

引用格式:

董莉霞, 李广, 燕振刚, 刘强. 秸秆覆盖量和施氮量对陇中春小麦的产量效应模拟[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 18–23.

DONG L X, LI G, YAN Z G, LIU Q. Simulation of straw mulching quantity and nitrogen on spring wheat yield effects in dryland of central Gansu Province[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 18–23.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



秸秆覆盖量和施氮量对陇中春小麦的产量效应模拟

董莉霞¹, 李广^{2*}, 燕振刚¹, 刘强¹

(1.甘肃农业大学信息科学技术学院, 甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为量化分析秸秆覆盖量和施氮量对旱地春小麦的产量效应和协同作用, 在 APSIM 模型中, 设置秸秆覆盖量和施氮量 2 因素 5 个变化梯度, 组合交叉设计 25 个处理, 利用模型模拟 25 个处理的春小麦产量; 于 2016—2018 年在甘肃省定西市安定区开展小麦大田试验, 得到早播(ESW)、正常播(NSW)、晚播(LSW)春小麦产量的实测值, 利用 APSIM 模型模拟 2016—2018 年春小麦的产量, 将模拟值与实测值进行对比, 对模型的适用性和模拟精度进行分析; 对春小麦产量与秸秆覆盖量、施氮量的耦合关系进行二次多项回归和通径分析, 利用 Matlab 计算春小麦的最大产量及对应的秸秆覆盖量和施氮量。结果表明: 不同处理下产量的模拟值与实测值均位于 15% 置信带内, 模型模拟精度较高, 归一化均方根误差值为 4.64%~12.22%, 表明该模型在研究区具有良好的适用性; 秸秆覆盖量和施氮量的增长对春小麦的产量效应为正效应, 相应关系表现为开口向下的二次抛物线变化关系; ESW、NSW 和 LSW 模拟情景下, 春小麦最大产量分别为 3 548.64、3 149.59、2 507.58 kg/hm²; ESW 模式下, 最佳秸秆覆盖量和施氮量分别为 7 062.04、194.91 kg/hm²; NSW 模式下, 最佳秸秆覆盖量和施氮量分别为 8 211.31、218.81 kg/hm²; LSW 模式下, 最佳秸秆覆盖量和施氮量分别为 6 215.15、162.01 kg/hm²。

关键词: 春小麦; APSIM 模型; 秸秆覆盖量; 施氮量; 产量

中图分类号: S512.1+20.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0018-06

Simulation of straw mulching quantity and nitrogen on spring wheat yield effects in dryland of central Gansu Province

DONG Lixia¹, LI Guang^{2*}, YAN Zhengang¹, LIU Qiang¹

(1.College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This study aimed to quantitatively analyze the yield effect and synergistic effect of straw mulch and nitrogen on spring wheat in dry land. By use of the APSIM model, the crop yield of spring wheat were set 25 treatments were simulated by using the model with 5 gradients over the two variables, straw cover and nitrogen application. The wheat field experiment was performed in Anding District, Dingxi City, Gansu Province from 2016 to 2018, and the measured values of spring wheat yield were collected in the three sowing periods(ESW, NSW and LSW). APSIM model was used to simulate the simulated values of spring wheat from 2016 to 2018, and the simulated values were compared with the measured values to analyze the applicability and simulation accuracy of the model. The coupling relationship between spring wheat yield, straw mulch amount and nitrogen application amount was analyzed by quadratic multinomial regression and path analysis, and the maximum spring wheat yield and the corresponding straw mulch amount and nitrogen application amount were calculated by Matlab. The results showed that both the simulated and measured yields

收稿日期: 2023-08-03

修回日期: 2024-04-16

基金项目: 甘肃省高等学校创新基金项目(2022A-057); 甘肃省重点研究发展计划(22YF7FA116); 甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909); 甘肃省高等学校产业支撑项目(2021CYZC-15、2022CYZC-41)

作者简介: 董莉霞(1981—), 女, 甘肃泾川人, 硕士, 副教授, 主要从事农业信息化研究, donglx@gsau.edu.cn; *通信作者, 李广, 博士, 教授, 主要从事作物模型模拟研究, lig@gsau.edu.cn

under different treatments were within the 15% confidence band, and the simulation accuracy of the model was high, with the normalized root mean square error(RMSE) ranging from 4.64% to 12.22%, indicating that the model had good applicability in the study area. The increase of straw cover amount and nitrogen application amount had a positive effect on spring wheat yield, which showed a quadratic parabolic relationship of opening downward. Under ESW, NSW and LSW simulation, the maximum yield of spring wheat was 3 548.64, 3 149.59 and 2 507.58 kg/hm², respectively. The optimal combinations of straw mulch and nitrogen application were 7 062.04, 194.91 kg/hm² and 8 211.31, 218.81 kg/hm² and 6 215.15, 162.01 kg/hm², respectively.

