

基于 AquaCrop 模型的库尔勒香梨 生长动态模拟及滴灌制度优化

张景瑞^{1,2}, 王春霞^{1,2}, 马建江³, 王宏鑫^{1,2}, 王佳鑫^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,
新疆 石河子 832000;3.新疆生产建设兵团第二师农业科学研究所,新疆 库尔勒 841000)

摘要: 为探究省力化栽培模式下库尔勒香梨园适宜的灌溉制度,依据 4 种灌溉定额(3 750,5 250,6 750,8 250 m³/hm²)条件下 2 年香梨的田间试验数据,通过冠层覆盖度、土壤含水量和蒸散强度(ET_a)和产量指标,确定 AquaCrop 模型参数。设置不同灌水场景,综合考虑产量、水分利用效率和灌溉水利用效率,利用 AquaCrop 模型优化香梨灌溉制度。结果表明:Y2W3 处理产量高出其余处理 3.87%~16.86%,Y2W1 处理水分利用效率高出其余处理 2.88%~27.20%;AquaCrop 模型模拟与试验地实测结果的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、标准均方根误差(NRMSE)、拟合度指数(d)和 Nash 效率系数(NSE)评价指标表明,冠层覆盖度 R^2 变化范围为 0.89~0.93,土壤含水量 d 为 0.92~0.98, ET_a 的 RMSE 为 1.06~1.61 mm/d;AquaCrop 模型预测 15 种不同场景,灌溉定额 7 200 m³/hm²、灌水次数 11 次和灌溉周期 14 天的灌溉方案表现最优,其产量为 6 793.62 kg/hm²,水分利用效率为 10.90 kg/(hm²·mm),灌溉水利用效率为 1.03 kg/m³。AquaCrop 作物生长模型可用于香梨产量预测和田间用水管理,其研究结果可为地表滴灌技术适用性选择提供依据。

关键词: 滴灌; AquaCrop 模型; 库尔勒香梨生长; 灌溉制度

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2023)05-0328-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.040

Dynamic Simulation of Korla Fragrant Pear Growth and Optimization of Drip Irrigation System Based on AquaCrop Model

ZHANG Jingrui^{1,2}, WANG Chunxia^{1,2}, MA Jianjiang³, WANG Hongxin^{1,2}, WANG Jiabin^{1,2}

(1.College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000;

2.Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000;

3.Agricultural Scientific Institute of 2nd Division of Xinjiang Production & Construction Corps, Korla, Xinjiang 841000)

Abstract: In order to explore the suitable irrigation system of Korla Fragrant Pear orchard under labor-saving cultivation mode, based on the two-year field test data of Fragrant Pear under four irrigation quotas (3 750, 5 250, 6 750 and 8 250 m³/hm²), the AquaCrop model parameters were determined through using canopy coverage, soil water content, evapotranspiration (ET_a) and yield index. Different irrigation scenarios were set up, and the yield, water use efficiency and yield were comprehensively considered, AquaCrop model was used to optimize the irrigation system of fragrant pear. The yield of Y2W3 treatment was 3.87%~16.86% higher than that of other treatments, and the water use efficiency of Y2W3 treatment was 2.88%~27.20% higher than that of other treatments. The evaluation indexes of determining coefficient (R^2), root mean square Error (RMSE), standard root mean square error (NRMSE), the Willmott's index of agreement (d) and Nash Sutcliffe efficiency (NSE) of the simulated and measured results of AquaCrop model showed that the canopy coverage R^2 ranged from 0.89 to 0.93, the range of soil water content d was 0.92~0.98, the range of ET_a RMSE was 1.06~1.61 mm/d. The AquaCrop model predicted 15 different scenarios, and the

收稿日期:2023-03-15

资助项目:新疆重点产业创新发展支撑计划项目“新疆特色林果节水设备研发和水肥高效利用关键技术集成与示范”(2021DB012);新疆库尔勒香梨水肥盐精准调控提质增效关键技术研究与示范项目(2022DB020);国家自然科学基金项目“干旱区膜下滴灌农田生态系统水盐与养分运移及环境效益”(U1803244)

第一作者:张景瑞(1997—),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:zhangjingrui@163.com

通信作者:王春霞(1979—),女,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:wangchunxia1979@139.com

irrigation system with irrigation quota of 7 200 m³/hm², irrigation frequency of 11 times and irrigation cycle of 14 days performed best, with a yield of 6 793.62 kg/hm², water use efficiency of 10.90 kg/(hm² · mm) and irrigation water use efficiency of 1.03 kg/m³. AquaCrop growth model could be used for yield prediction and field water management of fragrant pears, and the results could provide a basis for the applicability selection of surface drip irrigation technology.

Keywords: drip irrigation; AquaCrop model; Korla Fragrant Pear growth; irrigation system

随着现代化农业日新月异地推进,自然地理环境资源合理改造逐步走入人类视野,水资源高效利用首当其冲^[1],2021 年新疆维吾尔自治区用水总量 573.9 亿 m³,农业用水 527.9 亿 m³^[2],农业用水占比 91.98%,优化农业灌溉用水分配对于合理利用当地水资源十分重要。高效节水灌溉技术的推广与应用是当地提高农业用水效率的主要途径,目前滴灌技术应用面积达到 137 万 hm²^[3],广泛应用于在小麦、棉花、辣椒、玉米、葡萄和红枣等作物,其中棉花效益增收 87%。巴音郭楞蒙古自治州(简称巴州)农业用水量 43.61 亿 m³^[4],占用水总量的 88.19%;巴州梨树种植面积 37 162 hm²^[5],占整个水果种植面积的 37.56%。2021 年库尔勒市总用水量为 9.97 亿 m³,农业用水量为 7.98 亿 m³,占比 80.04%,农业用水量超出指标 1.33 亿 m³^[6]。目前库尔勒香梨常规灌溉需要用水 7 500 m³/hm²^[7],进行库尔勒市农业节水的潜力在于减少特色林果的灌水量,所以当地特色林果节水灌溉技术的实施尤其重要,滴灌技术也成为特色林果灌水技术的首选。

香梨是区域性的特色林果,截至 2021 年库尔勒市香梨已达到 2.7 万 hm²^[8],口感更佳的“树上熟”香梨产量达到 10 万 t,“库尔勒香梨”的品牌价值达到 161.20 亿元^[9]。针对传统的香梨种植园(株距 2~7 m、行距 3~8 m),晏清洪等^[10]证明了地表滴灌可适用于株行距 4 m×5 m 的 20 年树龄香梨树;刘洪波等^[11]则认为株行距 4 m×6 m 的 11 年树龄香梨树采用地表滴灌可以更好确定灌溉制度。自从 2015 年引进高密度省力香梨栽培模式(株行距为 1 m×4 m),此模式下第 3 年开始结果,第 4~5 年进入丰产期,相比传统的种植模式更有利于实施滴灌技术。根据省力化栽培模式下土壤、树龄等相关因素,探讨合理的滴灌制度,对于进一步推行滴灌水肥一体化,推进香梨种植从零散型向集中规模化种植转型,提高香梨产量和果实品质,促进香梨节水效益产业群发展提供理论依据。

