

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.032

水氮管理影响冬小麦品质的 CERES-Wheat 模型模拟

刘建超^{1,2} 何建强^{1,2} 武文杰^{1,2} 李正鹏² 马海姣^{1,2} 冯浩^{2,3}

(1. 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;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 评估 CERES-Wheat 对不同水氮管理的响应, 模拟不同水氮管理对冬小麦品质和产量的影响, 筛选优质高产的水氮管理, 优化冬小麦农田管理措施。首先利用关中地区 2014—2016 年 2 季冬小麦试验数据, 对 CERES-Wheat 进行校准和验证, 并评估其模拟籽粒蛋白质浓度和产量的精度。应用 CERES-Wheat 模拟 51 a (1966—2016) 历史气象数据下不同水氮管理的冬小麦生长情况, 以籽粒蛋白质浓度和产量为主要筛选目标优化水氮管理。结果表明, CERES-Wheat 能够较为精确地模拟冬小麦的生长过程, 但籽粒和地上部生物量在严重氮胁迫条件下被低估, 籽粒蛋白质浓度在低氮胁迫条件下被高估。籽粒蛋白质浓度和产量对不同的水氮处理具有不同的响应, 但可以通过调整灌溉定额、灌溉次数、灌溉时期和施氮量之间的耦合作用达到小麦提质增效的目的。越冬期灌溉 120 mm, 施氮量 262.5 kg/hm² 的水氮管理最适合关中地区的气候条件, 可以同时实现优质、高产、稳产。

关键词: 冬小麦; 籽粒蛋白质浓度; 产量; CERES-Wheat; 水氮管理

中图分类号: S274.1; S512.1⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0271-08

Effect of Irrigation and Nitrogen Fertilizer Managements on Winter Wheat Quality Based on CERES-Wheat Model

LIU Jianchao^{1,2} HE Jianqiang^{1,2} WU Wenjie^{1,2} LI Zhengpeng² MA Haijiao^{1,2} FENG Hao^{2,3}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. Water and Soil Conservation Research Institute, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Market shortage of high-quality wheat and lack of market competitiveness both exist in wheat production in China. The objective was to evaluate response of CERES-Wheat to different irrigation and nitrogen fertilization managements. Field experiments were conducted in the Guanzhong Plain of Shaanxi Province during 2014—2016 for two wheat growing seasons. And its relevant outputs were used to estimate grain protein concentration (G_{PC}). The CERES-Wheat was calibrated and evaluated with the experimental data. CERES-Wheat was run with 51-years (1966—2016) historical weather data to simulate the G_{PC} and yield, and the optimal irrigation and nitrogen fertilization managements were selected. The CERES-Wheat model could accurately simulate winter wheat growth and G_{PC} under different irrigation and nitrogen fertilization managements. While the aboveground and grain biomass were underestimated with severe nitrogen stress, and the relative root mean square error (RRMSE) values between simulated and measured were 10% ~ 30%, which meant that the simulation results were good or medium. And G_{PC} were overestimated with slight nitrogen stress. The RRMSE of G_{PC} was 3.77%, and the simulation results were still excellent. The CERES-Wheat model was able to be used to simulate winter wheat quality and yield. G_{PC} and yield had different responses to irrigation and nitrogen

收稿日期: 2018-01-03 修回日期: 2018-01-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102904)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(QN2009087)和高等学校学科创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 刘建超(1990—),男,博士生,主要从事作物生境过程耦合与调控技术研究, E-mail: 314459698@qq.com

通信作者: 冯浩(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事水土资源高效利用原理与技术研究, E-mail: nerewsi@vip.sina.com

fertilization. But the coupling effects of irrigation depth and nitrogen fertilization, irrigation depth and irrigation frequency, and irrigation depth and irrigation times could improve G_{PC} and yield at the same time. The selected final optimal management, with a basal dressing of 262.5 kg/hm² and 120 mm irrigation depth at wintering stages, showed strong reliability under different climatic conditions in the Guanzhong Plain. The management could simultaneously meet the multiple requirements of high grain quality and yield, and would be more practical.

Key words: winter wheat; grain protein concentration; yield; CERES-Wheat; irrigation and nitrogen fertilization management

0 引言

小麦籽粒品质主要包括营养品质、磨粉品质和加工品质,其中籽粒蛋白质浓度(Grain protein concentration)对上述品质均有重要影响^[1]。基因和环境都对籽粒蛋白质浓度有重要影响,其中环境等因素的影响可占50%^[2-3]。通过水氮管理优化小麦的生长环境对小麦品质的提升具有重要作用。赵广才等^[4]通过灌水时期和灌溉定额优化了小麦籽粒产量和品质。姜东等^[5]研究了施肥量和施肥种类对小麦籽粒蛋白质浓度的影响规律。NANGIA等^[6]认为在设定水氮管理时,应该更多地关注水氮耦合对产量和品质协同效应的影响。但是由于田间试验的限制,试验结果往往不能在长时间序列上得到验证,且处理数量较少难以充分反映客观规律。

