

基于 APSIM 模型的旱地春玉米 施肥类型及氮肥用量研究

金志强, 孙东宝, 王庆锁

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:为探究玉米高产和减少硝态氮残留的合理施肥模式,通过山西寿阳旱地春玉米田间试验和 APSIM 模型模拟,研究不同施肥类型和施氮量对春玉米产量、硝态氮残留量和氮肥利用率的影响。田间试验设置 3 个施肥类型主处理,包括化肥单施、有机无机肥配施(配施比例 1:1)和有机肥单施;7 个施肥梯度副处理,分别为 0、50、100、150、200、250、300 kg·hm⁻²,并利用 2019—2021 年试验站点数据对模型进行校准验证。结果表明:APSIM 模型可以较好地模拟当地玉米产量和硝态氮残留量状况。各降水年型下,随氮肥施用量的增加,玉米产量先增加后减少,硝态氮残留量显著增加,氮肥利用率有所降低;相同施肥类型及施氮量下,丰水年的春玉米作物产量最高,硝态氮残留量最低,氮肥利用率最高;相同降水年型及施氮量下,有机无机肥配施方式的春玉米产量最高,硝态氮残留量居中,氮肥利用率最高。相较于化肥单施和有机肥单施方式,有机无机肥配施对于干旱地区玉米产量提升效果更好,其土壤硝态氮残留量对降水变化的敏感性相对较低,其氮肥利用率受降水影响也更小。综上,当施氮量介于 148~168 kg·hm⁻²时,有机无机肥配施方式下土壤硝态氮残留量维持在阈值内,春玉米产量可达到理论产量的 95%左右,适宜在研究区域推广应用。

关键词:春玉米;硝态氮;氮肥利用率;有机无机肥配施;APSIM 模型

中图分类号:S513; S423 **文献标志码:**A

Study on fertilization types and nitrogen application rates of spring maize in dryland based on APSIM model

JIN Zhiqiang, SUN Dongbao, WANG Qingsuo

(Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
Key Laboratory of Dry Farming and Water-Saving Agriculture, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to explore the reasonable fertilization mode for high yield of maize and reduction of nitrate nitrogen residue, the effects of different fertilization types and nitrogen application rates on yield, nitrate nitrogen residue and nitrogen use efficiency of spring maize were studied through a field experiment and APSIM model simulation of spring maize in the Shouyang drylands of Shanxi Province. In the field experiment, three main fertilization treatments were set up, including single application of chemical fertilizer, combined application of organic and inorganic fertilizer (combined application ratio of 1:1) and single application of organic fertilizer. Seven sub-treatments of fertilization gradients were set at 0, 50, 100, 150, 200, 250 kg·hm⁻² and 300 kg·hm⁻², respectively, and the model was calibrated and verified by using the fertilization test data of spring maize at the test site from 2019 to 2021. The results showed that the APSIM model better simulated the local maize yield and nitrate nitrogen residue status. Under different precipitation years, increasing amount of nitrogen fertilizer application caused the crop yield to increase first and then decrease. The nitrate nitrogen residue increased significantly, with the nitrogen fertilizer utilization rate decreasing. Under the same fertilization type and nitrogen application rate, the yield of spring maize in wet year was the highest, the nitrate nitrogen residue was the lowest, and the nitrogen use efficiency

was the highest. Under the same precipitation year and nitrogen application rate, the yield of spring maize was the highest under the combination of organic and inorganic fertilizers, the nitrate nitrogen residue was in the middle, and the nitrogen fertilizer utilization rate was the highest. In addition, compared with the single application of chemical fertilizer and organic fertilizer, the combined application of organic and inorganic fertilizers had a better effect on the increase of maize yield in arid areas. The sensitivity of soil nitrate nitrogen residue to precipitation change was relatively low, and its nitrogen fertilizer utilization rate was less affected by precipitation. Overall, the best fertilization method was the combination of organic and inorganic fertilizers. When the nitrogen application rate was between 148~168 kg·hm⁻², the nitrate nitrogen residue was maintained within the threshold, and the spring maize yield reached about 95% of the theoretical yield.

Keywords: spring maize; nitrate nitrogen; nitrogen use efficiency; integrated organic and inorganic fertilizers; APSIM model

我国是人口大国,粮食安全至关重要^[1]。施肥是提高粮食产量最直接、最有效的措施。自上世纪70年代初开始,我国农业生产中施用的化肥量逐年增加,对保障国家粮食安全起到了重要作用^[2]。但过量施用化肥(尤其是氮肥)导致土壤中大量氮(主要是硝态氮)残留,其随降水或灌溉水淋洗到作物根层以下,超出了作物根系吸收范围,不仅降低肥效,还导致耕地质量退化,引发地下水硝酸盐污染、湖泊蓝藻水华、海洋赤潮等环境问题^[3-4]。为提高作物产量并确保环境安全,目前大量研究集中于探究科学合理的区域性施肥方案,主要包括精准施肥、水肥一体化以及有机肥替代等^[5]。精准施肥和水肥一体化方式一般针对灌溉农业,有机肥替代不但适用于灌溉农业,同样适用于旱作农业。研究表明有机肥施用可改善土壤物理、化学和生物学性质,保持土壤健康,可实现耕地的可持续利用^[6],但是有机肥完全替代化肥无法充分挖掘作物产量潜力^[7]。因而,有机无机肥料配合施用成为科学合理施肥的另一种选择。研究证实,有机无机肥料配合施用可以最大限度地发挥两者的优势,降低土壤氮素残留,提高养分的利用效率,从而增加作物产量,改善土壤健康状况^[8]。

田间试验是探索和优化作物施肥方案的基础,但其存在一定的局限性,一方面设计的肥料施用量梯度有限,另一方面若施肥年限不足,难以覆盖不同的降水年型,影响试验结果,也给施肥方案的科学优化带来一定难度^[9],而应用作物生长模型则可以有效弥补田间试验存在的缺陷。APSIM(Agricultural production system simulator)模型是一种农业生产系统模型,可以准确模拟作物生长、土壤水分、养分循环等变化过程,即模拟不同气候、不同肥料施用水平条件下的作物产量、土壤硝态氮残留量等,近年来已在不同作物上得到广泛应用^[10-12]。但不

同的区域、作物和降水年型下 APSIM 的适用性仍需通过田间试验数据进行验证和评价^[13]。

因此,本研究基于 APSIM 模型属性特征,利用田间定位观测数据对其进行适应性评价,同时利用山西寿阳试验地区长期气象观测数据,模拟不同施肥类型和施氮量对春玉米产量和硝态氮残留量的影响,以探讨春玉米高产与环境友好双赢目标的施肥优化方案,以期为北方春玉米科学施肥提供参考和依据。

1 研究方法

1.1 研究地点概况

研究地点为山西寿阳旱地农田生态系统国家野外科学观测研究站(简称寿阳站),寿阳站地处黄土高原东部(37°51' N, 113°05' E),海拔 1 135 m。该地区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,年平均气温为 7.6℃,无霜期 140 d,多年平均降水量为 482 mm,季节分配不均,主要分布在 7—9 月,且年际间变化大。地貌为黄土旱塬,土壤为褐土,pH 值 8.4,有机质 17.6 g·kg⁻¹,全氮 0.96 g·kg⁻¹,有效磷 1.8 mg·kg⁻¹,速效钾 25.2 g·kg^{-1[14]}。主要大田作物是春玉米,一年一熟制。

