

# 基于 DSSAT 模型的河套平原春小麦灌溉方案优化<sup>\*</sup>

李翊尘 史培军<sup>†</sup>

(北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 100875, 北京;  
北京师范大学地理科学学部, 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 100875, 北京;  
青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 810008, 青海西宁)

**摘要** 以河套平原临河站点监测的春小麦“永良 4 号”品种为例, 运用 DSSAT-CERES-Wheat 模型, 经过参数校正和验证, 模拟不同生育期多种灌溉配额组合下的春小麦产量, 优化灌溉方案, 提高灌溉水生产效益。研究结果表明: 1)DSSAT-CERES-Wheat 模型能较好地模拟河套平原春小麦“永良 4 号”的生长过程; 2)春小麦的灌溉水生产效益随总灌溉量增加呈下降趋势; 3)分蘖期灌溉是保证春小麦产量的基础, 拔节期的灌溉量对提高灌溉水生产效益作用最为明显, 春小麦产量对乳熟期灌溉量的响应最不敏感; 4)春小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期分别灌溉 30、105、30 和 30 mm 的水量, 为河套平原春小麦“永良 4 号”品种的最优节水灌溉方案, 优化后的方案可保证春小麦产量, 并且能提高春小麦灌溉水生产效益与灌溉水利用效率。

**关键词** 生产效益; 河套平原; 春小麦; 优化灌溉; DSSAT

中图分类号 S512.11

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2019355

## 0 引言

河套平原地处干旱半干旱地区, 是典型的引黄灌区, 多年平均引黄水量为 51.80 亿 m<sup>3</sup>, 其中约 93% 用于农业灌溉, 但灌溉水利用效率低<sup>[1]</sup>。河套平原实际引黄水量远超过国家规定的引黄指标, 水资源供需矛盾尤为突出。并且, 河套灌区是内蒙古重要的优质春小麦生产基地, 水资源是制约河套灌区春小麦生产的重要因素。农业农村部出台的《全国种植业结构调整规划(2016—2020 年)》<sup>[2]</sup>明确指出: 要在北方农牧交错带地区重点发展节水农业, 且在内蒙古河套地区适当恢复春小麦种植。因此, 优化河套平原春小麦的灌溉制度, 提高水资源生产效益, 对促进河套平原节水灌溉和恢复春小麦种植具有重要意义。

目前, 国内对小麦灌溉制度的优化研究主要集中于冬小麦<sup>[3-7]</sup>, 而针对春小麦灌溉制度的优化研究并不多见。现有的有关河套灌区春小麦灌溉制度的优化研究, 主要采用大田试验结合统计模型的方法<sup>[8-10]</sup>。如张永平等<sup>[8]</sup>通过设置 8 种包括不同灌溉次数和灌溉时间的方案进行大田试验, 结果表明在小麦分蘖至拔节期、抽穗至开花期灌 2 次水, 是实现节水与高产的最优灌溉方案; 田德龙等<sup>[9]</sup>通过设置 4 种不同的灌溉方案进行大田试验并结合 Jensen 模型进行统计分析, 认为小麦整个生育期需灌 4 次水, 灌水量分别为 67.5、75.0、75.0 和 67.5 mm。由于受实际条件限制, 这些基于大田试验的方法所研究的灌溉方案较少且设置单一, 不能充分比较在不同生育期灌溉和不同灌溉配额对作物产量和灌溉水生产效益的影响。大田试验未设置的方案难以得到研究, 所得到的河套灌区春小麦最优灌溉方案不够准确。同时, 基于统计模型的分析并不完全符合作物的生长机制, 致使分析结果缺乏物理意义。

除田间试验<sup>[11-13]</sup>外, 作物模型模拟方法也是国内外应用较为广泛的优化小麦灌溉制度的研究方法<sup>[14-15]</sup>。作物模型模拟法结合作物生长发育的机制特性, 根据输入的环境条件参数, 通过计算机对作物生长发育的生理过程进行数值模拟<sup>[16-17]</sup>, 克服了田间试验方法的局限性。其中, DSSAT(decision support system for agrotechnology transfer) 模型涵盖了 CERES 系列模型以及 CROPGRO 等模型, 是目前应用最广泛的作物模型之一<sup>[18-19]</sup>。国内外许多研究者在不同区域对 DSSAT 模型开展了适用性验证, 将该模型广泛地应用于作物生长

\* 国家自然科学基金创新研究群体资助项目(41621061)

† 通信作者: 史培军(1959—), 男, 博士, 教授。研究方向: 环境演变与自然灾害。e-mail: spj@bnu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-18

研究中: Lobell 等<sup>[15]</sup>根据 2 年进行的含 3 种灌溉方案的田间试验评估了 DSSAT-CERES-Wheat 作物模型, 验证了其适用性, 并探究减少灌溉对墨西哥雅基山谷春小麦面积产量的影响, 模拟了 7 种灌溉方案下的春小麦面积产量; Attia 等<sup>[20]</sup>使用 DSSAT-CERES-Wheat 模型, 模拟研究了德克萨斯州高原地区的冬小麦面积产量与水分利用效率对灌溉管理的响应; Ji 等<sup>[21]</sup>和江敏等<sup>[22]</sup>学者分别在中国关中平原和北方地区进行了 DSSAT-CERES-Wheat 模型对冬小麦模拟的参数校正和验证, 研究结果表明 DSSAT 模型在这些地区有良好的适用性。目前, DSSAT 模型还未广泛用于内蒙古河套平原春小麦灌溉制度的优化研究中。

本研究运用 DSSAT-CERES-Wheat 作物模型, 模拟内蒙古河套平原春小麦在由多种灌溉配额和不同生育期灌溉组合而成的多种灌溉方案下的产量, 计算灌溉水利用效率和灌溉水生产效益, 分析面积产量与灌溉水生产效益对灌溉量和灌溉时期的响应, 从提高灌溉用水的产量效益出发, 优化河套平原春小麦的灌溉方案。

## 1 数据与方法

**1.1 研究区概况** 研究区位于河套平原, 地理位置为  $40^{\circ}10' \sim 41^{\circ}20' N$ 、 $106^{\circ}10' \sim 109^{\circ}30' E$ 。灌区总面积约 1.19 万  $km^2$ , 属温带大陆性干旱气候区。年均气温  $5.6 \sim 7.8^{\circ}C$ , 日均日照时间 8~9 h, 无霜期平均为 130 d 左右<sup>[23]</sup>, 年均降水量 150~200 mm, 其中夏秋季降水占全年降水的 85% 以上, 年蒸发量 1900~2500 mm, 其中春末夏初蒸散量最大, 5—6 月平均蒸散量可达 300~400 mm。河套灌区为一年一熟耕作制度, 农业发展完全依靠引水灌溉, 现引黄灌溉面积已达到 6013  $km^2$ , 年均引黄水量约 50 亿  $m^3$ , 占黄河过境水量的  $1/7$ <sup>[24]</sup>。灌区主要种植作物有小麦、玉米、杂粮和向日葵等, 是国家及内蒙古自治区重要的商品粮油基地。

