

陇中旱地春小麦产量对主要气象因子变化和氮肥施用的响应

姚群英¹, 刘 强^{1*}, 巩敬锦²

(1.甘肃农业大学 信息科学技术学院, 兰州 730070;

2.中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要:【目的】探究气候变化和氮肥施用对旱地春小麦产量的耦合效应。【方法】基于研究区 1970—2017 年历史气象数据以及对气候变化敏感的免耕覆盖耕作方式下 2016—2017 年春小麦生育期实测数据及 2005—2009、2013—2015 年田间实测产量数据, 通过 APSIM 进行了 5×5×5 次日平均温度、日平均辐射量、CO₂ 质量分数、氮肥施用量单独变化及共同变化的模拟试验, 研究不同降水年型主要气象因子和氮肥施用量对旱地春小麦产量的影响。【结果】①APSIM 模型对试验区春小麦生育持续天数模拟效果为 $R^2=0.98$ 、 $NRMSE=5\%$; 春小麦产量模拟效果为 $R^2=0.91$ 、 $NRMSE=12\%$ 、 $D=0.95$, 故 APSIM 来模拟免耕覆盖耕作方式下的旱地春小麦的生长发育及产量效果较好。②3 种降水年型下, 选定气象因子和氮肥施用量的单独作用及交互作用均能显著影响旱地春小麦产量; 通过调控气象因子和氮肥施用量, 在枯水年取得的增产效应最显著。③相同试验条件下, 丰水年春小麦产量最高且最稳定。【结论】降水量的增加不仅能提高旱地春小麦产量, 还将影响其他气象因子对旱地春小麦产量的作用效果和作用性质并提高氮肥施用对春小麦产量的增产效应。

关 键 词: 旱地春小麦; 气候变化; APSIM

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023183

OSID:



姚群英, 刘强, 巩敬锦. 陇中旱地春小麦产量对主要气象因子变化和氮肥施用的响应[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(11): 74-82.

YAO Qunying, LIU Qiang, GONG Jingjin. Influence of Meteorological Factors and Nitrogen Fertilization on Spring Wheat Yield in the Longzhong Dryland Region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 74-82.

0 引 言

【研究意义】气候变化已经深刻影响到了我国的农业生产和人民生活, 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次气候变化评估报告 (AR6) 第一工作组报告明确指出, 全球平均表面温度较工业化前已上升约 1.07 °C, 除非未来几十年内全球削减 CO₂ 等温室气体排放量, 否则全球气温升高幅度预计将超过 1.5 °C 和 2 °C^[1]。降水、辐射等对农作物产量起到显著影响的气象因子也在随着全球温度上升和 CO₂ 排放的急剧增加而持续发生变化^[2-5]。小麦作为主要粮食作物, 保证其产量的稳定对保障我国的粮食安全至关重要。

【研究进展】西北地区气候条件受全球气候变化影响严重, 而该地区是我国小麦种植的优势区域, 在该地区被大量种植的旱作小麦生长发育严重依赖自然条件^[6-8]。在 CO₂、降水、温度等气象因子变化的情景下, 氮肥施用影响小麦的生长发育和产量形成, 氮肥的合理施用将有助于减少气候变化对小麦生产带来的风险, 提高小麦产量^[9-11]。以 APSIM、DSSAT、CCSODS、GOSSYM 等模型为代表的主流农作物模型已被广泛应用于研究气候变化对农作物的影响, 而与其他作物模型相比, APSIM 模型简单易用、便于扩展, 在黄土高原地区的适用性更好, 能够高精度地模拟不同气候条件和田间管理措施下旱地春小麦产量形成^[12]。聂志刚等^[13]利用 APSIM 模型研究定西地区春小麦产量对日最高温度、最低温度变化的响应, 研究表明日最高温度、最低温度单独升高下, 最低温度带来增产效应, 最高温度带来减产效应, 共同升高时会对产量带来减产效应, 且最高温度升高带来的减产效应远大于最低温度升高带来的增产效应。高雪慧等^[14]通过 APSIM 模型研究未来气候情景下旱地春小麦产量发现, 在 RCP4.5 和

收稿日期: 2023-04-25 修回日期: 2023-07-18 网络出版日期: 2023-11-10
基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (20JR10RA509); 甘肃省高等学校创新基金项目 (2021B-122); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目 (2021CZYC-15); 甘肃农业大学学科发展基金项目 (GAU-XKFZJ-2020-13)
作者简介: 姚群英 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业作物模型研究。E-mail: 1159446801@qq.com
通信作者: 刘强 (1974-), 男, 教授, 主要从事农业作物模型研究。
E-mail: liuq@gsau.edu.cn
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

RCP8.5 情景下, 与 2007—2019 年相比, 2020—2060 年西北地区的温度和降水量都将增加, 2 种情境下年均日最高温度较基准期分别升高 0.8、0.9 °C, 年均日最低温度分别升高 0.9、1.1 °C, 降水量分别增加 31.5、44.2 mm, 降水量和温度的变化会使小麦获得增产效应。温度和辐射量是影响小麦产量的重要因素, 在低温情景下, 小麦不同生育期内增温, 将显著提升小麦光能利用效率、呼吸速率和潜在光合速率, 增加小麦的穗数和千粒质量, 而年平均辐射量和年平均温度同时升高时, 年平均辐射量和年平均温度存在正的互作效应, 但年平均辐射量增加所带来的增产效应并不能弥补年平均温度升高所导致的减产效应^[15-17]。

【切入点】综上所述, 在使用气象因子构建合成气象情景模拟作物产量上, 使用二因素或三因素的情景较多, 而多气象因子与氮肥施用耦合变化下对小麦产量影响的报道较少^[17-19]。【拟解决的关键问题】为此, 通过 APSIM 模型来模拟不同降水年型