Keywords: spring wheat; APSIM model; straw mulching quantity; nitrogen; yield

陇中地区属于典型的黄土高原地带,旱地小麦是主要粮食作物之一。小麦生长发育过程中,地表裸露降低了土壤的稳定性和蓄水保墒能力,加大了风蚀度,影响其高产和稳产^[1-2]。在该地区进行农作物生产时,农户常依据经验施氮,缺乏科学性。对于大多数作物而言,合理的秸秆覆盖量和施氮量能改善土壤的生态环境,可以对土壤中的气、热、水、肥之间的关系进行协调,从而提高作物产量^[3]。很多学者^[4-5]通过大田试验研究了不同覆盖方式和施氮对作物的影响,但通过模拟定量分析秸秆覆盖量和施氮量的协同对产量影响的报道较少。本研究中,通过 2016—2018 年不同播期下的大田试验数据,对 APSIM 模型的适用性进行验证,进而利用 APSIM 模型,在秸秆覆盖量和施氮量连续增长的梯度组合下模拟春小麦产量值,分析双因素的产量效应,并利用 Matlab 计算最大产量值,继而求出最佳组合对应的双因素值;通过产量和双因素的通径分析,得出秸秆覆盖量和施氮量的连续增长和产量之间的关系,旨在阐明其对产量的调控机制,为中国西北地区旱地春小麦的科学耕作和合理施氮提供依据。

1 试验区概况

试验区位于甘肃省定西市安定区安家坡乡,地处甘肃省中部偏南,是典型的黄土高原丘陵区,属中温带大陆性半干旱气候,海拔高度 2 000 m,全年无霜期 140 d 左右,年均气温 6.4 °C,年平均降水量 395 mm。降水主要集中在 7、8、9 月,占全年降水量的 60%^[6],降水是维持作物生长的唯一水源。年均蒸发量 1 540 mm,年均日照时数 2 300 h,属于典型的半干旱雨养农业区。土壤类型为黄绵土。

2 材料与方法

2.1 APSIM 模型及模型设置

2.1.1 APSIM 模型

APSIM 模型是澳大利亚农业生产系统研究所

开发的一种种植系统模型。APSIM 模型的输入信息包括:气象资料(逐日最高温度、逐日最低温度、降水量、太阳辐射)、土壤参数(容重、pH 值、有机碳含量等)和农田管理数据(播种日期、施肥管理、秸秆覆盖量等),模拟物候过程、生物量积累和分配、叶面积指数以及产量和产量构成因素等输出信息^[7]。本研究中的气象数据来源于甘肃省气象局定西市安定区 1971—2018 年的资料,土壤的相关参数依据大田试验实测数据设置。

2.1.2 模型中的播期设定

APSIM 模型以各生长阶段累积积温(热时间 TT)为判断标准,通过达到累积积温来预测春小麦某一生长阶段持续天数^[8]。采用春小麦最适宜温度和上、下限温度,即三基点法^[9]来确定播期。

2.1.3 模拟情景设计

在 APSIM 模型中,耕作措施设置为与大田试验一致的传统耕作,在模型组件“paddock”中,对耕作措施工具包“Manage folder”中的“Crop Management”进行设置。在模型的“climate control”模块中分别设定 3 个播期情形(ESW、NSW 和 LSW)。秸秆覆盖量和施氮量设置为连续增长梯度,在模型的表层覆盖工具包“Surface Organic Matter”设置秸秆覆盖量的变化梯度分别为 0、2 000、4 000、6 000、8 000 kg/hm²,在模型的“Manage folder”菜单下“Fertilise at Sowing”设置施氮量的变化梯度分别为 0.0、52.5、105.0、157.5、210.0 kg/hm²。在 2 因素 5 水平下组合交叉为 25 个处理,模拟 1971—2018 年每个处理的春小麦产量,求出每个处理 48 年产量的平均值。

