

基于 APSIM 模型分析不同降水年型下 施氮深度对旱地小麦的产量效应

尹嘉德^{1,2}, 侯慧芝^{1,2}, 张绪成^{1,2,3}, 马明生^{1,2}, 雷康宁^{1,2}, 郭宏娟³

(1.甘肃省农业科学院旱地农业研究所,兰州 730070;

2.甘肃省旱作区水资源高效利用重点实验室,兰州 730070;3.甘肃农业大学农学院,兰州 730070)

摘要:氮肥深施有助于提高旱地作物产量,但施氮深度对黄土高原丘陵沟壑区旱地小麦产量在不同降水年型的影响尚不清楚。利用 1990—2020 年气象观测数据,基于 APSIM 模型和数学统计方法探讨施氮深度对不同降水年型小麦产量的影响。结果表明:模型模拟的小麦产量和生物量模拟值与观测值相关性决定系数(R^2) >0.9 、模型有效性指数(M_E) >0.8 及归一化均方根误差(NRMSE) <0.2 ,表明该模型在该地区具有较好的适用性;模拟的麦田生育期土壤水分动态变化和收获期土壤剖面含水量的 NRMSE 分别为 0.05~0.07 和 0.13~0.29,表明该模型基本能够较准确模拟麦田土壤水分变化。氮肥深施增产效应在丰水年最高,平水年次之。与干旱年相比,相同施氮量下丰水年和平水年增加施氮深度可提高农田生产力稳定性和可持续性。在施氮水平为 150 kg/hm² 时,丰水年和平水年增加施氮深度对农田生产力稳定性没有明显影响,但有助于提高农田生产力可持续性。不同降水年型下,施氮深度和施氮量与产量交互关系表明,丰水年和平水年拟合关系较好, R^2 分别为 0.76 ($P<0.05$) 和 0.61 ($P<0.05$),丰水年和平水年增加施氮深度至约 20~23 cm 可获得潜在最高产量。干旱年 R^2 为 0.29 ($P>0.05$),增加施氮深度对干旱年小麦产量没有显著影响。研究结果以期对黄土高原丘陵沟壑区小麦在区域尺度优化施肥措施提供理论指导。

关键词: APSIM 模型; 施氮深度; 降雨年型; 变异系数; 可持续性指数

中图分类号: S318.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)01-0247-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2022.01.032

Analysis of Effects of Nitrogen Application Depths on Yield of Spring Wheat in Different Precipitation Years Based on APSIM Model

YIN Jiade^{1,2}, HOU Huizhi^{1,2}, ZHANG Xucheng^{1,2,3},

MA Mingsheng^{1,2}, LEI Kangning^{1,2}, GUO Hongjuan³

(1. Institute of Dry-land Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences,

Lanzhou 730070; 2. Gansu Province Key Laboratory of High Water Utilization on Dryland,

Lanzhou 730070; 3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

Abstract: Deep application of nitrogen (N) fertilizer helps to increase crop yield in dryland area, but the effect of depth of N fertilizer on wheat yield in hilly and gully regions of the Loess Plateau under different precipitation types is still unclear. This study used the meteorological data from 1990 to 2020, to explore the effect of N application depth on wheat yield in different precipitation types based on APSIM model and mathematical statistical methods. The correlation coefficient (R^2) of the simulated and observed value of wheat yield and biomass was greater than 0.9, the model validity index (M_E) was greater than 0.8, and the normalized root mean square error (NRMSE) was less than 0.2, indicating that the model had good applicability in this region. The NRMSE of simulated and observed soil moisture dynamics during the growth period and soil profile moisture content at the harvest stage of the wheat field were 0.05 ~ 0.07 and 0.13 ~ 0.29, respectively, demonstrating that the model could accurately simulate the wheat field soil moisture changes. The yield potential of deep application of N fertilizer was the highest in wet years, followed by normal years.

收稿日期: 2021-07-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560355); 甘肃省重点研发计划项目(20YF8WA110); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2020GAAS32); 甘肃省科技计划项目(20JR10RA464)

第一作者: 尹嘉德(1992—),男,硕士,主要从事旱地作物资源高效利用研究。E-mail: yinjiade@qq.com

通信作者: 张绪成(1973—),男,博士,研究员,主要从事植物生理生态研究。E-mail: gszhangxuch@163.com

Compared with drought years, increasing the depth of N application in wet and normal years under the same nitrogen application rate could improve the stability and sustainability of farmland productivity. When the nitrogen application level was 150 kg/hm², increasing the depth of N application in wet and normal years had no obvious effect on the stability of farmland productivity, but it helped to improve the sustainability of farmland productivity. The interaction relationship between N application depth and amount and yield under different precipitation types showed that the relationship between wet years and normal years was better, with R^2 of 0.76 ($P < 0.05$) and 0.61 ($P < 0.05$), respectively. Increasing the depth of N application to 20 ~ 23 cm could obtain the highest potential yield. In a drought year, R^2 was 0.29 ($P > 0.05$), increasing the depth of N application had no significant effect on wheat yield. The results of the study are expected to provide theoretical guidance for optimizing fertilization measures at the regional scale for wheat in the hilly and gully regions of the Loess Plateau.