研究站点临河站点坐标为  $40^{\circ}45'N$ 、 $107^{\circ}25'E$ , 位于河套平原中部, 位置如图 1 所示。

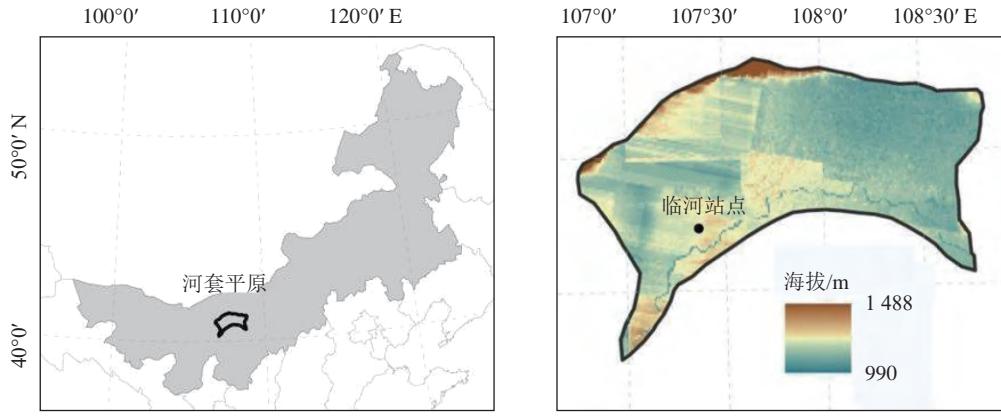


图 1 研究区地理位置

**1.2 模型及模拟评价方法** DSSAT 模型可以对作物生长和发育过程进行逐日模拟, 可以响应包括作物遗传特性、管理措施、环境、氮素和水分胁迫、病虫害在内的多种因素<sup>[25]</sup>。DSSAT-CERES-Wheat 模型是 DSSAT 模型中专门用于模拟小麦生长发育的模型, 在国际上已得到广泛应用。近年来, 国内大量学者也应用该模型进行灌溉施肥管理优化、气候变化以及灾害等研究, 还有学者开展了对模型参数校正及模拟效果的研究<sup>[15, 20-22]</sup>。

采用标准均方根误差 ( $E_{NRMS}$ )<sup>[20, 26-28]</sup> 和决定系数 ( $R^2$ )<sup>[11, 29]</sup> 评价模型的校验效果。当  $E_{NRMS} < 10\%$  时, 认为模型的模拟效果极好;  $E_{NRMS}$  为  $10\% \sim 20\%$  时, 模型模拟效果良好; 当  $E_{NRMS}$  为  $20\% \sim 30\%$  时, 模型模拟效果一般; 而当  $E_{NRMS} > 30\%$  时, 则模型模拟效果差<sup>[30]</sup>;  $R^2$  越接近于 1, 表明模型的校验效果越好。模型的模拟效果使用整群剩余系数 ( $CRM$ ,  $C_{RM}$ )<sup>[11, 20]</sup> 评价,  $C_{RM}$  越接近于 0, 表明模型的模拟效果越好,  $C_{RM} < 0$  表示模型具有高估观测数据的趋势, 而  $C_{RM} > 0$  表示模型具有低估观测数据的趋势。各指标的计算式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$E_{NRMS} = \frac{E_{RMS}}{M} \times 100\%, \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}, \quad (3)$$

$$C_{RM} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n M_i}, \quad (4)$$

式中  $M_i$  代表实际观测值,  $S_i$  代表模拟值,  $\bar{M}$  为实测平均值,  $\bar{S}$  为模拟平均值,  $n$  为样本数.

**1.3 数据来源** 模型所需数据包括气象数据、田间管理数据和土壤数据等. 气象数据由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供, 时间序列为 1981—2018 年, 涵盖的变量有日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时间等. 田间管理数据由国家气象信息中心提供, 时间序列为 2005—2012 年, 包括作物品种、播种日期、播种量、生育期、灌溉日期、灌溉量、施肥日期、施肥量、肥料类型、产量以及土壤记录等信息. 其中, 2005—2012 年田间监测的春小麦的品种为“永良 4 号”. 肥料类型为尿素和肥美二胺. 土壤数据包括土壤各层的土壤机械组成、全氮含量、阳离子交换量、有机碳含量等, 来自《中国内蒙古土种志》<sup>[31]</sup>、世界土壤数据库(Harmonized World soil Database)以及国家气象信息中心 2005—2012 年的田间管理数据.

#### 1.4 试验设计

根据河套灌区每次实际灌溉量, 共设置 7 种灌溉量分别为 0、30、45、60、75、90 和 105 mm, 于分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期和乳熟期进行灌溉, 正交组合得到雨养处理和 16 806 种灌溉方案, 组合方案如图 2 所示, 包括灌溉 1、2、3、4 和 5 次的灌溉方案. 使用模型模拟 1981—2018 年每种灌溉方案的产量, 用于计算灌溉水生产效益<sup>[12, 20, 32—34]</sup>和灌溉水利用效率<sup>[34]</sup>. 为排除其他因素影响, 模型模拟各种灌溉方案时保持作物品种同为“永良 4 号”, 并为每种灌溉方案按照当地多年普遍情况, 设置同样的播种量、施肥次数、施肥量、施肥日期、各生育期灌溉日期等输入参数.

**1.5 各指标计算方法** 采用灌溉水生产效益和灌溉水利用效率衡量灌溉方案的水分效益, 计算式为<sup>[12, 20, 32—34]</sup>

$$P_{IW} = \frac{Y_I - Y_P}{Q_I}, \quad (5)$$

$$E_{IWU} = \frac{Y_I}{Q_I}, \quad (6)$$

式中  $P_{IW}$  为灌溉水生产效益 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),  $E_{IWU}$  为灌溉水利用效率 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ),  $Y_I$  和  $Y_P$  分别为灌溉和雨养条件下春小麦的单位面积产量 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $Q_I$  为净灌溉水量 (mm).

数据预处理及统计分析使用 SPSS 19、MATLAB2012 等软件, 采用  $T$  检验等方法进行数理统计分析, 显著性水平为 0.05.

