

基于 AquaGIS 模型的盈科灌区制种玉米 农业用水效率分析

韩聪颖^{1,2}, 张宝忠^{1,2}, 刘钰^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 盈科灌区是黑河流域中游绿洲典型灌区之一, 该灌区农业用水效率较低, 农业用水矛盾十分突出。制种玉米是灌区主要种植作物, 研究制种玉米的优化灌溉制度对实现该区域农业用水可持续发展具有十分重要的意义。利用分布式作物模型 AquaGIS 模型, 基于盈科灌区土壤质地的空间变异性对该灌区制种玉米灌溉制度进行了优化, 提出了适合灌区实际配水情况的最佳灌溉制度。通过灌溉制度优化, 灌区制种玉米蒸散发量减少 36 ~ 53 mm, 水分生产率 WP_{ET} 增加 5% 左右, 灌溉水生产率 WP_I 增加 25% ~ 48%, 极大地提高了灌区农业用水效率。同时, 对该灌区不同水文年灌溉制度进行优化, 综合对比灌区制种玉米 WP_{ET} 、 WP_I 和产量, 其中丰水年灌溉 3 次、平水年灌溉 4 次、枯水年灌溉 5 次可以实现农业用水效率最高, 为灌区高效节水灌溉提供理论指导。

关键词: 分布式作物模型; 农业用水效率; 灌溉制度优化; 水文年; 制种玉米

中图分类号: S274.1; S513

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0248-06

Analysis of agricultural water use efficiency of seed maize in Yingke Irrigation District based on AquaGIS Model

HAN Congying^{1,2}, ZHANG Baozhong^{1,2}, LIU Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China

Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. National

Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research - Beijing, Beijing 100048, China.)

Abstract: Yingke Irrigation District (YID) is one of the typical irrigation district in the middle oasis of Heihe River Basin. With the low agricultural water use efficiency, the contradiction between the supply and requirement of agricultural water use is outstanding. The maize for seed is the main crop in YID, and it is of great significance to study the optimized irrigation system for the production of seed maize for the sustainable development of agricultural water in the region. In this paper, the irrigation system of maize for seed was optimized based on the AquaGIS model and the spatial variability of soil texture in YID, and the best irrigation system suitable for the actual condition in YID were proposed. Through the optimization of irrigation system, the evapotranspiration of maize for seed in YID reduced from 36 mm to 53 mm, the water productivity (WP_{ET}) increased by 5%, and the irrigation water productivity (WP_I) increased by 25% - 48%, which greatly improved the agricultural water use efficiency of the irrigation area. At the same time, the irrigation system of different hydrological years in the irrigation district was optimized. Comprehensively comparing the WP_{ET} , WP_I and yield of maize for seed, the optimal irrigation system for different hydrological years was proposed, that is, three times for wet years, four times for normal years and five times for drought years, providing theoretical guidance for high efficiency water saving irrigation in YID.

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(91425302); 水利部公益性行业科研专项(201501016)

作者简介: 韩聪颖(1987-), 女, 河南濮阳人, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者: 张宝忠(1981-), 男, 山西太原人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。

Key words: distributed(AquaGIS) model; agricultural water efficiency; irrigation system optimization; hydrological years; seed maize

1 研究背景

我国农业用水效率仅为40%左右^[1],灌溉水利用系数仅为0.53,远低于欧洲发达国家。不合理灌溉是造成农业低效用水的主要原因之一。提高田间农艺管理措施,包括制定合理的灌溉制度是提升灌区灌溉水利用效率的重要途径。为此,一些学者^[2-4]尝试对作物灌溉制度进行了优化,极大地提高了水分生产率。由于作物模型可重复性比较强,已经成为农业研究的重要工具。利用作物模型进行灌溉制度优化已经被广泛应用到农业生产中^[5-7]。但是这些优化仅限于田间尺度,作物生长环境比较单一。随着作物生长环境,尤其是土壤质地的空间变异性,作物最佳灌溉制度也会产生一定的空间差异。利用作物模型,结合作物生长环境的空间变异性对灌溉制度进行空间优化具有很大的现实意义。