Keywords: APSIM model; N application depths; precipitation year pattern; coefficient of variation; sustainable yield index

过去几十年高产出农业的迅猛发展促使化肥大量使用,化肥用量的持续增加并不会持续提高单位面积粮食产量^[1],并且造成江河等水体污染和土壤退化等环境问题^[2]。已有研究^[3]表明,1960—2017 年黄土高原总降雨量和降雨强度呈增加趋势,地区间存在较大的差异性和随机性,降雨强度和分布时空错位增大,对地处黄河流域上游水土易流失地区黄土丘陵沟壑区旱作梯田土壤养分平衡和持续性造成负面影响,尤其土壤氮通过淋失、反硝化等途径损失风险增加^[4-5],从而影响作物产量。陇中地区位于黄土高原中部,相比华北及东北等地区耕层土壤有机质较低^[6-7],进而其氮肥固持效率较低;其次,土壤密度低使表层土壤中氮肥与空气接触程度高,易增加氮淋失、氨挥发和 N₂O 排放^[8-10],造成氮流失,导致基肥制度的旱地作物不能高效利用养分,是阻碍旱地农业高质量发展原因之一。因此,通过采取优化施氮措施,提升坡地梯田等旱作区域保肥效率,是保证旱作农业可持续发展重要一环。将肥料表层撒施或浅施改为深施,可减少氮排放^[6,8]、氮素淋溶和径流等^[6,10],降低氮肥损失,延长肥效,进而促进小麦根系发育、花后氮素吸收和延缓根系衰老^[11-15],提高氮肥效率和产量^[11,14]。由于气象、土壤、作物基因型和管理因素差异,施氮深度对不同生态区域作物产量影响必然存在差异^[6,8,11-15]。

APSIM 主要用于单点区域尺度农田作物系统方面建模,可以有效地平衡作物与土壤关系,实现对不同气候条件和管理下农田生态系统作物生长及土壤变化过程的动态模拟并进行产量预测,以评估农业生产系统面临的风险和可持续性^[16]。APSIM 模型突出核心是土壤,天气和管理措施驱动的土壤剖面水氮及理化性质发生连续变化,作物在土壤中的变动如播种、生长发育、收获及休耕都是基于土壤基本属性改

变^[16]。有研究^[17]表明,APSIM 模型在陇中地区具有较好的适用性,可高精度地模拟不同耕作措施下麦田土壤含水量变化,对小麦生育期降水分布与小麦产量变化关系有较好的敏感性^[18]。茹晓雅等^[19]利用 APSIM 模型研究表明施氮量对旱地小麦产量影响程度与降水量显著相关。同时,APSIM 模型对小麦^[20]、玉米^[21]不同生育期叶片含氮量、土壤水分、土壤无机氮动态变化与作物生长关系具有较高的模拟精度和敏感性。黄土高原地区降水量及降水强度年季分布不均,不同降水年型小麦产量波动大,而作物产量变化是对施肥措施效果的直接反映,因此,本研究从作物模型机理角度分析施氮深度对不同降水年型小麦产量的影响,探明不同降水年型和施氮深度下小麦产量变化关系,以期为黄土高原丘陵沟壑区小麦在区域尺度优化施肥措施提供理论指导,对半干旱区旱地农业提高氮肥利用效率和可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省定西市安定区团结镇唐家堡村甘肃省农业科学院定西验站(国家土壤质量安定观测实验站/农业农村部西北黄土高原地区作物栽培科学观测实验站,地理坐标 35°35′00″N,104°36′00″E),海拔 1 970 m,属于温带半干旱气候,近 30 年平均气温 6.2 ℃, (1990—2020 年),年均降水量 425.33 mm,降水变率为 21.9%,年辐射总量 5 898 MJ/m²,年日照时间 2 500 h, >10 ℃积温 2 075.1 ℃。试区土壤类型以灰钙土为主,土壤母质为黄土,质地为砂壤和粉壤,属于典型黄土高原丘陵沟壑区。根据 1990—2020 年春小麦生育期和休闲期降雨分布,降雨年型划分为:干旱年(1992 年、1995 年、1997 年、2000 年、2001 年、2008 年、2009 年、2016 年),平水年(1994 年、1996 年、2002 年、2007 年、2010 年、

2011 年、2014 年、2015 年、2017 年)和丰水年(1990 年、1991 年、1993 年、1998 年、1999 年、2003 年、2005 年、2012 年、2013 年、2018 年、2019 年、2020 年)。

1.2 APSIM-Wheat 模型基本简述

APSIM(agricultural production systems simulator)模型通过中心引擎将土壤参数模块、作物参数模块、气候参数模块和管理参数模块连接整合进行模块化管理,其“插拔”功能,可以灵活调整管理措施,有效地预测不同耕作方式及水肥控制的各种气候背景组合条件下作物产量,以及模拟不同气候、品种、土壤和管理因素背景组合下作物生长、产量形成、土壤温度、土壤水分等指标的变化过程^[16]。APSIM 模型各子模块变动以土壤为核心,天气变化和田间管理措施变动引起土壤水和养分限制条件变化;作物模块接收到气候模块和管理模块传输的信息后吸收土壤水分、氮素,以日步长向土壤水、氮模块返回信息;土壤模块根据试区土壤理化参数、土壤 C : N,加之作物模块、管理模块和气象模块返回的信息,模拟土壤水氮动态变化(包括氮素硝化、反硝化、淋溶、氨挥发和 N₂O 排放等过程);地表覆盖信息以计算蒸发速率、径流为土壤模块中水分平衡模块提供信息。本研究 APSIM-Wheat 模块将连接土壤水分模块之一的 SOILWAT 模块,SOILWAT 模块每日水分平衡包括 3 个过程:土壤蒸发、植物蒸腾(使用蒸腾效率方法计算)、排水和径流(使用美国农业部曲线数方法计算);SOILWAT 模块中潜在土壤水分吸收由 Monteith 方法计算,引进修正日最大水分吸收因子(KL),KL 为经验性因子,由小麦和土壤理化性质决定,土壤中根水分吸收值由作物种类和土壤类型控制。APSIM-Wheat 模型中作物从土壤分层吸收氮,并且整个生育时期分为氮限制阶段和非氮限制阶段,氮限制阶段介于花期前的 30%时期到成熟收获期之间。作物模块对氮的吸收是运用类似水分吸收方式来描述硝酸盐(NO₃⁻)的吸收过程,铵(NH₄⁺)不能直接被吸收,与温度和水分共同影响土壤氮库流动(<https://www.apsim.info>)。