2.2 大田试验设计

2016—2018 年进行大田定位试验。小麦品种为定西 42 号。播期分为 3 种情形,早播(ESW, 3 月 3 日播种),正常播(NSW, 3 月 18 日播种),晚播(LSW, 3 月 31 日播种)。大田试验小区面积为 80

m²(20 m×4 m)，随机区组排列，设 3 次重复。翻施深度约 18 cm，小区施尿素 228 kg/hm²(氮的质量分数约 46%)，P₂O₅ 约 105 kg/hm²。肥料用作基肥，在播种时一次性施入，传统耕作；播种后，将前一年收获的小麦秸秆进行表层覆盖，覆盖量为 4 000 kg/hm²。

2.3 计算方法与数据处理

2.3.1 APSIM 模型参数调整及精度评价

对 APSIM 模型进行参数调整，模型中参数的调整采用初始变量扰动法，对主要参数进行敏感性分析，根据资料对敏感性较强的参数进行调整，然后利用 2016—2018 年不同播期的产量数据进行模型验证。

APSIM 模型在输入的数据背景下，模拟 2016—2018 年的产量值，将模拟的春小麦产量值与 2016—2018 年实际试验数据进行对比，分别利用均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(NRMSE)和决定系数(R²)来评估模型的精确度^[10]。

2.3.2 春小麦环比增长率的计算

按照文献[11]的方法计算春小麦环比增长率。将试验设计中最大秸秆覆盖量(8 000 kg/hm²)平均分为 10 个梯度，最大施氮量 (210 kg/hm²) 平均分为 10 个梯度，根据相应的拟合回归模型计算出小麦的产量值；采用 Origin 2022 作出环比增长率的变化图。

2.3.3 数据处理与计算

采用 DPS 对旱地春小麦产量进行二次多项式回归分析；采用 Sigmaplot 12.5 和 Origin 2022 绘图。

3 结果与分析

3.1 模型的适用性

对 2016—2018 年春小麦产量的实测值和模拟值进行分析验证。结果(图 1)表明，旱地春小麦产量的模拟值与实测值均分布在 15%置信带内，模型的模拟结果显示出较高的精确度。

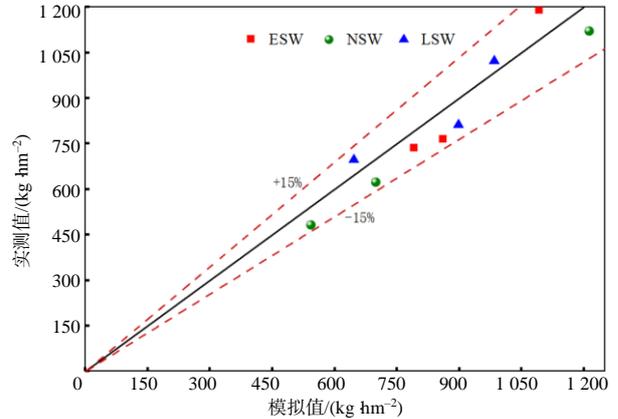


图 1 春小麦产量模拟值与实测值

Fig.1 The simulated value and measured value of spring wheat yield

为进一步验证模型的适用性，计算出归一化均方根误差(RMSE)、相对均方根误差(NRMSE)和决定系数(R²)，以评估模拟结果与观测结果的吻合度和模型的模拟精度。通过对比 2016—2018 年 3 种播期下实际产量与模拟产量(表 1)，发现 3 个播期、3 个年份的决定系数均接近 1。不同处理下产量模拟值与实测值的 RMSE 值为 39.15~96.82 kg/hm²，NRMSE 值为 4.64%~12.22%，均在 15%以下，说明 APSIM 模型在研究区具有良好的适用性。

表 1 APSIM 模型模拟精度分析结果

播期	RMSE/(kg hm ⁻²)			NRMSE/%			R ²
	2016 年	2017 年	2018 年	2016 年	2017 年	2018 年	
ESW	96.28	56.11	96.47	10.80	6.26	10.76	0.972 58
NSW	96.82	75.08	90.70	7.99	10.11	12.22	0.999 81
LSW	85.34	51.59	39.15	10.50	6.12	4.64	0.815 39

3.2 秸秆覆盖量和施氮量与小麦产量的关系

3.2.1 产量与双因素拟合方法

采用 DPS 对旱地春小麦产量与秸秆覆盖量、施氮量的耦合关系进行二次多项式回归分析。以春小麦产量 Y (Y₁、Y₂、Y₃ 分别为 ESW、NSW、LSW 播期的产量) 为应变量，秸秆覆盖量 X₁ 和施氮量 X₂ 为自变量，采用二元二次方程拟合方法，分析双因