AquaCrop 模型是联合国粮食及农业组织(FAO)首次提出的关于作物生长水分驱动模型^[12],该模型输入数据简单人性化,输出数据准确,符合预期要求,数据以模块化综合考虑水分胁迫对作物冠层生长、衰老等过程的影响,通过不同参数模拟水分对最终结果的

影响程度和过程^[13],实现不同运转模式下植株冠层覆盖度、植株产量和土壤含水量等相关要素的动态模拟。模型对大豆、玉米、棉花、小麦、葡萄等农产品做了大量研究,并证明了模型适用性。目前 AquaCrop 模型已经广泛用于 1 年草本植物,在落叶果树应用较少,本文首次开展 AquaCrop 模型在香梨树生长方面的适用性研究。

利用 AquaCrop 模型模拟可感知未来不确定性,减少非必要的经济损耗。本研究在库尔勒地区选择省力化种植模式香梨,通过田间灌溉试验,利用 AquaCrop 模型模拟香梨冠层覆盖度、土壤含水量和实际蒸散强度(ET_a)动态变化过程,检验最终产量,根据香梨连续生长的 2 个季节(2021 年校准,2022 年验证)实测的田间数据,评估 AquaCrop 模型的性能。通过利用 AquaCrop 模型评估产量、水分利用效率和作物生产率,为农民实施省力化香梨种植模式下滴灌灌水计划提供合理的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4—9 月、2022 年 4—9 月在新疆维吾尔自治区铁门关市 29 团 10 连香梨园进行。该地区位于东经 85°54',北纬 41°47',海拔 909.00 m,属于暖温带大陆性干旱气候,多年平均无霜期 210 天,全年平均气温 11.40℃,冬季最低气温 -28.00℃,平均风速 11.60 km/h。2021 年、2022 年梨树生育期降水量分别为 163.96,81.99 mm。

试验区选材为 2016 年嫁接的香梨树,香梨树种植模式株行距 1 m×5 m,截止到目前梨树平均直径范围 8~11 cm,平均树高 4.10 m,树冠体积 20.13 m³。试验区土质属于砂壤土,土壤 pH 为 7.8,有机质含量 15.00 g/kg,全氮含量 0.60 g/kg,碱解氮含量 53.82 mg/kg,有效磷含量 22.20 mg/kg,速效钾含量 200.90 mg/kg。选择地下水作为灌溉水源,地下水埋深 >3.50 m。

1.2 试验设计

灌溉系统采用地表滴灌模式,滴灌系统布置方式为 1 行 2 管,与树行齐头并进,其滴头流量 2.4 L/h,滴头间距 30 cm,通过管道首部水表和阀门控制,管道压力控制在 0.10 MPa 左右。灌水量的单因素随

机区组试验,处理见表 1。每组处理 3 个重复。每年 3 月中下旬采用机械沟施的方式施加底肥:45 m³/hm²腐熟的羊粪、1 000 kg/hm²标准的氮磷钾占比为

17:17:17 的复合肥、1 700 kg/hm²有机菌肥,4—9 月随水施肥 5 次,所用肥料为中化化肥有限公司生产的大量元素水溶肥料。

表 1 试验设计

灌水序号	灌水日期 (月—日)	灌水定额/(m ³ ·hm ⁻²)						追肥情况/ (kg·hm ⁻²)
		2021 年			2022 年			
		Y1W1	Y1W2	Y1W3	Y1W1	Y1W2	Y1W3	
1	04—20	165	210	255	120	165	210	
2	05—05	270	345	420	195	270	345	
3	05—20	360	450	540	255	360	450	150
4	06—04	465	600	720	330	465	600	
5	06—22	585	750	915	420	585	750	150
6	07—07	840	1095	1350	600	840	1095	150
7	07—25	885	1140	1380	630	885	1140	200
8	08—09	885	1140	1380	630	885	1140	200
9	08—27	795	1020	1290	570	795	1020	
总计		5250	6750	8250	3750	5250	6750	

注:Y 代表年份;W 代表灌溉定额;第 1 次施肥为平衡肥,第 2 次、第 3 次为高磷肥,最后 2 次为高钾肥,3 种肥料具体参数 N:P:K 比例为 20:20:20,16:44:0 和 8:12:32。

1.3 测量指标

1.3.1 土壤含水量 2021 年、2022 年 4—8 月采用烘干法测量土壤含水率,单次灌水前后使用土钻取土样 1 次,降雨后加测,取土深度 1 m,单层 20 cm 为 1 层称湿重,置于恒温 105 ℃烘箱烘至 24 h,计算土壤质量含水量。土壤含水量(W)计算公式^[14]为:

$$W = \sum_{i=1}^n \theta_i \times Z_i \times \rho_i \quad (1)$$

式中:W 为土壤含水量(mm); θ_i 为第 i 层土壤质量含水量(g/g); Z_i 为第 i 层土壤层厚度(mm); ρ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); n 为根区土壤层数。

1.3.2 香梨耗水量 通过水量平衡法计算耗水量,公式为:

$$ET_j = 10 \sum_{i=1}^n H_i \rho_i (\theta_{i1} - \theta_{i2}) + M + P_0 + K \quad (2)$$

式中: ET_j 为阶段耗水量(mm); i 为土壤层次号数; n 为土壤层次总数; H_i 为第 i 层土壤厚度(cm); ρ_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); θ_{i1} 为第 i 层土壤阶段初质量含水量(g/g); θ_{i2} 为第 i 层土壤阶段末质量含水量(g/g); M 为时段内的灌水量(mm); P_0 为时段内降雨量(mm); K 为时段内的地下水补给量(mm)(本试验地的地下水埋深较深,地下水补给量为 0)。

1.3.3 冠层覆盖度 冠层覆盖度(CC)是指绿色冠层覆盖地面土壤的面积百分比^[15],利用叶面积指数进行计算:2021 年、2022 年 5—10 月每隔 10 天采用 YMJ-B 便携式叶面积仪测量每个处理香梨叶面积,进而转换为叶面积指数(LAI),每个处理重复 3 次取平均值作为该小区 LAI,计算公式为:

$$CC = 1 - e^{-0.945 \times 0.5 \times LAI} \quad (3)$$

1.3.4 产量 2021 年是试验区结果第 1 年,2021 年实测产量通过单株产量计算总产量,2022 年实测产量是农户收获产量。

1.3.5 水分利用效率

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中:WUE 为水分利用效率[kg/(hm²·mm)];Y 为香梨产量(kg/hm²);ET 为作物全生育期耗水量(mm)。

1.3.6 灌溉水利用效率

$$IWUE = Y/I \quad (5)$$

式中:IWUE 为灌溉水利用效率(kg/m³);Y 为香梨产量(kg/hm²);I 为生育期内总灌水量(m³/hm²)。

1.4 AquaCrop 模型参数化、校准和验证

AquaCrop 模型模块主要分为气象模块、作物生长模块、灌溉管理模块、土壤基本参数模块等。

1.4.1 气象模块 在田间埋设由东方智感(浙江)科技股份有限公司生产的天祈智能生态站,监测降雨量、气温、太阳辐射、相对湿度、风速等气象指标,并将输入 AquaCrop 模型。2021 年和 2022 年香梨生育期内气温、降雨量和 ET_0 见图 1。