## 2 结果与分析

**2.1 参数校验及模型评估** 使用田间观测资料对模型品种参数进行校正. 基于灾害发生少、产量稳定的原则, 选择 2010—2012 年的田间观测资料, 使用 DSSAT 模型中的最大似然估计模块(GLUE), 基于单位面积产量和生育期(播种到开花时间和播种到成熟时间), 对“永良 4 号”春小麦品种进行了参数的本地化校正. 使用 2005—2009 年的田间观测资料对参数校正后的模型进行验证. 表 1 为模型对生育期(播种到开花时间、播种到

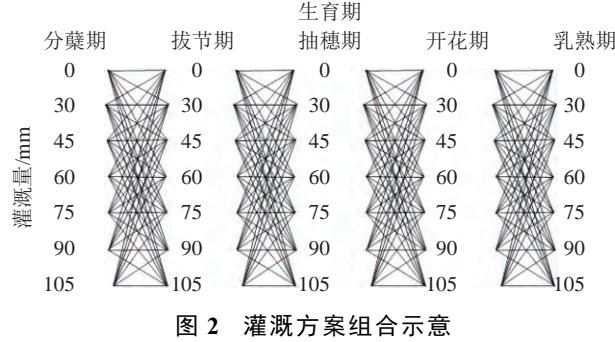


图 2 灌溉方案组合示意

表 1 播种到开花时间、播种到成熟时间和面积产量的模拟效果校验

$C_{RM}$	$E_{NRMS} / \%$		$R^2$	
	校正	验证	校正	验证
播种至开花时间	0.05	3.44	7.60	0.78
播种至成熟时间	0.03	1.87	5.18	0.96
产量	-0.002	2.60	4.23	0.97

成熟时间)和面积产量的模拟值与观测值的  $E_{NRMS}$ 、 $R^2$  和  $C_{RM}$ 。由于本研究主要基于作物产量对灌溉方案的响应,故在对作物生育期和产量校验时,主要侧重于对产量模拟效果的校验(图 3)。三者校正的  $E_{NRMS}$  为 1.0%~3.5%, 验证的  $E_{NRMS}$  为 4.0%~8.0%,  $C_{RM}$  绝对值为 0~0.05, 表明模型适用于模拟“永良 4 号”春小麦的生育期和面积产量,具有良好的准确性。其中,面积产量校正和验证的  $E_{NRMS}$  分别为 2.6% 和 4.23%, 均 <5%,  $C_{RM}$  为 -0.002, 显示了模型对面积产量良好的模拟精度。

## 2.2 灌溉量对水分生产效益的影响

为分析灌溉量对产量及灌溉水生产效益的影响,绘制了不同总灌溉量下面积产量、增产量及灌溉水生产效益的箱型图及均值的变化(图 4)。从均值及箱型图的中位值(图 4-a, b)来看,面积产量和增产量随着总灌溉量增加都呈现增加趋势,在总灌溉量达到 400 mm 时,平均产量达 5 500 kg · hm<sup>-2</sup> 左右,增产量达 3 500 kg · hm<sup>-2</sup> 左右。超过 400 mm 后随着总灌溉量增长,面积产量与增产量增长几乎停滞,表明当灌溉量达到 400 mm 以上时,多余的灌溉水对面积产量的效益极低。从每个总灌溉量下面积产量和增产量的值域来看,在灌溉量为 100~300 mm 时,值域较大,说明当灌溉量为 100~300 mm 时,不同的灌溉次数以及灌溉时间对面积产量和增产量影响较大,使二者产生了较大的波动范围。

从灌溉水生产效益箱型图及均值来看(图 4-c),随总灌溉量增加,灌溉水生产效益整体上呈现下降趋势,由 10~40 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup> 降至 10 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup> 以下。亏缺灌溉可以获得更高的水分生产效益,充分灌溉下水分利用效率最低,而灌溉量小时,水分利用效率高。从中位值来看,当灌溉量为 0~250 mm 时,灌溉水生产效益随着灌溉量增加而下降的速度逐渐减慢,表明当灌溉量较小时,灌溉水的增产作用强,后随着灌溉量增加而下降。当灌溉量为 240~285 mm 时,灌溉水生产效益中位值基本保持不变,表明在此灌溉量下,增加灌溉量不会损失灌溉水生产效益。当灌溉量 >285 mm 时,灌溉水生产效益随灌溉量的增加而下降的速度逐渐增大,表明灌溉量 >285 mm 后,灌溉量的边际生产效益下降。

## 2.3 生育期对灌溉水生产效益的影响

分析生育期对灌溉水生产效益的影响,首先需要探究灌溉次数对灌溉水生产效益的影响,即灌溉几个生育期对提高灌溉水生产效益最佳,为此将 1981—2018 年在不同的生育期灌溉分配方案下,模拟计算得到的灌溉水生产效益,按照灌溉方案的灌溉次数进行分类,绘制了不同灌溉次数下灌溉水生产效益的概率累积曲线(图 5)。不同灌溉次数所能取得的灌溉水生产效益由大到小排序为 1、2、3、4、5 次。在 <70% 的累积概率下,5 次灌溉的灌溉水生产效益明显高于其他灌溉次数。在 >70% 左右的累积概率下,1 次灌溉的灌溉水生产效益明显高于其他灌溉次数,高出 30~60 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>。根据 2.2 节的研究结果,这是由于总灌溉量小,灌溉水生产效益普遍高,因此 1 次灌溉的最大值大于其他次数。

为进一步分析生育期对灌溉水生产效益的影响,本研究进而将模拟计算得到的灌溉水生产效益,按照每个灌溉次数下灌溉的生育期进行分类,分别绘制灌溉 1~4 次灌溉在不同生育期的灌溉水生产效益概率累积曲线(图 5-a)。整体来看,1~3 次灌溉在 50% 的累积概率下取得的最大灌溉水生产效益为 15 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup> 左右,4 次灌溉的最大灌溉水生产效益为 12 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup> 左右。