素与小麦产量的关系。根据 3 种播期下模拟出的数据，得到的拟合方程分别为：

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 911.433\ 829 + 0.292\ 109X_1 + 0.103\ 351\ 83X_2 - \\
 &\quad 5.23 \times 10^{-6}X_1^2 - 2.955\ 6 \times 10^{-2}X_2^2 + 1.68 \times 10^{-4}X_1X_2; \\
 Y_2 &= 1\ 068.450\ 971 + 0.257\ 55X_1 + 9.355\ 972X_2 - \\
 &\quad 1.9 \times 10^{-5}X_1^2 - 2.651\ 9 \times 10^{-2}X_2^2 + 2.49 \times 10^{-4}X_1X_2; \\
 Y_3 &= 852.166\ 229 + 0.269\ 461X_1 + 10.099\ 137X_2 - \\
 &\quad 2.1 \times 10^{-5}X_1^2 - 3.017\ 2 \times 10^{-2}X_2^2 + 5.2 \times 10^{-5}X_1X_2.
 \end{aligned}$$

上述方程中的 R^2 均大于 0.9, 表明 3 个播期的拟合方程均可较好地描述产量值与秸秆覆盖量和施氮量之间的关系。3 个方程中, 自变量 X_1 和 X_2 的一次项系数均为正数, 表明不同播期, 秸秆覆盖量和施氮量对春小麦产量的效应为正效应; X_1 和 X_2 的二次项系数都为负数, 表明试验设计的各处理的春小麦产量与秸秆覆盖量和施氮量的关系均表现为开口向下的二次抛物线变化关系; 3 个方程中, X_1 和 X_2 的交互系数均是正值, 说明秸秆覆盖量和施氮量互作对春小麦产量具有耦合促进作用。

3.2.2 通径分析

为了进一步分析秸秆覆盖量(X_1)、施氮量(X_2)对春小麦产量(Y)的效应, 对因变量 Y 和自变量 X_1 、 X_2 进行通径分析。结果(表 2)显示, ESW、NSW 和 LSW, $X_1 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别为 1.454 4、1.251 3、1.727 2, 说明在同一施氮量下, 春小麦产量与秸秆覆盖量成正比; $X_2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别为 1.350 8、1.193 2、1.699 3, 说明在同一秸秆覆盖量下, 增加施氮量, 春小麦产量呈上升趋势; $X_1 X_2 \rightarrow Y$ 的直接通径系数分别为 0.138 6、0.200 6、0.055 1, 说明秸秆覆盖量和施氮量之间存在正协同效应, 即当一个因素用量提高时, 会耦合促进另一个因子效应的发挥。

表 2 秸秆覆盖量与施氮量双因素通径分析结果

Table 2 The results of two-factor path analysis of straw mulching quantity and nitrogen

播期	变量因子的系数				
	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$
ESW	1.454 4	1.350 8	-0.958 9	-0.846 0	0.138 6
NSW	1.251 3	1.193 2	-0.754 6	-0.727 6	0.200 6
LSW	1.727 2	1.699 3	-1.139 4	-1.111 8	0.055 1

3.2.3 秸秆覆盖量和施氮量对春小麦产量的影响

根据 ESW、NSW 和 LSW 情形下产量的拟合方程, 采用 Sigmaplot 12.5 绘制出春小麦产量变化三维图(图 2)。从图 2 可以看出, 春小麦产量随着秸秆覆盖量和施氮量的梯度变化而变化, 且变化趋势基本一致。在 3 种播期的模拟试验下, 随着秸秆覆盖量的增加, 春小麦产量呈现低-高-低的二次抛物线变化趋势; 春小麦产量先随施氮量的增加而增加, 增加到某一量时, 产量随之下降。具体变化如下: ESW 下, 当秸秆覆盖量为 6 000 kg/hm², 施氮量为 210 kg/hm²时, 春小麦产量最高, 为 3 281.14 kg/hm², 为同播期一般情况下(施氮量 105 kg/hm²、未秸秆覆盖)产量值的 1.88 倍; NSW 下, 当秸秆覆盖量为 8 000 kg/hm², 施氮量为 210 kg/hm²时, 春小麦产量最高, 为 3 535.14 kg/hm², 为同播期一般情况的 1.91 倍; LSW 下, 当秸秆覆盖量为 6 000 kg/hm², 施氮量为 157.5 kg/hm²时, 春小麦产量最高, 为 2 675.14 kg/hm², 比同播期一般情况下的产量增加 64%。