1.4.2 作物模块 作物模块主要由作物冠层变化、作物生长周期、作物蒸散、作物水分生产力、水分、盐分、温度胁迫等单一因素变化构成。最初与最大冠层覆盖率、不同生育期等参数由实际田间观测所得,作物水分生产力及水分、盐分、温度胁迫系数则对应模型提供基本参数取值范围,本试验用 2021 年各处理田间实测数据对模型参数进行调试,选用 2022 年田间数据进行验证,经调试后 AquaCrop 模型作物模块参数见表 2。

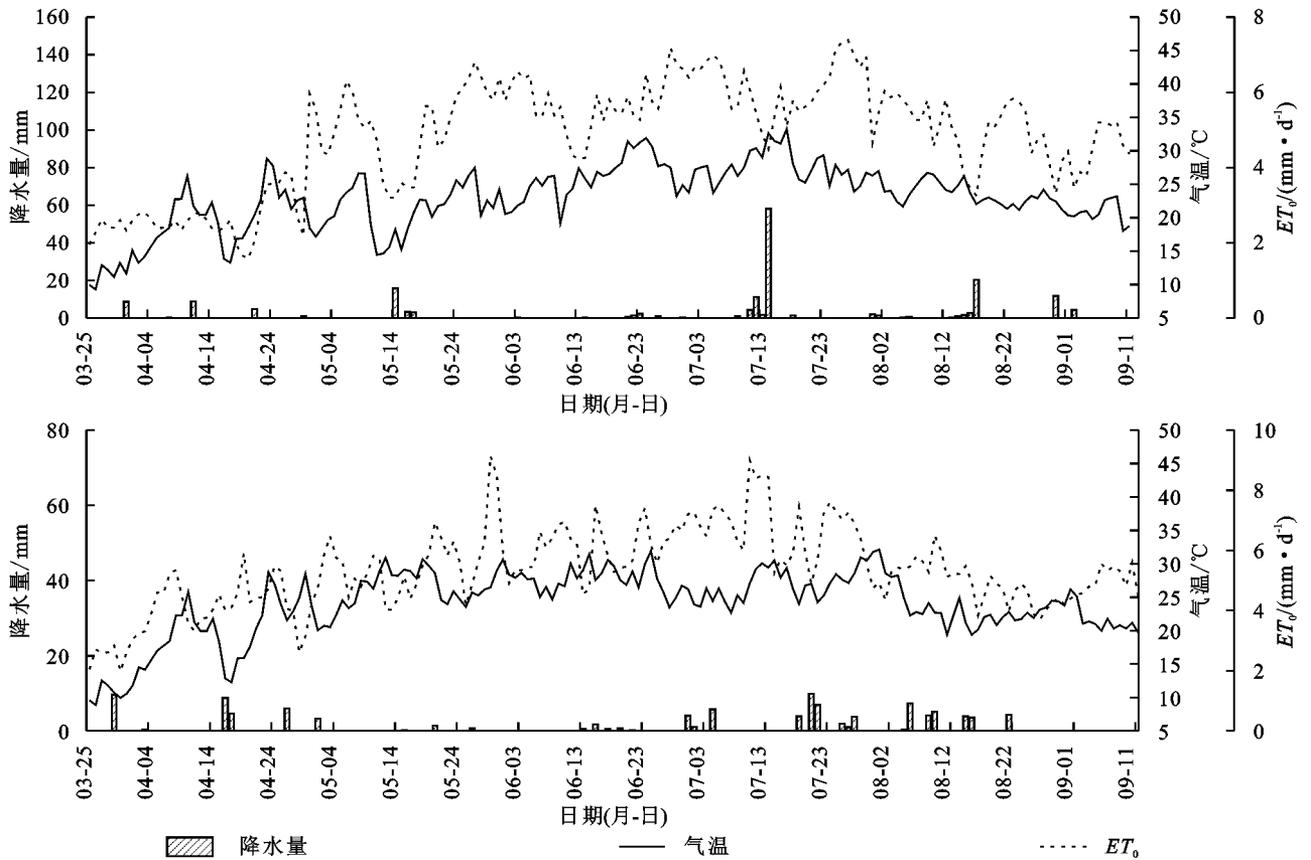


图 1 2021—2022 年香梨生育期内气象数据和 ET_0 。

表 2 AquaCrop 模型作物模块参数

符号	定义	取值	单位
Tbase	基底温度	7.00	°C
Tupper	上限温度	36.00	°C
CC0	初始覆盖度	5.85	m ² /m ²
CGC	冠层增长系数	0.07	°C/d
CCx	最大冠层覆盖度	68.00	%
CDC	冠层衰减系数	0.03	°C/d
Kex	土壤最大蒸发系数	0.33	
Zmin	最小有效生根深度	0.20	m
Zx	最大有效生根深度	1.20	m
Rexshp	根区膨胀的形状因子	1.50	m
Kcb	作物系数		
KeTr,x	作物蒸腾系数	0.65	—
WP	标准水分生产力	17.00	g/m ²
HI	参考收获参数	45.00	%
Ksexp,w.upper	限制冠层伸展的土壤水分消耗上限阈值	0.32	—
Ksexp,w.lower	限制冠层伸展的土壤水分消耗下限阈值	0.78	—
Ksexp,w.shp	限制冠层伸展的水分胁迫系数曲线的形状因子	5.50	—
Kssto.upper	气孔控制:土壤水分耗竭阈值上限阈值	0.60	—
Kssen.upper	冠层衰老的土壤水分耗竭因子上限阈值	0.70	—
Ppol.upper	授粉土壤水分耗竭因子上限阈值	0.80	—
	衰老应激系数曲线形状	2.50	
	叶片膨胀应力系数曲线形状	5.00	

1.4.3 土壤模块 将表 3 土壤基本参数输入 AquaCrop 模型,并建立当前试验地土壤模块。

表 3 土壤基本参数

土层深度/cm	颗粒质量分数/%			土壤含盐量/ (g · kg ⁻¹)	容重/ (g · cm ⁻³)	饱和 含水率/%	田间 持水量/%	萎蔫 系数/%
	沙	粉状土	黏土					
0—20	57.33	34.32	8.35	8.23	1.37	39.23	26.48	13.01
20—40	55.39	36.96	7.65	10.68	1.40	38.54	27.68	14.29
40—60	54.12	36.80	9.08	10.48	1.45	37.11	28.11	14.49
60—80	44.11	48.12	7.77	9.11	1.46	38.21	28.98	14.64
80—100	48.26	41.45	10.29	7.51	1.43	38.69	26.32	13.65

注:表中饱和含水率、田间持水量和萎蔫系数均为土壤体积含水率。

1.4.4 模型评价 模型性能评估是模型验证的重要环节,模型评估使用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、标准均方根误差(NRMSE)、拟合度指数(d)和 Nash 效率系数(NSE)对模拟结果进行评价,计算公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \times 100 \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (9)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