1.3 APSIM 模型适用性评估和子模块数据来源

为评估 APSIM 模型对陇中黄土丘陵沟壑区旱地春小麦产量的适用性,在 2012—2017 年设置田间定位试验。试验供试小麦品种为“陇春 27”,种植模式为裸地穴播,行距 20 cm,穴距 12.5 cm,每穴 8~10 株,出苗密度约为 300 株/m²;施尿素 150 kg/hm²(含 N 46%)、过磷酸钙 75 kg/hm²(含 P₂O₅ 12%~16%)、氯化钾 45 kg/hm²(含 K₂O 60%),翻施深度约至 10 cm,不追肥。测定每年小麦籽粒产量、地上生物量及品种性状、收获期 0—200 cm 土壤剖面含水量(2015 年除外)及 2016 年、2017 年生育期内每隔

15~20 天 0—200 cm 土壤水分含量(土壤含水量采用烘干法测定),为 APSIM 模型初始模块参数矫正和适用性验证提供数据。

本研究气象模块数据来自于甘肃省农业科学院定西试验站记录的 1990—2020 年逐日气象数据,主要包括:逐日降水量(mm)、逐日蒸发量(mm)、逐日最高温度(℃)、逐日最低温度(℃)、逐日实际日照长度(h);根据逐日气象数据计算春小麦生育期内逐日辐射量(MJ/m²)^[17]。该气象观测站距离试验地不足 1 km,能够准确反映试验地小区域气候。土壤模块基本土壤理化参数为研究区田间的实测数据及参考同区域已有研究^[17-18]结果校准确定。作物模块的作物遗传发育参数参考前人^[17-18]关于 APSIM 在陇中黄土丘陵沟壑区适用性研究中的数据、本试验田间试验观测数据及调阅甘肃省农业科学院小麦研究所关于“陇春 27 号”品种审定性状参数(包括物候期、植株和籽粒性状),利用试错法修正综合修定。APSIM 模型的管理模块参数根据试验小区的实际管理措施进行情景设定。

1.4 管理窗口情景设置

每年小麦收获后根茬留量干重估算约为 1 000 kg/hm²,C : N 为 55,50% 进入土壤,模型中播种时间与实际操作时间一致(每年 3 月 20 日);根据定位试验春小麦单位面积播种籽粒数和多年统计的单位面积有效穗数状况,将播种密度设置为 300 株/m²,播种深度 3 cm,行距 20 cm。施磷肥深度设置为 10 cm,施磷肥 75 kg/hm²(设置为非水溶性肥料,含 P₂O₅ 15%);施氮肥(尿素,含 N 46%),氮肥施量为 60,120,150,180 kg/hm²;施氮深度为 10,20,30,40 cm。

1.5 APSIM 模型检验和数据分析

1.5.1 降雨年型划分方法 利用小麦生育年+休闲期的概念,根据试验区统计 1990—2020 年春小麦生育期(当年 3 月 20 日至 7 月 10 日)降雨量与休闲期降雨量总和,降水年型的划分由公式(1)计算得出。

$$DI=(F-F_a)/\sigma \tag{1}$$

式中:DI 为干旱指数(干旱年 $DI<-0.35$;平水年 $-0.35<DI<0.35$;分水年 $DI>0.35$);F 为生育年降水量(mm);F_a 为生育年平均降水量(mm);σ 为标准差^[19]。

1.5.2 模型评估的检验方法 利用 2012—2017 年田间定位试验相关实测试验数据对 APSIM 模型的模拟结果值进行检验。模型评估检验主要选用标准统计参数量化检验指标,检验指标包括相关性决定系数(R²)、归一化均方根误差(normalized root mean squared error,NRMSE)及模型的有效性(model efficiency,M_E)。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_a)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - X_a)^2} \tag{2}$$
$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{X_a} \tag{3}$$
$$M_E = 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (X_i - X_a)^2} \tag{4}$$

式中: X_i 为实测值; Y_i 为模拟值; X_a 为实测值平均值; Y_a 为模拟值平均值; n 为样本个数。 R^2 越接近 1, 说明模型模拟结果的稳定性越好;NRMSE 反映模拟值与实测值之间的绝对误差, 一般情况下低于 0.2 表示模拟效果较好;当 $M_E > 0.5$ 时, 模拟结果有效性较好^[17-18]。

1.5.3 产量和生物量的变异系数及可持续性指数
利用数学统计分析方法变异系数(coefficient of variation, CV)和可持续性指数(sustainable yield index, SYI)评价不同处理和降水年型下小麦产量稳定性和可持续性进行。

$$\text{CV} = \sigma/Y \tag{5}$$
$$\text{SYI} = (Y - \sigma)/Y_{\max} \tag{6}$$

式中: σ 为标准差; Y 为小麦平均产量(kg/hm^2); $Y_{\max}$ 为所有年份中最大值(kg/hm^2)。CV 值越小, 表明系统的稳定性越高, SYI 值越大可持续性越高^[19]。

