 | -0.025 | -0.015 | -0.037 |
| | W×F-Minhas | -0.009 | -0.063 | -0.008 | -0.052 | -0.017 | -0.031 | -0.021 | -0.044 |
| | W×F-Rao | -0.009 | -0.036 | -0.011 | -0.031 | -0.008 | -0.017 | -0.009 | -0.023 |

# 3 讨 论

## 3.1 W×F-Minhas 模型在脐橙产量模拟方面的应用

目前,有关水分生产函数的研究主要集中于小麦、玉米和水稻等大田作物[15-18],对果树的研究较少。通过比较 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型模拟产量时的水、肥敏感指数发现,果实膨大期水、肥亏缺对脐橙产量影响最大,而成熟期较小。这表明果实膨大期是脐橙需水需肥关键阶段,水肥亏缺会导致脐橙产量显著降低,而成熟期适度水肥亏缺能够达到节水、节肥和稳产的目的。陈瑛等[19]也得到了相似的结论,果实膨大期对水分亏缺最敏感,而果实成熟期最不敏感,但其未考虑肥料对脐橙产量的影响。通过比较 3 个模型的回归系数($b$)、误差指标($RMSE$ 和 $AEE$)和建模质量($EF$ 和 $d_{IA}$)发现,本研究建立的 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型能够较好地模拟脐橙产量($R^2=0.79\sim0.86$,$RMSE=0.030\sim0.045$),其中 W×F-Minhas 模型表现最佳。这归因于两个方面:(1)影响脐橙产量的关键阶段为抽梢开花期,幼果期和果实膨大期,且它们对水肥亏缺的响应具有一致性。脐橙抽梢开花期水肥亏缺加剧了 6 月下旬的生理落果,导致收获时果实数量显著减少进而降低产量;幼果期和果实膨大期水肥亏缺分别通过影响脐橙果实汁囊细胞分裂和吸水膨胀降低脐橙果实成熟时单果质量,进而影响产量[20]。(2)本研究构建的 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型继承了水分生产函数的特点,意味着水肥亏缺越显著产量越低,这符合本研究脐橙产量对水肥亏缺的响应规律。Chen 等[14]和张和喜等[21]对番茄和玉米的研究也得到类似结果,产量与耗水量为正相关关系,水分生产函数能够很好地模拟作物产量与不同生育期耗水量的关系。本研究发现,3 个模型对模拟脐橙产量时求解的抽梢开花期、幼果期和果实成熟期水、肥敏感指数的敏感性均较弱。这表明本研究构建的 W×F-Jensen/

Minhas/Rao 模型具有鲁棒性,由于数据采集、拟合或模拟等原因引起的水、肥敏感指数的轻微偏差对结果不会产生显著影响。综上所述,推荐 W×F-Minhas 模型模拟脐橙产量与不同生育期水肥耦合关系。

### 3.2　W×F-Minhas 模型在脐橙果实品质参数模拟方面的应用

本研究发现,脐橙单果质量、果实含水量和可溶性糖对Ⅲ期水分亏缺和肥料变化最敏感,维生素 C 对Ⅲ期水分亏缺和 Ⅳ 期肥料变化最敏感。这与冉桔义[22]2020 年在四川省蒲江县的研究结果类似,单果质量和维生素 C 在果实膨大期对水肥的敏感性最高,可滴定酸在果实成熟期对水肥的敏感性最高。本研究建立的 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型均能较好地模拟脐橙单果质量和果实含水量($R^2$ 为 0.64~0.94, *RMSE* 为 0.01~0.05),其中 W×F-Rao 和 W×F-Minhas 模型分别在模拟单果质量和果实含水量时表现最好。这是因为单果质量和果实含水量是产量的重要构成部分,它们对水分亏缺的响应规律与产量相似,随着水分亏缺的加剧呈单调变化[20]。3 个模型在模拟可滴定酸时也表现较好($R^2$ 为 0.54~0.65, *RMSE* 为0.026~0.033),其中 W×F-Minhas 模型效果最佳。W×F-Jensen/Rao 模型模拟可溶性糖和维生素 C 时表现较差,而 W×F-Minhas 模型模拟在模拟可溶性糖和维生素 C 时表现相对较好($R^2$ 分别为 0.46 和 0.50)。尽管 W×F-Minhas 在模拟脐橙果实化学品质(可溶性糖、可滴定酸和维生素 C)时有可接受的表现,但相对于产量和果实物理品质(单果质量和果实含水量)仍较差。这是由于脐橙果实化学品质(可溶性糖、可滴定酸和维生素 C)对水肥耦合的响应较为复杂。适度水、肥亏缺有利于改善果实品质,但重度亏缺会直接影响 Rubisco 活化酶活性,抑制叶片光合能力[23],从而降低果实品质。此外,适度水肥亏缺往往引起果实品质的提高,这意味着在求解水、肥敏感指数时把 CK 处理下的品质作为潜在最高品质可能是导致模拟精度不高原因之一。由模型敏感性结果可知,W×F-Minhas 模型在模拟脐橙果实品质时对水、肥敏感指数的敏感性较低,表明本研究建立的模型相对稳定。综合模型预测性能和敏感性分析,建议采用 W×F-Minhas 模型模拟脐橙果实品质与不同生育期水分耦合的关系。