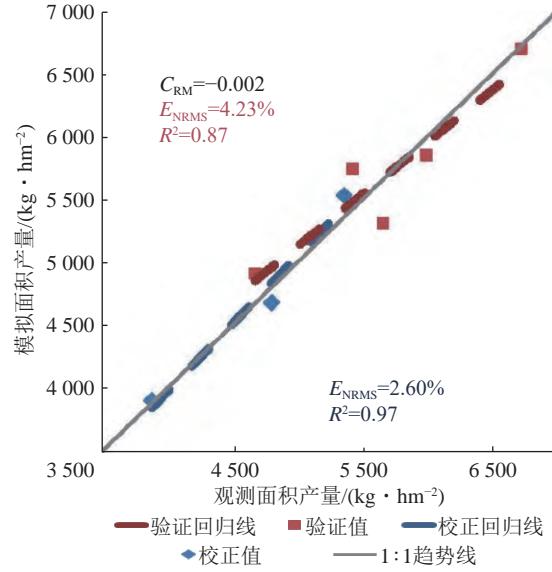
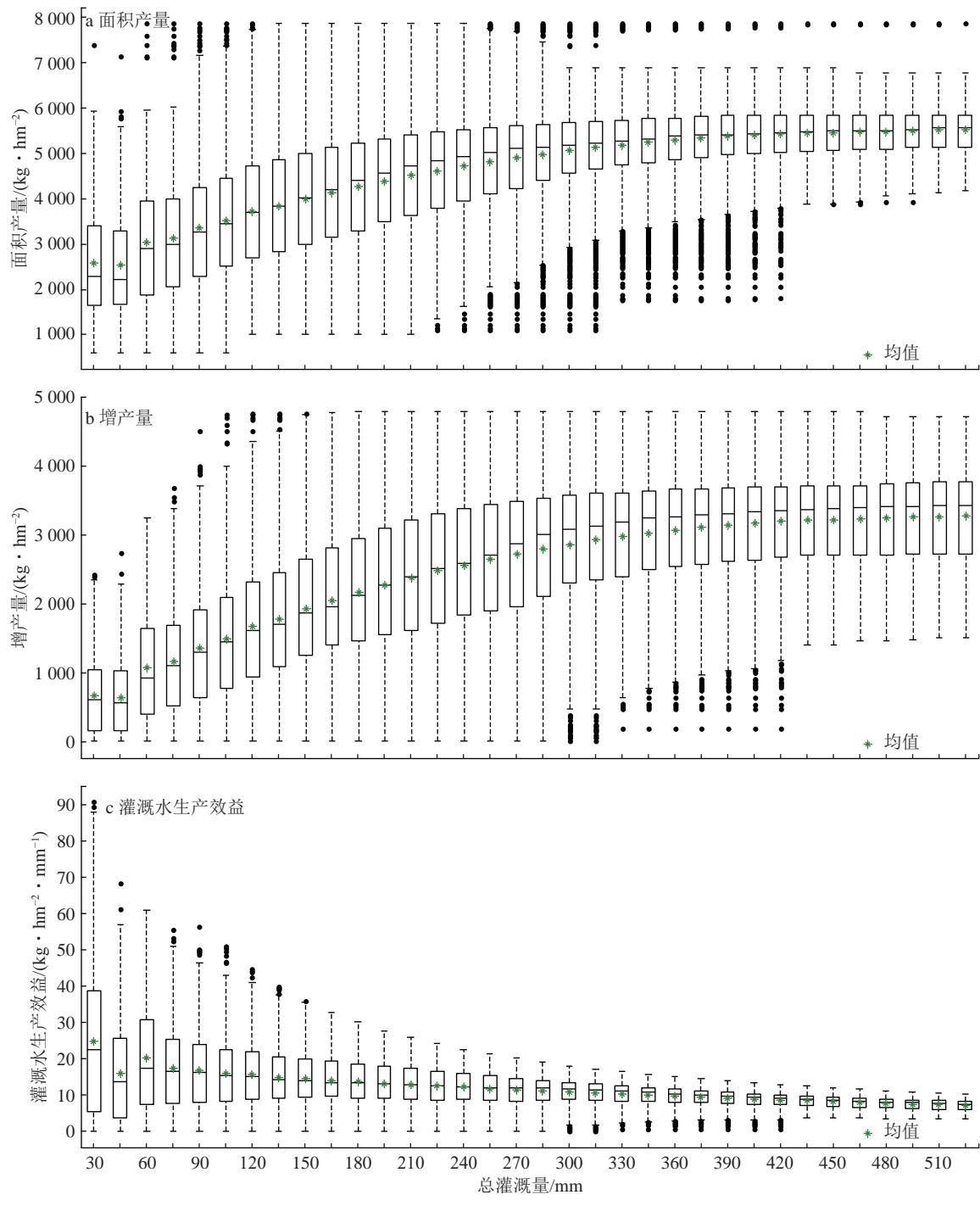


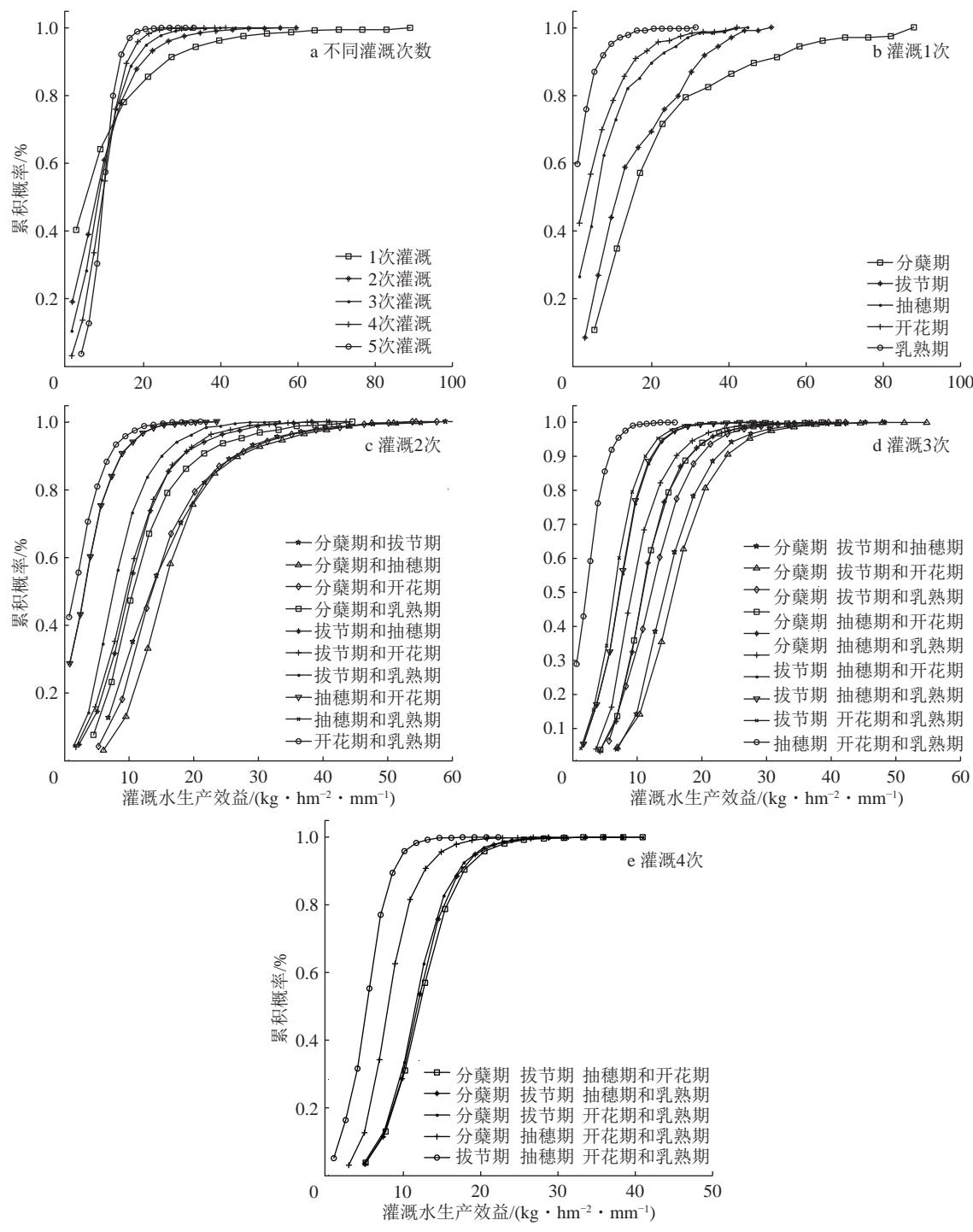
图 3 产量的模拟值与观测值比较



注: 每个总灌溉量对应的箱型图表示, 总灌溉量恒为此值的所有灌溉分配方案在1981—2018年的面积产量、增产量和灌溉水生产效益的模拟值. 箱型图由上至下的5个节点值分别为 $Q_3$  (上四分位数) + 1.5QR (四分位距)、 $Q_3$ 、中位数、 $Q_1$  (下四分位数)、 $Q_1$  - 1.5QR, 异常值为 $>Q_3+1.5QR$  和 $<Q_1-1.5QR$  的值.