1.5.4 数据处理与分析 相关数据分析和作图分别利用 IBM SPSS 22.0 和 Microsoft Excel 2016 软件进行, 二元二次回归拟合方程建立采用 Orgin 2018 软件。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型适应性检验

基于 APSIM 模型模拟旱地春小麦籽粒产量和地上生物量与田间实测值关系(图 1)。本研究利用 2012—2017 连续田间定位试验, 将籽粒产量和地上生物量实测数据, 与模拟结果比对, 通过试错法和已知的作物生理遗传参数对作物模块进行调参。通过

适应性分析, 相关性 $R^2 = 0.98$ 、归一化均方根误差 $\text{NRMSE} = 0.14$ 及 $M_E = 0.89$ 值表明, APSIM 模型模拟的籽粒产量和地上生物量结果与田间实测数据具有良好的一致性。

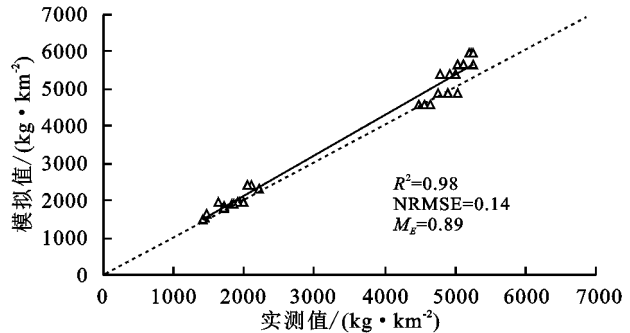


图 1 春小麦实测产量与模拟产量的关系

为评估 APSIM 模型对试验田土壤剖面水分模拟准确性, 将 2012 年、2013 年、2014 年、2016 年、2017 年春小麦收获期麦田土壤剖面(0—200 cm 土层)土壤含水量实测值与模拟值进行统计分析(表 1), 2012 年、2013 年、2017 年检验参数 NRMSE 基本接近和小于 0.2, 2014 年、2016 年 NRMSE 偏高, 但总体检验指标可以接受。模拟小麦生育期麦田 0—200 cm 土层土壤贮水量动态变化, 对生育期降雨、土壤水分实测值与模拟值进行拟合和统计分析(图 2), 由于实际测取土壤水分的存在一定误差, 实测与模拟的动态结果值在个别节点出现较大偏差, 但总体上 $R^2 > 0.8$ 、 $\text{NRMSE} < 0.2$ 、 $M_E > 0.5$, 说明模拟精度较高, APSIM 模型能够准确模拟试验地土壤水分变化趋势及动态。

表 1 春小麦收获期土壤剖面水分含量实测和模拟值检验指标

年份	R^2	NRMSE	M_E
2012	0.94	0.17	0.88
2013	0.95	0.13	0.92
2014	0.88	0.27	0.71
2016	0.85	0.29	0.72
2017	0.89	0.21	0.87