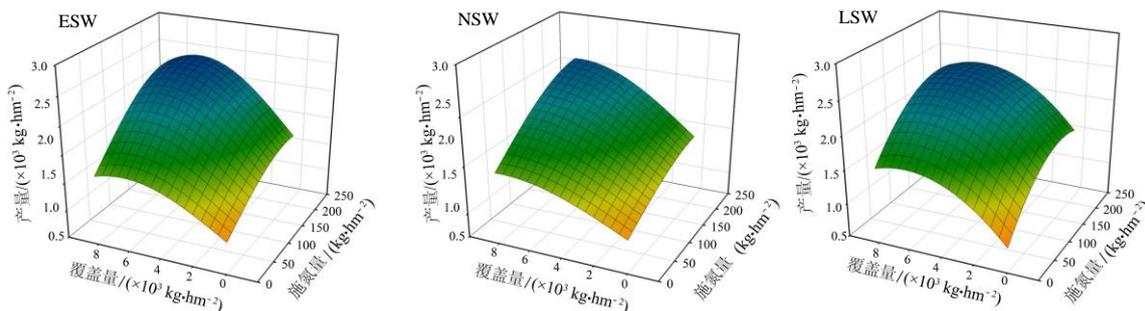


图 2 春小麦产量三维曲面图形

Fig.2 Three-dimensional curved surface pattern of spring wheat yield

3.3 春小麦最高产量预测

根据 ESW、NSW 和 LSW 情形下拟合的数学模型, 通过 Matlab 来预测春小麦最大产量值, 并且计算出最大产量下对应的秸秆覆盖量和施氮量。由拟合方程分别对不同变量求偏导数, 通过 Matlab 分析, 结果如表 3 所示。ESW 模拟下, 春小麦最大预测产

量为 3 548.64 kg/hm², 对应的最适秸秆覆盖量为 7 062.04 kg/hm², 最适施氮量为 194.91 kg/hm², 双因素的最佳组合均在模拟试验的设计范围之内; NSW 模拟下, 最大产量的预测值为 3 149.59 kg/hm², 对应的最适秸秆覆盖量为 8 211.31 kg/hm²、最适施氮量为 218.81 kg/hm², 与 ESW 的相比, 秸秆覆盖量增加了 16.27%, 施氮量增加了 12.26%, 双因素的最佳

组合均超出模拟试验的设计范围,但符合实际情况;LSW 模拟下,最大产量的预测值为 2 507.58 kg/hm²,对应的最适秸秆覆盖量为 6 215.15 kg/hm²,最适施氮量为 162.01 kg/hm²,与 ESW 的相比,秸秆覆盖量减少了 11.99%,施氮量减少了 16.88%。LSW 模拟下,预测的最大产量值低于 ESW 和 NSW 的。

表 3 春小麦最大预测产量及对应的最佳秸秆覆盖量和施氮量

播期	nitrogen		kg/hm ²
	最大产量	覆盖量	
ESW	3 548.64	7 062.04	194.91
NSW	3 149.59	8 211.31	218.81
LSW	2 507.58	6 215.15	162.01