式中: P_i 和 O_i 分别为模拟值和实测值; \bar{P} 和 \bar{O} 分别为模拟值和实测值的均值; n 为实测次数。

1.4.5 灌溉制度探索 为进一步探索适宜的灌溉制度,Aquacrop 模型作物模块使用 2021—2022 年率定过的作物参数,土壤模块使用当前试验田土壤数据,气象模块采用 2022 年气象参数,设计 15(5×3)种情景进行模拟,灌水定额 I1、I2、I3、I4、I5 分别为 540,600,660,720,780 mm,灌水次数 N1、N2、N3 分别为 8,11,14 次。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉定额对水分利用效率和灌溉水利用率的影响

从表 4 可以看出,随着灌溉定额增加,香梨的水分利用效率和灌溉水利用率均降低,且 2 年的观测结果一致。Y1W2 处理水分利用效率比 Y1W1 处理降低 11.31%,Y1W3 处理水分利用效率比 Y1W2 处理降低 9.96%,Y1W2 处理灌溉水利用率比 Y1W1 处理降低 22.47%,Y1W3 处理灌溉水利用率比 Y1W2 处理降低 11.25%,2022 年不同处理表现一致。灌溉定额条件相同时,2022 年香梨水分利用效率和灌溉水利用率高于 2021 年,在灌溉定额同为 5 250 m³/hm²时,Y2W2 处理香梨水分利用效率和

灌溉水利用效率高出 Y1W1 处理,这一现象在 Y1W2、Y2W3 处理也均有体现。

表 4 2021 年、2022 年水分利用效率和灌溉水利用率

年份	处理	水分利用效率/灌溉水利用率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹) (kg · m ⁻³)	
		水分利用效率/ (kg · hm ⁻² · mm ⁻¹)	灌溉水利用率/ (kg · m ⁻³)
2021	Y1W1	11.31a	1.09c
	Y1W2	10.16d	0.89e
	Y1W3	9.24e	0.80f
2022	Y2W1	11.76b	1.40a
	Y2W2	11.43c	1.11b
	Y2W3	10.19d	0.91d

2.2 AquaCrop 模型率定

采用 2021 年不同处理的冠层覆盖度、土壤含水量和作物蒸散强度试验数据对 AquaCrop 模型参数校正(表 5),Y1W2 处理冠层覆盖度拟合效果最佳, R^2 、RMSE、NRMSE(%)、 d 和 NSE 分别为 0.92,8.80,14.37%,0.99 和 0.75;Y1W1 处理土壤含水量和 ET_a 拟合精度较高,土壤含水量评价指标 R^2 、RMSE、NRMSE(%)、 d 和 NSE 分别为 0.93,8.69,7.59,0.93 和 0.90, ET_a 评价指标 R^2 、RMSE、NRMSE(%)、 d 和 NSE 分别为 0.47,1.52,49.26,0.78 和 0.39。3 种处理结果综合表明,AquaCrop 模型的模拟值与实测值符合拟合标准,可以用校正后参数模拟香梨生长发育过程一些重要指标。

2.3 AquaCrop 模型验证结果

2.3.1 AquaCrop 模型冠层覆盖度模拟 利用 2021 年数据校准 AquaCrop 模型后的参数,对 2022 年冠层覆盖度实测数据进行验证(图 2),评价指标 $R^2 \geq 0.91$,RMSE 为 8.11%~9.56%,NRMSE 为 12.71%~16.09%, $d \geq 0.97$,NSE 为 0.72~0.77,通过对比 2021 年校正数据(表 4),2022 年不同处理模拟效果优于 2021 年。

2022 年香梨冠层覆盖度模拟与实测结果(图 2)表明,4,5 月是冠层覆盖度增长最快的时期,Y2W1 处理冠层盖度在 9 月中旬出现骤降现象,Y2W2、Y2W2 处理冠层盖度在 6—8 月实测值高于模拟值。从返春到最大冠层覆盖度与灌溉量呈现正相关关系,Y2W1、Y2W2 和 Y2W3 最大冠层覆盖度实测值分别为 64.98%,69.22%

和 74.67%, AquaCrop 模型中 Y2W1、Y2W2 和 Y2W3 模拟值分别为 63.87%、65.36% 和 72.00%。

表 5 AquaCrop 模型校正指标

评价指标	Y1W1			Y1W2			Y1W3		
	冠层 覆盖度/%	土壤含水量/ mm	ET_a / (mm · d ⁻¹)	冠层 覆盖度/%	土壤含水量/ mm	ET_a / (mm · d ⁻¹)	冠层 覆盖度/%	土壤含水量/ mm	ET_a / (mm · d ⁻¹)
R^2	0.90	0.93	0.47	0.92	0.92	0.43	0.89	0.78	0.41
RMSE	10.22	8.69	1.52	8.80	16.58	1.45	11.06	16.44	1.61
NRMSE/%	17.25	7.59	49.26	14.37	8.68	47.56	16.98	10.36	50.68
d	0.98	0.93	0.78	0.99	0.98	0.76	0.98	0.92	0.89
NSE	0.73	0.90	0.39	0.75	0.79	0.12	0.71	0.91	0.17

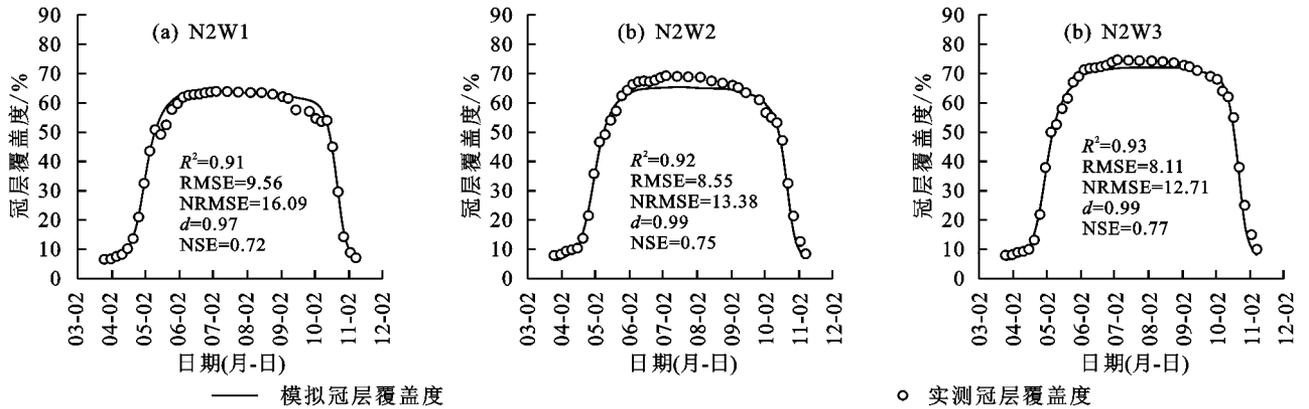


图 2 2022 年冠层模拟值与实测值

2.3.2 AquaCrop 模型土壤含水量模拟 关于 AquaCrop 模型土壤含水量模拟(图 3 与表 4), 2021 年、2022 年统计参数 d 分别为 0.92~0.98, 0.97~0.98, NSE 分别为 0.79~0.91, 0.90~0.93, NRMSE 分别为 7.59%~10.36%, 3.16%~5.74%, 说证明模型具有可行性, 表现出土壤水分的动态变化。