### 3.3　W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型的意义及局限性

本研究在水分生产函数的基础上引入了“肥”因子,构建了 W×F-Jensen/Minhas/Rao 模型。这 3 个水肥-产量/果实品质模型的提出不仅有助于优化脐橙灌溉制度、提高水肥利用率,也为西南脐橙产业应对季节性干旱、工程性缺水和极端天气事件提供了依据。然而,由于本研究仅为单阶段水肥亏缺处理,所构建的模型在实际生产中的表现需进一步验证。此外,由于本研究构建的模型仅为经验模型,可能适合于研究区或具有相似土壤、气候类型的地区,而对于环境条件差异较大的地区表现可能较差。因此,在未来的研究中应该从叶片生理、果实生长和果实内部化学指标形成过程考虑脐橙产量和果实品质对不同生育期水肥耦合的响应关系以改进模型,以达到广泛推广和应用的目的。

## 4　结　论

1)脐橙产量、单果质量、果实含水量和可溶性糖均对果实膨大期水分亏缺和肥料变化最敏感;维生素 C 对果实膨大期的水分亏缺最敏感,对果实成熟期的肥料变化最敏感;可滴定酸对幼果期的水分亏缺最敏感,对果实成熟期的肥料变化最敏感。

2)W×F-Jensen、W×F-Minhas 和 W×F-Rao 模型均能较好地模拟脐橙产量、单果质量、果实含水量和可滴定酸与不同生育期水肥耦合的关系,$R^2$ 分别为 0.76~0.90、0.64~0.65、0.87~0.94 和 0.54~0.65,其中 W×F-Minhas 表现最佳且较为稳定;W×F-Minhas 和 W×F-Rao 模型在模拟维生素 C 时表现较好($R^2$>0.5)。综上所述,推荐 W×F-Minhas 模型模拟脐橙产量和果实品质与不同生育期滴灌水肥耦合的关系。

**参 考 文 献:**


[1]　孟富宣, 段元杰, 杨玉皎, 等. 不同产地纽荷尔脐橙品质分析与评价[J]. 湖南农业科学, 2020,(9): 68-72.
MENG F X, DUAN Y J, YANG Y J, et al. Evaluation and analysis of fruit quality of *Citrus junos* from different producing regions[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020,(9): 68-72.

[2]　廖秋红.纽荷尔脐橙主产区果实品质特征与产地识别研究[D].重庆:西南大学,2014.
LIAO Q H. Study on the fruit quality characteristics and origin identification of Newhall navel orange in the main production area[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.

[3]　朱嘉伟, 赵聪佳, 郭蕊蕊, 等. 水资源约束条件下的县域冬小麦节水灌溉制度[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 92-100.
ZHU J W, ZHAO C J, GUO R R, et al. Water-saving irrigation regime for winter wheat in county areas under water resources constraints[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 92-100.

[4]　李中恺, 刘鹄, 赵文智. 作物水分生产函数研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1781-1794.
LI Z K, LIU G, ZHAO W Z. Revisiting crop water production functions in terms of cross-regional applications[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(12): 1781-1794.

[5]　肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 中国主要农作物分生育期 Jensen 模

型研究[J]. 节水灌溉, 2008,(7): 1-3, 8.
XIAO J F, LIU Z D, DUAN A W, et al. Study onJensen model at each growing stage for main crops in China [J]. Water Saving Irrigation, 2008,(7): 1-3, 8.

[6] 尹希, 邵东国, 李浩鑫, 等. 南方旱稻水分生产函数模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(增刊2): 131-133.
YIN X, SHAO D G, LI H X, et al.Study on water production function of upland rice in South China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S2): 131-133.