近年来使用作物模型与非充分灌溉理论相结合设计灌溉制度逐渐受到人们的重视,具有处理量多、工作量小、可以量化分析的优点^[7]。李艳等^[8]利用RZWQM模型评估水氮管理对作物产量和氮利用效率的影响。王文佳等^[9]利用作物模型分析优化了不同降水年型下关中地区的灌溉制度。但是小麦生长初期,无法判断当年的降水情况,农民的可操作性不强。因此,选择一套符合当地环境情况、具有较高产量和品质保证率的水氮管理,则更有利于田间实践和推广。作物模型与品质的结合近些年也得到了应用。沈家晓^[10]利用遥感数据和作物模型监测小麦籽粒蛋白质浓度。黄芬^[11]则利用作物模型与WebGIS平台进行籽粒品质生态区划研究。但是利用作物模型优化冬小麦水氮管理,从而达到较高品质的研究仍然较少,原因主要是模型不具备模拟籽粒品质的能力^[12],或者对水氮胁迫的响应较差^[13]。DSSAT是当前应用最广泛的作物模型之一,而CERES-Wheat是其集成的小麦模型,能够较为准确地模拟水氮对作物生长的影响^[14]。CERES-Wheat氮平衡模块模拟的主要过程包括有机氮矿化、氮素固定、硝化、反硝化、尿素水解、氨挥发、植物生育期的氮吸收及其在不同器官的转移,能够解释和模拟氮素在土壤-植物中的运动和转移^[15],但其

缺陷在于虽然CERES-Wheat可以模拟籽粒氮的积累过程,但不能直接输出籽粒蛋白质浓度等参数。李振海^[16]则通过简单的折算使模型能够输出籽粒蛋白质浓度,但其仅验证了无水肥胁迫条件下DSSAT模拟籽粒蛋白质浓度的精度。

此外,前人有关水氮管理对冬小麦的影响研究多以产量作为主要筛选指标,较少涉及冬小麦籽粒品质。因此本研究拟使用CERES-Wheat模拟陕西关中地区冬小麦的生长发育、产量和品质的形成过程,以及冬小麦籽粒蛋白质浓度和产量等指标在不同水氮管理条件下的响应机制,评估水氮管理对CERES-Wheat模拟关中地区冬小麦籽粒蛋白质浓度的影响,并以提质增效为目标优化水氮管理。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

田间试验于2014—2016年在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室(34.24°N, 108.05°E,海拔506 m)进行,该地年平均降水量580 mm左右,年平均气温13℃,日照时数2 196 h,降水年内分布不均,属于半湿润易旱区。土壤质地为中壤土,土层厚3 m,无地下水补给。播前土壤基础物理化学性质为:0~20 cm土层有机质质量比16.01 g/kg,全氮质量比1.01 g/kg,速效磷质量比17.66 mg/kg,速效钾质量比273.33 mg/kg;0~100 cm土层平均饱和含水率为31.8 g/g,平均pH值为8.07,平均土壤容重为1.48 g/cm³,平均饱和导水率为30.92 cm/d。

1.2 试验设计与观测指标

种植的小麦品种为“小偃22”。试验采用裂区试验,设置4个灌溉主区(雨养,I0;越冬期60 mm,I1;越冬期60 mm、拔节期40 mm,I2;越冬期60 mm、拔节期40 mm、灌浆期60 mm,I3)4个施肥副区(施氮量0 kg/hm²,N0;105 kg/hm²,N1;210 kg/hm²,N2;315 kg/hm²,N3),重复3次,共48个小区,每小区长6 m、宽2.5 m。

冬小麦生育期内,每隔2周在各小区随机取样10株,各器官分开,在105℃的干燥箱杀青30 min,

75℃干燥至恒质量,测定各器官干质量。收获后小麦干燥脱粒,并测定产量、穗粒数、千粒质量等指标。润麦 24 h 至含水率 14%,将样品成分的测定数据、快速谷物成分测定仪(RX001-5 型,瑞典波通公司)测出的样品蛋白质光密度数据,运用回归分析方法,求出其线性回归方程中的斜率和截距,并将这些数据输入快速谷物成分测定仪,测定小麦籽粒蛋白质含量。植株采样同时测定不同土层土壤的含水率,采样深度为 1 m,共分 7 层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)。然后将土样放入干燥箱 105℃干燥至恒质量,计算土壤质量含水率后乘以各土层干容重,得到土壤体积含水率。

1.3 CERES-Wheat 的校准和验证

校准所需的气象、土壤和管理等数据由田间试验直接测量,作物遗传参数则使用 DSSAT 模型自带的调参工具 DSSAT-GLUE^[17-18]进行估计。首先利用 2014—2015 年试验的足水足肥处理(I3N3; 越冬期 60 mm、拔节期 60 mm 和灌浆期 60 mm; 播前施纯氮 315 kg/hm²)校准模型参数^[19]。然后利用 2015—2016 年 16 个水氮处理进行验证。采用相对均方根误差(Relative root mean square error, RRMSE)和偏差率(Percentage of deviation)来衡量不同水肥条件下模拟值与实测值的差异程度。一般认为 RRMSE 越小则模拟值与实测值的差异也越小,模型模拟结果更准确。当 RRMSE 小于 10% 时为极好,当 RRMSE 为 [10%, 20%) 时为好,当 RRMSE 为 [20%, 30%) 时为中等,当 RRMSE 大于等于 30% 时为差^[20]。偏差率越低则模拟结果越优秀,相关计算公式为

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - o_i)^2}{n}}}{\sum_{i=1}^n \frac{o_i}{n}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 s_i ——模拟值 o_i ——实测值
 n ——样本数量

$$d = \frac{s_i - o_i}{o_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中 d ——偏差率, %