下日平均温度、日平均辐射量、CO₂ 质量分数、氮肥施用量变化时旱地春小麦典型产区的产量, 评估气候变化对旱地春小麦产量所带来的风险, 分析不同气候条件下氮肥施用对产量的影响, 为旱地春小麦在错综复杂的气候变化下更好地迎接主要气象因子变化及合理施用氮肥提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

大田试验区位于甘肃省定西市安定区凤翔镇安家沟村 (104°38'E, 35°35'N), 属于典型的黄土丘陵雨养农业区, 海拔 1 980 m, 光照充足, 昼夜温差大, 年均降水量 385 mm, 年潜在蒸发量为 1 531 mm, 属于半干旱大陆性气候; 土壤以黄绵土为主, 耕层土壤体积质量为 1.26 g/cm³, 土壤有机质量为 12.01 g/kg, 全氮量为 0.61 g/kg, 具体土壤属性参数如表 1 所示。

表 1 土壤属性特征

Table 1 Soil properties

土层深度/cm	体积质量/ (g cm ⁻³)	土壤导水率/ (mm h ⁻¹)	风干含水率/ (mm mm ⁻¹)	田间最大持水率/ (mm mm ⁻¹)	饱和含水率/ (mm mm ⁻¹)	硝态氮量/ (kg hm ⁻²)	铵态氮量/ (kg hm ⁻²)
0~5	1.290	0.013	0.013	0.270	0.460	4.671	14.514
5~10	1.226	0.013	0.013	0.270	0.490	5.895	12.462
10~30	1.325	0.046	0.046	0.271	0.450	5.014	12.623
30~50	1.200	0.071	0.071	0.270	0.501	3.663	8.311
50~80	1.140	0.087	0.087	0.262	0.520	4.030	10.572
80~110	1.140	0.103	0.103	0.270	0.520	5.854	9.081
110~140	1.250	0.107	0.107	0.273	0.482	3.913	9.332
140~170	1.120	0.115	0.115	0.270	0.530	3.350	8.772
170~200	1.110	0.127	0.127	0.274	0.532	3.436	9.023

1.2 APSIM 模型简介及校验

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 是由澳大利亚联邦科工组织 (CSIRO) 和昆士兰州政府的农业生产系统研究组 (APSRU) 联合研制开发的, 通过“可插拔”方式来组合使用作物模块、土壤模块、管理模块和气象模块等系统子模块, 以日尺度模拟小麦、苜蓿、燕麦、玉米等作物生长发育全过程中对太阳辐射、温度、光周期、土壤水分和氮肥施用等气象因子变化和田间管理措施变化响应的农作物模型。其中, 作物模块主要模拟被试作物的生长发育和产量形成的过程, 土壤模块模拟土壤有机质动态、水土流失等土壤水分和养分的运移机理, 管理模块包括设定被试作物的播种与收获、耕作方式、肥料施用以及调用其他子模块等功能。除此之外, APSIM 模型还为用户提供了 1 个可编译平台, 通过该平台, 用户可以通过 Python、R 等编程语言来针对试验的特殊需求, 开发定制功能, 接入模型当中。选用标准统计参数中的相关性决定系

数 (R^2)、归一化均方根误差 ($NRMSE$) 和一致性指标 (D) 作为检验指标对模型适用性进行评价。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_s - Y_{smean})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_{omean})^2}, \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_o - Y_s)^2}}{Y_{mean}}, \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_s - Y_o)}{\sum_{i=1}^n (|Y_s - Y_{smean}| + |Y_o - Y_{omean}|)}, \quad (3)$$

式中: n 为试验年份; Y_o 为产量实测值; Y_s 为模拟值; Y_{mean} 为实测产量的平均值; Y_{smean} 为模拟产量的平均值。 R^2 、 D 的范围处于 0~1, 其值越趋近于 1, $NRMSE$ 的值越趋近于 0, 表明模拟值与实测值之间误差越小, 模拟的稳定性越好。

1.3 试验设计

1.3.1 田间试验设计

田间试验小区面积为 80 m² (20 m×4 m), 供试小麦品种为定西 35 号春小麦, 品种参数如表 2 所示。

播种时间为 2005—2009、2013—2017 年每年 3 月中旬, 耕作方式为免耕覆盖, 播种时使用免耕播种机一次性完成施肥和播种, 播种深度为 30 mm, 行距为 250 mm, 播种量为 187.5 kg/hm², 施氮量为 105 kg/hm²。收获时间为 2005—2009、2013—2017 年每年 7 月中旬, 收获后用 2, 4-D 和草甘磷除草, 收获脱粒后将全部前茬作物秸秆切碎 (5 cm 左右), 均匀覆盖在原种植区, 小麦秸秆覆盖量设置为 2 250 kg/hm², 其他田间管理措施同当地大田。

表 2 “定西 35 号”春小麦生育参数

Table 2 Growth parameters of spring wheat of Dingxi No.35

参数	取值
单株质量/g	4
株高/mm	1 000
春化敏感因子	1.0
光周期敏感因子	2.0
分蘖质量/g	1.22
灌浆期到成熟期的积温/(°C d ⁻¹)	580
灌浆速率/(mg d ⁻¹)	2.30
最大谷粒质量/g	0.045

1.3.2 模拟试验设计

由于 APSIM 对试验区平水年下小麦产量的模拟效果较差, 因此在加强平水年模拟的基础上, 利用试验区枯水年 (2008、2009 年)、平水年 (2006、2007、2014、2015 年)、丰水年 (2005、2013 年) 研究区逐日蒸发量、降水量、最低温度、最高温度、太阳辐射量的气象数据和对气候变化敏感的免耕覆盖耕作方式下的田间实测产量^[20-24], 以及 2016—