图 4 不同灌溉量面积产量 (a)、增产量 (b) 和灌溉水生产效益 (c) 箱型图

从1次灌溉的概率累积曲线(图5-b)来看, 最大的灌溉水生产效益在分蘖期灌溉取得, 为5~90 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, 表明在春小麦生长前期, 水分供应对保证春小麦产量有必要作用. 而其他生育期灌溉取得的灌溉水生产效益远低于分蘖期灌溉. 2次灌溉(图5-c)的最大灌溉水生产效益在分蘖期和抽穗期灌溉时取得, 为6~60 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>. 另外, 在分蘖期、拔节期灌溉和分蘖期、开花期灌溉可获得的灌溉水生产效益在>80%的累积概率下与分蘖期、抽穗期灌溉相近. 3次灌溉(图5-d)的最大灌溉水生产效益在分蘖期、拔节期和开花期灌溉时取得, 为8~55 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>. 从4次灌溉的概率累积曲线(图5-e)来看, 最大的灌溉水生产效益在分蘖期、拔节期、



注: 图中曲线上的符号点为每条曲线的灌溉水生产效益等分点, 以便显示累积曲线特征.

图 5 灌溉水生产效益累积概率曲线

抽穗期和开花期灌溉时取得, 为  $5\sim42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 另外, 在分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期灌溉和分蘖期、拔节期、开花期、乳熟期灌溉可获得的灌溉水生产效益与分蘖期、拔节期、抽穗期和开花期灌溉相近. 表明在分蘖期和拔节期进行灌溉对增产和提高灌溉水生产效益具有必要性, 在保证二者进行灌溉下, 其余 3 个生育期进行灌溉对增产和提高灌溉水生产效益的效果相近.

综上, 5 次灌溉的灌溉水生产效益最优. 低于 5 次灌溉的不同灌溉次数下的最优灌溉生育期存在差异. 保证分蘖期灌溉取得的灌溉水生产效益普遍最大, 而保证乳熟期灌溉取得的灌溉水生产效益最小.