灌溉量因素对模型模拟结果表现两极分化的现象, 2022 年灌溉量最低的 Y2W1 处理 R^2 达到 0.96, 灌溉量最高的 Y2W3 处理 R^2 低至 0.76, 表明灌溉定额越低, 拟合程度越高, 反之则拟合程度较低, 2021 年 Y1W1 处理与 Y1W3 处理也证明这一现象。灌溉量相同条件下, 2021 年 Y1W1、Y1W3 处理的 R^2 分别为 0.93, 0.92, 远高于 2022 年的 Y2W2、Y2W3 处理的 R^2 。

土壤含水量模型模拟结果与实测结果中, Y2W1 处理只有在 7、8 月大部分时间内高于田间持水量, 此期间灌水量占到全生育期灌溉定额的 64.81%, 过低的灌溉定额不利于土壤含水量。Y2W2 处理在 5 月 20 日至收获期土壤含水量基本高于田间持水量, 证明香梨果实迅速膨大期以及之后生育期基本不会受到水分胁迫。Y2W3 处理只有在 4 月 6 日至 5 月 19 日土壤含水量略微低于田间持水量, 灌溉定额整体增加, 影响全生育期的土壤含水量。

Y2W1、Y2W2 和 Y2W3 处理单次最高灌溉量对应数值分别为 63, 89, 114 mm, 模型对此响应迅速, 土壤含水量曲线陡直上升, 灌前模拟值与实测值相差 0.78~8.21 mm, 灌后模拟值与实测值相差 4.98~23.3

mm, Y2W3 处理灌前灌后差值均高于其余处理。

2.3.3 AquaCrop 模型 ET_a 模拟 关于 ET_a 模拟模型的验证(图 4、表 4), 2021 年、2022 年统计参数 R^2 分别为 0.41~0.47, 0.38~0.42, 对于灌溉定额相同的 N1W1、N2W2 和 N1W2、N2W3 处理对应的 RMSE 分别为 1.52, 1.21 mm/d 和 1.45, 1.34 mm/d, 2022 年 ET_a 模拟曲线略差 2021 年, 但模拟数值准确性高于 2021 年。

2022 年 3 月 25 日至 10 月 15 日香梨 ET_a 呈现单高峰趋势, 3 种处理在 3 月 25 日至 4 月 10 日模拟与实测平均 $ET_a \leq 2$ mm/d, 3 种处理在 4 月 25—30 日均出现极大值(4.10~5.7 mm/d), 5—6 月上旬香梨 ET_a 变化范围为 2.5~3.6 mm/d, 6 月中下旬香梨 ET_a 出现短暂下降现象, 7、8 月香梨 $ET_a \geq 4.17$ mm/d, 9 月中上旬香梨 $ET_a \geq 2.5$ mm/d, 9 月下旬香梨 ET_a 逐渐下降。

灌溉定额单一因素下, 3 种处理的 ET_a 模拟只有数值差距, 而整体曲线走势基本一致, 7、8 月是当地全年气温最高峰、净光合辐射最强时期, 此时 ET_a 模拟值与实测值均为全年最高。2022 年 Y2W1 处理在 7 月 25 日 ET_a 实测值与模拟值分别为 5.48, 6.1 mm/d, Y2W2 处理 7 月 26 日 ET_a 实测值与模拟值分别为 6.15, 7.01 mm/d, Y2W3 处理 7 月 28 日 ET_a 实测值与模拟值分别为 6.59, 7.25 mm/d。

2.3.4 AquaCrop 模型产量的模拟 2021 年 Y1W2、Y1W3 处理实测产量分别为 5 897, 5 887.11 kg/hm², 灌溉定额增加时产量并没有增加, 而 2022 年 Y2W1、

Y2W2、Y2W3 处理实测产量随灌溉定额依次增加，Y2W3 处理实测产量为 6 114.84 kg/hm²，模拟产量为 6 198.15 kg/hm² (图 5)。模拟值与实测值差值 < 5.80%，故可以用于对产量预测。

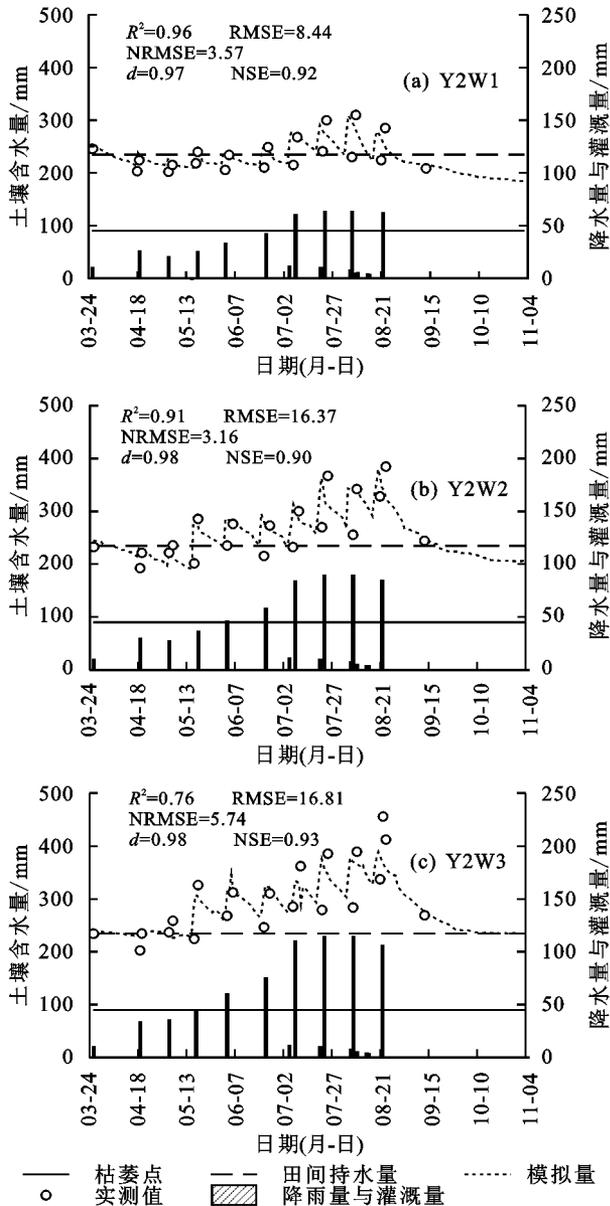


图 3 2022 年土壤含水量模拟值与实测值

2.4 AquaCrop 模型不同场景模拟结果

利用模型对不同灌溉定额与灌溉周期 15 种方案进行模拟 (表 6): 灌溉定额为 5 400 m³/hm² 时, 香梨产量、灌溉水利用效率与灌水次数呈正相关, 灌水周期为 14 天时水分利用效率最高, 为 11.31 kg/(hm² · mm); 灌溉定额为 6 000 m³/hm² 时, 灌溉周期 14 天时产量最高, 为 6 736.45 kg/hm², 灌溉周期 11 天时水分利用效率最高, 为 12.14 kg/(hm² · mm); 灌溉定额为 6 600 m³/hm² 时, 灌溉周期 14 天时产量、灌溉水利用效率最高, 分别为 6 768.25 kg/hm² 和 1.13 kg/m³, 灌溉周期为 11 天时水分利用效率最高, 为 11.24 kg/(hm² · mm); 灌溉定额为 7 200 m³/hm² 时, 灌溉周期 14 天时产量、