2017 年免耕覆盖耕作措施下旱地春小麦各生育阶段持续天数的田间实测值来对模型进行调参验证。在参考前人^[25-28]所构建的模拟气象情景的基础上, 使用校验后的 APSIM 模型以试验区 1970—2017 年连续 48 a 的实测气象数据来模拟春小麦产量, 并以该处理为基准情景 (日平均温度、日平均辐射量变化为 0, CO₂ 质量分数为 370 mg/kg, 氮肥施用量为 105 kg/hm²), 分别在不同降水年型下进行日平均温度、日平均辐射量、CO₂ 质量分数、氮肥施用量变化情景下对免耕覆盖旱地春小麦产量影响的模拟试验。其中, 日平均温度的变化范围为-2.0~2.0 °C, 以 1 °C 为变化梯度; 日平均辐射量的变化范围为-20%~20%, 以 10%为变化梯度; CO₂ 质量分数的变化范围为 370~570 mg/kg, 以 50 mg/kg 为变化梯度; 氮肥施用量的变化范围为 0~105 kg/hm², 以 26.25 kg/hm² 为变化梯度; 合计进行模拟试验 5×5×5 次, 并将模拟结果分 3 种降水年型输出。

1.3.3 降水年型划分

采用春小麦生育年概念^[29], 根据研究区 1970—2017 年逐日降水量数据, 根据各春小麦生育年降水量划分枯水年、平水年、丰水年, 计算式为:

$$S=(C-R)/\sigma, \quad (4)$$

式中: S 代表干旱指数; C 代表生育期降水量; R 为生育年平均降水量; σ 表示标准差。 $S < -0.35$ 为枯水年; $-0.35 < S < 0.35$ 为平水年; $S > 0.35$ 为丰水年。具体降水年型划分见表 3。

表 3 1970—2017 年降水年型划分

Table 3 Classification of precipitation year types from 1970 to 2017

降水年型	合计/a	年份	平均降水量/mm
枯水年	13	1971、1974、1975、1976、1982、1995、1997、 2000、2001、2008、2009、2011、2017	136
平水年	21	1970、1972、1973、1980、1981、1983、1985、1987、1988、1989、 1992、1994、1996、2002、2004、2006、2007、2010、2014、2015、2016	203
丰水年	14	1977、1978、1979、1984、1986、1990、1991、 1993、1998、1999、2003、2005、2012、2013	270

1.4 数据处理与分析

1.4.1 数据预处理

为消除数据量纲和数据数量级的影响, 在统计完成各种模拟情景下春小麦产量、日平均温度、日平均辐射量、CO₂ 质量分数、氮肥施用量后, 采用标准差标准化方法对数据进行预处理, 计算式为:

$$Z_i=(X_i-X)/\sigma, \quad (5)$$

式中: Z_i 为无量纲编码; X_i 为因素取值 ($i=1, 2, \dots, n$); X 为均值; σ 为标准差。

1.4.2 产量稳定性评估

采用变异系数 (CV) 对春小麦产量进行分析,

CV 值越小表明产量的稳定性越高。

$$CV=\sigma/M, \quad (6)$$

式中: σ 为产量标准差; M 为产量平均值。

1.4.3 数据分析

将 APSIM 模型模拟的不同气象因子及氮肥施用协同变化情景下的数据分 3 种降水年型输出, 利用 SPSS 26.00 将春小麦产量作为因变量, 日平均辐射量、日平均温度、CO₂ 质量分数、氮肥施用量作为自变量进行多元线性回归分析; 利用 DPS 7.5 以日平均温度 (X_1)、日平均辐射量 (X_2)、CO₂ 质量分数 (X_3)、氮肥施用量 (X_4) 为自变量, 以春小

麦产量 (Y) 为因变量进行多因子及其互作项逐步回归分析来探究各作用因子间的互作效应。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型调参和验证

基于春小麦完成某一生育阶段积温恒定的原理^[30], 根据研究区免耕覆盖的田间春小麦各生育阶段持续

天数的田间实测值来模拟春小麦的生育阶段, $R^2=0.92$ 、 $NRMSE=5\%$ 详见表 4; 图 1 为不同降水年型下春小麦产量实测数据与 APSIM 模拟试验数据对比结果, $R^2=0.91$ 、 $NRMSE=12\%$ 、 $D=0.95$, 这表明用调参后的 APSIM 模型来模拟免耕覆盖耕作方式下的春小麦的生长发育及产量效果较好。

表 4 2016—2017 年春小麦各生育阶段持续天数实测值与模拟值

Table 4 Measured and simulated data of duration days of spring wheat at different growth stages in dryland from 2016 to 2017

年份	种子萌发阶段 (播种—出苗)		幼苗阶段 (出苗—拔节)		器官建成阶段 (拔节—开花)		籽粒形成阶段 (开花—成熟)		R^2	NRMSE
	模拟值/d	实测值/d	模拟值/d	实测值/d	模拟值/d	实测值/d	模拟值/d	实测值/d		
2016	38	41.3	40	41.2	19	20.5	25	25.2	0.98	5%
2017	40	40.2	40	41.8	19	18.6	25	25.8		

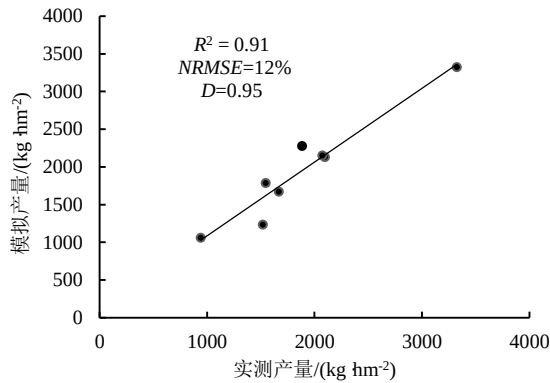


图 1 试验区春小麦产量实测值和模拟值的线性回归拟合

Fig.1 Linear regression fitting of measured and simulated spring wheat yield in experimental area