注: 土层深度为 0—200 cm。

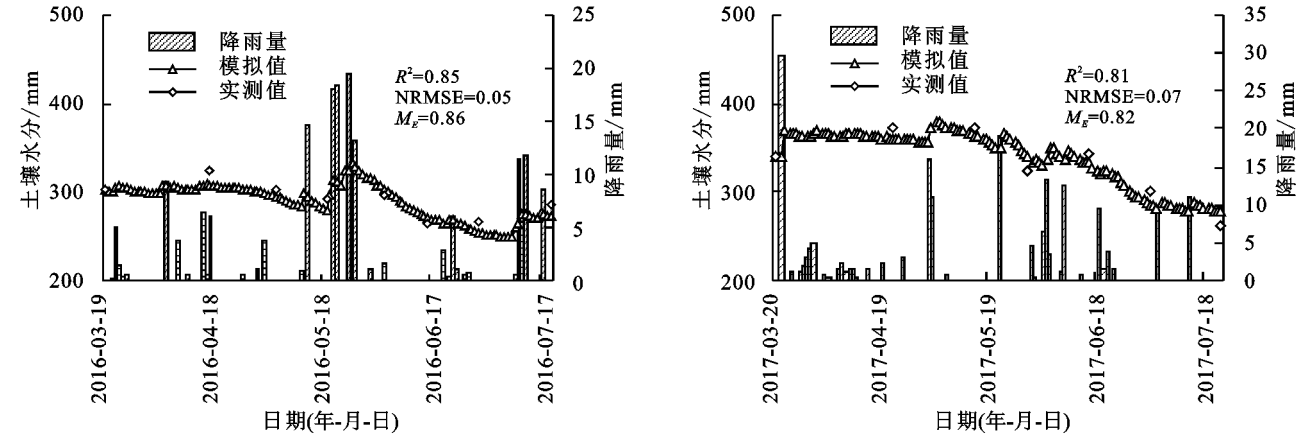


图 2 2016 年和 2017 年春小麦生育期土壤贮水量实测和模拟值

2.2 不同施氮处理下小麦产量分析

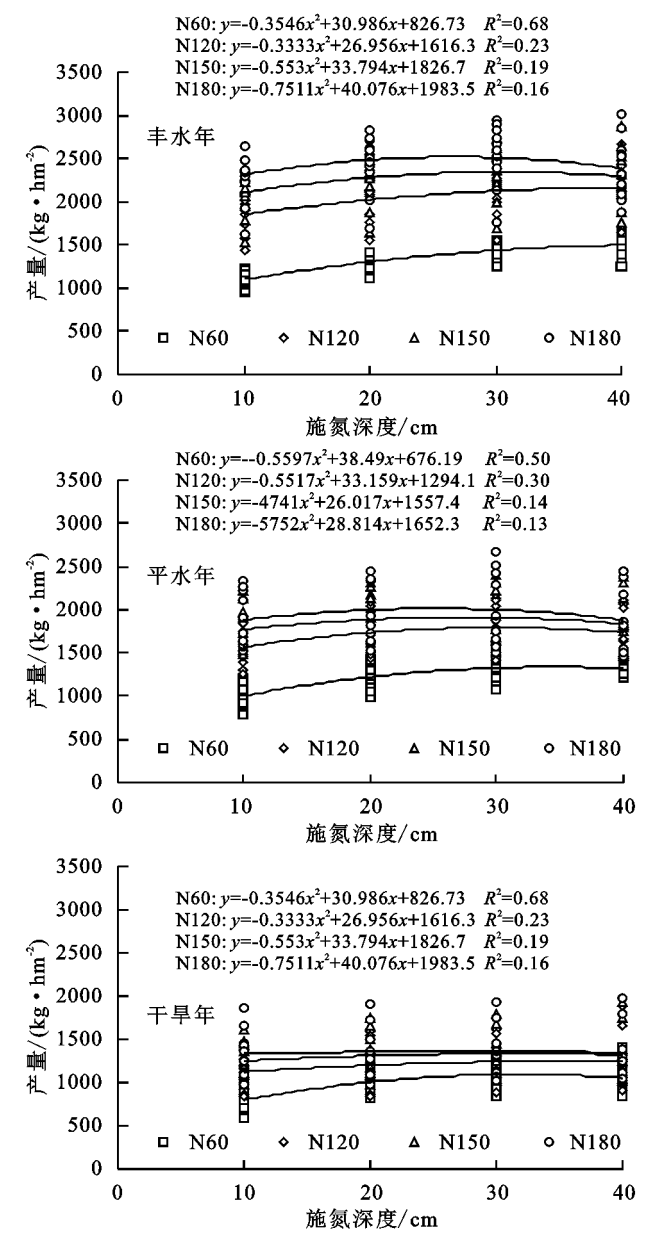
本研究在对 APSIM 模型参数进行校正后,模拟了 1990—2020 年间试验地不同降水年型下不同施氮处理的旱地春小麦产量状况,并建立了不同降水年型下施氮深度、施氮量与产量的一元二次方程变化趋势关系(图 3)。由于年份间和春小麦生育期间降雨差异大,导致模拟结果产量离散程度较高,干旱年方程拟合度较丰水年和平水年拟合度较低。结果显示,各处理平均产量丰水年>平水年>干旱年;随着施氮量增加各处理产量均呈增加趋势;在丰水年和平水年,不同施氮水平下,随着施氮深度增加产量基本呈先增后减的趋势,当施氮深度为 30 cm 平均产量最高;传统农户小麦种植施氮量为 150 kg/hm²时,丰水年小麦产量施氮深度在 30 cm 土层较 10 cm 土层平均提高 11.45%,平水年提高 8.17%,干旱年提高 6.47%;丰水年小麦产量施氮深度在 30 cm 土层较 20 cm 土层平均提高 3.92%,平水年提高 4.43%,干旱年提高 1.35%;丰水年、平水年和干旱年小麦产量施氮深度在 40 cm 土层时均较施氮深度在 30 cm 土层时有所降低。因此,增加施氮深度在丰水年增产效应最为显著,其次是平水年,干旱年产量提升效应最小。

2.3 不同施氮处理生产力稳定性和可持续性

不同气象的模拟试验条件下旱地春小麦产量波动性大除由于 APSIM 模型嵌入模块相关固定参数的不确定性及模型无法评估生物胁迫因素引起以外,其主要产生于气象因子、作物因子、土壤因子和管理因子的耦合效应,而模型结构运行方程、气象因子和管理因子引起的作物生长的变异基本上是稳定的,不同降水年份及不同处理因子间交互作用的产量变异性是决定旱地农田生产力稳定性主要因素。不同降水年型不同施氮处理的小麦产量变异性存在一定程度差异(图 4),根据产量变异系数(CV)可知,不同处理产量稳定性表现为丰水年>平水年>干旱年,施氮量增加变异增加。干旱年施氮深度增加产量变异度递增;除平水年 60,180 kg/hm²,平水年和丰水年施氮深度在 10,20,30 cm 产量变异度无明显变化。因此,除干旱年,通常施氮量下适当地增加施氮深度不会影响农田生产力的稳定性。

可持续性指数(SYI)值越大表示系统的可持续性越高。不同施氮处理 SYI 值表现为丰水年>平水年>干旱年,说明降水对产量可持续性具有积极促进作用;其次,施氮量越高产量可持续性越高,而干旱年施氮量在 150~180 kg/hm²无显著差异。干旱年施氮量在 120~180 kg/hm²随着施氮深度增加 SYI 值整体没有明显变化,平水年随着施氮量和施氮深度增加 SYI 值增大而超过 30 cm 减小,丰水年表现出同

样变化趋势且更明显,丰水年施氮深度 30 cm 时 SYI 平均值较施氮 10 cm 时提高 12.93%(图 4)。良好水分和养分供应是农田生产力提高主要因素,这表明适当地增加施氮深度能够增加氮素持续供应能力,有助于提高农田生产力持续性。