1.2 APSIM 模型概述

APSIM 模型通过中心引擎,将土壤模块、作物模块、气候模块和管理模块连接整合,进行模块化、有效地模拟不同气候、品种、土壤和管理因素背景组合下的作物生长、产量形成、土壤温度、土壤水分等指标的变化过程^[15]。

1.3 APSIM 模型运行所需数据及其来源

1.3.1 气象数据 APSIM 模型运行所需气象数据主要包括逐日最高温度(℃)、逐日最低温度(℃)、逐日降水量(mm)、逐日太阳净辐射(MJ·m⁻²)。太阳净辐射由 Penman-Monteith 公式计算,多年平均

温度 (T_{av}) 和月平均温度的最大振幅 (Amp) 利用 TAV_AMP 软件计算^[16]。气象数据来源于中国气象局科学数据共享服务网 (<https://data.cma.cn/>) 以及山西寿阳旱地农田生态系统国家野外科学观测研究站。

1.3.2 土壤数据 土壤数据(表 1)主要包括分层土壤容重(BD)、饱和含水量(SAT)、田间最大持水量(DUL)、萎蔫系数(LL15)、风干土含水量(Airdry), 以及分层速效氮和速效磷, 均来自任新茂^[17] 的研究。

表 1 土壤模块主要参数值^[17]

Table 1 Main parameters of soil module

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density /($g \cdot cm^{-3}$)	风干含水量 Air drying moisture content/($mm \cdot mm^{-1}$)	萎蔫系数 Wilting coefficient /($mm \cdot mm^{-1}$)	田间最大持水量 Maximum field water capacity/($mm \cdot mm^{-1}$)	饱和含水量 Saturated water content /($mm \cdot mm^{-1}$)
0~20	1.18	0.04	0.06	0.30	0.44
20~40	1.30	0.04	0.07	0.27	0.43
40~60	1.33	0.02	0.07	0.33	0.47
60~80	1.36	0.02	0.07	0.32	0.48
80~100	1.28	0.02	0.06	0.31	0.41
100~120	1.28	0.02	0.08	0.31	0.43
120~140	1.37	0.02	0.10	0.35	0.43
140~160	1.36	0.02	0.11	0.36	0.44
160~180	1.40	0.02	0.11	0.35	0.43
180~200	1.40	0.02	0.11	0.35	0.43

1.3.3 田间试验数据 田间试验数据主要包括 2019—2021 年春玉米籽粒产量、土壤水分含量和土壤硝态氮含量, 数据均来自寿阳站玉米施肥长期定位试验。试验选用的春玉米品种为‘益田 807’, 种植行距为 60 cm, 株距为 30 cm。主处理为施肥类型, 包括有机肥单施、化肥单施和有机无机肥配施(配施 N 比例 1:1); 副处理为施氮梯度, 每种施肥类型分别设置 7 个施肥梯度(以 N 计), 分别为 0、50、100、150、200、250、300 $kg \cdot hm^{-2}$ 。供试无机肥为尿素(N 46.6%), 有机肥为牛粪(C:N=18, C:P=50); 磷、钾肥分别为过磷酸钙和硫酸钾, 按当地农民平均施用量施用, 由于本试验地土壤富含磷、钾, 因此磷、钾不是作物生产限制因子; 所有的肥料播种前一次性施入。全生育无灌溉。玉米于 2019 年 4 月 26 日播种, 10 月 2 日收获; 2020 年 4 月 27 日播种, 10 月 4 日收获; 2021 年 4 月 23 日播种, 10 月 6 日收获。玉米籽粒产量在收获时测定; 土壤含水量测定深度为 0~200 cm, 自上而下隔 20 cm 依次进行测定, 生育期内每隔 10 d 测定 1 次; 土壤硝态氮含量测定深度为 0~200 cm, 自上而下隔 20 cm 采样一次, 仅在玉米收获后测定, 并在实验室进行分析测试。

1.3.4 作物遗传参数 APSIM 模型参数率定用的数据来自 2019 年玉米施肥长期定位试验数据, 并参考刘沉默^[18] 的研究(表 2), 采用“试错法”进行调试确定。

1.4 APSIM 模型情景设置

APSIM 模型情景设置和田间试验设置保持一致, 施肥梯度比田间试验设置多增加 350、400 $kg \cdot$

hm^{-2} , 模拟时间设置为 2000 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 12 日。

1.5 APSIM 模型验证方法

APSIM 模型验证指标主要选用 4 个统计参数, 即实测值和模拟值间的相关性决定系数(R^2)、归一化均方根误差(NRMSE)、一致性指标(D 指标)和模型有效性(M_E), 其计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{\bar{X}} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (3)$$

$$M_E = 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

式中, X_i 为实测值; Y_i 为模拟值; \bar{X} 为实测值平均值; \bar{Y} 为模拟值平均值; n 为样本个数。 R^2 越接近 1, APSIM 模型的稳定性越好; NRMSE 低于 0.2, 表明模拟精度较好; D 指标取值越接近 1, 表明模拟效果越好; 模型有效性 $M_E > 0.5$ 时, 模拟结果有效性较好。

表2 APSIM 模型中的品种参数值

Table 2 Parameter values of varieties in the APSIM model

参数类别 Parameter class	参数含义 Parameter meaning	单位 Unit	参数值 Parameter value
tt_emerg_to_endjuv	出苗到营养生长结束的积温 Accumulated temperature from emergence to the end of vegetative growth	℃·d	180
tt_flower_to_start_grain	开花到开始灌浆的积温 Accumulated temperature from flowering to beginning grout	℃·d	120
tt_flower_to_maturity	开花到成熟的积温 Accumulated temperature from flowering to maturity	℃·d	830
tt_flag_to_flower	旗叶到开花的积温 Accumulated temperature from flag leaf to flowering	℃·d	50
photo_crit 1	光周期临界值 1 Photoperiodic critical value 1	h	12.5
photo_crit 2	光周期临界值 2 Photoperiodic critical value 2	h	24
photoperiod_slope	光周期斜率 Photoperiodic slope	℃·h ⁻¹	23
grain_gth_rate	潜在灌浆速率 Potential grouting rate	mg·grain ⁻¹ ·d ⁻¹	8.5
x_stem_wt	茎秆重 Stem weight	g·plant ⁻¹	80
y_height	最大株高 Maximum plant height	mm	2500
Head_grain_no_max	每株最大籽粒数 Maximum number of seeds per plant	kernel·head ⁻¹	650
summer_U	土壤供水充分下的蒸发累计参数 Evaporation accumulation parameter under full soil water supply	mm	5
Summer Cona	土壤供水不充分时蒸发随时间的参数 Parameters of evaporation over time when soil water supply is inadequate	mm	2.5

1.6 降水年型划分与主要研究指标计算

1.6.1 降水年型划分 依据 GB/T22482-2008《水文情报预报规范》^[17],将本研究区 2000—2021 年的降水年型划分为枯水年、平水年和丰水年。当某一年的降水量低于多年平均降水量的 20%时,即为枯水年;当某一年的降水量高于多年平均降水量的 20%时,即为丰水年;当某一年的降水量在高于枯水年的标准且低于丰水年的标准时,即为平水年。