2.2 单一气象因子变化对春小麦潜在产量的影响

图 2 为不同降水年型下各因子单独作用时对春小麦产量的影响。由图 2 可知, 3 种降水年型下, 日平均温度、日平均辐射量的增加均导致春小麦产量

降低, 其中, 枯水年, 与日平均温度变化量为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比, 日平均温度变化量为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时将导致春小麦潜在产量降低 158%, 降幅达到最大; 枯水年日平均辐射量增加 10% 时, 春小麦潜在产量降低 28%, 降幅最大。3 种降水年型下, CO_2 质量分数、氮肥施用量的增加均导致春小麦产量增加, 但氮肥施用量的增加对春小麦的增产效应表现为先增加后降低。枯水年 CO_2 质量分数为 520 mg/kg 时, CO_2 质量分数增加 50 mg/kg , 春小麦潜在产量将增加 140%, 增幅最大; 氮肥施用量为 105 kg/hm^2 时, 氮肥施用量减少 26.25 kg/hm^2 , 枯水年、平水年、丰水年春小麦潜在产量将分别增加 20%、26%、27%, 增幅达最大。基准情景下, 降水年型由枯水年变为平水年时, 春小麦潜在产量将增加 45%, 增幅最大。3 种降水年型下, 相同模拟试验设置条件下, 春小麦潜在产量均表现为丰水年 > 平水年 > 枯水年。

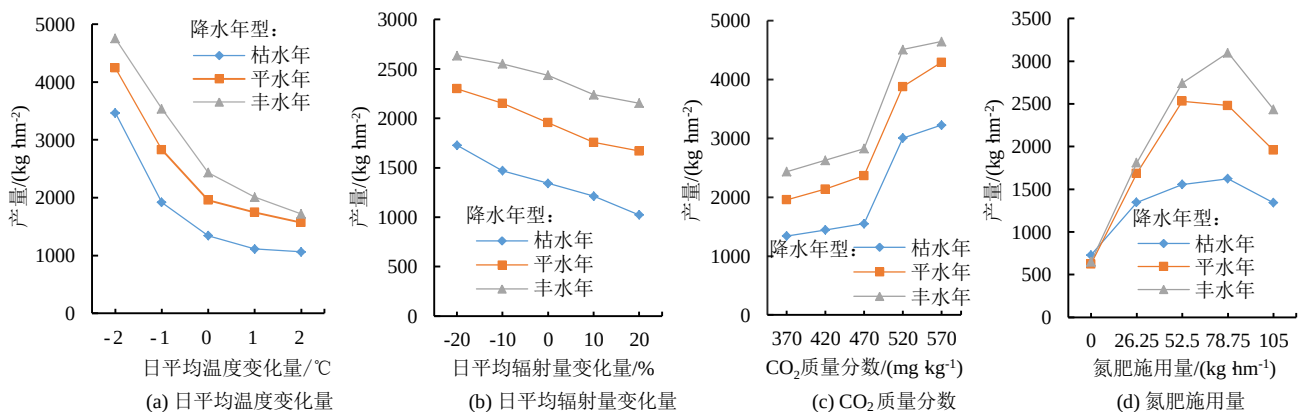


图 2 不同降水年型下春小麦潜在产量对单因素作用的响应

Fig.2 Response of potential yield of spring wheat to single factors

图 3 为不同降水年型下单因素对春小麦产量影响的变异系数。由图 3 可知, 当日平均温度变化量为 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 春小麦产量变异系数表现为丰水年 < 枯水年 < 平水年, 平水年时, 日平均温度增加 $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 日平均温度的增加将增加春小麦产量的变异系数; 当日平均辐射量增加 20% 时, 春小麦产量变异系数

表现为丰水年 < 平水年 < 枯水年; 当日平均温度变化量为 $-2\sim -1$ 、 $0\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 日平均辐射量变幅为 $-20\%\sim 10\%$ 时, 日平均温度和日平均辐射量的增加, 都将会提高春小麦产量的变异系数, 同一温度变幅下春小麦产量的变异系数表现为丰水年 < 平水年 < 枯水年, 同一辐射量变幅下春小麦产量的变异系数表现为丰

水年 < 枯水年 < 平水年。当 CO_2 质量分数在 370~470 mg/kg 变化时, CO_2 质量分数升高, 枯水年下, 春小麦产量的变异系数保持不变, 平水年和丰水年春小麦产量变异系数轻微降低; 当 CO_2 质量分数在 470~570 mg/kg 时, 3 种降水年型下, 春小麦产量的变异系数都将随 CO_2 质量分数的升高而显著降低。当 CO_2 质量分数为 570 mg/kg 时, 春小麦产量

变异系数表现为丰水年 < 平水年 < 枯水年; 除此之外, CO_2 质量分数位于同一变幅时, 春小麦产量变异系数均表现为丰水年 < 枯水年 < 平水年。3 种降水年型下, 氮肥施用量对春小麦产量变异系数的影响均表现为先减小后增大, 相同氮肥施用量下, 丰水年春小麦产量变异系数最小。

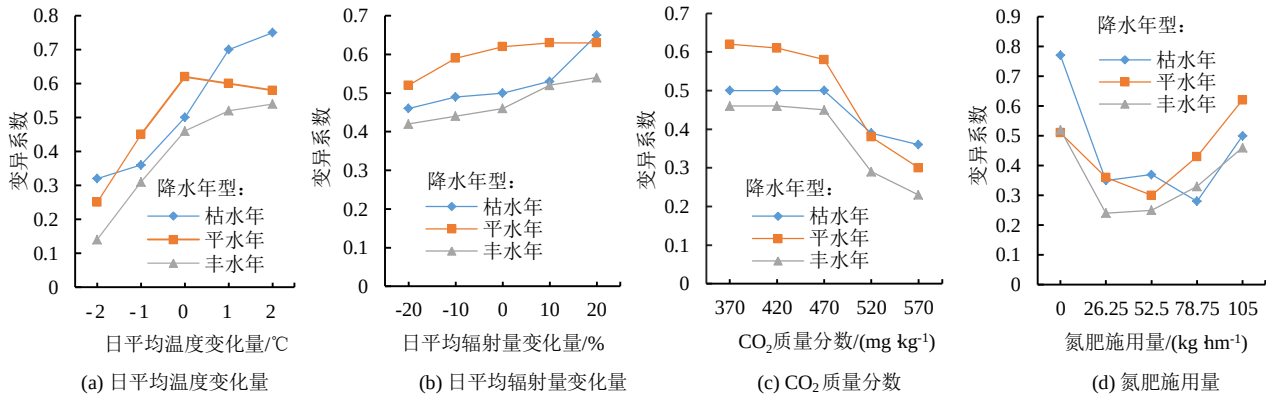


图 3 不同降水年型下单因素作用时春小麦潜在产量的变异系数

Fig.3 Variation coefficient of spring wheat potential yield under single factor of different precipitation year type