1.4 籽粒蛋白质浓度的模拟

如前所述, CERES-Wheat 不能直接输出籽粒蛋白质浓度,但是可根据《谷物品质测试理论与方法》^[21]使用该模型的两个相关输出变量,即收获期籽粒氮产量与收获期籽粒产量的比值,折算出籽粒氮素浓度和籽粒蛋白质浓度,即

$$G_{PC} = 5.70 \frac{G_N}{G_Y} \times 100\% \quad (3)$$

式中 G_{PC} ——籽粒蛋白质浓度, %
 G_N ——收获期籽粒氮产量, kg/hm²
 G_Y ——收获期籽粒产量, kg/hm²

1.5 灌溉施肥模拟情境的设定与优化

根据关中平原地区灌溉经验,设置了灌溉定额、灌溉时期和施氮量 3 因素交互作用,研究其在长时间序列条件下对冬小麦籽粒蛋白质浓度和产量的影响(表 1)。本研究共设置 5 个灌溉水平,上限为 240 mm(选择常用的 60 mm 灌溉梯度); 7 个灌溉时期,包括分别在越冬期、拔节期、灌浆期各灌 1 水; 分别在越冬期+拔节期、越冬期+灌浆期、拔节期+越冬期各灌 2 水,灌水定额为总灌溉定额的 1/2; 在越冬期+拔节期+灌浆期灌 3 水,灌水定额为总灌溉定额的 1/3。7 个氮肥水平,上限为 315 kg/hm², 52.5 kg/hm²施氮梯度,播前一次性施肥。

表 1 冬小麦水氮管理设定

Tab. 1 Irrigation and nitrogen fertilization management of winter wheat

序号	灌水时期	灌溉定额/ mm	施氮量/ (kg·hm ⁻²)
0	雨养	0	0
1	越冬期	60	52.5
2	拔节期	120	105.0
3	灌浆期	180	157.5
4	越冬期+拔节期	240	210.0
5	越冬期+灌浆期		262.5
6	拔节期+灌浆期		315.0
7	越冬期+拔节期+灌浆期		

根据排列组合,共产生 203 种不同的水氮管理,然后从中筛选出关中地区品质、净利润、水氮利用效率最优的平水年水氮管理。各处理命名规则为 I^xxyN^z(表 1), I^x为模拟灌溉制度,其中 x 代表灌溉时期, y 灌溉定额; N^z为模拟施肥制度, z 为施氮量。例如处理 I⁴42N²中, I⁴42 表示越冬期+拔节期(序号 4)、共灌 120 mm(序号 2), N²表示施氮量为 105 kg/hm²(序号 2),下同。利用 CERES-Wheat 逐个模拟上述 203 个水氮管理在 1966—2016 年的生长情况,以小麦籽粒品质和产量作为最优水氮管理的主要筛选条件,即

$$\begin{cases} G_{PC} \geq 12\% \\ \bar{G}_Y \geq 0.75 G_{Y,MAX} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $G_{Y,MAX}$ ——无水氮胁迫条件下多年产量最大值,取 9 378 kg/hm²

\bar{G}_Y ——设定的水氮管理多年平均产量 kg/hm^2
其中 12% 为优质强筋小麦籽粒蛋白质浓度 (14% 水分基) 的下限^[22]。

2 结果与分析

2.1 CERES-Wheat 的校准

校准的基因型参数能够较好地反映冬小麦品种的相关特性(表 2),足水足肥处理的生育期、 G_Y 、 G_N 、总蒸散量(ET)模拟值与观测值 d 均小于 10% (表 3) 模拟结果极好。物候期模拟值与实测值相同,使模型较为准确地模拟冬小麦的灌浆过程,从而更好地模拟籽粒品质和产量。ET 的 d 为 -2.34%,模型低估了 ET 和作物的生长情况。 G_Y 和 G_N 也因此

被低估, d 分别为 -3.16% 和 -3.41%。但 CERES-Wheat 总体上能够准确地模拟物候期、作物生长、水分和养分的运移。

表 2 “小偃 22” 基因型参数校准结果

Tab. 2 Estimated genetic coefficients of “Xiaoyan 22”

品种参数	校准值
春化敏感系数 P1V	42.54
光周期敏感系数 P1D	45.34
灌浆特征参数 P5/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	405.2
花期籽粒数特征参数 G1/(粒 $\cdot\text{g}^{-1}$)	16.05
潜在灌浆速率参数 G2/($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$)	38.66
分蘖死亡系数 G3/g	1.476
出叶间隔特征参数 PHINT/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$)	67.25

表 3 2014—2015 年足水足肥处理(I3N3)的校准结果

Tab. 3 Calibration results of treatment with sufficient irrigation and fertilization (I3N3) in 2014—2015

开花期			成熟期			G_Y			G_N			ET		
s_i/d	o_i/d	$d/\%$	s_i/d	o_i/d	$d/\%$	$s_i/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$o_i/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$d/\%$	$s_i/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$o_i/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$d/\%$	s_i/mm	o_i/mm	$d/\%$
191	191	0	233	233	0	8.025	8.287	-3.16	170	176	-3.41	458	469	-2.34