1.6.2 土壤储水量 土壤储水量(mm)=土层厚度×土壤容重×土壤质量含水率×10

1.6.3 土壤硝态氮残留量 硝态氮残留量(kg·hm⁻²)=土层厚度×土壤容重×硝态氮含量/10

1.6.4 植株氮素积累量 植株氮素积累量(kg·hm⁻²)=植株氮含量×干物质积累量

1.6.5 氮肥利用率 氮肥利用率(%)=(施氮处理植株氮素积累量-不施氮处理植株氮素积累量)/施氮量×100%

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行整理汇总,利用 Origin 2021 软件进行图形绘制,使用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析。试验处理数据之

间的差异采用最小显著性差异检验(LSD)进行评估($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型适用性验证

基于 2020 年和 2021 年试验数据的 APSIM 模型分析结果,春玉米产量和硝态氮残留量的实测值与模拟值的 R^2 均趋近于 1、 $NRMSE$ 均小于 0.2、 D 指数值均趋近于 1、 M_E 均大于 0.5(图 1),表明 APSIM 模型模拟的春玉米产量和硝态氮残留量与实测数据具有较好的拟合关系。

玉米生长季的土壤含水量变化趋势与降水分布和生育期密切相关(图 2)。土壤含水量的实测值与模拟值的 R^2 接近 0.9、 $NRMSE$ 小于 0.2、 D 值接近 0.9、 M_E 大于 0.5,也说明 APSIM 模型能较准确地模拟春玉米土壤水分动态变化。

本研究实测数据缺少收获时植株含氮量,但前人在相同区域基于 APSIM 模型的研究表明,收获时植株含氮量实测值与模拟值的 $R^2=0.82$ 、 $NRMSE=0.11$ 、 $M_E=0.78$ ^[18],同样说明 APSIM 模型能较准确地模拟春玉米植株含氮量。

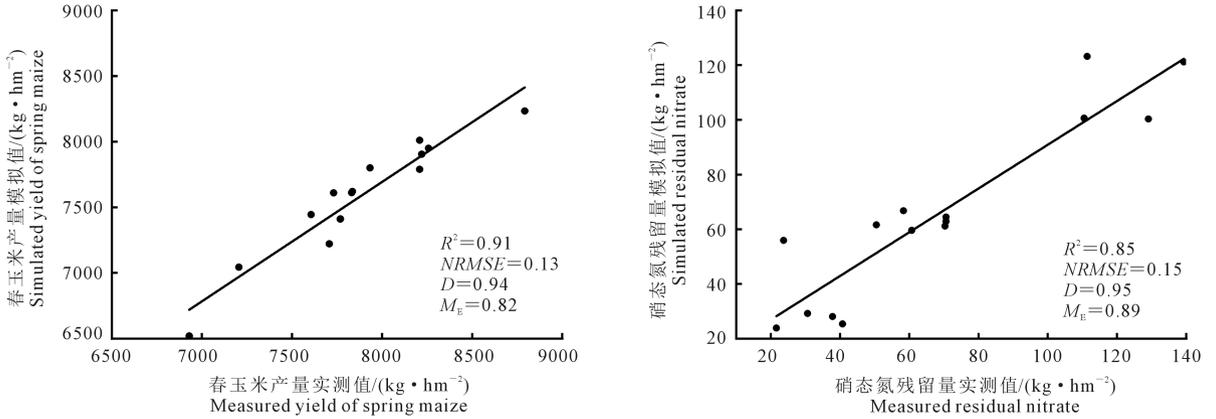


图 1 春玉米产量、硝态氮残留量实测值与模拟值比较

Fig.1 Comparison of measured and simulated spring maize yield and nitrate nitrogen residues

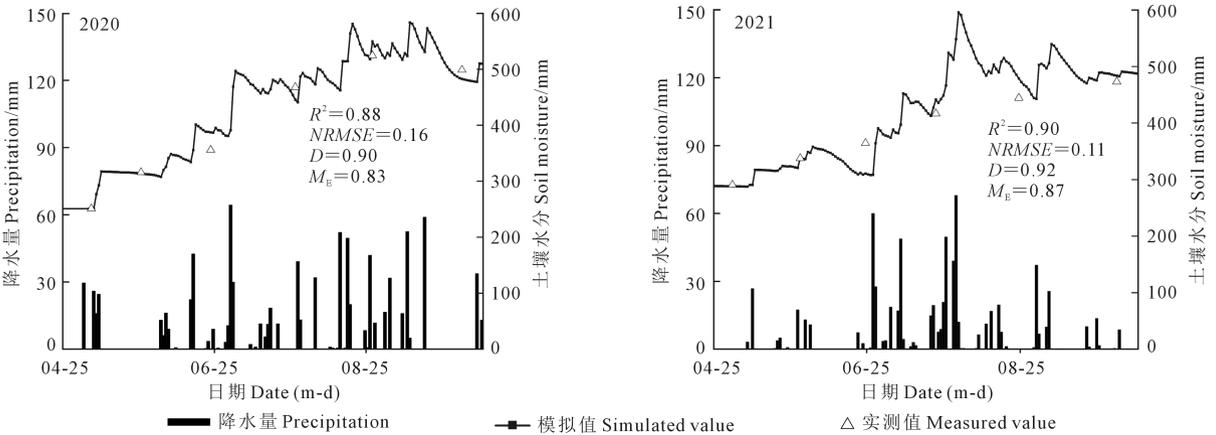


图 2 春玉米生育期土壤水分实测值和模拟值比较

Fig.2 Comparison of measured and simulated soil moisture during spring maize fertility period

2.2 玉米产量与施肥、降水年型的关系

对 APSIM 模型参数进行校正及适用性评价后,本研究模拟了试验区 2000—2021 年不同施氮量、施肥类型和降水年型下的春玉米产量(图 3)。结果表明:(1)各施肥类型及各降水年型下,玉米产量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势。化肥单施处理玉米产量在施氮量 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 达到最高,有机无机肥配施处理的玉米产量在施氮量 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 达到最高,有机肥单施处理玉米产量在施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 达到最高。这说明过高水平的氮肥投入会对玉米产量增长造成负面影响,有机无机肥配施玉米氮素利用效果较优,有机肥处理表现较差。(2)不同施肥类型均可显著提高旱地玉米产量。同一降水年型及同等氮肥供应水平下,有机无机肥配施处理的玉米产量显著高于化肥单施和有机肥单施。与不施肥相比,化肥单施处理平均增产效率为 117.8%,有机无机肥配施处理平均增产效率为 170.2%,有机肥单施处理平均增产效率为 88.9%。有机无机肥配施的增产效果优于有机肥单施和化