鉴于此,学者们对如何将田间点模型进行区域应用展开了初步探索。Hansen等^[8]提出了通过增加模型输入数据取样点密度,例如通过增加土壤质地采样点数目,减小模型区域模拟的误差,但是此方法仅限于在小尺度范围进行研究。Saarikko^[9]将芬兰地区划分为10 km×10 km的栅格,在每个栅格内利用CERES-Wet-Wheat模型结合有限输入数据,对小麦产量在不同气候条件下进行估测。以上模型区域应用方法减小了传统模型以点带面带来的误差,但是受输入数据尤其是土壤数据空间连续性的限制,区域模拟误差仍然很大。并且受空间环境变异性、输入数据复杂性等影响,一些作物模型如ASPIM等^[10]、CROPSYST等^[11]、DSSAT等^[12]、WOFOST等^[13]的区域应用受到很大限制。

为此,世界粮农组织(FAO)研发了AquaCrop模型^[14-15],并且为促进AquaCrop模型在区域尺度的应用,FAO又开发了AquaData和AquaGIS模型^[16],为初步实现输入数据和输出数据的空间差异性划分提供平台。该模型输入参数比较少,输入数据直观且易获取,因此得到了快速而广泛的发展^[17]。AquaCrop模型和遥感数据的耦合为模型区域应用提供了新的研究思路^[18]。中国科学院南京土壤研究所等相关单位完成了全国土壤数据库建设,该数据基本覆盖了全国各种类型土壤及其主要属性特征,这一成果在很大程度上解决了该模型进行区域

应用时土壤质地数据空间连续性的难题。目前,利用该分布式模型进行区域应用的研究尚少,Lorite等^[16]利用该模型对西班牙南部安达卢西亚地区过去30年和未来30年气候变化对小麦产量的影响进行了模拟,极大地提高了区域模拟效率。

目前,利用分布式模型对区域作物进行灌溉制度空间优化研究尚少。为此,本文以盈科灌区为研究区域,利用分布式AquaGIS模型和带精英策略的遗传算法NSGA-II对该灌区的制种玉米灌溉制度进行优化,并进一步分析该灌区农业用水效率,为提高盈科灌区农业用水效率提供理论指导。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

盈科灌区位于张掖市甘州区,地理位置38°50′~38°58′N,100°17′~100°34′E。灌区年平均气温6.5~8.5℃,多年平均降雨量133 mm,参考作物年蒸散发量1200 mm左右。灌区内地下水埋深比较大,从西南部的40 m减小为东北部的5 m。盈科灌区占地面积192 km²,其中灌溉面积占比68%。灌区主要种植作物有制种玉米、大田玉米、小麦、蔬菜及其他作物,其中,制种玉米是当地最主要的农作物,种植面积占总种植面积的50%左右。该区域制种玉米采用覆膜种植,平均在4月22日左右播种,9月23日左右收获,全生育期150 d左右,据甘州区水务局统计,灌区制种玉米生育期平均灌溉5次,灌溉制度如表1所示,本文以播种后天数表示灌水时间。本研究于2012年4月-2013年9月在盈科灌区一支渠石桥五斗二农渠进行了田间试验,为模型率定和验证提供基础数据。

表1 盈科灌区制种玉米现状灌溉制度

| 灌水频次 | 灌水时间 (播种后天数) | 灌水定额/ mm |
|------|-----------------|-------------|
| 第1次 | 26 | 124 |
| 第2次 | 44 | 121 |
| 第3次 | 62 | 123 |
| 第4次 | 92 | 118 |
| 第5次 | 123 | 118 |
| 合计 | | 604 |

2.2 数据获取方法

(1) 田间试验采集数据主要包括叶面积指数、地上干物质量、土壤含水率, 数据采集方法详见参考文献[19];

(2) 土壤数据来源于南京土壤研究所, 根据土壤质地栅格数据显示, 盈科灌区不同深度层土壤属性空间差异比较大, 该区 0~30 cm 和 30~100 cm 两个深度层土壤主要为黏壤土、壤土和粉砂壤土

(土壤属性如表 2 所示), 土壤水力学参数利用 Rosetta 软件基于土壤粒径组成进行估算;

(3) 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>), 本文采用张掖站气象资料, 包括日最低气温、日最高气温、平均湿度、平均风速、日照时数、日降雨量;