2.2 CERES-Wheat 的评估

对比 2015—2016 年不同处理籽粒生物量和地上部生物量实测值与模拟值随时间序列的动态变化,模型基本能够反映作物的生长过程和产量的形成过程(图 1)。但 CERES-Wheat 与大多数模型一样,不能够准确地模拟严重胁迫条件下(N0)作物的生长(图 1a、1e、1i、1m),模拟结果偏低。严重氮胁迫条件下籽粒生物量和地上部生物量的 RRMSE 为 10%~30%,模拟结果为好或者中等,其他处理 RRMSE 基本上小于 10%,模拟结果极好(表 4)。对比 2015—2016 年不同水氮处理,籽粒蛋白质浓度在低胁迫条件(N1)被高估(图 2),但 RRMSE 为 3.77%,模拟结果极好,可以用来模拟籽粒蛋白质浓度对水氮管理的响应。总体而言,CERES-Wheat 能够准确地模拟不同水氮管理条件下冬小麦生长、籽粒产量和品质。

2.3 不同水氮管理对小麦多年平均籽粒蛋白质浓度和产量的影响

籽粒蛋白质浓度随施氮量的增加先减少后增加,当大于 $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,籽粒蛋白质浓度基本不再变化(图 3a)。当施氮量在 $50 \sim 100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,籽粒蛋白质浓度随灌溉定额的增加而增加。当施氮量小于 $50 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 或大于 $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,灌溉对籽粒蛋白质浓度的影响较弱。产量随施氮量的增加而增加(图 3b)。当施氮量大于 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,灌溉定额的增加有益于增产。当施氮量小于 $150 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,灌溉对产量的影响较弱。水氮存在耦合作用,低氮水

平灌溉有利于籽粒蛋白质浓度的增加,高氮水平灌溉有利于产量的增加。

当灌溉定额小于 180 mm 时,减少灌溉次数有利于籽粒蛋白质浓度的增加;当灌溉定额大于 180 mm 时,分次灌溉有利于籽粒蛋白质浓度的增加(图 3c)。产量与其不同,只有高灌溉定额分次灌溉更有益于产量的增加(图 3d)。推迟灌溉时间,增加灌溉定额有利于籽粒蛋白质浓度的积累(图 3e);产量则与此相反,灌溉时间提前,增加灌溉定额有助于产量的增加(图 3f)。

施氮量和灌溉定额的耦合作用对籽粒蛋白质浓度和产量都有显著影响,但灌溉次数和灌溉时期与灌溉定额的耦合作用对产量影响更显著。因此在优化水氮管理时,产量的提高要考虑所有因素,而籽粒蛋白质浓度的提高则主要考虑水氮耦合的影响。

2.4 最优水氮管理的筛选

从 203 种水氮管理中筛选出 11 个符合条件的潜在最优水氮管理(表 5),其中所有入选方案均为高氮处理($262.5, 315 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和越冬期灌溉的参与。籽粒蛋白质浓度均达到该品种籽粒蛋白质浓度上限,因此差异不大。多年平均产量为 $6866 \sim 7404 \text{ kg}/\text{hm}^2$,变幅大于籽粒蛋白质浓度。在符合条件的水氮管理中,I'74N'6 的籽粒蛋白质浓度最高,为 12.04%,I'44N'6 的产量最高,为 $7407 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。所有措施中仅有 I'14N'5、I'13N'5 和 I'12N'5 的施氮量为 $262.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$,其籽粒蛋白质浓度均为 12.02%,产量为 $7314 \sim 7366 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。I'12N'5 仅