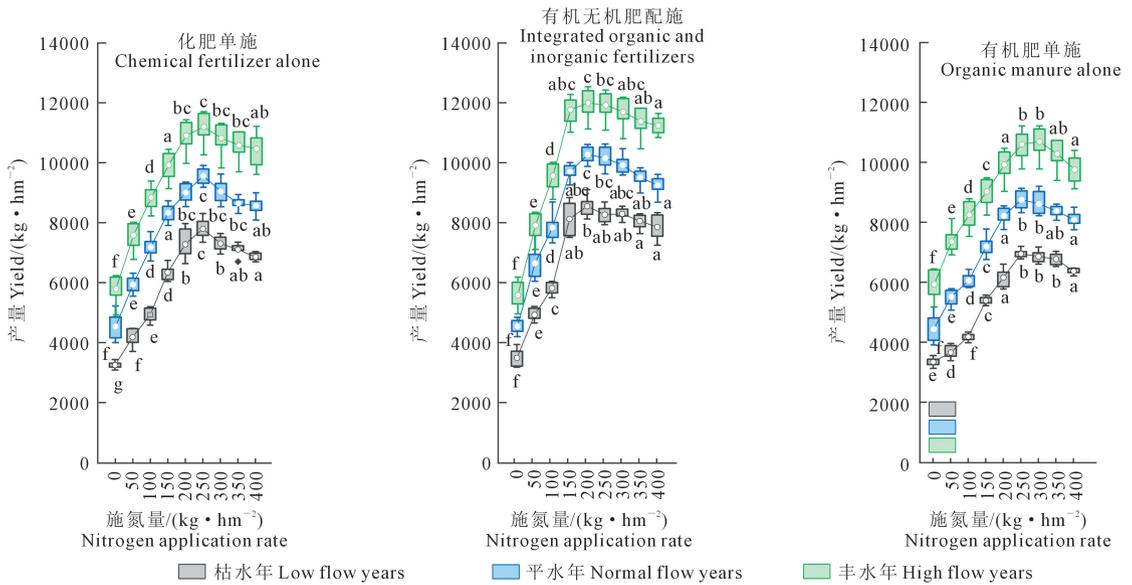
肥单施,表明有机无机肥配施在提高旱地玉米产量方面具有明显优势。(3)总体而言,无论是化肥单施、有机肥单施还是有机无机肥配施,旱地玉米产量均表现为丰水年>平水年>枯水年,且不同降水年型间差异显著。在枯水年,相较于不施肥处理,化肥单施处理的平均增产效率为 90.7%,有机无机肥配施处理的平均增产效率为 147.4%,有机肥单施处理的平均增产效率为 72.1%,有机无机肥配施对于干旱地区玉米产量提升效果更好。

2.3 土壤硝态氮残留量与施肥、降水年型的关系

如图 4 所示,APSIM 模型模拟的玉米田土壤硝态氮残留量随着施氮量的增加而显著增加。土壤硝态氮残留量与施肥类型有关,在同一降水年型及同等氮肥供应水平下均表现为化肥>有机无机肥配施>有机肥。不同施肥类型下,随着施氮量增加土壤硝态氮残留量的增长幅度差异很大,与不施肥处理相比,施氮量为 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,化肥单施处理硝态氮残留量平均增加 $378.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机无机肥配施处理平均增加 $188.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,有机肥单施处

理平均增加 $30.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 化肥单施硝态氮残留量增加最多, 有机无机肥配施次之, 有机肥单施增加最少。土壤硝态氮残留量还与降水有关, 表现为枯水年 > 平水年 > 丰水年, 这是因为降水量越多, 作物生长越旺盛, 因而作物吸收土壤中的氮素也越多, 土壤硝态氮通过淋洗损失的也越多。降水年型从丰水年变为枯水年时, 化肥单施处理土壤硝态氮残

留量平均增加 36.7% , 有机无机肥配施土壤硝态氮残留量平均增加 35.7% , 有机肥单施土壤硝态氮残留量平均增加 53.9% , 表明有机无机肥配施处理下, 土壤硝态氮残留量对降水变化的敏感性相对较低。可见有机无机肥配施能够更好地适应旱地农田降水年际差异大的特点, 并最大程度地减少氮素的浪费, 降低环境污染风险。



注: 箱体两端的 T 字形代表该组数据的最大值和最小值, 箱体上下边界分别代表上下四分位数, 箱体内圆圈代表平均数, 箱外的数据点代表异常值; 同一施肥类型下相同降水年型中不同小写字母表示组间不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The T-shaped at both ends of the box represents the maximum and minimum values of the set of data, the upper and lower boundaries of the box represent the upper and lower quartiles, the inner circle of the box represents the average, and the data points outside the box represent the outliers. Under the same fertilization type, different lowercase letters in the same precipitation year type indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 3 玉米产量与施氮量、施肥类型与降水年型的关系

Fig.3 Maize yield in relation to nitrogen application, fertilizer type and precipitation year pattern

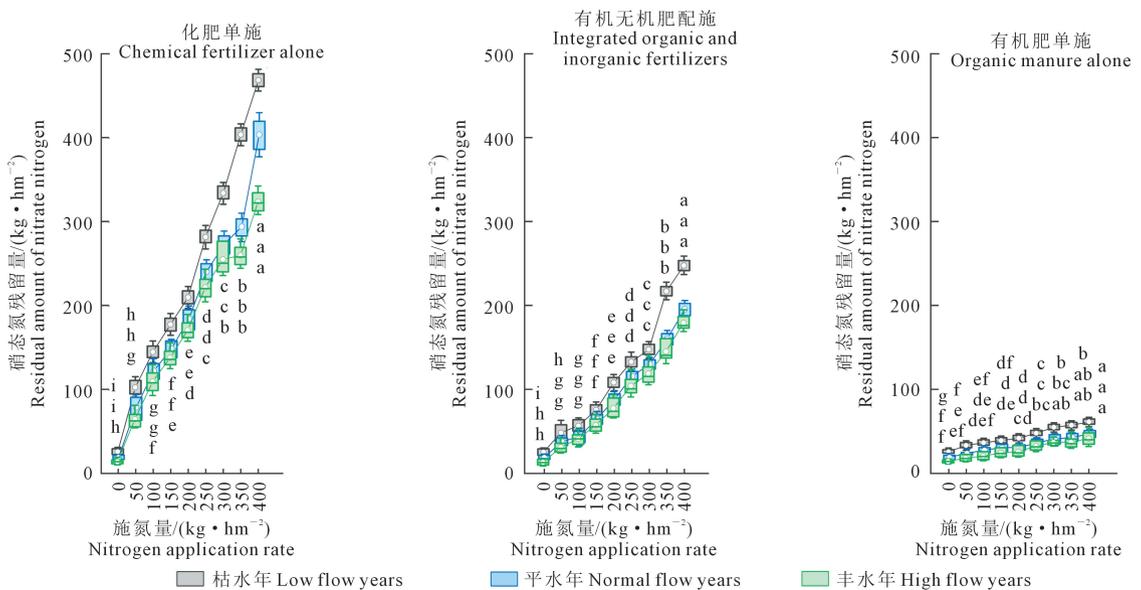


图 4 玉米田土壤硝态氮残留量与施氮量、施肥类型与降水年型的关系

Fig.4 Nitrate nitrogen residues in maize field soils in relation to nitrogen application, fertilizer type and precipitation year pattern

2.4 氮肥利用率与施肥、降水年型的关系

APSIM 模型模拟的玉米氮肥利用率见图 5。由图 5 可知,氮肥利用率随着施氮量的增加而降低,这是因为随着施氮水平的增加,作物吸收利用的氮素相对减少,导致硝态氮在土壤中残留量增加,因而氮肥利用率越来越低。不同施肥类型旱地玉米氮肥利用率不同,有机无机肥配施各施氮处理下旱地玉米氮肥利用率均为最高,这与旱地玉米产量的变化规律一致。整体来看,当施氮量从 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,化肥单施处理的氮肥利用率由 36.5% 下降到 20.9%,降幅为 42.7%;有机无机肥配施处理的氮肥利用率由 39.2% 下降到 22.3%,下降幅度为 42.9%;有机肥单施处理的氮肥利用率由 37.4% 下降到 22.0%,下降幅度为 41.2%,说明施氮量在 $50 \sim 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 范围内变化时,不同施肥类型下氮素利用率的变化幅度无显著差异,可能是因为不同施肥类型对于作物的氮素供应相对均衡,各施肥量下均能够保证足够的氮素供应,从而使得氮素利用率的变化幅度无显著差异。