(4) 灌溉管理资料来源于盈科灌区水管局, 资料显示该灌区平均灌溉 4 次, 全生育期入田水量 604 mm。

表 2 盈科灌区 0~100 cm 深度土壤属性

| 深度 0~30 cm | | | | | 深度 30~100 cm | | | | |
|------------|------|------|------|---|--------------|------|------|------|---|
| 土壤类型 | 砂粒/% | 粉粒/% | 黏粒/% | 饱和导水率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) | 土壤类型 | 砂粒/% | 粉粒/% | 黏粒/% | 饱和导水率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) |
| 黏壤土 | 39 | 29 | 32 | 5.3 | 黏壤土 | 30 | 34 | 36 | 7.3 |
| 壤土 | 35 | 43 | 22 | 13.0 | 壤土 | 35 | 44 | 21 | 13.9 |
| 壤土 | 37 | 46 | 17 | 17.3 | 壤土 | 37 | 42 | 21 | 11.9 |
| 粉砂壤土 | 29 | 50 | 21 | 15.3 | 壤土 | 34 | 45 | 21 | 14.5 |

2.3 AquaGIS 介绍

AquaGIS 模型是 AquaCrop 模型基于作物生长环境的空间差异性进行的集成, 该软件将作物生长环境划分成独立的匀质模拟单元, 对区域内不同的模拟单元进行独立模拟。AquaGIS 模型核心组成是 batch 文件, 该文件集成了模型运行需要的数据结构, 主要包括作物、气象、土壤、灌溉、播种日期、初始条件、田间管理等。软件使用步骤简单介绍如下:

(1) 利用 ArcGIS 将目标区域的空间属性文件, 包括土壤类型、种植结构、灌溉分布、气象等进行叠加, 将目标区域划分成独立的模拟单元, 使模拟单元拥有独立的模拟环境;

(2) 按照 batch 文件的结构, 对每个模拟单元进行模拟环境分配;

(3) 利用率定好的 AquaCrop 模型按照模拟单元的模拟环境生成对应的 .cro 文件, 即作物文件, 这里主要是指肥胁迫参数;

(4) 按照气象文件和土壤文件要求, 整理模型模拟需要的 weather 文件和 soil 文件;

其他操作主要包括: 根据实际情况整理模型需要的初始含水率、地下水文件(由于盈科灌区地下水埋深较大, 所以本研究予以忽略), 播种日期(本研究采用统一播种日期), 田间管理文件。

输入数据准备完成即可运行软件, 对作物生长状况及需耗水规律进行空间模拟。该软件自带的空间分析功能可以对模拟结果进行空间展示。

3 结果分析与讨论

3.1 AquaCrop 模型率定和验证

分别利用 2012 和 2013 年田间试验数据对 AquaCrop 模型进行率定和验证, 以确定适合盈科灌区制种玉米的模型参数, 并选择均方根误差 *RMSE*、标准均方根误差 *NRMSE*、一致性指数 *d* 对率定结果进行评价, 模型率定结果如表 3 所示。结果显示, 冠层覆盖度率定和验证过程的 *RMSE* 分别为 7.5% 和 7.9%, *NRMSE* 分别为 10.2% 和 11.9%, *d* 分别为 0.97 和 0.98; 土壤水储量的 *RMSE* 分别为 18.8 和 40.1 mm, *NRMSE* 分别为 6.2% 和 13.4%, *d* 分别为 0.93 和 0.75。其中, 模型进行验证时, 土壤肥胁迫系数仍然采用的 2012 年率定值, 这与 2013 年实际情况有所出入, 因此导致地上干物质量模拟误差稍微偏大, 其中 *NRMSE* 分别为 21.5% 和 51% 稍有偏高, 但是 *d* 分别达到了 0.97 和 0.86, 模拟结果可以接受。

表 3 AquaCrop 模型率定和验证评价指标

| 评价指标 | 2012 年(率定) | | | 2013 年(验证) | | |
|--------------|------------|--------|-------|------------|--------|-------|
| | 冠层覆盖度 | 地上干物质量 | 土壤储水量 | 冠层覆盖度 | 地上干物质量 | 土壤储水量 |
| <i>RMSE</i> | 7.5 | 2.2 | 18.8 | 7.9 | 4.7 | 40.1 |
| <i>NRMSE</i> | 10.2 | 21.5 | 6.2 | 11.9 | 51.0 | 13.4 |
| <i>d</i> | 0.97 | 0.97 | 0.93 | 0.98 | 0.86 | 0.75 |