2.3 气象因子和氮肥施用量协同变化对春小麦潜在产量的影响

2.3.1 多元线性回归分析

由表 5 可知, 不同降水年型下日平均辐射量、日平均温度、 CO_2 质量分数、氮肥施用量均显著影响春小麦产量 ($P < 0.05$)。枯水年 4 个因子对春小麦产量影响的大小分别表现为氮肥施用量 > 日平均温度 > CO_2 质量分数 > 日平均辐射量; 平水年下, 对春小麦产量影响的大小表现为氮肥施用量 > 日平均温度 > CO_2 质量分数 > 日平均辐射量; 丰水年下, 对春小麦产量影响的大小表现为氮肥施用量 > 日平均温度 > 日平均辐射量 > CO_2 质量分数。

表 5 多元线性回归分析

Table 5 Multiple linear regression analysis

降水年型	因子	标准化系数	t 值	P 值	容差	膨胀系数
枯水年	日平均温度	-0.312	-15.148	0.000	0.774	1.292
	日平均辐射量	-0.145	-7.034	0.000	0.774	1.292
	CO_2 质量分数	0.230	12.272	0.000	0.938	1.066
	氮肥施用量	0.444	23.724	0.000	0.938	1.066
平水年	日平均温度	-0.228	-14.665	0.000	0.875	1.143
	日平均辐射量	-0.049	-3.113	0.000	0.868	1.153
	CO_2 质量分数	0.186	12.359	0.000	0.934	1.070
	氮肥施用量	0.534	33.535	0.000	0.934	1.070
丰水年	日平均温度	-0.542	-16.141	0.000	0.239	4.185
	日平均辐射量	0.338	10.058	0.000	0.239	4.185
	CO_2 质量分数	0.149	8.740	0.000	0.937	1.067
	氮肥施用量	0.612	35.919	0.000	0.937	1.067

在设定因素协同作用的情景下, 3 种降水年型下, 日平均温度升高都将导致春小麦产量降低, 且丰水年下的减产效应大于其他年型; 枯水年和平水年日平均辐射量增加将导致春小麦产量降低, 且枯水年

的减产效应大于平水年; 丰水年日平均辐射量增加将导致春小麦产量增加; CO_2 质量分数的增加将导致春小麦产量增加, 且增产效应随降水量的升高而降低; 丰水年 CO_2 质量分数增加对春小麦产量的增产效应最低; 增加氮肥施用量对春小麦产量具有增产效应, 且增产效应大于其他因素, 对春小麦产量形成的增产效应随降水量的增加而增强, 丰水年增加氮肥施用量的增产效应最大。

2.3.2 交互效应分析

由表 6 可知, 除枯水年下 X_1X_3 的 p 值 > 0.05, 即枯水年下日平均温度和 CO_2 质量分数的交互效应不显著外, 其他降水年型下, 日平均辐射量、日平均温度、 CO_2 质量分数、氮肥施用量互作的 p 值 < 0.05, 因此各因子之间的交互效应显著影响春小麦产量。

表 6 日平均辐射量、日平均温度、 CO_2 质量分数、氮肥施用量对春小麦产量的交互作用分析

Table 6 Interaction analysis of daily mean radiation, daily mean temperature, CO_2 mass fraction and nitrogen fertilizer application rate on spring wheat yield

降水年型	变量	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4
枯水年	直接通径系数	-0.037	0.027	-0.223	-0.048	-0.146	0.138
	p 值	0.045	0.173	0.000	0.016	0.000	0.000
平水年	直接通径系数	-0.042	0.058	-0.171	-0.124	-0.070	0.127
	p 值	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
丰水年	直接通径系数	-0.064	-0.626	-0.385	0.642	0.190	0.115
	p 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.000

3 种降水年型下, X_1X_2 的直接通径系数分别表现为枯水年 (-0.037) > 平水年 (-0.042) > 丰水年 (-0.064), 说明日平均温度和日平均辐射量的交互作用对春小麦产量产生减产效应, 且降水量的增加对二者交互作用导致的减产效应减缓效果不明显; X_1X_3 的直接通径系数表现为平水年 (0.058) > 枯水年 (0.027) > 丰水年 (-0.626), 说明枯水年和平水年日平均温度和 CO_2 质量分数的交互作用对春小麦产量产生增产效应, 但丰水年时对春小麦产量产生减产效应; X_1X_4 的直接通径系数表现为平水年 (-0.171) > 枯水年 (-0.223) > 丰水年 (-0.385), 说明日平均温度和氮肥施用量的交互作用将会导致春小麦产量降低。

X_2X_3 的直接通径系数表现为丰水年 (0.642) > 枯水年 (-0.048) > 平水年 (-0.124), 说明日平均辐射量和 CO_2 质量分数的交互作用在枯水年和平水年对春小麦产量产生减产效应, 但丰水年时会对春小麦产量产生增产效应; X_2X_4 的直接通径系数表现为丰水年 (0.190) > 平水年 (-0.070) > 枯水年 (-0.146), 说明在降水量充沛的情况下, 日平均辐射量和氮肥施用量的交互作用能够对春小麦产量产生增产效应, 日平均辐射量和氮肥施用量的交互作用对春小麦产量造成的增产效应随降水量的减少而降低。