玉米氮肥利用率还与降水年型有关,各施肥类型处理在丰水年氮肥利用率均有所增加,在枯水年氮肥利用率则显著降低。与枯水年相比,丰水年化肥单施处理平均氮肥利用率提高 62.1%,有机无机肥配施处理提高 51.3%,有机肥单施处理提高 55.1%,有机无机肥配施处理氮肥利用率受降水影响最小。

2.5 玉米产量、土壤硝态氮残留量、氮肥利用率与施氮量之间的相互关系

由图 6 可知,APSIM 模型模拟的玉米产量、土壤硝态氮残留量、氮肥利用率与施氮量之间均呈现显著的相关关系。

对于化肥单施而言,春玉米产量与施氮量呈二次函数关系,拟合方程为 $y = -0.0623x^2 + 35.760x + 4382.7$ ($R^2 = 0.98, P < 0.001$)。当施氮量超过 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,玉米产量不再显著增加。土壤硝态氮残留量随施氮量变化的回归方程为 $y = 47.282e^{0.006x}$ ($R^2 = 0.90, P < 0.05$)。氮肥利用率随施氮量增加呈指数关系降低,拟合方程为 $y = 40.184e^{-0.0023x}$ ($R^2 = 0.92, P < 0.05$)。产量、硝态氮残留量与氮肥利用率的交点分别出现于施氮量 $184 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处,即为化肥单施的合理施氮量范围。

对于有机无机肥配施而言,春玉米产量随氮肥用量增加呈先增加后降低的趋势,拟合方程为 $y = -0.0799x^2 + 44.182x + 4528.9$ ($R^2 = 0.88, P < 0.05$)。当施氮量为 $276 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米获得最高产量,但与

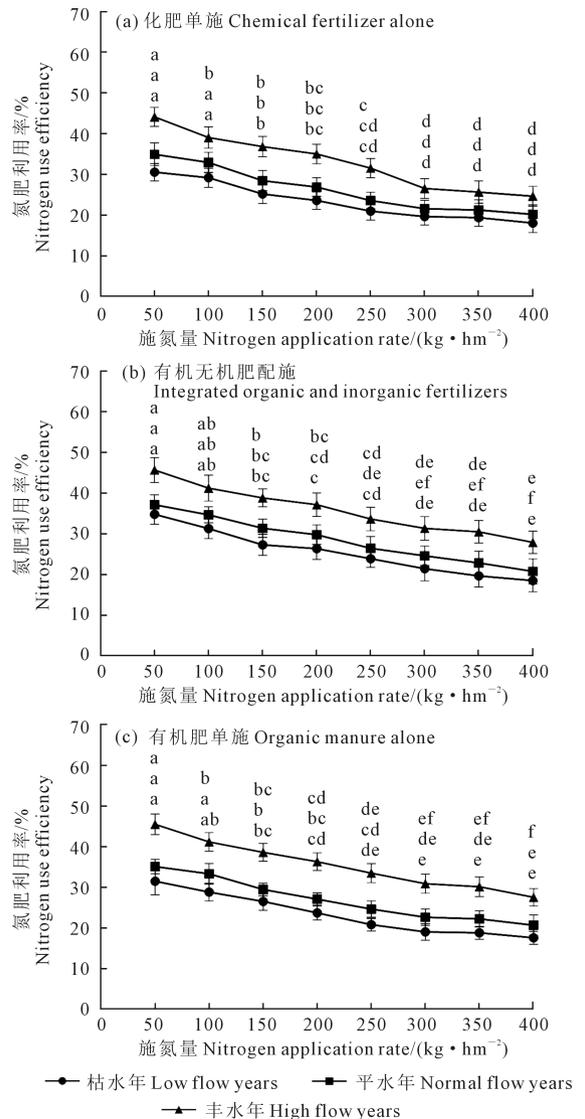


图 5 玉米田氮肥利用率与施氮量、施肥类型与降水年型的关系

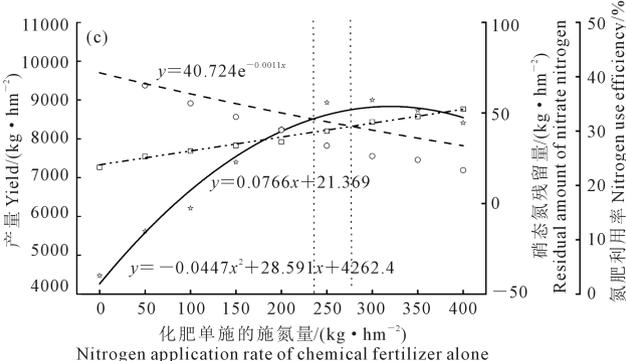
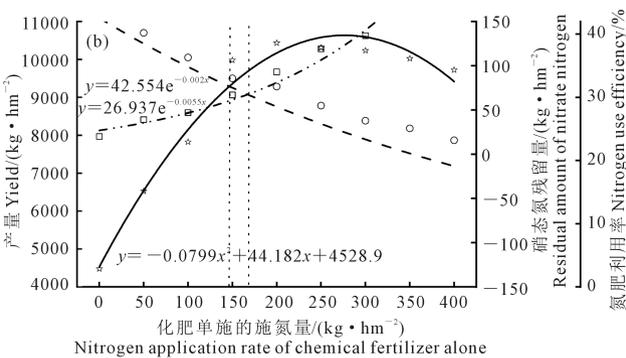
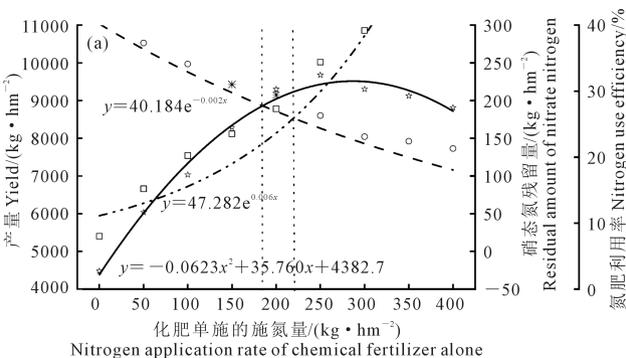
Fig.5 Nitrogen fertilizer utilisation in maize fields in relation to the amount of nitrogen applied, type of fertilizer applied and precipitation year pattern

施氮量 $150, 200, 250, 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理下获得的产量差异不显著。土壤硝态氮残留量随氮肥用量增加呈指数形式增加,拟合方程为 $y = 26.937e^{0.0055x}$ ($R^2 = 0.91, P < 0.05$)。氮肥利用率与施氮量呈指数关系降低,拟合方程为 $y = 42.554e^{-0.0024x}$ ($R^2 = 0.92, P < 0.01$)。产量、硝态氮残留量和氮肥利用率的交点分别为 $148 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处,即为有机无机肥配施的合理施氮量范围。