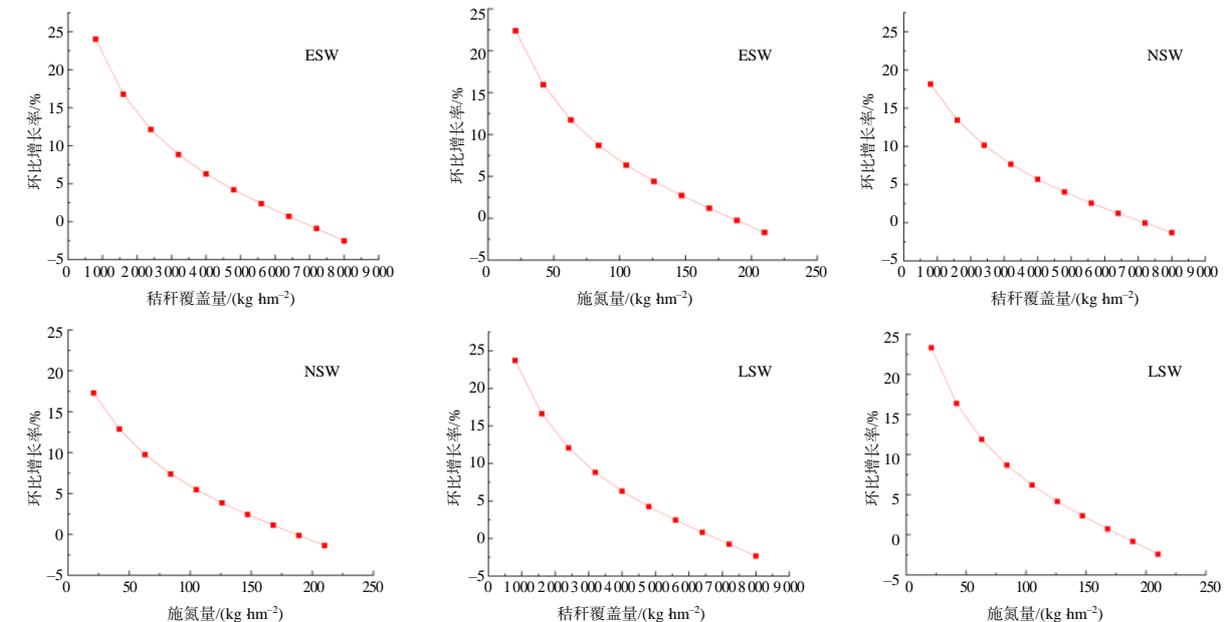


图 3 春小麦产量环比增长率

Fig.3 The sequential growth rate of spring wheat yield

4 结论与讨论

提高模型的预测精度一直是学者们研究的内容之一^[12]。本研究中,对不同播期下 2016—2018 年春小麦产量模拟结果与实测结果进行验证分析,结果显示春小麦产量值模拟结果与实测结果均位于 15% 置信带内,表明该模型在研究区具有良好的适用性。对研究区 2016—2018 年春小麦产量的实测值和模拟值进行归一化均方根误差和相对均方根误差分析,结果显示模型的模拟结果与观测结果

3.4 春小麦产量环比增长率

为了进一步分析增加秸秆覆盖量和施氮量对小麦增产的影响,通过计算春小麦产量环比增长率来预测小麦产量增加空间的趋势。从图 3 可以看出,在 LSW 下,二因素均在第 8~9 梯度之间开始呈现负增长趋势,说明秸秆覆盖量超过 7 200 kg/hm²、施氮量大于 189 kg/hm²时,小麦产量环比增产率开始减小,再加大秸秆覆盖量和施氮量,对小麦增产效果不明显;在 NSW 和 ESW 下,春小麦产量环比增长率的变化趋势和 LSW 的相同。但在不同播期下,产量环比增长率下降数值有所不同,ESW 下,当秸秆覆盖量持续增加,春小麦产量环比增长率下降最快;LSW 下,当施氮量持续增加,春小麦产量环比增长率下降最快。

吻合度良好,模型的模拟精度较高。

在陇中黄土高原半干旱农作区,春寒现象较明显,秸秆覆盖可以有效降低春季极端低温对小麦发育的灾害^[13-14]。本研究中,在 3 个播期的拟合方程中,覆盖量的一次项系数为正数,推测当施氮量不变时,随着秸秆覆盖量的增加,产量的模拟值随之增加。原因是在小麦生育前期,秸秆覆盖量的增加,给小麦的生长发育创造了良好的水肥条件,对于小麦分蘖有积极作用;而在作物生长发育中后期,秸秆覆盖增加了小麦的库容,提升了光合性能,从而

使春小麦增产^[15]。和传统耕作措施相比, 秸秆覆盖处理后, 春小麦成活率和出苗率得以改善, 秸秆覆盖为苗期小麦的正常生长提供了较好的环境^[16]。本研究发现, 当秸秆覆盖量大于 7 200 kg/hm² 时, 小麦环比增产率有减弱的趋势, 覆盖量过大对旱地春小麦增产起到了负面作用。