X_3X_4 的直接通径系数表现为枯水年 (0.138) > 平水年 (0.127) > 丰水年 (0.115), 说明 CO_2 质量分数和氮肥施用量的交互作用能够提高春小麦产量, 但随着降水量的增加, 二者交互作用的增产效应逐渐降低。

枯水年和平水年日平均温度和 CO_2 质量分数 (0.027、0.058) 的交互作用对春小麦产量产生增产效应, CO_2 质量分数和氮肥施用量的交互作用 (0.138、0.127) 所形成的增产效应大于其他因子之间的交互作用。枯水年和平水年日平均温度和氮肥施用量的交互作用 (-0.223、-0.171) 对春小麦产量造成的减产效应最为显著。丰水年日平均辐射量和 CO_2 质量分数的交互作用 (0.642) 所形成的增产效应大于其他因子之间的交互作用, 日平均温度和 CO_2 质量分数的交互作用 (-0.626) 对春小麦产量造成的减产效应最为显著。

3 讨论

APSIM 模型被广泛应用于研究旱地春小麦产量形成对气候变化的响应。本研究表明, 日平均温度与日平均辐射量的单独升高均导致春小麦产量降低, 二者的交互作用对春小麦产量表现为减产效应, 这与人^[31]的研究结果基本一致。聂志刚等^[13]认为,

与其他降水年型相比, 丰水年日最高温度的升高对旱地春小麦的减产效果更加明显。本研究发现, 丰水年日平均温度的升高以及日平均温度与日平均辐射量的交互作用也会导致春小麦产量增加; 枯水年和平水年下日平均温度和 CO_2 质量分数的交互作用对春小麦产量表现为正效应, 这主要是由于在枯水年和平水年日平均温度的升高加剧了干旱胁迫, 而在干旱情景下, CO_2 质量分数的升高将增加春小麦单茎生物量、单穗粒数和穗粒质量, 降低不孕小穗数, 提高春小麦籽粒产量^[32]。在气象因子与氮肥施用量协同变化时, 日平均辐射量在枯水年和平水年对春小麦产量产生减产效应, 随着降水量的增加, 减产效应降低, 但在丰水年形成了增产效应, 且在丰水年下日平均辐射量与 CO_2 质量分数、氮肥施用量交互形成的增产效应大于其他因子间的交互作用。这是因为春小麦光合特性在干旱的环境中会受到明显的抑制作用, 不利于春小麦生长发育, 而随着降水量的增加, 当春小麦生长环境适宜时, 春小麦光合效能和同化物的有效转化功能将被充分发挥^[33-35]。3 种降水年型下, CO_2 质量分数的单独增加及其与氮肥施用量的交互作用均有利于春小麦产量增加, 增产效应随降水量的升高而降低; 枯水年对春小麦产量的增产效应最大, 丰水年增产效应最低。 CO_2 质量分数升高能在一定程度上缓解水分不足对春小麦的胁迫且在低水分条件下表现更明显^[36]。单独提高氮肥施用量将显著提高春小麦产量, 对春小麦产量形成的增产效应随降水量的增加而增强, 丰水年施加氮肥所形成的增产效应最大, 这与胡雨彤等^[37]的研究结果一致, 当施氮量超过最佳点时, 施加氮肥将降低春小麦产量^[38]。

4 结论

1) 不同降水年型下日平均温度、日平均辐射量、 CO_2 质量分数、氮肥施用量的单独作用及交互作用将显著影响旱地春小麦产量。

2) 与其他降水年型相比, 枯水年下, 通过调控气象因子和氮肥施用量, 旱地春小麦的增产效应最显著; 相同模拟试验条件下, 丰水年下的旱地春小麦产量最高且最稳定。