对于有机肥单施而言,春玉米产量与施氮量呈二次函数关系,拟合方程为 $y = -0.0447x^2 + 28.591x + 4262.4$ ($R^2 = 0.97, P < 0.001$)。当施氮量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米获得最高产量 ($8\ 816 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),但与

施氮量 250、350 kg · hm⁻² 施肥处理的产量差异不显著。土壤硝态氮残留量与施氮量呈显著的正相关关系,回归方程为 $y=0.0766x+21.369$ ($R^2=0.90, P<0.01$)。氮肥利用率与施氮量呈指数关系,拟合方程为 $y=40.724e^{-0.0011x}$ ($R^2=0.91, P<0.05$)。产量曲线、硝态氮残留量曲线与氮肥利用率分别相交于施氮量 236 kg · hm⁻² 和 276 kg · hm⁻², 即为有机肥单施的合理施氮量范围。

综上所述,春玉米有机无机肥配施的施氮量为 148~168 kg · hm⁻² 时,即是兼顾玉米高产和环境友好的最佳施肥方案。



☆ 产量平均值 Average yield
— 产量拟合曲线 Yield fitting curve
□ 硝态氮残留量平均值 Average value of nitrate nitrogen residue
--- 硝态氮残留量拟合曲线 Nitrate nitrogen residue fitting curve
○ 氮肥利用率平均值 Average nitrogen use efficiency
-- 氮肥利用率拟合曲线 Nitrogen use efficiency fitting curve

图 6 玉米产量、土壤硝态氮残留量、氮肥利用率与施氮量之间的相互关系

Fig.6 Correlation between maize yield, soil nitrate-nitrogen residues, nitrogen fertilizer utilisation and nitrogen applications

3 讨论

3.1 APSIM 模型的适应性评价

本研究通过 APSIM 模型的验证结果表明,玉米产量的实测值与模拟值的 $R^2=0.91$ 、 $NRMSE=0.13$ 、 $D=0.94$ 、 $M_E=0.82$,表明 APSIM 模型能准确模拟寿阳站的春玉米产量的形成。任新茂^[17]的研究也表明 APSIM 模型模拟山西旱地农业春玉米产量形成具有较好的可靠性,产量模拟值和实测值的 $R^2=0.90$ 、 $NRMSE=0.27$ 、 $D=0.76$ 。本研究还表明, APSIM 模型能准确模拟寿阳站的玉米农田土壤水分动态变化,土壤水分实测值与模拟值的 R^2 趋近于 1、 $NRMSE<0.2$ 、 D 指数趋近于 1、 $M_E>0.5$ 。Chimonyo 等^[19]基于 APSIM 模型以及南非中部的大田试验数据,分析表明该模型能够准确地模拟不同水分条件下的作物生长、产量和水分利用情况。本研究中,硝态氮残留量的实测值与模拟值的 $R^2=0.85$ 、 $NRMSE=0.15$ 、 $D=0.95$ 、 $M_E=0.89$,表明 APSIM 模型能准确模拟寿阳站土壤中硝态氮的累积情况。李建政等^[20]借助 APSIM 模型在华北平原进行旱作农田生态系统硝态氮的累积和淋溶量的研究,结果表明 APSIM 模型在点位尺度以及区域尺度上都表现出较好的价值,可准确模拟旱作地区土壤中硝态氮的累积情况。

3.2 施氮量、施肥类型及降水年型对春玉米产量的影响

本研究结果表明,不同施肥类型及不同降水年型下 APSIM 模拟的春玉米产量随施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,化肥单施处理玉米产量在施氮量 250 kg · hm⁻² 时达到最高,有机无机肥配施处理玉米产量在施氮量 200 kg · hm⁻² 时达到最高,有机肥单施处理玉米产量在施氮量 300 kg · hm⁻² 时达到最高。这与郭星宇^[21]的研究结果相似,但本研究得出的施氮量阈值(148~168 kg · hm⁻²) 低于其研究结果(225 kg · hm⁻²),可能是与小麦相比,玉米的根系更为发达,具有较高的氮素吸收能力和高效的氮素转移机制^[22]。另外,冯悦晨等^[23]在晋南地区的研究也表明有机无机肥配施可显著提升夏玉米的籽粒产量,但其结果中只涉及有机无机配比的改变,并未从施氮总量的角度进行研究。本研究通过分析不同施氮总量下玉米的产量变化来确定合适的施氮范围,一定程度上丰富了对玉米合理施肥配比的研究。

本研究发现,在同一施氮水平及同一降水年型下,有机无机肥配施方式比化肥单施和有机肥单施对玉米产量影响更加显著(图 3)。究其原因可能是

化肥(尿素)单施后易分解为碳酸铵或碳酸氢铵,释放的铵态氮无法被作物及时吸收利用,多余的铵态氮及其经过硝化作用形成的硝态氮大量残留在土壤中,被水淋溶到根系以下,失去肥效,从而降低作物产量^[24]。有机肥单施方式的玉米产量低,这可能与有机肥矿化速度慢、释放的养分量少而无法满足作物的高产需求有关。有机无机肥配施方式综合了化肥的无机氮释放迅速、损失量大而有机肥的无机氮释放缓慢、量少的特征,实现肥效互补,进而实现作物高产^[25]。

降水年型也是本研究中影响玉米产量的重要因素。不同施肥类型下玉米的产量均表现为丰水年>平水年>枯水年。这是因为水分是干旱区作物生长的限制因子,在降水少的情况下,旱地土壤水分含量低,作物生长速度减缓,进而导致产量减少;而降水多的情况下,土壤水分含量高,有利于植物对土壤养分的吸收,从而增加产量^[26]。赵彦茜等^[27]利用 APSIM 模型对华北平原 1986—2015 年不同种植模式下的冬小麦和夏玉米产量进行模拟,结果表明华北平原降水资源对于作物生长有重要意义,年降水量越大,作物产量越高。

3.3 施氮量、施肥类型及降水年型对土壤硝态氮残留量的影响

本研究发现,玉米农田土壤硝态氮残留量均随施氮量增加而增加,其中有机肥单施方式的硝态氮残留量最低、变化趋势最为平缓,化肥单施的硝态氮残留量最高、变化趋势最为陡急,有机无机配施方式则居中。冯悦晨等^[23]在夏玉米有机无机不同比例配施试验中表明,单施化肥处理 0~300 cm 土层的硝态氮总残留量显著高于单施有机肥和有机无机 1:1 配施处理。这与本研究的硝态氮残留量变化规律相同。

土壤硝态氮残留量还受降水年型的影响。本研究中土壤硝态氮残留量表现为丰水年<平水年<枯水年。郭星宇^[21]研究表明,渭北旱塬旱地冬小麦枯水年型下土壤硝态氮残留量最高,与本研究变化规律相同。翟勇全等^[28]在宁夏地区滴灌条件下不同降水年型的玉米科学施肥试验中表明,土壤硝态氮含量峰值与降水量密切相关,相比于枯水年,丰水年的硝态氮残留量峰值出现在更深层土壤。本研究采用的土层硝态氮残留总量更适合衡量旱地农田硝态氮的积累和残留情况。