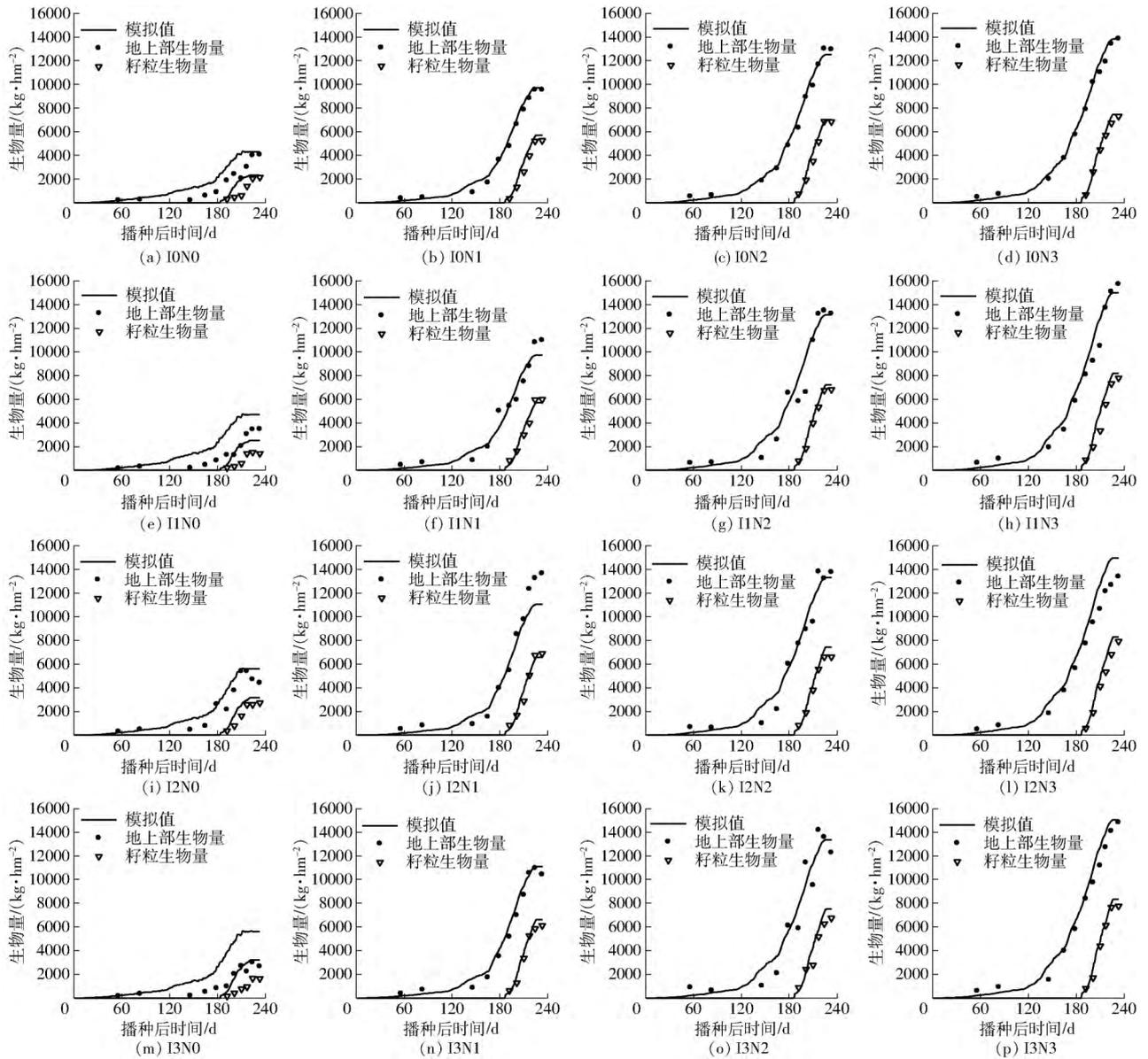


图 1 2015—2016 年 16 种不同水氮管理下地上部生物量和籽粒生物量的模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparisons of simulated and observed biomass of total aboveground and grain with 16 irrigation and nitrogen fertilizer managements in 2015—2016

表 4 2015—2016 年小麦籽粒生物量和地上部生物量
实测值与模拟值的 RRMSE

Tab. 4 RRMSE of grain biomass and aboveground biomass for CERES-Wheat based on dynamic simulation in 2015—2016 %

处理	籽粒生物量	地上部生物量
I0N0	22.6	23.8
I0N1	15.6	7.7
I0N2	7.9	5.8
I0N3	9.1	3.9
I1N0	18.6	15.5
I1N1	9.5	17.2
I1N2	11.1	12.8
I1N3	22.7	13.5
I2N0	19.6	25.4
I2N1	16.7	17.3
I2N2	18.7	10.7
I2N3	9.7	10.4
I3N0	17.5	14.8
I3N1	10.3	5.9
I3N2	9.0	10.8
I3N3	9.2	10.4

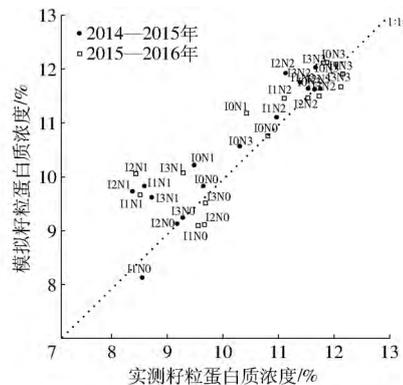


图 2 2014—2016 年 16 种不同水肥处理下籽粒蛋白质浓度模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and observed grain protein concentration under 16 different irrigation and fertilizer treatments in 2014—2016