**2.4 灌溉方案优化** 为进一步优化灌溉水生产效益, 本文分析了不同总灌溉量下灌溉水生产效益最优的灌溉方案(图 6), 并进行了显著性检验. 从整体上看, 不同总灌溉量对应的最优方案进行灌溉的生育期与 2.3 节

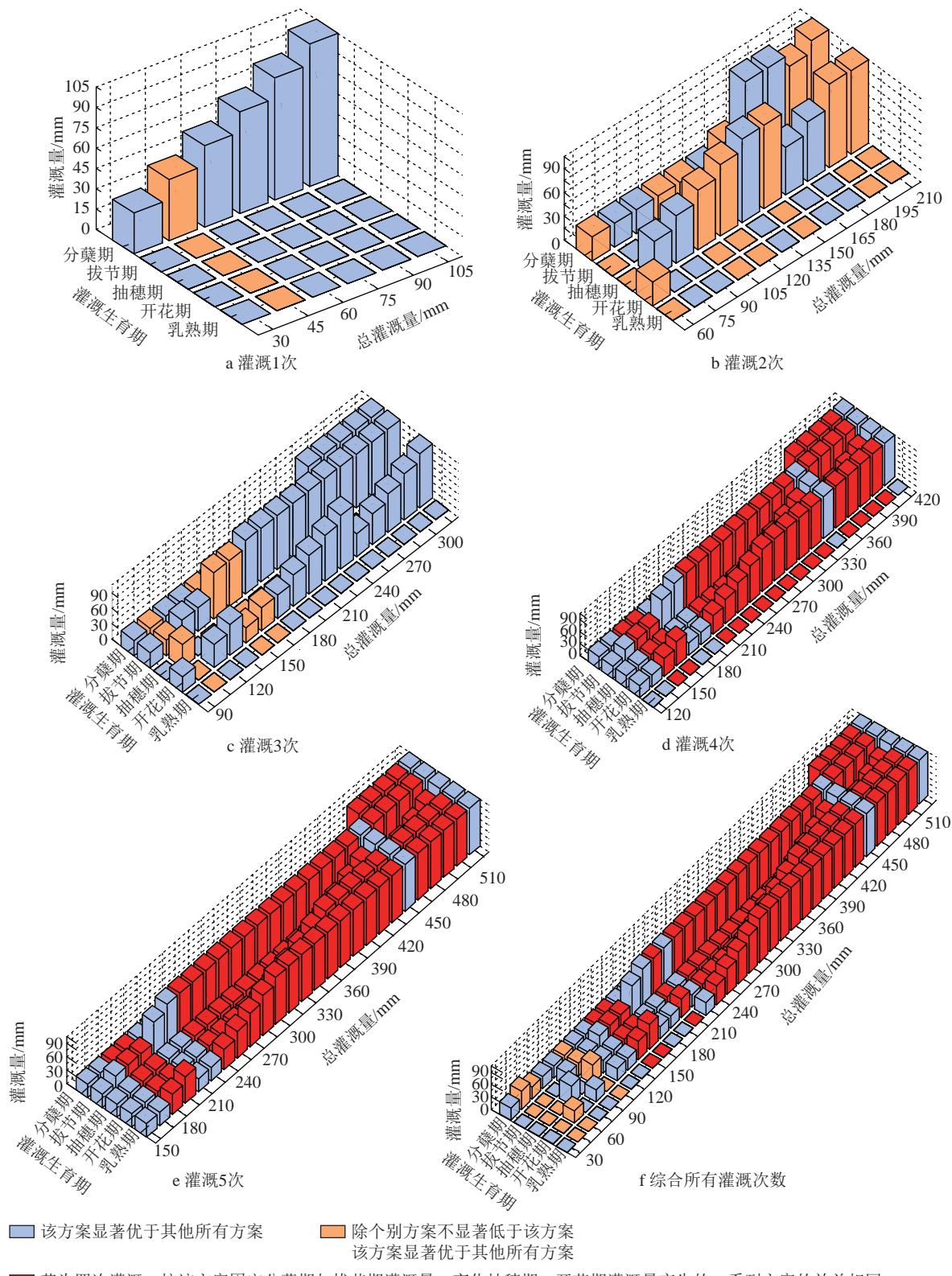


图 6 不同总灌溉量最佳灌溉方案

的分析结果一致。在不同灌溉次数的优化方案中，随着总灌溉量增加，灌溉水生产效益均呈现下降趋势(图 7)，这也与 2.2 节的研究结果一致。

在 1 次灌溉的情况下(图 6-a)，不同的总灌溉量都以灌溉分蘖期最优。最优方案的面积产量和灌溉水生产

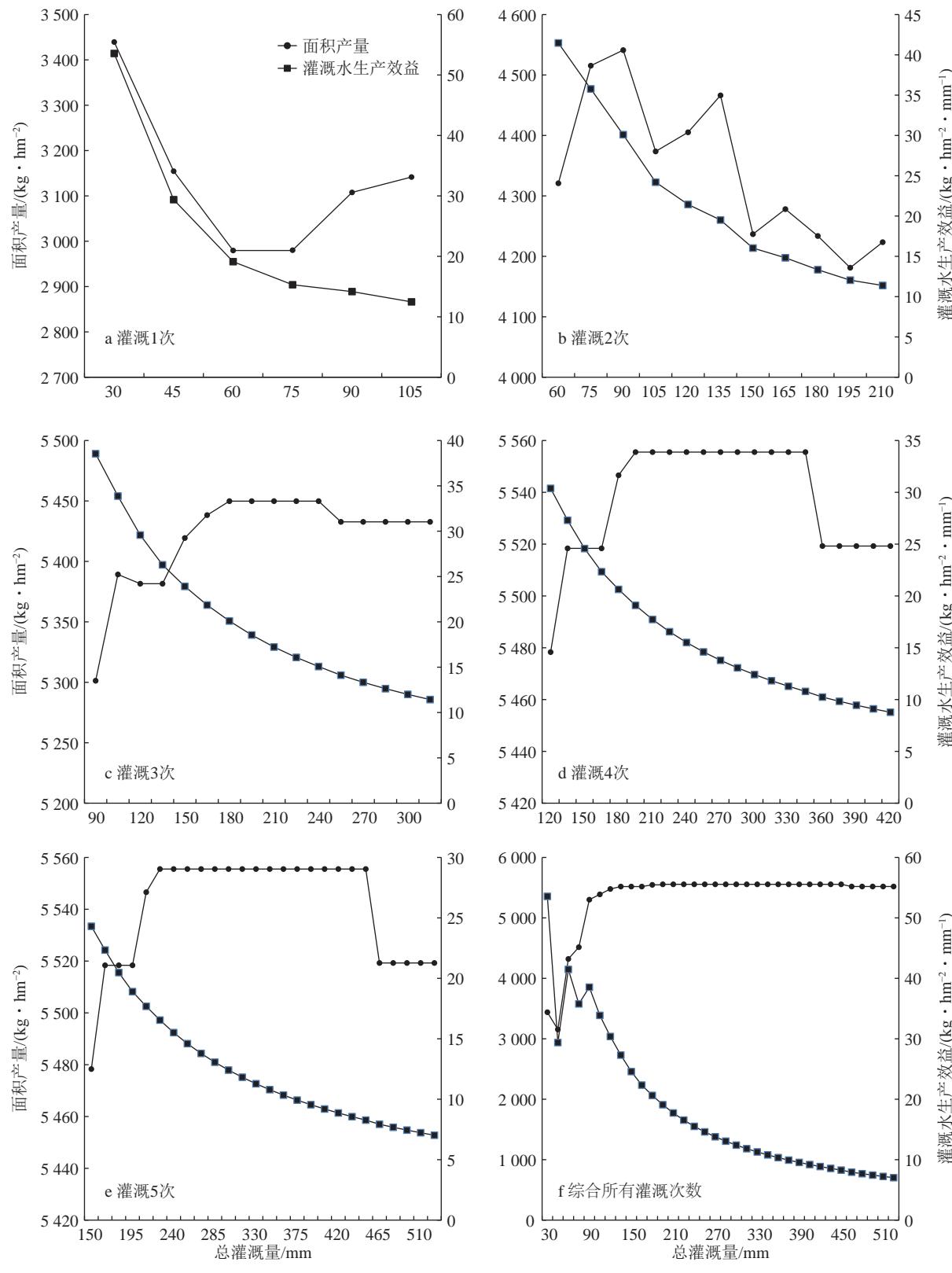


图 7 优化方案的面积产量与灌溉水生产效益

效益(图 7-a)最大值出现在总灌溉量为 30 mm 时, 分别为 3 440 kg·hm<sup>-2</sup> 和 53 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>, 随着总灌溉量增加, 面积产量先降低后有所回升, 但仍低于灌溉 30 mm 下的面积产量, 可见在 1 次灌溉的最优方案下, 增加总灌溉量会减少面积产量。

2 次灌溉(图 6-b)整体上以灌溉分蘖期和抽穗期最优, 且在总灌溉量较小时, 最优方案下的分蘖期灌溉配

额小, 抽穗期的灌溉配额随着总灌溉量增加而增加。当总灌溉量达到 150 mm 及以上时, 分蘖期的配额才增加。最优方案下的面积产量(图 7-b)随总灌溉量的增加, 呈现波动下降的趋势, 最大面积产量出现在总灌溉量为 90 mm 时, 此时的面积产量为  $4\ 541 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 灌溉水生产效益为  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 相比于优化前的灌溉方案(表 2), 灌溉水生产效益提高了  $19 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (表 3)。

3 次灌溉(图 6-c)整体上以灌溉分蘖期、拔节期和开花期最优, 随着总灌溉量增加, 最优方案下拔节期的灌溉配额最先增加。当总灌溉量达到 180 mm 后, 开花期灌溉配额增加。当总灌溉量达到 250 mm 及以上时, 分蘖期灌溉配额增加并超过开花期。可见在 3 次灌溉下, 对保证灌溉水生产效益作用最大的生育期为拔节期, 次之为开花期。最优方案下(图 7-c), 在总灌溉量为 180 mm 时达到最大面积产量( $5\ 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), 此时灌溉水生产效益为  $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 相比于优化前的灌溉方案(表 2), 灌溉水生产效益提高  $9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (表 3), 在此灌溉量下再增加灌溉量对面积产量无增加作用。

4 次灌溉下(图 6-d), 灌溉前 4 个生育期最优。总体上随着总灌溉量增加, 拔节期配额最先增加, 当总灌溉量达到 200 mm 及以上, 抽穗期与开花期灌溉配额开始增加, 并且二者增加先后对生产效益无显著影响, 表明在保证分蘖期与拔节期最优配额下, 抽穗期与分蘖期灌溉量对水分生产效益具有同等的作用。在总灌溉量超过 350 mm 后, 分蘖期灌溉配额增加并超过抽穗期与开花期。