3.4 施氮量、施肥类型及降水年型对春玉米氮肥利用率的影响

本研究发现,玉米氮肥利用率随施氮量的增加而逐渐降低,这与赵伟等^[29]的研究结果相似。这是

因为随着施氮水平的提高,作物吸收利用的氮素相对减少,而土壤中的氮残留量相对增加,增加根系层土壤氮素的损失风险,因而氮肥利用率逐渐降低^[30]。

作物氮肥利用率与施肥类型密切相关。本研究发现,同一降水年型及同一施肥量下,玉米氮肥利用率表现为有机无机肥配施>有机肥单施>化肥单施。杜梦寅等^[31]研究则发现,在特定的土壤条件和作物类型下,有机肥单施对氮肥利用率的提高效果更为明显。研究结论不同可能与土壤类型、作物类型、有机肥种类等因素的差异有关。

玉米氮肥利用率还与降水年型密切相关。本研究发现,同一施肥类型及同一施氮水平下氮肥利用率表现为丰水年>平水年>枯水年。翟勇全等^[28]研究表明,在施氮量为 270 kg·hm⁻²时,丰水年玉米氮肥利用率较枯水年提升 12.10%;而本研究中相同施氮量下单施化肥方式玉米氮肥利用率提升 37.1%,这可能是因为降水年型对旱地的影响更加显著。

3.5 旱地玉米施肥方式优化

本研究中 APSIM 模型预测结果表明,有机无机肥配施(配施 N 比例 1:1)及适宜施氮量(148~168 kg·hm⁻²)是兼顾玉米产量及环境友好的施肥策略。杨忠赞等^[32]在东北黑土区的研究表明,与单施化肥和单施有机肥相比,有机肥替代化肥 50%和有机肥替代化肥 70%处理均可显著提高玉米籽粒产量,其中有机肥替代化肥 50%处理增产率最高。这说明有机无机配施对于旱地玉米产量形成非常重要。值得注意的是,本研究发现有有机无机肥配施相较于单施化肥可降低 0~200 cm 土层硝态氮残留量 83%~162%。杨修一等^[33]的研究也表明,有机肥替代尿素可以显著增加土壤总碳和铵态氮含量,减少 60~100 cm 土层土壤硝态氮淋溶。综合而言,相较于单施化肥和单施有机肥,有机无机肥配施能够提供更稳定的养分供应,减少养分流失,提高氮肥利用率,实现对降水利用、产量增加、硝态氮残留和氮肥利用率的综合优化。

前人通过对粮食作物的研究表明^[34],我国北方的高产作物收获后 0~90 cm 土层硝态氮残留量不应超过 150 kg·hm⁻²。本研究有机无机肥配施施肥量在 148~168 kg·hm⁻²时 0~90 cm 土层硝态氮残留量为 71.2~85.0 kg·hm⁻²,远低于硝态氮残留量限定阈值。Ovejero 等^[35]研究认为,作物达到最高产量 95%的施氮量为兼顾产量、经济效益和生态效益的施氮量。本研究中,有机无机肥配施处理春玉米平均最高籽粒产量的 95%是 10105 kg·hm⁻²,通

过二次曲线求得施氮量为 $158.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 这与本研究推荐的施氮量范围 $148 \sim 168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 接近。因此, 山西旱地春玉米田施肥类型采用有机无机肥配施, 施氮量 $148 \sim 168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有利于实现可持续的作物高产和最小化环境成本。

4 结 论

通过 APSIM 模型的适应性评价可知, 春玉米产量、硝态氮残留量、土壤水分的实测值和模拟值的 R^2 均趋近于 1、 $NRMSE$ 均 < 0.2 、 D 指数均趋近于 1、 M_E 均 > 0.5 , 表明 APSIM 模型可以准确模拟寿阳站地区的春玉米产量形成、土壤硝态氮累积、土壤水分动态变化状况。利用本地化后的 APSIM 模型, 模拟了 2000—2021 年施肥对旱地玉米产量、土壤硝态氮残留量以及土壤硝态氮残留量的影响, 结论如下:

(1) 各降水年型下, 玉米产量均随氮肥施用量增加先增加后减少, 硝态氮残留量显著增加, 氮肥利用率有所降低; 同一施肥类型及相同施氮量下, 丰水年的春玉米作物产量最高, 硝态氮残留量最低, 氮肥利用率最高; 同一降水年型及相同施氮量下, 有机无机肥配施方式春玉米的产量最高, 硝态氮残留量居中, 氮肥利用率最高。

(2) 在枯水年, 相较于不施肥处理, 化肥单施处理、有机无机肥配施处理和有机肥单施处理的平均增产效率分别为 90.7%、147.4% 和 72.1%, 有机无机肥配施对于干旱地区玉米产量提升效果更为明显。当降水年型从丰水年转为枯水年时, 化肥单施处理、有机无机肥配施处理和有机肥单施处理土壤硝态氮残留量分别平均增长 36.7%、35.7% 和 53.9%, 表明有机无机肥配施方式下土壤硝态氮残留量对降水变化的敏感性相对较低。相较于枯水年, 丰水年的化肥单施处理、有机无机肥配施处理和有机肥单施处理平均氮肥利用率分别提高 62.1%、51.3% 和 55.1%, 即施氮量为 $50 \sim 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 不同施肥类型间氮素利用率的变化幅度无显著差异。

(3) 寿阳站旱地玉米种植中, 化肥单施的最佳施氮范围为 $184 \sim 220 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机无机肥配施的最佳施氮范围为 $148 \sim 168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 有机肥单施的最佳施氮范围为 $236 \sim 276 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 有机无机肥配施是寿阳站旱地玉米的理论最佳施肥类型, 在最佳施肥范围内, 与有机肥单施相比, 玉米产量提高 9.4%~10.8%, 节约氮素 59.5~64.3%; 与化肥单施相比, 玉米产量提高 5.0%~5.2%, 氮肥利用率提高 17.4%~13.3%, 硝态氮残留量降低 134.5%~160.7%, 节约氮素 24.3%~31.0%。

参 考 文 献:

- [1] 闫丽娟, 李广, 祁小平, 等. 化学氮肥配施有机肥对陇中旱作春小麦氮素利用效率和土壤养分含量的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1361-1371.
YAN L J, LI G, QI X P, et al. Effects of combined application of nitrogen and organic fertilizers on nitrogen use efficiency and soil nutrients of dryland spring wheat in central Gansu [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1361-1371.
- [2] 罗双龙, 马忠明, 薛亮, 等. 有机肥与氮肥配施对膜下滴灌西瓜生长、产量和品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 136-142.
LUO S L, MA Z M, XUE L, et al. Influence of the combination application of organic manure and nitrogen fertilizer to watermelon growth, yield and quality under mulched drip-irrigation condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(1): 136-142.
- [3] 谢永春, 郭天文, 刘国一. 不同种植方式和施肥对旱地春玉米土壤硝态氮残留的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 110-115.
XIE Y C, GUO T W, LIU G Y. Effects of different patterns of planting and fertilization on the residual of spring maize soil nitrate nitrogen in dry-land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 110-115.
- [4] 刘晶, 郑利芳, 王颖, 等. 控释尿素施用比例对旱地春玉米产量及土壤硝态氮残留量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(11): 127-134.
LIU J, ZHENG L F, WANG Y, et al. Effects of controlled-release urea application ratios on dryland spring corn yield and soil nitrate nitrogen residues[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2022, 50(11): 127-134.
- [5] YANG Q L, LIU P, DONG S T, et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers mitigates ammonia and nitrous oxide emissions in a maize field[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(1): 13-27.
- [6] ZHAO T, HE A, KHAN M N, et al. Coupling of reduced inorganic fertilizer with plant-based organic fertilizer as a promising fertilizer management strategy for colored rice in tropical regions[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(1): 93-107.
- [7] ZHANG Z Y, ZHANG X K, MAHAMOOD M, et al. Effect of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil nematode communities within aggregates[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 31118.
- [8] HEI Z W, PENG Y T, HAO S L, et al. Full substitution of chemical fertilizer by organic manure decreases soil N_2O emissions driven by ammonia oxidizers and gross nitrogen transformations[J]. Global Change Biology, 2023, 29(24): 7117-7130.
- [9] HU Y J, LI D H, WU Y, et al. Mitigating greenhouse gas emissions by replacing inorganic fertilizer with organic fertilizer in wheat - maize rotation systems in China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 344: 118494.
- [10] SMITH C J, MACDONALD B C T, XING H, et al. Measurements and APSIM modelling of soil C and N dynamics[J]. Soil Research, 2020, 58: 41-61.
- [11] 赫迪, 胡鹏程, 王靖, 等. 长江流域冬油菜产量潜力及产量差分布特征[J]. 山东农业科学, 2023, 55(10): 174-180.
HE D, HU P C, WANG J, et al. Distribution characteristics of winter canola yield potential and yield gap in the Yangtze river basin [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(10): 174-180.
- [12] 车鹏鹏, 刘强, 王钧, 等. 基于 APSIM 模型模拟不同耕作措施下施氮对陇中旱地春小麦产量的影响[J]. 热带农业工程, 2023, 47(5): 79-86.