注:图中 N60、N120、N150、N180 分别表示施氮量 60、120、150、180 kg/hm²。下同。

图 3 不同降水年型不同施氮处理春小麦产量

2.4 不同施氮处理与小麦产量交互关系

本研究采用二元二次多项式回归分析,拟合 APSIM 模型模拟的不同降水年型下施氮量和施氮深度与小麦产量交互关系(表 2)。通过二元二次回归方程可知,不同降水年型下施氮量和施氮深度与产量的交互效应不同,丰水年和平水年的可解释性分别为 0.76($P<0.05$)和 0.61($P<0.05$);干旱年可解释性仅为 0.29($P>0.05$),说明拟合回归方程能够较有效地描述丰水年施氮深度、施氮量与产量关系,

其次是平水年,而干旱年施氮深度、施氮量与产量变化交互效应不显著,所以在干旱年施氮深度对小麦产量无显著影响。在丰水年和平水年,施氮深度(10~40 cm)范围内,产量先增大后减小;丰水年施氮深度为 22.71 cm、施氮量为 245.13 cm,潜在产量

最大(2 749.11 kg/hm²);平水年施氮深度为 20.55 cm、施氮量为 235.01 kg/hm²,潜在产量最大(2 596.43 kg/hm²)。因此,如果仅考虑获得潜在最大产量,平水年和丰水年获得潜在最高产量的 95% 区间时,施氮深度约 20~23 cm。

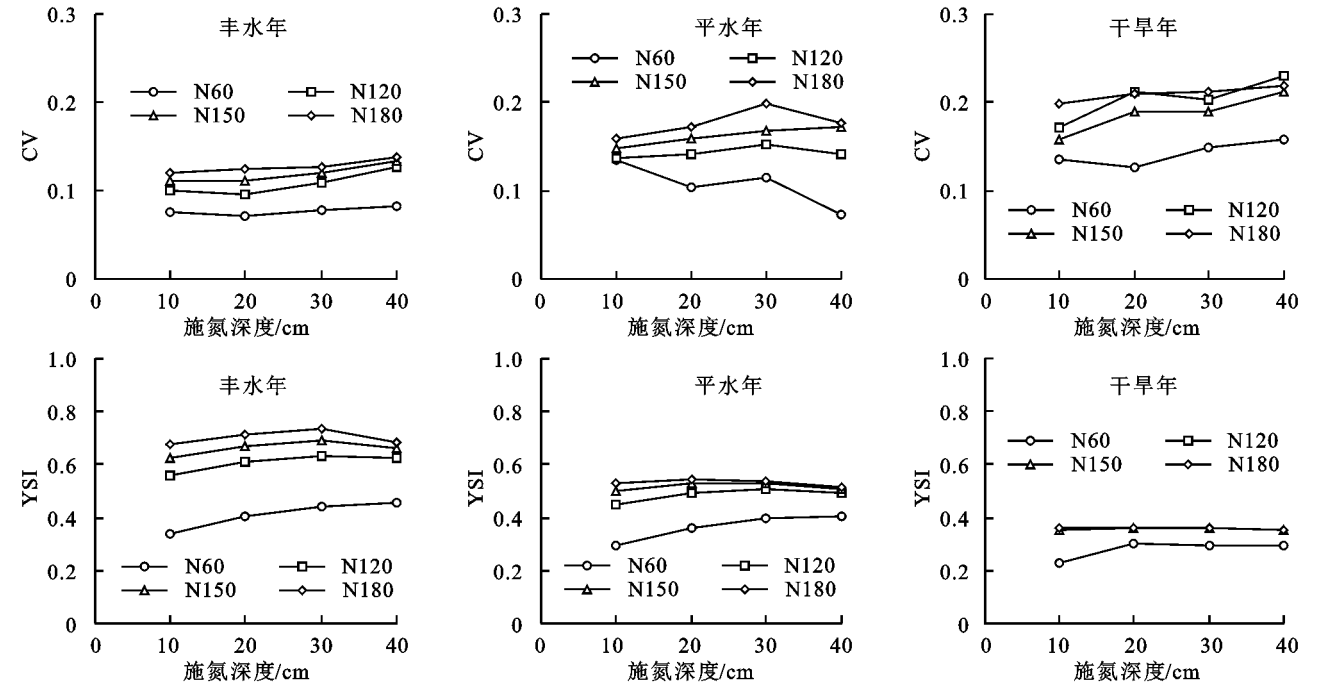


图 4 小麦产量变异系数(CV)及可持续性指数(YSI)

表 2 不同施氮处理与小麦产量回归方程

降水年型	回归方程	R^2	F 值显著性
丰水年(12 年)	$Y=-407.24+44.31D+21.65N-0.49D^2-0.04N^2-0.09DN$	0.76	$P<0.05$
平水年(10 年)	$Y=-176.38+44.58D+15.95N-0.57D^2-0.03N^2-0.09DN$	0.61	$P<0.05$
干旱年(10 年)	$Y=220.61+44.31D+21.65N-0.49D^2-0.0N^2-0.09DN$	0.29	$P>0.05$