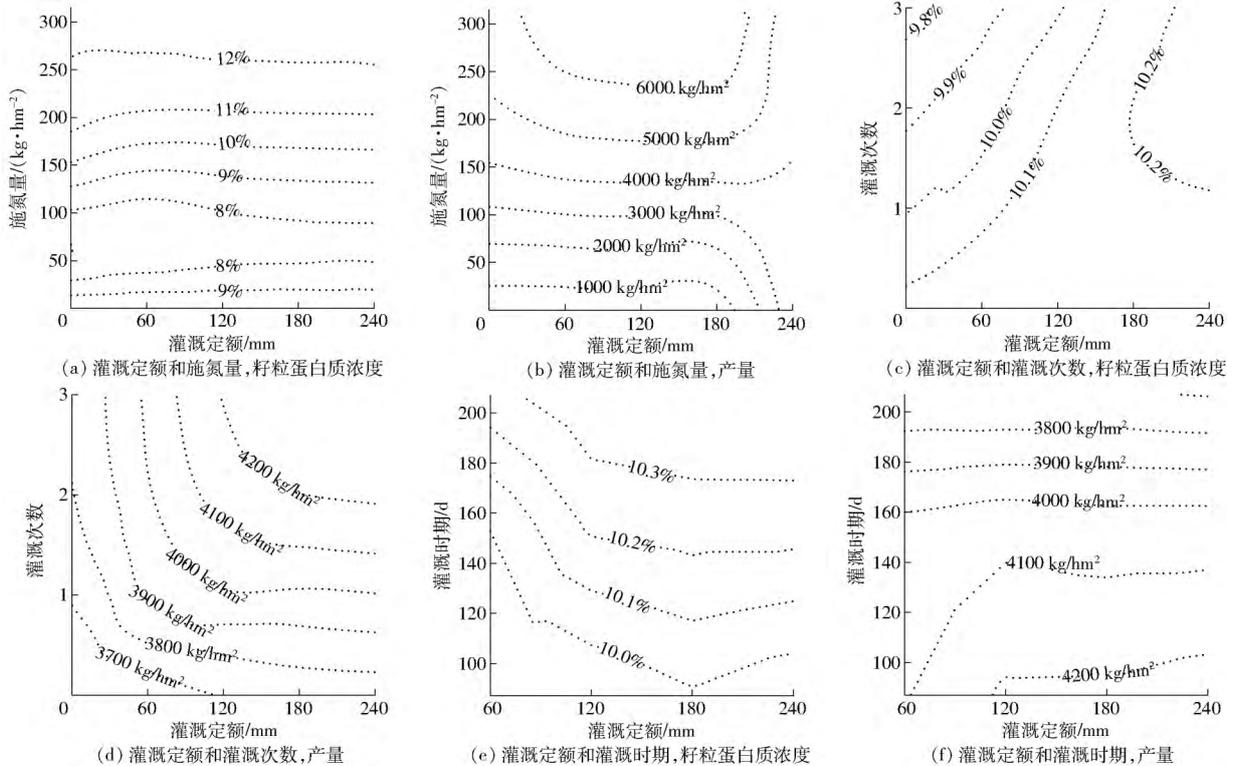


图3 灌溉定额和施氮量耦合、灌溉定额和灌溉次数耦合、灌溉定额和灌溉时期耦合对籽粒蛋白质浓度和产量的影响
 Fig.3 Coupling effects of irrigation depth and nitrogen , irrigation depth and irrigation frequency , and irrigation depth and irrigation days after sowing on grain protein concentration and yield

表5 基于 CERES-Wheat 模拟结果选择的关中地区冬小麦潜在最优水氮管理

Tab.5 Selected potential optimal irrigation and nitrogen fertilization managements based on CERES-Wheat model simulation for winter wheat in Guanzhong Plain

水氮管理	籽粒蛋白质浓度 /%	产量 / (kg·hm ⁻²)
I-74N-6	12.04	7 382
I-43N-6	12.03	7 394
I-44N-6	12.03	7 407
I-53N-6	12.03	7 294
I-54N-6	12.03	7 382
I-11N-6	12.03	6 866
I-14N-5	12.02	7 366
I-13N-5	12.02	7 356
I-12N-5	12.02	7 314
I-52N-6	12.02	6 998
I-72N-6	12.01	7 318

灌溉一次,节省劳动力,符合关中地区的灌溉习惯;同时灌溉施氮量较少,响应了节水节肥的国家战略。因此,选定 I-12N-5 为关中地区以品质为筛选目标的最优的水氮管理。

3 讨论

3.1 模型模拟籽粒蛋白质浓度对水氮管理的响应

CERES-Wheat 基本上可以较为准确地反映水氮管理对作物生长的影响,但在严重氮胁迫(N0)条

件下生物量模拟结果较差。与刘海龙^[23]结果基本相同,认为模型中与氮胁迫相关参数 *b* (作物生育期内氮含量的范围) 的默认值设定不准确,可以通过修改相关参数来调节模型对氮胁迫的响应。本研究虽然设置了不灌溉处理,但关中地区属于半湿润易旱区,小麦季的雨水都较为充足。所以水胁迫相较于氮胁迫并不严重,模拟结果优于氮素胁迫。优化的水氮管理是基于该地区长时间序列模拟的结果,能够反映该地区水分和养分状况。

籽粒蛋白质浓度在严重水氮胁迫条件下结果依然较好,主要是因为籽粒蛋白质浓度的计算是籽粒氮产量与籽粒生物量的比值,两者受水氮胁迫的影响基本一致。同时,灌浆期氮素和生物量的积累主要受温度的影响,而不受水氮胁迫的直接影响^[24]。但因为氮素和生物量的积累也受到同化物供应的影响,而水胁迫影响同化物供应,所以灌浆期氮素和生物量的积累仅受水胁迫的间接影响。与产量模拟结果不同,低氮(N1)条件下籽粒蛋白质浓度模拟结果一般。ASSENG 等^[25]认为籽粒蛋白质浓度模拟不准确主要是因为 CERES-Wheat 中灌浆期温度低于 10℃ 时氮素的积累速度被高估,应当调节基础温度改善籽粒蛋白质浓度的模拟结果。