注: 冠层覆盖度的单位为%; 地上干物质量的单位为 t/hm^2 ; 土壤储水量的单位为 mm。

3.2 盈科灌区现状年农业用水效率

利用 AquaGIS 模型对盈科灌区 2015 年制种玉米产量和水分生产率进行空间模拟。该灌区 2015 年制种玉米平均产量为 13.31 t/hm²,水分生产率 WP_{ET} 为 2.01 kg/m³,灌溉水生产率 WP_I 仅为 2.21

kg/m³。模拟结果显示,灌区 2015 年制种玉米生育期渗漏量 144 mm,造成了极大的水资源损失。为提高灌区农业用水效率,根据黑河中游绿洲实际配水情况,分别假定灌区配水 3、4、5 和 6 次,并对每种假定分别进行灌溉制度优化,结果如表 4 所示。

表 4 盈科灌区现状年及优化灌溉制度的农业用水效率

| 灌溉情景 | 情景设置 | 灌溉制度 | | | | | | | 灌溉定额 (t·hm ⁻²) | 产量 / (t·hm ⁻²) | ET / mm | WP _{ET} / (kg·m ⁻³) | WP _I / (kg·m ⁻³) |
|--------|---------|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------|----------------------------|---------|--|---|
| | | 播种后天数 | 26 | 44 | 62 | 92 | 123 | 118 | | | | | |
| 优化前 | 现状 | 播种后天数 | 26 | 44 | 62 | 92 | 123 | | | | | | |
| | | 灌水定额/mm | 124 | 121 | 123 | 118 | 118 | | 604 | 13.31 | 660 | 2.01 | 2.21 |
| 优化后 | 灌溉 3 次 | 播种后天数 | 63 | 93 | 118 | | | | 398 | 12.89 | 607 | 2.12 | 3.23 |
| | | 灌水定额/mm | 127 | 139 | 132 | | | | | | | | |
| | 灌溉 4 次 | 播种后天数 | 50 | 68 | 95 | 117 | | | 402 | 13.13 | 620 | 2.12 | 3.27 |
| | | 灌水定额/mm | 75 | 61 | 148 | 118 | | | | | | | |
| | 灌溉 5 次 | 播种后天数 | 49 | 66 | 94 | 113 | 132 | | 438 | 13.17 | 623 | 2.11 | 3.00 |
| | | 灌水定额/mm | 77 | 60 | 109 | 108 | 84 | | | | | | |
| 灌溉 6 次 | 播种后天数 | 48 | 69 | 94 | 110 | 125 | 140 | 477 | 13.18 | 624 | 2.11 | 2.76 | |
| | 灌水定额/mm | 77 | 60 | 90 | 103 | 86 | 61 | | | | | | |

分析可知,灌溉制度优化以后制种玉米产量略有降低,但是减少量均在 5% 以内。灌溉制度优化以后灌溉定额明显减少,蒸散发量减少 36~53 mm,实现了本质意义上的节水,水分生产率 WP_{ET} 增加量在 5% 左右,灌溉水生产率 WP_I 增量达到 25%~48%,极大地提高了农业用水效率。综合优化结果,灌区现状年平均灌溉 4 次灌溉制度最优,灌溉水效率 WP_I 可达到 3.27 kg/m³。

3.3 盈科灌区不同水文年农业用水效率

对张掖水文站(1980-2014)年降雨资料进行降雨频率分析(如图 1 所示),分别得到该站点丰水年(保证率 25%)、平水年(保证率 50%)和枯水年(保证率 75%)的年均降雨量。对应站点不同水文年及对应气象要素如表 5 所示。对盈科灌区不同水文年制种玉米灌溉制度进行优化,并进一步对比分析该灌区不同水文年的农业用水效率,结果如表 6 所示。

对表 5、表 6 进行分析可知,盈科灌区丰水年和枯水年水分生产率 WP_{ET} 基本一致,平均为 2.26~2.29 kg/m³,平水年比较低,为 2.09~2.17 kg/m³。气象数据显示,平水年平均风速达到 2.8 m/s,高于丰水年(1.8 m/s)和枯水年(1.8 m/s),且该水平年平均相对湿度低于丰水年和枯水年,因此平水年 ET