3) 降水量的增加不仅能对旱地春小麦产量形成增产效应, 还将影响其他气象因子对旱地春小麦产量的作用性质和作用效果, 并提高氮肥施用对春小麦产量的增产效应。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48.
FAN Xing, QIN Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group I report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(Z2): 44-48.
- [2] 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): 1 572-1 580.
LU Chang, MA Long, LIU Tingxi, et al. Temporal and spatial variations of annual precipitation and meteorological drought in China during 1951—2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(6): 1 572-1 580.
- [3] HOUSER M, STUART D. An accelerating treadmill and an overlooked contradiction in industrial agriculture: Climate change and nitrogen fertilizer[J]. Journal of Agrarian Change, 2020, 20(2): 215-237.
- [4] WANG Y W, YANG S, SANCHEZ-LORENZO A, et al. A revisit of direct and diffuse solar radiation in China based on homogeneous surface observations: Climatology, trends, and their probable causes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(9): e2020JD032634.
- [5] 张更喜, 粟晓玲, 刘文斐. 考虑 CO₂ 浓度影响的中国未来干旱趋势变化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 84-91.
ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, LIU Wenfei. Future drought trend in China considering CO₂ concentration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 84-91.
- [6] 吕彤, 郭倩, 丁永霞, 等. 气候变化下中国小麦与玉米适生区研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(5): 588-599.
LYU Tong, GUO Qian, DING Yongxia, et al. Suitable planting areas of wheat and maize under climate changes over China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(5): 588-599.
- [7] 叶志标, 李文娟. 小麦空间布局演变及驱动因素分析的研究现状[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 158-165.
YE Zhibiao, LI Wenjuan. A review on spatial distribution and driving impacts of wheat production[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(3): 158-165.
- [8] 刘玉洁, 陈巧敏, 葛全胜, 等. 气候变化背景下 1981—2010 中国小麦物候变化时空分异[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(7): 888-898.
LIU Yujie, CHEN Qiaomin, GE Quansheng, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2018, 48(7): 888-898.
- [9] 夏晔, 胡正华, 刘超, 等. 不同大气 CO₂ 浓度升高与施氮交互对冬小麦光合与生长的影响[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(2): 333-341.
XIA Ye, HU Zhenghua, LIU Chao, et al. Interactive effects of different levels of elevated CO₂ concentration and nitrogen fertilization on photosynthesis and growth of winter wheat[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(2): 333-341.
- [10] 李裕, 齐月, 王小恒, 等. 水限制环境 CO₂ 与施氮交互作用对春小麦水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 228-234.
LI Yu, QI Yue, WANG Xiaoheng, et al. Interactive effects of CO₂ and nitrogen application on water use efficiency of spring wheat in water-limited environments[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 228-234.
- [11] 坚天才, 康建宏, 吴宏亮, 等. 氮素缓解春小麦花后高温早衰的抗氧化特性研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(7): 33-44.
JIAN Tiancai, KANG Jianhong, WU Hongliang, et al. Antioxidative characteristics study of nitrogen in alleviating premature senescence of spring wheat at high temperature after anthesis[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(7): 33-44.
- [12] 蒋腾聪. 黄土高原冬小麦生产对气候变化响应的模型模拟及不确定性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- JIANG Tengcong. Crop model simulations and uncertainty analyses for the responses of winter wheat production to climate change in the loess plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [13] 聂志刚, 冯仰强, 董莉霞, 等. 不同降水年型下温度升高对旱地春小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1 151-1 158.
NIE Zhigang, FENG Yangqiang, DONG Lixia, et al. Effect of temperature increase on dryland spring wheat yield in different precipitation years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7): 1 151-1 158.
- [14] 高雪慧, 刘强, 王钧. 基于 APSIM 模型播期对未来气候变化情景下旱地春小麦产量和生育期影响的模拟分析[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 738-745.
GAO Xuehui, LIU Qiang, WANG Jun. Simulation of sowing dates influencing on yield and growth period of spring wheat in dryland under future climate change scenarios based on APSIM model[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(6): 738-745.
- [15] 石姣姣, 江晓东, 史宏斌, 等. 冬季增温对田间小麦光合作用及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 352-356.
SHI Jiaojiao, JIANG Xiaodong, SHI Hongbin, et al. Effect of winter warming treatments on photosynthesis and yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(3): 352-356.
- [16] 杨楠, 李广. 免耕旱地小麦产量的光温效应[J]. 草业科学, 2014, 31(4): 705-710.
YANG Nan, LI Guang. Effects of the light and temperature on dry land wheat yield under different tillage systems[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(4): 705-710.
- [17] 杨婷, 李广. 旱地小麦产量对光温的响应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 98-102.
YANG Ting, LI Guang. Response of dryland wheat yield to light and temperature[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(2): 98-102.
- [18] 逯玉兰, 李广, 韩俊英, 等. 降水量和气温变化对定西地区旱地春小麦产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 268-273.
LU Yulan, LI Guang, HAN Junying, et al. Effect of precipitation and temperature changes on dryland spring wheat yield in Dingxi area[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(3): 268-273.
- [19] 刘霞霞, 李扬, 王靖, 等. 基于 APSIM 模型的内蒙古四大生态区不同降水年型下主要作物适应性评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(10): 1 917-1 937.
LIU Xiaxia, LI Yang, WANG Jing, et al. Adaptability evaluation of staple crops under different precipitation year types in four ecological regions of Inner Mongolia based on APSIM[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(10): 1 917-1 937.
- [20] CHEN S C, PARSONS D, DU T S, et al. Simulation of yield and water balance using WHCNS and APSIM combined with geostatistics across a heterogeneous field[J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107 174.
- [21] 王钧, 李广, 刘强. 基于 LSTM 神经网络模拟的陇中黄土高原沟壑区保护性耕作下土壤贮水量变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1 226-1 237.
WANG Jun, LI Guang, LIU Qiang. Soil water storage under conservation tillage based on LSTM neural network simulation in the Loess Plateau Gully Region of central Gansu[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1 226-1 237.
- [22] 王嘉男, 李玲玲, 谢军红, 等. 半干旱区保护性耕作对旱作春小麦光合特性和产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(12): 1 493-1 500.
WANG Jianan, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of conservation tillage on photosynthesis and yield formation of rain-fed spring wheat in semi-arid areas[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(12): 1 493-1 500.
- [23] 董莉霞, 李广, 闫丽娟, 等. 不同耕作措施下春小麦产量对温度变化的