3.2 水氮管理对籽粒蛋白质浓度和产量的影响

籽粒蛋白质浓度随施氮量的增加先减少后增

加。贺明荣等^[26]研究表明,当施氮量较少时,籽粒生物量的积累速度大于氮素的积累速度,籽粒蛋白质浓度反而出现较大幅度的下降。当施氮量进一步增加时,则与陆景陵^[27]研究结果相似,增施氮肥能够显著增加籽粒蛋白质浓度,但施氮过量时籽粒蛋白质浓度不再增加甚至有下降的趋势。当施氮量大于 250 kg/hm²时,籽粒蛋白质浓度基本不再变化,主要是因为籽粒蛋白质浓度已经达到该小麦品种的上限。当施氮量在 50 ~ 100 kg/hm²时,籽粒蛋白质浓度随灌溉定额的增加而增加。李世娟等^[28]研究认为,干旱胁迫不利于氮素的积累,灌溉显著提高植株的氮吸收量,低氮条件通过灌溉可以缓解干旱胁迫。翟丙年等^[29]研究认为,水氮存在互补效应,充足氮供给弥补了干旱胁迫的不利影响。当施氮量大于 150 kg/hm²时,产量随灌溉定额的增加而增加,翟丙年等^[29]研究表明高氮条件下灌溉能够提高氮素利用率,增加产量。适当的灌溉定额与灌溉次数有利于小麦品质和产量的提升。与马新明等^[30]研究相同,灌溉定额较大时增加灌溉次数能够减少氮淋溶,促进植株的氮素吸收,同时提高小麦品质和产量。本研究结果表明,推迟灌溉时间有利于籽粒蛋白质浓度的提高,王朝辉等^[31]认为越冬期灌溉降低了植物吸氮量,主要原因是过量的水分不利于越冬期植株根系的发育。但越冬期灌溉有利于产量的提高,这与关中地区常见的灌溉制度——越冬期灌溉一致。越冬期灌溉可以实现冬水春用,延长灌溉有效期,有利于冬小麦的营养生长,从而促进灌浆期营养器官干物质向籽粒的再转移^[32]。

3.3 水氮管理的优化

本文在优化最优水氮管理时,并没有选择为不同降水年型优化不同的灌溉制度,而是以杨凌 51 年

历史气象数据为基础,选择多年平均籽粒蛋白质浓度和产量均较高的水氮管理。这样筛选出的水氮管理不仅具有实践指导意义,同时操作性较强,便于推广。

在综合考虑灌溉定额和施氮量后,选择 I'12N'5 (越冬期灌溉 120 mm,施氮 262.5 kg/hm²) 为关中地区以品质为筛选目标的最优的水氮管理。I'12N'5 在筛选出的 11 种水氮管理中,虽然籽粒蛋白质浓度和产量均不是最高,但在籽粒蛋白质浓度和产量没有明显减少的情况下,灌溉定额和施氮量均较低。关中地区常见的灌溉制度为越冬期或返青期灌溉 105 ~ 240 mm^[33]。I'12N'5 虽然越冬期灌溉 120 mm,单次灌溉量较大,但灌溉次数较少,省时省力。选择越冬期灌溉,虽然籽粒蛋白质浓度略有减少但能较大幅度增加产量;较低的灌溉定额与较少的灌溉次数搭配提高了籽粒蛋白质浓度。关中地区常见的氮肥管理为播前施氮 (211 ± 139) kg/hm²^[34],推荐的高产小麦施氮量为 221 kg/hm²^[35]。I'12N'5 的施氮量略大于平均施氮量和高产推荐施氮量,但在保证产量的同时提升了品质。

4 结论

(1) CERES-Wheat 模型能够较为精确地模拟冬小麦的生长发育、产量和品质。但籽粒和地上部生物量在严重氮胁迫 (N0) 条件下被低估,籽粒蛋白质浓度在低氮胁迫 (N1) 条件下被高估。

(2) 通过调整灌溉定额、灌溉次数、灌溉时期和施氮量之间的耦合作用达到了小麦提质增效目的。

(3) 越冬期灌溉 120 mm、施氮量 262.5 kg/hm² 的水氮管理最适合关中地区的气候条件,可以同时实现优质、高产、稳产。

参 考 文 献

- 1 于振文. 小麦产量与品质生理及栽培技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 58 - 65.
- 2 WIESER H, SEILMEIER W. The influence of nitrogen fertilisation on quantities and proportions of different protein types in wheat flour [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1998, 76(7): 49 - 55.
- 3 李金才, 魏凤珍. 氮素营养对小麦产量和籽粒蛋白质及组分含量的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(2): 6 - 8.
LI Jincan, WEI Fengzhen. Effects of nitrogen fertilizer on grain protein content and protein components and yield of wheat [J]. *Chinese Cereals and Oils Association*, 2001, 16(2): 6 - 8. (in Chinese)
- 4 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 不同灌水处理对强筋小麦籽粒产量和蛋白质组分含量的影响 [J]. *作物学报*, 2007, 33(11): 1828 - 1833.
ZHAO Guangcai, CHANG Xuhong, LIU Lihua, et al. Grain yield and protein components responses to irrigation in strong gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1828 - 1833. (in Chinese)
- 5 姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 氮磷钾肥长期配合施用对冬小麦籽粒品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(4): 566 - 571.
JIANG Dong, DAI Tingbo, JING Qi, et al. Effects of long-term combined application of N, P and K fertilizer on grain quality in winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(4): 566 - 571. (in Chinese)
- 6 NANGIA V, TURRAL H, MOLLEN D. Increasing water productivity with improved N fertilizer management [J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2008, 22(3): 193 - 207.
- 7 IQBA M A, SHEN Y J, STRICEVIC R, et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 135(2): 61 - 72.
- 8 李艳, 刘海军, 黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦-夏玉米水氮管理评价 [J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 111 - 120.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150617&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/