注:Y 为产量(kg/hm²);D 为施氮深度(cm);N 为施氮量(kg/hm²)。

3 讨论

APSIM 模型对陇中地区小麦产量模拟具有较好的适用性,本研究与前人^[17-19]的验证结果基本一致。APSIM 模型土壤氮动态平衡主要由土壤中碳库、氮库成分及有机质 C : N、土壤水分、温度及管理措施等因素决定,而降雨、气温与作物属性决定土壤水分状态,进而驱动土壤温度、碳库和氮库变化^[16,22],模型中因子间变化的联动性能,能够反映模型的敏感性,所以,在评估作物模块的基础上进一步评估土壤水分模块拟合精度和敏感性,对模拟的动态土壤水分与实测多点土壤水分结果评估检验分析,春小麦生育期 0~200 cm 土壤贮水量模拟值、收获期土壤剖面水分模拟结果与实测结果基本吻合,表明该模型模拟结果具有较好的拟合精度和敏感性,这与前人^[17]研究结果基本一致。

氮是影响作物产量提升的重要因素^[1]。黄土高原丘陵沟壑区土壤有机质含量和密度低,降雨强度高

时,易造成水肥流失,尤其是坡地梯田^[4-5]。土壤氮平衡主要受到土壤温度、水分及作物生长状况的影响,施肥深度增加,土壤温度降低和土壤水分受降雨的入渗速率变缓,能够减少铵态氮挥发、N₂O 排放、硝态氮流失和下渗等^[4-6,8-10],延长土壤肥力,促进增产稳产^[11-13]。与大多数模型一样,对于不同胁迫因素和时期作物的生长模拟过程敏感性表现不一,如相同降水年型会由于小麦生育期内降水时空分布差异影响土壤水分变化,使土壤氮素变化、作物产量及生物量存在差异^[16,18-21],敏感性差异导致相同降水年型产量波动。因此,本研究探讨不同施氮量和施氮深度在长时间序列不同降雨年型的小麦产量变异性和可持续性,由图 4 可知,增加适宜施氮深度对平水年和丰水年小麦产量变异系数 CV 没有影响,但提高产量可持续性指数 YSI 值,说明与氮素相比,水分仍是黄土高原丘陵沟壑区主要限制因素,虽然增加适当施氮深度对生产力稳定性没有影响,但是可降低氮素损失,提高土

壤肥力持续性,有利于增加产量;另外,在施氮量单一因素变化下,变异系数丰水年<平水年<干旱年、YSI 值丰水年>平水年>干旱年,说明降雨较好的年份农田生产力稳定性和可持续性均较好,这与前人^[19]研究结果基本一致。

黄土高原地区农户小麦生产中往往受到机械操作限制和观念约束,通常作物种植以基肥浅施为主,而降水强度变化将显著影响表层土壤氮素平衡^[4-5],土壤水分和氮素两者之间对于旱地小麦生长存在相互协同和相互制约关系^[19],从而施氮深度和施氮量在不同降水年份对产量交互效应存在差异。氮肥深施能够提高深层土壤中根系所占比重^[12-13,15,23-24],促进对深层水肥的吸收和延缓植株衰老,提高小麦群体生产力^[15,23-25];施肥在土壤浅层有利于促进营养生长期壮根和植株建成,而增加基肥施入深度可促进中后期生殖发育期根系伸长吸收养分和水分,提高籽粒产量^[13,15,23,25]。石岩等^[14]在华东地区研究表明,氮肥施在 20~40 cm 有利于延长肥效和缓解小麦旗叶衰老,提高氮肥利用效率和产量;张永清等^[15]在山西研究表明,小麦施肥深度至 10~30 cm 可增加根系养分吸收,进而增产。本研究通过对不同降水年型施氮深度、施氮量和小麦产量建立二元二次回归方程,得出最优拟合关系。通过拟合回归方程发现,平水年和丰水年回归方程对施氮深度、施氮量和产量之间的拟合关系具有较好的解释性, R^2 分别为 0.76 和 0.61,而干旱年可解释性只有 0.26,说明干旱年施氮深度与施氮量对产量无交互效应。施氮量和施氮深度在不同降水年份对产量影响存在差异,主要原因是:(1)干旱年春小麦生长受水分胁迫较为严重,不利于根系对氮素的吸收利用,而平水年和丰水年降水增加,水分限制效应降低将促进对氮的吸收利用,提高水肥协同效应,促进增产;(2)增加施氮深度虽然可延长肥效,但干旱年份作物水分受限,植株矮小,对氮需求相对较少,进而增加施氮深度对产量影响小,而降雨量好的年份,增加适宜施氮深度可延长肥效和促进深层根系生长,有助于提高产量。本试验属于 3 因素试验,即降水量、施氮量和施氮深度,产量的影响效应降水量和施氮量高于施氮深度,而施氮深度是否对水肥协同效应有促进作用是本研究主要目的,所以本研究基于作物生长模型将作物、土壤、气象和管理因子结果整合分析,以施氮深度为主要对象,基于作物模型机理模拟结果和数学统计分析表明,施肥深度对不同降水年型水肥协同效应确实存在差异,但是实际作物生长还受到其他多因素共同影响,例如,施氮深度与植

株水分胁迫的关系;其次,本研究不足是基于模型理论认为受气象因子驱动土壤水分与氮平衡具有高度关联性,而验证土壤水分,对氮模块评估欠缺。虽然 APSIM 模型适用性在全球范围内已得到广泛验证,但今后仍需通过在大田试验中的适用性进行不断验证完善调试,并将生物胁迫因素纳入模块,以便于为实际生产中管理措施提供更精准和可靠的风险评估。