水分利用效率和灌溉水利用效率最高, 分别为 6 793.62 kg/hm², 10.90 kg/(hm² · mm) 和 1.03 kg/m³; 灌溉定额为 7 800 m³/hm² 时, 灌溉周期 14 天时产量、水分利用效率和灌溉水利用效率最高, 分别为 6 781.22 kg/hm², 10.04 kg/(hm² · mm) 和 0.94 kg/m³。综上模拟结果, 考虑到水资源消耗量、田间农户工作量, 推荐 S11 方案, 即灌溉定额为 7 200 m³/hm², 灌水周期 14 天, 灌水次数 11 次。

3 讨论

3.1 不同灌溉定额对产量、水分利用效率、灌溉水利用效率的影响

本研究中灌溉定额为 3 750 m³/hm² 时, 土壤含水量偏低是影响产量的主要原因, 灌溉定额增加时, 产量有一定幅度上升, 灌溉定额 6 750 m³/hm² 时产量最高, 适宜的灌溉定额提高香梨产量, 但灌溉定额达到 8 250 m³/hm² 时, 产量反而降低, 此时土壤含水量偏高, 影响香梨根系呼吸是产量降低的原因, 这与张健利等^[16] 研究结果一致。影响香梨水分利用效率和灌溉水利用效率的主要因素包括灌溉定额与产量, 灌溉定额与产量之间并不是单一的线性关系, 灌溉定额增加必然造成香梨耗水量增加, 但其水分利用效率和灌溉水利用效率却减少, 其原因是产量与耗水不呈正比。

3.2 AquaCrop 模型适用性

模型适用性应当从 R²、RMSE、NRMSE、d 和 NSE 等指标进行评价, 这些评价指标在冠层覆盖度、土壤含水量和 ET_a 方面表现并不一致, AquaCrop 模型对 2 年香梨冠层覆盖度试验数据验证及模拟精度最高, 对土壤含水量和 ET_a 只有中等模拟效果。

本试验中冠层覆盖度 AquaCrop 模型模拟值与实测值不同处理 R² 变化范围为 0.89~0.93, RMSE 为 8.11%~11.06%, NRMSE 为 12.71%~17.25%, d 为 0.97~0.99, NSE 为 0.71~0.77。实测冠层覆盖度平滑程度低于模拟程度, 因模型是自然生长模拟, 没有加入定期修剪枝叶等相关设定; 实测冠层覆盖度在 5、6 月出现过降低现象, 这是农户修剪枝条与机械除草导致的叶面积减少原因; Y2W1 处理 9 月出现冠层覆盖度骤降现象, 原因是土壤含水量过低, 导致部分叶片过早脱落。AquaCrop 模型的马铃薯^[17]、大豆^[18] 和樱桃番茄^[19] 冠层覆盖率模拟精度高于本试验的模拟精度, 原因不仅包括农户在 5、6 月修剪枝条, 还包括一年草本植物冠层覆盖度生长速度高于多年生的木本植物, 草本植物生长周期短于木本植物。

本试验中土壤含水量 2 年模拟值与实测值 R² 变化范围为 0.76~0.96, RMSE 为 8.44~16.81 mm, NRMSE 为 3.16%~10.36%, d 为 0.92~0.98, NSE 为

0.79~0.93。Zhai 等^[20]采用 AquaCrop 模型模拟冬小麦咸水灌溉,土壤体积含水量统计参数 $R^2 > 0.85$, NRMSE $< 12.95\%$; Masasi 等^[21]用 AquaCrop 模型预测有限灌溉定额下土壤含水量的误差 Pe 为 $3\% \sim 10\%$, 灌溉定额

增加导致土壤含水量上升,但灌溉定额与土壤含水量并不是简单的正线性关系,气温、土壤颗粒的不均匀性是影响土壤含水量的重要因素,这是造成 AquaCrop 模型土壤水分模拟精度低的原因。

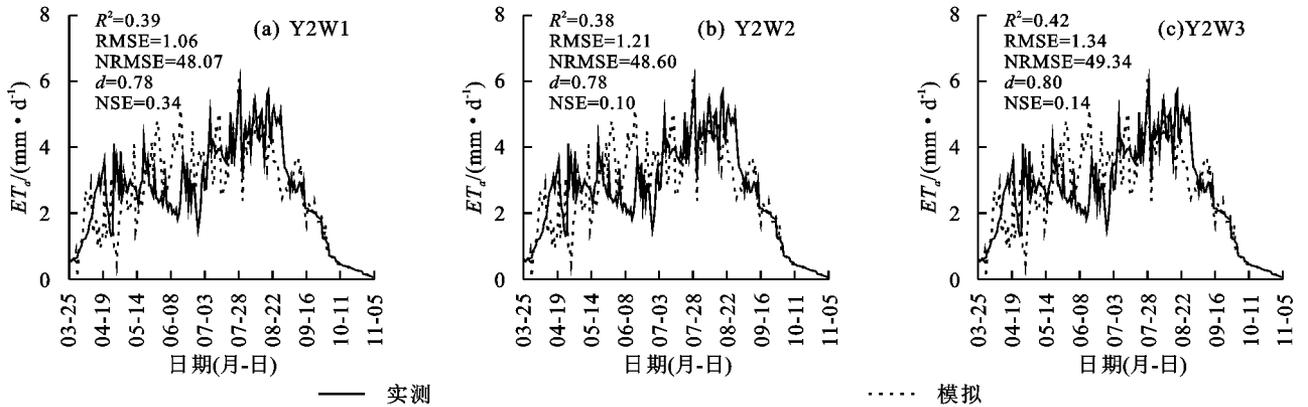


图 4 2022 年香梨耗水量模拟值与实测值

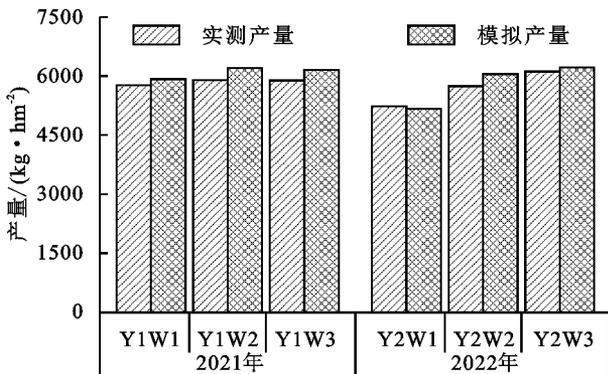


图 5 2021 年、2022 年实测产量和模拟产量

本试验中 2 年模拟值与实测值 ET_c 的 R^2 整体在 $0.38 \sim 0.47$ 范围内浮动, RMSE 为 $1.06 \sim 1.61$ mm/d, d 为 $0.76 \sim 0.89$, 模拟 ET 总值与实测 ET 总值差值 < 80 mm。4 月下旬、8 月下旬实测 ET_c 出现极大值,前者原因是 4 月 9—16 日日均气温达到 $21.78 \sim 25.75$ °C,日最高气温达到 $31.66 \sim 37.73$ °C, 高气湿