整体偏高。综合对比灌区制种玉米 WP_{ET}、WP_I、产量可知,丰水年灌区最佳灌水次数为 3 次,平水年最佳灌水次数为 4 次,枯水年最佳灌水次数为 5 次。

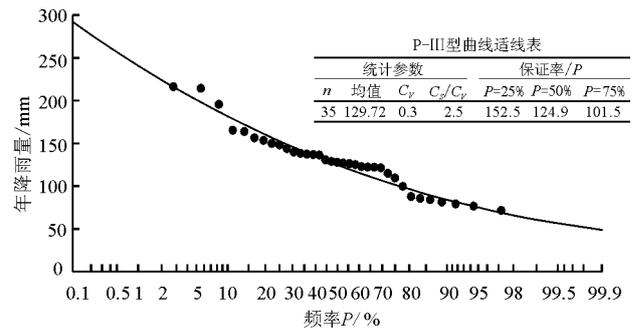


图 1 张掖水文站 1980-2014 年降雨量频率曲线

表 5 张掖水文站不同水文年水文气象要素

| 水文气象要素 | 丰水年 (P = 25%) | 平水年 (P = 50%) | 枯水年 (P = 75%) |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 典型年份 | 2008 | 2013 | 1980 |
| 年降雨量/mm | 154 | 125 | 100 |
| 年日照时数/h | 3052 | 3173 | 3174 |
| 年平均气温/°C | 8.3 | 8.8 | 7.3 |
| 平均风速/(m·s ⁻¹) | 1.8 | 2.8 | 1.8 |
| 年平均相对湿度/% | 51.2 | 43.9 | 51.2 |

表6 盈科灌区不同水文年优化灌溉制度的农业用水效率

| 水文年 | 情景假定 | 灌溉制度 | | | | | 灌溉定额 (t·hm ⁻²) | 产量/ (t·hm ⁻²) | ET/ mm | WP _{ET} / (kg·m ⁻³) | WP _I / (kg·m ⁻³) | | |
|-----|------|--------|----|----|-----|-----|-------------------------------|------------------------------|-----------|---|--|------|------|
| 丰水年 | 灌溉 | 播种后天数 | 49 | 67 | 95 | | | | | | | | |
| | 3次 | 灌水量/mm | 95 | 60 | 219 | | 374 | 13.1 | 574 | 2.28 | 3.50 | | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 54 | 71 | 95 | 122 | | | | | | | |
| | 4次 | 灌水量/mm | 91 | 60 | 124 | 93 | 368 | 13.02 | 568 | 2.29 | 3.48 | | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 51 | 67 | 95 | 114 | 134 | | | | | | |
| | 5次 | 灌水量/mm | 91 | 60 | 101 | 95 | 66 | 413 | 13.09 | 573 | 2.28 | 3.50 | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 45 | 65 | 92 | 109 | 125 | 140 | | | | | |
| | 6次 | 灌水量/mm | 91 | 62 | 96 | 99 | 92 | 63 | 503 | 13.18 | 582 | 2.26 | 3.52 |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 69 | 84 | 111 | | | | | | | | |
| 平水年 | 3次 | 灌水量/mm | 72 | 61 | 168 | | 301 | 12.62 | 580 | 2.17 | 3.37 | | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 64 | 83 | 111 | 133 | | | | | | | |
| | 4次 | 灌水量/mm | 82 | 61 | 138 | 70 | 351 | 13.25 | 615 | 2.15 | 3.54 | | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 57 | 78 | 108 | 123 | 138 | | | | | | |
| | 5次 | 灌水量/mm | 79 | 63 | 64 | 66 | 76 | 348 | 13.2 | 617 | 2.14 | 3.53 | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 36 | 60 | 80 | 110 | 125 | 140 | | | | | |
| | 6次 | 灌水量/mm | 60 | 60 | 60 | 80 | 70 | 61 | 391 | 13.55 | 648 | 2.09 | 3.62 |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 53 | 70 | 95 | | | | | | | | |
| | 3次 | 灌水量/mm | 93 | 60 | 207 | | 360 | 12.99 | 566 | 2.29 | 3.47 | | |
| 枯水年 | 灌溉 | 播种后天数 | 50 | 67 | 95 | 117 | | | | | | | |
| | 4次 | 灌水量/mm | 92 | 60 | 130 | 103 | 385 | 13.12 | 574 | 2.28 | 3.51 | | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 49 | 66 | 95 | 112 | 127 | | | | | | |
| | 5次 | 灌水量/mm | 94 | 60 | 117 | 62 | 60 | 393 | 13.15 | 577 | 2.28 | 3.51 | |
| | 灌溉 | 播种后天数 | 49 | 66 | 95 | 110 | 125 | 140 | | | | | |
| | 6次 | 灌水量/mm | 93 | 60 | 118 | 63 | 77 | 64 | 475 | 13.14 | 578 | 2.27 | 3.51 |