[7] 汪顺生, 李欢欢, 王康三, 等. 宽垄沟灌下冬小麦水分生产函数试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(11): 987-992.
WANG S S, LI H H, WANG K S, et al. Field plot experiment on water production function of winter wheat in wide ridge and furrow irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(11): 987-992.

[8] 邵颖.陕西泾惠渠灌区冬小麦水分生产函数及节水灌溉制度研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
SHAO Y. Study water production function and water-saving irrigation system of winter wheat in Jinghuiqu irrigationdistrict, Shanxi [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.

[9] 陶延怀, 郑文生. Minitab 软件在大豆水分生产函数模型建立与评价中的应用[J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(9): 1-4.
TAO Y H, ZHENG W S. Application ofMinitab software onbuilding and evaluation of water production function models of soybean [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2018, 1(9): 1-4.

[10] 任秋实, 孙兆军, 王力, 等. 宁夏扬黄灌区马铃薯水分生产函数试验研究[J]. 节水灌溉, 2019,(2): 43-46, 58.
REN Q S, SUN Z J, WANG L, et al. An experimental research on water production function for potato in Yellow River pumping irrigation area of Ningxia[J]. Water Saving Irrigation, 2019,(2): 43-46, 58.

[11] 陈盛, 黄达, 王振昌, 等. 土壤盐分垂向非均匀分布下的番茄盐分生产函数研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 388-396.
CHEN S, HUANG D, WANG Z C, et al. Salt production function in tomato under vertical uneven distribution ofsoil salt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 388-396.

[12] JENSEN M E. Water consumption by agricultural plants[M]//KOZLOWSKI T T. Plant water consumption and response. New York: Academic Press, 1968: 1-22.

[13] 陈亚新, 康绍忠.非充分灌溉原理[M].北京:水利电力出版社, 1995: 8.
CHEN Y X, KANG S Z. Principle of insufficient irrigation[M].Beijing: Water Resources and Electric Power Press,1995: 8.

[14] CHEN J L, KANG S Z, DU T S, et al. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages[J]. Agricultural Water Management, 2013, 129: 152-162.

[15] 张恒嘉. 几种大田作物水分-产量模型及其应用[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(5): 997-1001.
ZHANG H J. Field crop water-yield models and their applications[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(5): 997-1001.

[16] 程卫国, 卢文喜, 安永凯. 吉林省水稻水分生产函数模型的适应性研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(2): 61-66.
CHENG W G, LU W X, AN Y K. Adaptability of water production function models for rice in JilinProvince[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(2): 61-66.

[17] 司昌亮, 尚学灵, 王旭立, 等. 半干旱区玉米膜下滴灌适宜水分生产函数模型研究[J]. 节水灌溉, 2020,(1): 39-44, 48.
SI C L, SHANG X L, WANG X L, et al. Study on water product function for maize under drip irrigation under film in the semi-arid region[J]. Water Saving Irrigation, 2020,(1): 39-44, 48.

[18] 吴训, 许艳奇, 石建初, 等. 基于根系加权土壤水分有效性的冬小麦水分生产函数[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 124-134.
WU X, XU Y Q, SHI J C, et al.Water production function of winter wheat based on root-weighted soil water availability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(8): 124-134.

[19] 陈瑛, 邹颖, 杨文, 等. 不同调亏处理对脐橙果实生长和品质的影响[J]. 节水灌溉, 2017,(9): 38-42.
CHEN Y, ZOU Y, YANG W, et al. Effect of regulated deficit irrigation on navel oranges growth and quality[J]. Water Saving Irrigation, 2017,(9): 38-42.

[20] CHEN F, CUI N B, JIANG S Z, et al. Effects of water deficit at different growth stages under drip irrigation on fruit quality of citrus in the humid areas of South China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107407.

[21] 张和喜, 迟道才, 王永涛, 等. 黔中地区玉米水分生产函数模型适应性评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 176-179.
ZHANG H X, CHI D C, WANG Y T, et al.Evaluation on suitability of water production functions to maize in central area of Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 176-179.

[22] 冉桔义.柑橘低压滴灌水肥一体化调控效应与模拟[D].雅安:四川农业大学,2020.
RAN Z Y. Regulation effect and simulation of water and fertilizer in low pressure drip irrigation of citrus [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.

[23] JÁKLI B, TAVAKOL E, TRÄNKNER M, et al. Quantitative limitations to photosynthesis in K deficient sunflower and their implications on water-use efficiency[J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 209: 20-30.