- 敏感性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 36-40.
- DONG Lixia, LI Guang, YAN Lijuan, et al. Sensitivity analysis of spring wheat to variations in temperatures under different tillage measures[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 36-40.
- [24] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596-607.
- ZHENG Fengjun, WANG Xue, LI Shengping, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under No-tillage practice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(3): 596-607.
- [25] LANA M A, EULENSTEIN F, SCHLINDWEIN S L, et al. Yield stability and lower susceptibility to abiotic stresses of improved open-pollinated and hybrid maize cultivars[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(4): 30.
- [26] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1 088-1 095.
- LI Guang, LI Yue, HUANG Gaobao, et al. Response of dryland spring wheat yield to elevated CO₂ concentration and temperature by APSIM model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8): 1 088-1 095.
- [27] 王柳, 熊伟, 温小乐, 等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 138-146.
- WANG Liu, XIONG Wei, WEN Xiaole, et al. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 138-146.
- [28] 尹嘉德, 张俊英, 侯慧芝, 等. 基于 APSIM 模型的旱地春小麦产量对施氮量和施氮深度的响应模拟[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 775-783.
- YIN Jiade, ZHANG Junying, HOU Huizhi, et al. Simulation of the responses of spring wheat yield to the rates and depths of nitrogen application in dryland based on APSIM model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 775-783.
- [29] 茹晓雅, 李广, 陈国鹏, 等. 不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1 725-1 734.
- RU Xiaoya, LI Guang, CHEN Guopeng, et al. Regulation effects of water and nitrogen on wheat yield and biomass in different precipitation years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(11): 1 725-1 734.
- [30] 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): 1 556-1 563.
- LUO Cuiping, NIE Zhigang, WANG Jun, et al. Effects of sowing date and cultivation measure on growth period of dryland spring wheat based APSIM model[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12): 1 556-1 563.
- [31] 杨楠. 不同耕作措施下旱地小麦产量形成过程对光温的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
- YANG Nan. Response of dryland wheat yield formation process to light and temperature under different tillage measures[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2020.
- [32] 宗毓铮, 杨琦, 常翠翠, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对干旱条件下冬小麦叶片光合适应的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4 370-4 380.
- ZONG Yuzheng, YANG Qi, CHANG Cuicui, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic acclimation of winter wheat under drought condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4 370-4 380.
- [33] 张凯, 陈年来, 顾群英. 不同水氮水平下小麦品种对光、水和氮利用效率的权衡[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2 273-2 282.
- ZHANG Kai, CHEN Nianlai, GU Qunying. Trade-offs among light, water and nitrogen use efficiencies of wheat cultivars under different water and nitrogen application levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2 273-2 282.
- [34] 柳斌辉, 王变银, 陈朝阳, 等. 春一水灌溉时间对冬小麦产量和生长特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(S2): 122-128.
- LIU Binhui, WANG Bianyin, CHEN Zhaoyang, et al. Effect of time of once irrigation in spring on yield and growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(S2): 122-128.
- [35] 郭颂, 杨卫君, 宋世龙, 等. 不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(3): 65-73.
- GUO Song, YANG Weijun, SONG Shilong, et al. Change in photosynthesis of spring wheat with irrigation amount and biochar amendment[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(3): 65-73.
- [36] 姜帅, 居辉, 吕小溪, 等. CO₂ 浓度升高与水分互作对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 403-409.
- JIANG Shuai, JU Hui, LYU Xiaoxi, et al. Interactive effects of elevated carbon dioxide and water on the growth and development of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4): 403-409.
- [37] 胡雨彤, 郝明德, 王哲, 等. 不同降水年型下长期施肥旱地小麦产量效应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1): 135-141.
- HU Yutong, HAO Mingde, WANG Zhe, et al. Effect of long-term fertilization on winter wheat yield from the dry land under different precipitation patterns[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 135-141.
- [38] 赵金科, 徐学欣, 曲文凯, 等. 不同时期水氮处理对滴灌冬小麦旗叶光合特性、保护酶活性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(9): 43-51.
- ZHAO Jinke, XU Xuexin, QU Wenkai, et al. The effects of different irrigation and nitrogen fertilization on photosynthesis, protective enzyme activity of flag leaf and yield of drip-irrigated winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(9): 43-51.

Influence of Meteorological Factors and Nitrogen Fertilization on Spring Wheat Yield in the Longzhong Dryland Region

YAO Qunying¹, LIU Qiang^{1*}, GONG Jingjin²

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

2. China Agricultural University, College of Resources and Environment, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objective】 Longzhong is a region located over the transitional zone between the Sichuan Basin and the Loess Plateau; it has a unique climate and agriculture. This paper investigates the interactive impact of meteorological factors and nitrogen fertilization on yield of spring wheat in dryland in the region. **【Method】** The study was based on the APSIM model, using meteorological data measured from 1970 to 2017, crop growth data measured from 2016 to 2017 in zero-till mulched fields, and grain yield data measured between 2005—2009 and

2013—2015. We simulated the response of grain yield of the spring wheat to changes in next-day average temperature, average daily radiation, CO₂ mass fraction, nitrogen fertilization, both individually or in combination.

【Result】 ① The simulated growing duration and grain yield agreed well with the ground-true data with $R^2=0.98$ and $NRMSE=5\%$ for the former; and $R^2=0.91$, $NRMSE=12\%$ and $D=0.95$ for the latter. ② For the three precipitation scenarios we simulated, changing meteorological factors and nitrogen fertilization individually or in combination both had a significant impact on grain yield, especially in dry years. ③ When other conditions were the same, grain yield reached its peak and showed greater stability during wet years. **【Conclusion】** Elevated precipitation not only boosted grain yield but also played a pivotal role in influencing the effects of other meteorological factors on crop growth and enhancing the efficiency of nitrogen fertilizer.

Key words: dryland spring wheat; climate change; APSIM

责任编辑: 白芳芳

(上接第 66 页)

Effects of Planting Method on Root Growth and Nitrogen Uptake of Rice

HE Chunyu, LIU Yueyue, SHAO Xiwen, GUO Liying, TENG Yu, DU Juan, GENG Yanqiu*

(Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: **【Objective】** Water and nutrient uptake by plants is modulated by their root architecture. This paper investigates the impact of planting method on root distribution of rice and the associated nitrogen uptake and grain yield. **【Method】** The variety Jiyujing was used as the model plant. The experiment compared three planting methods: transplanting under flooding condition (TFR), direct drill under dry condition followed by flooding cultivation (DDSF), direct drill under dry condition followed by alternate wet and dry cultivation (DDSA). For each treatment, we measured morphological and physiological traits of the roots, nitrogen absorption from the top 0~20 cm soil layer, as well as the ultimate grain yield. **【Result】** ① Compared to TFR, both DDSA and DDSF increased the dried weight of the roots, root diameter and root distribution in the top 0~10 cm soil layer, while reducing roots in the 10~20 cm soil layer, during the primary growth period. ② After the young spike differentiation stage, DDSF reduced root activity and other physiological traits, while DDSA enhanced root vitality and other physiological traits. ③ The significance of the impact of planting method on yield, total nitrogen accumulation, nitrogen absorption after the post-flowering and during the grain-filling and maturity stages was ranked in the order of TFR > DDSA > DDSF. Transplanting increased deep rooting and root activity, resulting in high nitrogen accumulation and grain yield. **【Conclusion】** The alternate dry-wet irrigation combined with direct drill also increased deep rooting, enhanced root vitality, thereby promoting nitrogen absorption and grain yield. It is a potential cultivation practice to enhance nitrogen utilization and yield of the rice.

Key words: rice; planting patterns; root distribution; nitrogen accumulation; composition of root bleeding sap; yield

责任编辑: 白芳芳