- CHE P P, LIU Q, WANG J, et al. Simulation of effects of nitrogen application on spring wheat yield in Longzhong dry land under different tillage measures based on APSIM model[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2023, 47(5): 79-86.
- [13] VOGELER I, CICHOTA R, LANGER S, et al. Simulating water and nitrogen runoff with APSIM [J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 227: 105593.
- [14] 刘礼. 施肥对旱地春玉米产量和土壤硝态氮的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- LIU L. Effects of fertilization on yield and soil nitrate of dryland spring maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [15] BROWN H, HUTH N, HOLZWORTH D. Crop model improvement in APSIM: using wheat as a case study [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 100: 141-150.
- [16] LAGERQUIST E, VOGELER I, KUMAR U, et al. Assessing the effect of intercropped leguminous service crops on main crops and soil processes using APSIM NG [J]. *Agricultural Systems*, 2024, 216: 103884.
- [17] 任新茂. 密度和秸秆覆盖对旱地玉米产量和农田水分影响的模拟研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- REN X M. Modeling the effects of plant density and straw mulching on maize yield and field water[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [18] 刘沉默. 旱作条件下 APSIM 模型的适应性评价及应用——以山西省为例[D]. 晋中: 山西农业大学, 2019.
- LIU C M. Adaptability evaluation and application of APSIM model under dryland condition [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [19] CHIMONYO V G P, MODI A T, MABHAUDHI T. Simulating yield and water use of a sorghum-cowpea intercrop using APSIM[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 317-328.
- [20] 李建政, 王道龙, 王立刚, 等. 华北冬小麦/夏玉米农田水氮管理的温室效应评价[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 921-929.
- LI J Z, WANG D L, WANG L G, et al. Evaluation of nitrogen and water management on greenhouse gas mitigation in winter wheat-summer maize cropland system in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 921-929.
- [21] 郭星宇. 减量施肥对旱地麦田水肥利用、籽粒产量与氮素平衡的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- GUO X Y. Effects of reduced nitrogen application on soil water and fertilizer utilization, yield and nitrogen balance of winter wheat in dryland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.
- [22] 胥子航, 王睿, 刘育旺, 等. 地膜和秸秆覆盖提高春玉米产量与氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 1991-2003.
- XU Z H, WANG R, LIU Y W, et al. Plastic film and straw mulching improve yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2023, 29(11): 1991-2003.
- [23] 冯悦晨, 于志勇, 赵萍萍. 有机无机配施对夏玉米产量构成及水氮利用的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2021, 48(2): 185-190.
- FENG Y C, YU Z Y, ZHAO P P. Effects of organic and inorganic fertilization on yield component and water and nitrogen utilization of summer maize on the loess plateau[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(2): 185-190.
- [24] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机配施对玉米产量和硝态氮淋失的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 291-301, 249.
- ZHOU H, SHI H B, ZHANG W C, et al. Evaluation of organic-inorganic nitrogen application on maize yield and nitrogen leaching by DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 291-301, 249.
- Machinery, 2021, 52(9): 291-301, 249.
- [25] BAH H. 有机替代施肥方式下的紫色土氮素供应与保持机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- BAH H. Mechanisms of organic-instead fertilization for coupling nitrogen supply and retention in cropland of purplish soil [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [26] GEBRE G G, RAHUT D B, ARYAL J P, et al. Potential impact of scaling adaptation strategies for drought stress: a case of drought-tolerant maize varieties in Tanzania[J]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2023, 21(1): 2198396.
- [27] 赵彦茜, 肖登攀, 齐永青, 等. 华北平原不同降水年型和作物种植模式下的产量和耗水模拟[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(20): 108-116.
- ZHAO Y Q, XIAO D P, QI Y Q, et al. Crop yield and water consumption of different cropping patterns under different precipitation years in North China Plain [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 108-116.
- [28] 翟勇全, 马琨, 贾彪, 等. 不同降水年型滴灌玉米土壤硝态氮分布、淋失量及氮素吸收利用特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 765-775.
- ZHAI Y Q, MA K, JIA B, et al. Soil nitrate-N distribution, leaching loss and nitrogen uptake and utilization of maize under drip irrigation in different precipitation years [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(5): 765-775.
- [29] 赵伟, 梁斌, 杨学云, 等. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(8): 1628-1634.
- ZHAO W, LIANG B, YANG X Y, et al. Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1628-1634.
- [30] XIE J, EVGENIA B, ZHANG Y, et al. Fertilization strategies to improve crop yields and N use efficiency depending on soil pH[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2023, 69(10): 1893-1905.
- [31] 杜梦寅, 袁建钰, 李广, 等. 有机-无机肥配施对黄土高原半干旱区农田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(3): 186-194.
- DU M Y, YUAN J Y, LI G, et al. Effects of combined organic-inorganic fertilizer application on soil N₂O emissions from farmland in the semi-arid area of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 186-194.
- [32] 杨忠赞, 迟凤琴, 匡恩俊, 等. 有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价[J]. *华北农学报*, 2019, 34(增刊 1): 153-160.
- YANG Z Z, CHI F Q, KUANG E J, et al. Comprehensive evaluation of Soil physical and chemical properties and yield by substitution of organic manure[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(S1): 153-160.
- [33] 杨修一, 张清行, 卢晓峰, 等. 控释复合肥对坡耕地花生产量及氮素流失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(9): 1751-1760.
- YANG X Y, ZHANG Q H, LU X F, et al. Effects of controlled-release compound fertilizer on peanut yield and nitrogen loss in sloping farmland [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2023, 29(9): 1751-1760.
- [34] ZHANG Y J, REN W C, ZHU K Y, et al. Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake while mitigating environmental risks: a global meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109221.
- [35] OVEJERO J, MARESMA A, MARKS E A N, et al. Nitrogen fertilization with pig slurry in a barley-sorghum double-annual forage cropping system[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 124(3): 373-388.