4 结 论

- (1)通过 APSIM 模型和数学统计方法分析表明,不同降水年型下施氮深度对旱地小麦的产量效应不同,氮肥深施增产效应丰水年最高,平水年次之。
- (2)相同施氮量下,丰水年和平水年适当增加施氮深度较干旱年可提高农田生产力稳定性和可持续性;在传统农户施氮水平 150 kg/hm²时,丰水年和平水年增加适宜地施氮深度对农田生产力稳定性没有明显影响,但有助于提高农田生产力可持续性。
- (3)通过二元二次回归方程拟合不同降水年型下施氮深度和施氮量与产量交互关系,平水年和丰水年拟合关系较好, R^2 分别为 0.76($P<0.05$)和 0.61($P<0.05$),在平水年和丰水年施氮深度为 20~23 cm 时可获得潜在最高产量;干旱年拟合系数为 0.29($P>0.05$),增加施氮深度对干旱年小麦产量没有显著影响。

参考文献:

[1] 仇宏伟,栾江,孔祥永,等.我国农业生产中的氮肥利用效率分析[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2014,31(4):277-283.

[2] 杜金丽.氮肥施用对地下水污染的影响与治理策略研究[J].环境科学与管理,2019,44(8):22-27.

[3] 安彬,肖薇薇,张淑兰,等.1960—2017 年黄土高原不同等级降水日数和强度时空变化特征[J].干旱区研究,2021,38(3):714-723.

[4] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水—沙—氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.

[5] 王丽,王力,王全九.不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J].水土保持学报,2015,29(2):69-75.

[6] 胡晶晶,董文旭,王文岩,等.华北平原氮肥周年深施对冬小麦—夏玉米轮作体系土壤氮挥发的影响[J].中国生态农业学报,2020,28(12):1880-1889.

[7] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.

[8] 彭术,张文钊,侯海军,等.氮肥减量深施对双季稻产量和氧化亚氮排放的影响[J].生态学杂志,2019,38(1):153-160.

[9] 李叶杉,张仁陟,张军,等.不同施氮水平下陇中黄土高

- 原旱作小麦农田土壤温室气体的排放特征[J].甘肃农业大学学报,2018,53(6):34-41.
- [10] 左海军,张奇,徐力刚.农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J].环境污染与防治,2008,30(12):83-89.
- [11] 刘威,周剑雄,谢媛圆,等.控释尿素不同条施深度下鲜食玉米产量和氮素利用效应[J].水土保持学报,2018,32(1):246-258.
- [12] 苏志峰,杨文平,杜天庆,等.施肥深度对生土地玉米根系及根际土壤肥力垂直分布的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(2):142-153.
- [13] 方日尧,赵惠青,同延安.渭北旱原冬小麦深施肥沟播综合效应研究[J].农业工程学报,2000,16(1):49-52.
- [14] 石岩,于振文,位东斌,等.施肥深度对旱地小麦花后旗叶衰老及产量的影响[J].西北植物学报,1999,19(6):139-142.
- [15] 张永清,李华,苗果园.施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J].土壤,2006,38(1):110-112.
- [16] Holzworth D P, Huth N I, Devoil P G, et al. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. Environmental Modelling and Software,2014,62:327-350.
- [17] 李广,黄高宝,William B,等.APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.
- [18] 李广,黄高宝.基于 APSIM 模型的降水量分配对旱地小麦和豌豆产量影响的研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):342-347.
- [19] 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):1725-1734.
- [20] Silva N D, Okada K, Takahashi T. Evaluation of AP-SIM-Wheat to simulate the response of yield and grain protein content to nitrogen application on an Andosol in Japan [J]. Plant Production Science,2021,24(4):454-465.
- [21] Archontoulis S V, Miguez F E, Moore K J. Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States [J]. Agronomy Journal,2014,106(3):1025-1040.
- [22] Luo K Z, Wang E L, Fillery I R P, et al. Modelling soil carbon and nitrogen dynamics using measurable and conceptual soil organic matter pools in APSIM [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2014,186:94-104.
- [23] 汪晓丽,陶玥玥,盛海君,等.硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J].麦类作物学报,2010,30(1):129-134.
- [24] 李华伟,司纪升,徐月,等.栽培技术优化对冬小麦根系垂直分布及活性的调控[J].作物学报,2015,41(7):1136-1144.
- [25] 王化岑,刘万代,王晨阳.超高产小麦根系生长规律与垂直分布状态研究[J].中国农学通讯,2002,18(2):6-7.
- (上接第 246 页)
- [16] 董正武,李生字,毛东雷,等.古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包土壤粒度分布特征[J].水土保持学报,2021,35(4):64-72,79.
- [17] 张佳瑞,王金满,祝宇成,等.分形理论在土壤学应用中的研究进展[J].土壤通报,2017,48(1):221-228.
- [18] 钟韵,费良军,傅渝亮,等.浑水膜孔灌入渗影响因素[J].排灌机械工程学报,2017,35(2):178-184.
- [19] 费良军,王锦辉.泥沙粒度组成对浑水膜孔灌单向交汇入渗特性的影响[J].农业机械学报,2016,47(4):105-112.
- [20] 阎欣,安慧.宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征[J].应用生态学报,2017,28(10):3243-3250.
- [21] 孙忠超,郭天斗,于露,等.宁夏东部荒漠草原向灌丛地人为转变过程土壤粒径分形特征[J].草业学报,2021,30(4):34-45.
- [22] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报,2012,28(5):120-125.
- [23] 文星跃,黄成敏,黄凤琴,等.岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J].华南师范大学学报(自然科学版),2011,(1):80-86.