4 结 论

(1) 基于分布式作物模型的灌溉制度优化能够充分考虑作物生长环境因素的空间变异性,尤其是土壤质地的空间变化对灌溉制度的影响,能够更加合理地制定出适合目标区域的灌溉制度,最大限度地提高区域农业用水效率。

(2) 灌溉制度不合理是盈科灌区农业用水效率偏低的重要因素,通过优化灌溉制度,灌区农业用水效率有很大的提升空间。本文提出了适合盈科灌区实际配水情况的一组优化灌溉制度,通过灌溉制度优化,灌区制种玉米蒸散发量减少36~53 mm,水分生产率 WP_{ET} 增加5%左右,灌溉水生产率 WP_I 增加25%~48%,极大地提高了灌区农业用水效率。

(3) 本文对张掖水文站降雨资料进行分析,分别

制定了盈科灌区不同水平年的灌溉制度,并提出了不同水文年最佳灌溉制度,分别为丰水年灌区最佳灌水3次、平水年最佳灌水4次、枯水年最佳灌溉5次,为盈科灌区科学合理的灌溉管理提供理论指导。

参考文献:

- [1] 我国农业用水效率仅为发达国家一半左右[J]. 国土资源,2006(4):41-41.
- [2] WEN Yeqiang, SHANG Songhao, YANG J. Optimization of irrigation scheduling for spring wheat with mulching and limited irrigation water in an arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2017,192:33-44.
- [3] SHANG Songhao, MAO Xiaomin. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in North China[J]. Agricultural Water Management, 2006,85(3):314-322.

- [4] 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.
- [5] NGUYEN D C H, ASCOUGH II J C, MAIER H R, et al. Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model[J]. Environmental Modelling & Software, 2017,97:32-45.
- [6] PENG Zhigong, ZHANG Baozhong, XU Di, et al. Optimization of irrigation schedule based on the response relationship of water consumption and yield for winter wheat in North China Plain[J]. Desalination and Water Treatment, 2018,118:26-38.
- [7] LI Fawen, YU Dong, ZHAO Yong. Irrigation scheduling optimization for cotton based on the AquaCrop Model[J]. Water Resources Management, 2019,33(1):39-55.
- [8] HANSEN J W, JONES J W. Scaling-up crop models for climate variability applications[J]. Agricultural Systems, 2000, 65(1):43-72.
- [9] SAARIKKO R A. Applying a site based crop model to estimate regional yields under current and changed climates[J]. Ecological Modelling, 2000,131(2-3):191-206.
- [10] KEATING B A, CARBERRY P S, HAMMER G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3-4):267-288.
- [11] STÖCKLE C O, DONATELLI M, NELSON R. CropSyst, a cropping systems simulation model[J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3-4):289-307.
- [12] JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model[J]. European Journal of Agronomy, 2003,18(3-4):235-265.
- [13] BOOGAARD H L, VAN DIEPEN C A, ROTTER R P, et al. WOFOST 7.1; user's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5[R]. SC-DLO, 1998.
- [14] RAES D, STEDUTO P, HSIAO T C, et al. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):438-447.
- [15] STEDUTO P, HSIAO T C, RAES D, et al. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles[J]. Agronomy Journal, 2009,101(3):426-437.
- [16] LORITE I J, GARCÍA-VILA M, SANTOS C, et al. AquaData and AquaGIS: two computer utilities for temporal and spatial simulations of water-limited yield with AquaCrop[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013,96:227-237.
- [17] FOSTER T, BROZOVIĆ, BUTLER A P, et al. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model[J]. Agricultural Water Management, 2017,181:18-22.
- [18] KIM D, KALUARACHCHI J. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information[J]. Agricultural Water Management, 2015,149:143-155.
- [19] 闫昕. 黑河中游灌区不同尺度灌溉水有效利用系数估算[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2015.