- j. issn. 1000-1298. 2015. 06. 017.
- LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat-summer maize cropping system in North China plain using RZWQM [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 111-120. (in Chinese)
- 9 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): 795-802.
- WANG Wenjia, FENG Hao. Water requirement and irrigation systems of winter wheat: CROPWAT-DSSAT model solution in Guanzhong District [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(6): 795-802. (in Chinese)
- 10 沈家晓. 基于近地高光谱遥感与作物生长模型的冬小麦品质监测预报研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- 11 黄芬. 基于 GIS 与模型的小麦籽粒品质生态区划研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- 12 JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3-4): 235-265.
- 13 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): 448-459.
- 14 SINGH A K, TRIPATHY R, CHOPRA U K. Evaluation of CERES-Wheat and cropsyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 776-786.
- 15 BOOLTINK H, VERHAGEN J. Application of simulation models and weather generators to optimize farm management strategies [J]. European Journal of Human Genetics, 1996, 16(12): 1413-1429.
- 16 李振海. 基于遥感数据和气象预报数据的 DSSAT 模型冬小麦产量和品质预报 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- 17 HE J, DUKES M D, JONES J W, et al. Applying GLUE for estimating CERES-MAIZE genetic and soil parameters for sweet corn production [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(6): 1907-1921.
- 18 HE J Q, JAMES W J, GRAHAM W D, et al. Influence of likelihood function choice for estimating crop model parameters using the generalized likelihood uncertainty estimation method [J]. Agricultural Systems, 2010, 103(5): 256-264.
- 19 姚宁, 周元刚, 宋利兵, 等. 不同水分胁迫条件下 DSSAT-CERES-Wheat 模型的调参与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 138-150.
- YAO Ning, ZHOU Yuangang, SONG Libing, et al. Parameter estimation and verification of DSSAT-CERES-Wheat model for simulation of growth and development of winter wheat under water stresses at different growth stages [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 138-150. (in Chinese)
- 20 JAMIESON P D, SEMENOV M A, BROOKING I R, et al. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation [J]. European Journal of Agronomy, 1998, 8(3-4): 161-179.
- 21 田纪春. 谷物品质测试理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 45-46.
- 22 国家质量监督检验检疫总局. 优质小麦 强筋小麦: GB/T 17892—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- 23 刘海龙. 作物生产系统水分和氮素管理的 DSSAT 模型模拟与评价 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- 24 RITCHIE J T, OTTER S. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model [C]. ARS Wheat Yield Project, ARS-38, Natural Technology Information, Springfield, 1985: 159-175.
- 25 ASSENG S, BARTAL A, BOWDEN J W, et al. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat [J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16(1): 25-42.
- 26 贺明荣, 杨雯玉, 王晓英, 等. 不同氮肥运筹模式对冬小麦籽粒产量品质和氮肥利用率的影响 [J]. 作物学报, 2005, 31(8): 1047-1051.
- HE Mingrong, YANG Wenyu, WANG Xiaoying, et al. Effects of different N management modes on grain yield and quality as well as fertilizer N use efficiency of winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(8): 1047-1051. (in Chinese)
- 27 陆景陵. 植物营养学(上) [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 136-139.
- 28 李世娟, 周殿玺, 诸叶平, 等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响 [J]. 华北农学报, 2002, 17(1): 69-75.
- LI Shijuan, ZHOU Dianxi, ZHU Yeping, et al. Effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake and distribution in wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-sinica, 2002, 17(1): 69-75. (in Chinese)
- 29 翟丙年, 李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1188-1195.
- ZHAI Bingnian, LI Shengxiu. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1188-1195. (in Chinese)
- 30 马新明, 李琳, 赵鹏, 等. 土壤水分对强筋小麦‘豫麦 34’氮素同化酶活性和籽粒品质的影响 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 48-53.
- MA Xinming, LI Lin, ZHAO Peng, et al. Effect of water control on activities of nitrogen assimilation enzymes and grain quality in winter wheat [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(1): 48-53. (in Chinese)
- 31 王朝辉, 李生秀. 不同生育期缺水 and 补充灌水对冬小麦氮磷钾吸收及分配影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 265-270.
- WANG Chaohui, LI Shengxiu. Effects of water deficit and supplemental irrigation at different growing stage on uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(3): 265-270. (in Chinese)
- 32 王晓英, 贺明荣, 李飞, 等. 水氮耦合对强筋冬小麦子粒蛋白质和淀粉品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 361-367.
- WANG Xiaoying, HE Mingrong, LI Fei, et al. Coupling effects of irrigation and nitrogen fertilizer on grain protein and starch quality of strong-gluten winter wheat [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(3): 361-367. (in Chinese)
- 33 陕西洛惠渠灌区管理局. 洛惠渠灌区冬小麦灌溉制度 [J]. 中国农村水利水电, 1965(12): 16-17.
- 34 王圣瑞, 马文奇, 徐文华, 等. 陕西省小麦施肥现状与评价研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 31-37.
- WANG Shengrui, MA Wenqi, XU Wenhua, et al. Evaluation and present situation of fertilization for wheat in Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(1): 31-37. (in Chinese)
- 35 张明, 同延安, 郭俊炜, 等. 陕西关中小麦/玉米轮作区氮肥用量及施氮现状评估 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 152-158.
- ZHANG Ming, TONG Yan'an, GUO Junwei, et al. Determination of reasonable nitrogen use and evaluation of application status in wheat/maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 152-158. (in Chinese)