加剧香梨蒸腾作用,而对于后者主要原因是香梨此时处于果实品质提升的时期,香梨甜度、可溶性固形物等参数都在此时期形成。Wu 等^[22]验证 AquaCrop 模型玉米 ET 的准确性和适用性;Bello 等^[23]得出 AquaCrop 模型苋菜 ET 的 R^2 为 0.91 , RMSE 为 75.64 mm, d 为 0.91 。7 月下旬与 8 月香梨实际耗水高于 FAO 标准,吐鲁番葡萄、骏枣、苹果等也发生类似情况,其原因是新疆独特的“三山夹两盆”地势、长光照和昼夜温差等因素,在以后试验中需额外考虑地理环境的影响。AquaCrop 模型易受气温、降雨等气象因素影响,虽然不能准确模拟出 ET_c ,但可用作估算 ET 总值的工具。在干旱区与半干旱区利用模型对现有灌溉计划进行优化是重要方式,由于气候、环境与管理等因素差异, AquaCrop 模型需对不同指标综合考虑,在应用于不同地域时,未来可在收获指数(HI)和水分生产力(WP)计算公式中可引入温度关于 ET_c 一阶导数。

表 6 AquaCrop 模型不同场景模拟结果

模拟方案	灌溉定额/ ($m^3 \cdot hm^{-2}$)	灌水 周期/天	灌水 次数/次	产量/ ($kg \cdot hm^{-2}$)	ET / mm	水分利用效率/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)	灌溉水利用效率/ ($kg \cdot m^{-3}$)
S1	5400	18	8	6029.25	551.65	10.72	1.26
S2	5400	14	11	6268.75	562.69	11.31	1.31
S3	5400	11	14	6483.02	554.41	10.84	1.35
S4	6000	18	8	6656.93	598.12	11.00	1.23
S5	6000	14	11	6736.45	604.96	12.07	1.25
S6	6000	11	14	6733.03	597.82	12.14	1.25
S7	6600	18	8	6571.22	621.99	10.99	1.10
S8	6600	14	11	6768.25	623.30	11.19	1.13
S9	6600	11	14	6721.22	606.74	11.24	1.12
S10	7200	18	8	6531.67	666.90	10.50	0.99
S11	7200	14	11	6793.62	675.14	10.90	1.03
S12	7200	11	14	6553.51	663.67	10.80	0.99
S13	7800	18	8	6654.38	658.12	9.98	0.92
S14	7800	14	11	6781.22	664.96	10.04	0.94
S15	7800	11	14	6620.14	667.82	9.98	0.92

综上所述, AquaCrop 模型满足香梨在冠层覆盖度、土壤含水量和 ET_c 等方面的模拟, 不同作物对于 AquaCrop 模型参数要求不一致, 本试验中最大冠层覆盖度为 68%, 标准水分生产力 17 g/m^2 , 参考收获参数 45%。

3.3 AquaCrop 模型不同场景灌溉制度

AquaCrop 模型符合作物生长过程动态模拟时, 最终产量是反映灌溉计划合理性。AquaCrop 模型对于产量模拟效果与实测结果有一定差异性: 本试验中, 土壤参数等重要指标误差导致实测结果偏离正确值^[24], 甚者, 如香梨“午休”现象也是必要考虑因素; 模型模拟数值完全归于公式^[25], 模块中重要参数微小改动对最终输出的改动性, 实际中突发事件并未体现于模型模拟过程。

AquaCrop 模型推荐香梨的地表灌溉制度为 S11 方案(滴灌定额为 $7\ 200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌水周期 14 天, 灌水次数 11 次), 灌水主要集中于每年 7、8 月, 综合考虑产量、水分利用效率与灌溉水利用效率因素, 预测结果比当地漫灌可节水 $2\ 000\sim 2\ 500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。AquaCrop 模型未考虑一些实际中以外的假设试验和模拟之间的差异, 例如, AquaCrop 模型模拟中做出假设的准确性, 树龄逐年增长、根系深扎、冠层扩幅等因素值得未来探索。

4 结论

(1) AquaCrop 模型模拟冠层覆盖度 $R^2 \geq 0.91$ 和 $d \geq 0.97$; 土壤含水量 R^2 为 $0.76\sim 0.96$; 生育期 ET 模拟总值与实测总值差值 $< 80 \text{ mm}$, AquaCrop 模型可以用于香梨的生长模拟。

(2) 灌溉定额适度增加会促进最大冠层覆盖度, 实测冠层覆盖度平滑程度低于模拟程度; 灌溉定额较低时, 土壤含水量模拟结果表现优秀; 高温依旧是影响香梨 ET_c 的最重要因素, 7、8 月是香梨灌溉的最重要时期。

(3) AquaCrop 模型对不同设定情景进行模拟预测, 综合考虑产量、水分利用效率和灌溉水效率, 推荐地表滴灌灌溉定额为 $7\ 200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌水周期 14 天, 灌水次数 11 次。

参考文献:

- [1] 王红瑞, 李一阳, 杨亚锋, 等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 18-25.
- [2] 新疆维吾尔自治区统计局[EB/OL]. (2022-03-02)[2023-02-02]. <http://tjj.xinjiang.gov.cn/>.
- [3] 曹鹏飞, 刘泽星, 陈梅, 等. 新疆兵团滴灌技术应用现状、问题与推广启示[J]. 水利发展研究, 2022, 22(5): 114-119.
- [4] 罗长莲, 冯雷, 柴仲平, 等. 新疆地区农业水资源可持续利用对策研究[C]//2022(第十届)中国水生态大会论文集. 南阳, 2022: 560-569.
- [5] 巴音郭楞蒙古自治州库尔勒香梨产业高质量发展促进

条例[N]. 巴音郭楞日报(汉), 2022-06-13(3).