研究区所在的黄土丘陵区田间土壤条件贫瘠, 属于典型的黄绵土质, 氮肥对于春小麦的生长发育和产量形成极为重要^[17]。本研究中, 在 3 个播期的拟合方程中, 施氮量的一次项系数为正数, 可知当秸秆覆盖量不变时, 随着施氮量的增加, 产量的模拟值随之增大。可能是适宜的施氮量增加了小麦花后的氮素累积量和转运量^[18], 有助于作物的干物质积累^[19]。本研究结果表明, 春小麦产量与施氮量之间呈二次抛物线关系, 春小麦产量先随施氮量的增加而增加, 当增加到某一量时产量随之下降。在陇中旱地小麦区 ESW、NSW 和 LSW 播种情形下, 当施氮量大于 189 kg/hm² 时, 春小麦产量增长减缓。

本研究中, ESW、NSW 和 LSW 播期情形下, 秸秆覆盖量和施氮量之间存在正协同效应。在早播 (ESW) 情景下, 春小麦最高预测产量 (3 548.64 kg/hm²) 对应的最适秸秆覆盖量和施氮量分别为 7 062.04、194.91 kg/hm²; 适播 (NSW) 模拟下, 最高产量的预测值 (3 149.59 kg/hm²) 对应的最适秸秆覆盖量和施氮量分别为 8 211.31、218.81 kg/hm², 与 ESW 的相比, 秸秆覆盖量增加了 16.27%, 施氮量增加了 12.26%; 晚播 (LSW) 模拟下, 最高产量的预测值 (2 507.58 kg/hm²) 对应的最适秸秆覆盖量和施氮量分别为 6 215.15、162.01 kg/hm², 与 ESW 的相比, 秸秆覆盖量减少了 11.99%, 施氮量减少了 16.88%。

参考文献:

- [1] 卢秉林, 车宗贤, 包兴国, 等. 留茬免耕播种对河西绿洲灌区春小麦出苗和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3249–3256.
- [2] 张文颖, 张恩和, 景锐, 等. 河西绿洲灌区春小麦留茬免耕的防风蚀效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 244–249.
- [3] 尹宝重, 甄文超, 马燕会. 深松一体化播种对夏玉米农田土壤水热特征及微生物动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 285–293.
- [4] 李廷亮, 谢英荷, 高志强, 等. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735–2746.
- [5] 屈会峰, 刘吉飞, 赵护兵. 减氮结合不同覆盖对冬小麦产量、水氮利用及根系的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2270–2276.
- [6] 王钧, 李广, 闫丽娟, 等. 旱地春小麦产量对不同生育阶段温度变化的响应模拟[J]. 中国农业科学, 2020, 53(5): 904–916.
- [7] XIAO D P, TAO F L, SHEN Y J, et al. Combined impact of climate change, cultivar shift, and sowing date on spring wheat phenology in northern China[J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(5): 820–831.
- [8] 雒翠萍, 聂志刚, 王钧, 等. 基于 APSIM 模型的旱地春小麦生育期的播期和耕作效应分析[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1556–1563.
- [9] 殷新佑. 对预测作物发育的积温法的评价[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 474–482.
- [10] 颜学斌, 王俊, 王科锋, 等. 基于 DNDC 模型模拟的冬小麦田土壤有机碳和作物产量对地表覆盖的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 42–49.
- [11] 李晓州, 郝明德, 赵晶, 等. 不同降水年型下长期施肥的小麦产量效应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3237–3244.
- [12] KUMAR U, MOREL J, BERGKVIST G, et al. Comparative analysis of phenology algorithms of the spring barley model in APSIM 7. 9 and APSIM next generation: a case study for high latitudes[J]. Plants, 2021, 10(3): 443.
- [13] D ÍAZ-PÉREZ J C. Root zone temperature, plant growth and yield of broccoli [*Brassica oleracea* (Plenck) var. *italica*] as affected by plastic film mulches[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 123(2): 156–163.
- [14] ZHANG S L, LÖVDAHL L, GRIP H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1): 78–86.
- [15] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Straw mulching improves soil water content, increases flag leaf photosynthetic parameters and maintains the yield of winter wheat with different irrigation amounts[J]. Agricultural Water Management, 2021, 249: 106809.
- [16] 祁小平, 李广, 袁建钰, 等. 保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 312–321.
- [17] 李浩然, 李雁鸣, 李瑞奇. 灌溉和施氮对小麦产量形成及土壤肥力影响的研究进展[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(2): 196–210.
- [18] 马耕, 张盼盼, 王晨阳, 等. 高产小麦花后植株氮素累积、转运和产量的水氮调控效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 798–805.
- [19] 雷钧杰, 张永强, 赛力汗赛, 等. 施氮量对滴灌冬小麦干物质积累、分配与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(8): 1078–1086.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正