5 次灌溉的最优灌溉方案(图 6-e)同样为随着总灌溉量增加, 拔节期灌溉配额最先增加, 其次为抽穗期、开花期和乳熟期, 并且 3 个生育期增加先后对生产效益无显著影响, 对水分生产效益具有同等的作用。灌溉量超过 450 mm 后, 分蘖期灌溉配额增加并超过抽穗期、开花期与乳熟期。4 次和 5 次灌溉最优方案下(图 7-d, e), 分别在总灌溉量为 195 和 225 mm 时达到最大面积产量  $5\ 555 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 灌溉水生产效益分别为  $19$  和  $17 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 相比于优化前的灌溉方案(表 2), 灌溉水生产效益分别提高  $11$  和  $10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ (表 3)。相比 5 次灌溉, 4 次灌溉的最优方案下, 随总灌溉量的增加面积产量最先达到最大值, 且最大面积产量下的灌溉水生产效益高于 5 次灌溉。

表 2 优化前后的灌溉方案

灌溉次数	各生育期灌溉量/mm									
	当地原灌溉方案					优化灌溉方案				
	分蘖期	拔节期	抽穗期	开花期	乳熟期	分蘖期	拔节期	抽穗期	开花期	乳熟期
1						30				
2	105		105			30		60		
3	105	105		105		30	105		45	
4	105	105	105		105	30	105	30	30	
5	105	105	105	105	105	30	105	30	30	30

表 3 优化前后灌溉方案的面积产量、灌溉水生产效益与灌溉水利用效率

灌溉次数	当地原灌溉方案			优化灌溉方案			
	面积产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉水生产效益		灌溉水利用效率	面积产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉水生产效益	
		$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$				$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$	
1					3 440	53	114
2	4 223	11		20	4 541	30	50
3	5 432	11		14	5 450	20	30
4	5 493	8		13	5 555	19	28
5	5 519	7		11	5 555	17	25

综上, 从整合灌溉次数后的各个总灌溉量的最优灌溉方案(图 6-f)分析可知: 分蘖期灌溉为基础灌溉, 不同总灌溉量下的最优灌溉方案都必须保证分蘖期有灌溉配额; 灌溉水生产效益对拔节期灌溉最敏感, 在保证分蘖期基础灌溉配额的情况下, 优先增加拔节期灌溉可以提高灌溉水生产效益; 对提高灌溉水生产效益其

次敏感的为抽穗期和开花期,水分生产效益对二者的灌溉量具有相近程度的响应。综合不同灌溉次数的最优方案下面积产量(图 7-f)总体呈现先增加后不变的特征,灌溉水生产效益总体呈现下降趋势。在保证达到最大面积产量下,灌溉水生产效益最高的节水方案为灌溉 4 次,分别在分蘖期、拔节期、抽穗期和开花期灌溉 30、105、30 及 30 mm。在此最优节水方案下,此时面积产量达到最大值  $5\ 555\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,灌溉水生产效益和利用效率分别为  $19$  和  $28\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,相比原灌溉方案(表 2)分别提高 137.5% 和 115.4%(表 3)。

### 3 讨论

使用 DSSAT-CERES-wheat 模型,采用观测资料对河套平原“永良 4 号”春小麦品种的生长模拟进行参数校正和验证后,对不同生育期在多种灌溉配额下的组合方案进行模拟,对灌溉方案进行优化。相较于已有研究<sup>[11-15, 20, 30]</sup>,本研究有以下 3 点完善:

1)全面探究了春小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期和乳熟期 5 个生育期,以及与 0、30、45、60、75、90 和 105 mm 不同灌溉配额组合下,一系列灌溉方案的春小麦面积产量和灌溉水生产效益,更系统地探究了灌溉量与灌溉生育期对春小麦面积产量与灌溉水利用效率的影响,使优化后的方案更接近最优。研究发现亏缺灌溉可以获得更高的水分利用效益,充分灌溉量下水分利用效率最低,而灌溉量小时,水分利用效率高。且保证拔节期灌溉对提高水分利用效率最敏感,将亏缺灌溉在乳熟期进行所获得的水分利用效率最高。这些结论得到 Tari<sup>[12]</sup>在土耳其以及 Xu 等<sup>[35]</sup>在华北平原开展的小麦节水灌溉田间实验的支持,证明了本研究使用模型所得结果的可靠性。田德龙等<sup>[9]</sup>在内蒙古河套平原研究发现,小麦的缺水敏感期为分蘖—拔节期和拔节—开花期,本研究进一步发现,分蘖期灌溉为最基础的灌溉,当灌溉量较小时应首先保证分蘖期灌溉。而在保证分蘖期基础灌溉配额的前提下,优先增加拔节期灌溉可以提高灌溉水生产效益。

2)基于灌溉水生产效益,讨论灌溉水的春小麦产量效益,可直接对灌溉用水进行优化,节约灌溉用水。

3)获得了每种总灌溉量下的最优灌溉方案,可为当地在总引黄灌溉量受到限制的情况下,实现最优灌溉提供参考,对当地实现灌溉水的春小麦产量效益最大化具有实践意义。

同时,本研究也存在一定的不足:

1)模型模拟的方法难免存在一定的误差及理想化,应用于实际情况可能会出现一定偏差。但模型经过本地作物品种参数校正后,已尽可能降低模拟误差。并且通过验证表明,模型的模拟误差较小,模拟效果好。

2)在模拟的一系列灌溉方案中,由于方案之间的最小灌溉量差只有 15 mm,受到模型模拟的分辨率影响,可能会出现某一年份的不同方案,得到相同面积产量模拟值的情况。但因为模拟了多个年份,所以并不影响最终的优化方案与结论。

3)受到观测站点田间数据的记录质量限制,本研究使用数据品质高的临河站点代表河套平原。同时每个生育期只选择一个日期灌溉代表该生育期,代表性存在一定缺陷,在之后的研究中需增加模拟的站点数量,且每个春小麦生育期选择更多的灌溉日期分别进行模拟,增加研究的代表性。

4)有研究<sup>[4]</sup>表明在不同的降水年型中,最优的灌溉量会存在差异,但本研究的结果是综合了多年的平均情况,未讨论不同降水年型下的差异,在后续研究中需要继续深入讨论。

### 4 结论

通过使用经过参数校正后的 DSSAT-CERES-Wheat 模型,模拟各生育期不同灌溉配额组合的一系列灌溉方案,计算分析灌溉量、灌溉的生育期对春小麦产量及灌溉水生产效益的影响,优化灌溉方案,得到如下结论:

1)根据实地气象、土壤、田间管理与观测数据对 DSSAT-CERES-Wheat 模型进行参数校正后,模型模拟河套平原春小麦“永良 4 号”开花距播种期时间、成熟距播种期时间及面积产量的标准均方根误差分别为 7.60%、5.18%、4.23%,表明模型可以较好地模拟河套平原春小麦“永良 4 号”品种的生长过程。

2)灌溉水生产效益总体上随总灌溉量增加而下降。

3)春小麦分蘖期灌溉为基础灌溉,不同总灌溉量下的最优灌溉方案都必须保证分蘖期有灌溉配额。灌溉水生产效益对春小麦拔节期灌溉最敏感,在保证春小麦分蘖期基础灌溉配额的情况下,优先增加春小麦拔节期灌溉可以提高灌溉水生产效益。春小麦面积产量对其乳熟期灌溉量响应最不敏感。

4)春小麦分蘖期、拔节期、抽穗期、开花期分别灌溉 30、105、30 和 30 mm 为最优节水方案,相比原有的

5 个生育期分别灌溉 105 mm 的方案, 最优节水灌溉方案可保证面积产量且显著提高灌溉水春小麦生产效益与灌溉水利用效率。

## 5 参考文献

- [1] 岳卫峰, 杨金忠, 占车生. 引黄灌区水资源联合利用耦合模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 35
- [2] 农业部种植业管理司. 全国种植业结构调整规划(2016—2020年)[EB/OL]. (2016-04-28)[2019-12-18]. [http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201604/t20160428\\_5110638.htm](http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201604/t20160428_5110638.htm)
- [3] 刘建超, 何建强, 武文杰, 等. 水氮管理影响冬小麦品质的 CERES-Wheat 模型模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 271
- [4] 房全孝, 王建林, 于舜章, 等. 华北平原小麦—玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37
- [5] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 795
- [6] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1398
- [7] 王文佳, 冯浩, 宋献方. 基于 DSSAT 模型陕西杨凌不同降水年型冬小麦灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 1
- [8] 张永平, 谢岷, 井涛, 等. 内蒙古河套灌区春小麦高产节水灌溉制度研究[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(1): 96
- [9] 田德龙, 郭克贞, 鹿海员, 等. 河套灌区井渠双灌条件下主要作物灌溉制度优化[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(1): 48
- [10] 李生勇, 韩翠莲, 郭彦芬, 等. 河套灌区小麦套种玉米灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2016(4): 44
- [11] WEN Y Q, SHANG S H, 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
- [12] TARI A F. The effects of different deficit irrigation strategies on yield, quality, and water-use efficiencies of wheat under semi-arid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2016, 167: 1
- [13] YANG J, MAO X M, WANG K, et al. The coupled impact of plastic film mulching and deficit irrigation on soil water/heat transfer and water use efficiency of spring wheat in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 201: 232
- [14] BERHE A A, KISEKKA I, PRASAD P V, et al. Assessing wheat yield, biomass, and water productivity responses to growth stage based irrigation water allocation[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(1): 107
- [15] LOBELL D B, ORTIZ-MONASTERIO J I. Evaluating strategies for improved water use in spring wheat with CERES[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(3): 249
- [16] 杨靖民, 杨靖一, 姜旭, 等. 作物模型研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(5): 553
- [17] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区秋粮作物生产潜力模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 56
- [18] 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
- [19] 郑珍. 关中地区冬小麦水分产量效应及气候变化条件下产量响应模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- [20] ATTIA A, RAJAN N, XUE Q W, et al. Application of DSSAT-CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 50
- [21] JI J M, CAI H J, HE J Q, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 144(2): 1
- [22] 江敏, 金之庆, 葛道阔, 等. CERES-Wheat 模型在我国冬小麦主产区的适用性验证及订正[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 1998, 19(3): 64
- [23] 李朝欣. 河套平原临河区高砷地下水分布及水化学特征[D]. 北京: 首都师范大学, 2008
- [24] 李笑雷. 内蒙古河套灌区土地利用变化对灌区水文过程的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017
- [25] 刘海龙, 诸叶平, 李世娟, 等. DSSAT 作物系统模型的发展与应用[J]. 农业网络信息, 2011(11): 5
- [26] YANG X, ZHENG L N, YANG Q, et al. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM[J]. Agricultural Systems, 2018, 166: 111
- [27] VASHISHT B B, NIGON T, MULLA D J, et al. Adaptation of water and nitrogen management to future climates for sustaining potato yield in Minnesota: field and simulation study[J]. Agricultural Water Management, 2015, 152: 198
- [28] KADIYALA M D M, JONES J W, MYLAVARAPU R S, et al. Identifying irrigation and nitrogen best management practices for aerobic rice-maize cropping system for semi-arid tropics using CERES-rice and maize models[J]. Agricultural Water Management, 2015, 149: 23
- [29] LI J, SONG J, LI M, et al. Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under

- uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 245
- [30] 尹海霞. Aquacrop模型在半干旱区春小麦亏缺灌溉管理中的应用[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013
- [31] 内蒙古自治区土壤普查办公室. 中国内蒙古土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 483
- [32] 杨晓慧, 黄修桥, 陈震, 等. 基于DSSAT模拟的灌溉用水效率评价指标比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 95
- [33] IRMAK S, DJAMAN K, RUDNICK D R. Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, water use efficiency and yield response factors[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 271
- [34] WEI T, DONG Z Y, ZHANG C, et al. Effects of rainwater harvesting planting combined with deficiency irrigation on soil water use efficiency and winter wheat (*Triticum aestivum*, L.) yield in a semiarid area[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 231
- [35] XU X X, ZHANG M, LI J P, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 219

## Optimization of irrigation scheduling for spring wheat in Hetao Plain with DSSAT model

LI Yichen SHI Peijun<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;  
Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, 100875, Beijing, China;  
Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, 810008, Xining, Qinghai, China)

**Abstract** DSSAT model after calibration and test was used to simulate spring wheat yields under various irrigation schemes with different irrigation water quotas at different growth stages, for the spring wheat “Yongliang 4” at Linhe site in Hetao Plain, in order to optimize the irrigation schemes under different irrigation water supply amounts and to improve irrigation water productivity. The DSSAT-CERES-Wheat model was found to perform satisfactorily in simulating growth period and yield. The irrigation water productivity of spring wheat was found to decrease with increasing total irrigation water amount. Irrigate at tillering stage was found essential to keep spring wheat grow normally. Yield and irrigation water productivity of spring wheat were most sensitive to the irrigation water at jointing stage. Yield and irrigation water productivity of spring wheat were found least sensitive to irrigation water at milk-ripe stage. Irrigation to 30, 105, 30, 30 mm at tillering, jointing, heading and anthesis stages respectively were found to be the best to improve irrigation productivity and efficiency, maintaining wheat yield.

**Keywords** irrigation water productivity; Hetao Plain; spring wheat; irrigation optimization; DSSAT