- [6] 巴音郭楞蒙古自治州生态环境保护委员会办公室. 2021 年巴音郭楞蒙古自治州生态环境状况公报[N]. 巴音郭楞日报(汉), 2022-06-06(4).
- [7] 柴东波, 王建平. 我州制定地方性法规促进库尔勒香梨产业发展[N]. 巴音郭楞日报(汉), 2022-06-07(2).
- [8] 马建江, 李亚兵, 谢红江. 库尔勒香梨省力化栽培模式存在问题与建议[J]. 西北园艺(果树), 2022(5): 14-15.
- [9] 周海霞. “库尔勒香梨”品牌价值为 161.20 亿元[N]. 巴音郭楞日报(汉), 2022-10-03(2).
- [10] 晏清洪, 王伟, 任德新, 等. 不同微灌方式对成龄库尔勒香梨生长及耗水规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 86-89, 99.
- [11] 刘洪波, 张江辉, 白云岗, 等. 滴灌条件下库尔勒香梨耗水特征分析[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2206-2211.
- [12] Abedinpour M. The comparison of DSSAT-CERES and AquaCrop Models for wheat under water-nitrogen interactions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(17): 2002-2017.
- [13] Amiri E, Bahrani A, Irmak S, et al. Evaluation of irrigation scheduling and yield response for wheat cultivars using the AquaCrop model in an arid climate[J]. Water Supply, 2022, 22(1): 602-614.
- [14] 刘延雪, 乔长录. 干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散发[J]. 干旱区研究, 2023, 40(1): 152-162.
- [15] 崔颖, 蔺宏宏, 谢云, 等. AquaCrop 模型在东北黑土区作物产量预测中的应用研究[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 159-168.
- [16] 张健利, 王振华, 陈睿, 等. 灌水量和生物有机肥对滴灌枣田水盐动态及土壤养分属性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 323-331.
- [17] Wang H D, Cheng M H, Liao Z Q, et al. Performance evaluation of AquaCrop and DSSAT-SUBSTOR-Potato models in simulating potato growth, yield and water productivity under various drip fertigation regimes[J]. Agricultural Water Management, 2023, 276: e108076.
- [18] Adeboye O B, Schultz B, Adekalu K O, et al. Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max* L. merr) in Ile-Ife, Nigeria[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 1130-1146.
- [19] Cheng M H, Wang H D, Fan J L, et al. Evaluation of AquaCrop model for greenhouse cherry tomato with plastic film mulch under various water and nitrogen supplies[J]. Agricultural Water Management, 2022, 274: e107949.
- [20] Zhai Y, Huang M Y, Zhu C L, et al. Evaluation and application of the AquaCrop Model in simulating soil salinity and winter wheat yield under saline water irrigation[J]. Agronomy, 2022, 12(10): e2313.

(下转第 344 页)

- 年干旱时空演变特征[J].水土保持学报,2022,36(2):181-188,196.
- [2] 杨艳颖,毛克彪,韩秀珍,等.1949—2016年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响[J].中国农业信息,2018,30(5):76-90.
- [3] 游漫,贺中华,张浪,等.贵州省农业与气象干旱特征及其响应关系[J].水土保持学报,2022,36(5):255-264.
- [4] 马梓策,孙鹏,姚蕊,等.内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):231-240.
- [5] 黄进,王锦旗,张方敏.基于 H-P 滤波的我国粮食主产区农业干旱时空特征解析[J].水电能源科学,2022,40(9):18-22.
- [6] 田志会,李晓雪.基于灾情的中国粮食主产区旱灾变化周期研究[J].灾害学,2020,35(1):38-43.
- [7] 倪深海,王亨力,刘静楠,等.中国农业干旱灾害特征及成因分析[J].中国农学通报,2022,38(10):106-111.
- [8] 鲁洪威,马释宇,李婷婷,等.基于 EMD 模型的我国马铃薯产量波动及其成因的时空研究[J].中国农业资源区划,2021,42(2):109-119.
- [9] 刘忠,黄峰,李保国.基于经验模态分解的中国粮食单产波动特征及影响因素[J].农业工程学报,2015,31(2):7-13.
- [10] 田宏伟,邢开成,黄进,等.近 30 年河南省夏玉米的气象年景波动对大气环流的响应[J].江苏农业学报,2020(6):1437-1443.
- [11] 王金峰,闫东伟,鞠金艳,等.基于经验模态分解与 BP 神经网络的农机总动力增长预测[J].农业工程学报,2017,33(10):116-122.
- [12] 张计深,陈笑蝶,彭守璋.2001—2100 年中国温度变化趋势及时空差异研究[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(12):112-124.
- [13] 武建军,耿广坡,周洪奎,等.全球农业旱灾脆弱性及其空间分布特征[J].中国科学:地球科学,2017,47(6):733-744.
- [14] 梁圆,千怀遂,张灵.中国近 50 年降水量变化区划(1961—2010 年)[J].气象学报,2016,74(1):31-45.
- [15] 王澄海,李健,许晓光.中国近 50 年气温变化准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J].高原气象,2012,31(1):126-136.
- [16] 康蕾,张红旗.中国五大粮食主产区农业抗旱能力综合评价[J].资源科学,2014,36(3):481-489.
- [17] 路畅,马龙,刘廷玺,等.1951—2018 年中国年降水量及气象干旱的时空变异[J].应用生态学报,2022,33(6):1572-1580.
- [18] 黄进,林彬,徐兴祝,等.我国粮食主产区农业水灾波动特征对环流异常的响应[J].水电能源科学,2022,40(12):22-25.
- [19] 吕娟,苏志诚,屈艳萍,等.我国抗旱减灾体系建设与成就[J].中国防汛抗旱,2019,29(10):10-15.
- [20] 张强,姚玉璧,李耀辉,等.中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J].气象学报,2020,78(3):500-521.
- [21] 赵鸿,王润元,尚艳,等.粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J].干旱气象,2016,34(1):1-12.
- [22] 万能涵,杨晓光,刘志娟,等.气候变化背景下中国主要作物农业气象灾害时空分布特征(Ⅲ):华北地区夏玉米干旱[J].中国农业气象,2018,39(4):209-219.
- [23] 叶帮苹,张小丽,王雅琦,等.1961—2020 年青藏高原日照时数时空演变特征[J].应用与环境生物学报,2022,28(4):851-858.
- [24] 肖风劲,张旭光,廖要明,等.中国日照时数时空变化特征及其影响分析[J].中国农学通报,2020,36(20):92-100.
- [25] 崔童,张若楠,郝立生,等.华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J].大气科学,2022,46(4):903-920.
- [26] 施春华,孙伟佳,郭栋.WP 和 NAO 对中国东南部冬季温度的协同影响[J].大气科学学报,2021,44(3):394-404.
- [27] 武玮辰,魏凤英,王亚强,等.基于机器学习的中国冬季气温影响因子分析及模型估算[J].气象学报,2023,81(1):163-174.

(上接第 336 页)

- [21] Masasi B, Taghvaeian S, Gowda P H, et al. Simulating soil water content, evapotranspiration, and yield of variably irrigated grain sorghum using AquaCrop[J].Wiley,2019,55(4):976-993.
- [22] Wu H, Yue Q, Guo P, et al. Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules[J].Agricultural Water Management,2022,266:e107599.
- [23] Bello Z A, Walker S. Evaluating AquaCrop model for simulating production of amaranthus (*Amaranthus cruentus*) a leafy vegetable, under irrigation and rainfed conditions[J].Agricultural and Forest Meteorology,2017,247:300-310.
- [24] El M F, Nagaz K, Masmoudi M M, et al. Management practices assessment using aquacrop model for growing barley under saline conditions of the arid regions of Tunisia[J].Journal of Animal and Plant Sciences,2022,32(4):1053-1061.
- [25] 时荣超,佟玲,杜太生,等.改进 AquaCrop-KR 模拟不同水分和种植密度制种玉米产量[J].农业工程学报,2022,38(15):63-71.