

有机肥配合化肥减施对河西绿洲灌区 春玉米产量、品质及水氮利用的影响

孙惠东, 曹红霞, 刘林桃, 杜国腾

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探明河西绿洲灌区春玉米优质高效生产的化肥减施潜力, 基于当地推荐施氮量 ($260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 以单施化肥为对照, 探究有机肥替代 30% 化肥并配合 5 种化肥减施量对春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的影响。结果表明: 有机肥配合适量化肥减施可以改善穗部性状, 增加穗粒数的同时促进地上部生物量向籽粒分配, 从而提高春玉米产量。有机肥替代 30% 化肥 ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施 $211 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥, 即有机肥配合化肥减施 18.85% 可获得最高产量 $19\,323 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 有机肥替代 30% 化肥 ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施 $187 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥, 即有机肥配合化肥减施 28.08% 可获得最大收获指数 60.46%。有机肥配合适量化肥减施可以增加春玉米淀粉、可溶性糖和还原性糖含量, 且随着化肥减施比例增加, 籽粒体内形成更多的粗脂肪。有机肥配合适量化肥减施可以增加春玉米地上部氮累积量, 促进氮累积量向籽粒分配, 提高水氮利用效率。有机肥替代 30% 化肥 ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施 $193 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥, 即有机肥配合化肥减施 25.77% 可获得最大氮累积量 $242.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。有机肥替代 30% 化肥 ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配施 $173 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥, 即有机肥配合化肥减施 33.46% 可获得最高氮肥利用率 33.96%。有机肥配合适量化肥减施可以有效固定 0~40 cm 土层土壤硝态氮, 降低其向深层渗漏的风险。基于主成分分析综合评价不同处理对春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的影响, 同时考虑经济效益, 推荐有机肥替代 30% 化肥 ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 配合化肥减施 18.85%~33.46% ($49\sim 87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 可作为河西绿洲灌区较低肥力砂壤土的有效提质增效技术并具有推广潜力。

关键词: 春玉米; 有机肥; 化肥减施; 产量; 籽粒品质; 水氮利用

中图分类号: S513; S143.6 **文献标志码:** A

Effects of organic fertilizer combined with reduced chemical fertilizer on spring maize yield, quality, and water-nitrogen utilization in the Hexi oasis irrigation area

SUN Huidong, CAO Hongxia, LIU Lintao, Du Guoteng

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

Abstract: To explore the potential of high-quality and efficient chemical fertilizer reduction in spring maize cultivation in the Hexi oasis irrigation area, this study investigated the effects of replacing 30% of chemical fertilizer with organic fertilizer alone, alongside five different chemical fertilizers, on spring maize yield, grain quality, and water and nitrogen use efficiency. The results showed organic fertilizer combined with appropriate amount of chemical fertilizer improved ear traits, increased the number of grains per ear, and promoted the distribution of aboveground biomass to grains, thereby increasing the yield of spring maize. Based on the local recommended nitrogen application rate ($260 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), organic fertilizer replaced 30% chemical fertilizer ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with $211 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ chemical fertilizer, organic fertilizer combined with chemical fertilizer reduced by 18.85% to obtain the highest yield of $19\,323 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Organic fertilizer replaced 30% chemical fertilizer ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with $187 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ chemical fertilizer, organic fertilizer combined with chemical fertilizer reduced by 28.08% to obtain the

maximum harvest index of 60.46%. Organic fertilizer combined with appropriate amount of chemical fertilizer increased spring corn starch, soluble sugar and reducing sugar. Principal component analysis showed that more crude fat was formed in the grains with the reduction of chemical fertilizer application. Organic fertilizer combined with appropriate amount of chemical fertilizer can increase the nitrogen accumulation in the shoots of spring maize and promote the distribution of nitrogen accumulation to grains. It also can improve the water and nitrogen use efficiency. Organic fertilizer replaced 30% chemical fertilizer ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with $193 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ chemical fertilizer, organic fertilizer combined with chemical fertilizer was reduced by 25.77% to obtain the maximum nitrogen accumulation of $242.79 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Organic fertilizer replaced 30% chemical fertilizer ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) with $173 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ chemical fertilizer, organic fertilizer combined with chemical fertilizer was reduced by 33.46% to obtain the highest nitrogen fertilizer utilization efficiency of 33.96%. The application of organic fertilizer combined with an appropriate amount of chemical fertilizer can effectively fix nitrate nitrogen in the 0~40 cm surface layer of soil, reducing the risk of leaching into deeper layers. Based on principal component analysis, the effects of different treatments on yield, grain quality, and water and nitrogen utilization in spring maize were comprehensively evaluated. Considering economic benefits, it is recommended that organic fertilizer replace 30% of chemical fertilizer ($78 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), reducing chemical fertilizer use by 18.85%~33.46% ($49\sim 87 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), as a quality- and efficiency-improving technology for lower-fertility sandy loam soil in the Hexi oasis irrigation area.

Keywords: spring maize; organic fertilizer; chemical fertilizer reduction; yield; grain quality; water and nitrogen utilization

玉米是我国重要的粮食、经济、饲料作物和工业原料^[1],其优质高效生产在保障国家粮食安全和缓解能源危机等方面发挥着重要作用^[2]。氮肥是决定玉米产量高低和品质优劣的关键矿质元素^[3],过量施用化学氮肥易造成氮肥利用效率下降^[4]、土壤酸化^[5]、微生物活性减弱^[6]、地下水水质降低^[7]、温室气体排放增加^[8]和农业系统生物多样性减少^[9]等问题。因此,保证玉米优质高效生产的同时减少化学氮肥的施用,对农业绿色可持续发展具有重要意义。

施用有机肥可以增产提质,提高肥料利用率,减少土壤硝态氮残留^[10]。但单一施用化学或有机肥料不利于保障作物可持续生产^[11]。有机无机肥配施可以在时间和空间上优化土壤氮素供应与作物氮素吸收^[12],减少资源浪费和环境污染的同时降低农业生产系统对化肥的依赖^[13]。研究发现,适量减施化肥可以促进小麦籽粒灌浆和干物质累积,提高氮肥利用效率,实现作物稳产^[14]。有机肥配合化肥减施可以促进干物质向籽粒转运^[15],增加玉米对氮素的吸收和向籽粒的分配^[16],协调籽粒产量与耗水量的关系^[17-18],减少硝态氮淋失^[19-20]。可见,作为化肥零增长的关键措施,有机肥配合化肥减施是实现资源优化配置和改善农业生态环境的重要途径。

目前,大多研究着眼于等氮量下提高有机肥替代比例,而在有机肥替代化肥的基础上进一步进行化肥减施的研究尚不多见。河西绿洲灌区光热资源丰富,是我国春玉米主要产区和重要的商品粮基

地^[21],但该区多为砂壤土,保水保肥能力较差,且该地区春玉米生产过程中存在过量施用化学氮肥的问题。基于此,本研究旨在通过探明有机肥配合不同比例化肥减施对春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的影响,挖掘当地春玉米优质高效生产的化肥减施潜力并明确土壤硝态氮的变化规律,以期为区域内合理减施化肥和农业绿色可持续发展提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省武威市凉州区东河镇王井寨村中国农业大学石羊河实验站($37^{\circ}52'N$, $102^{\circ}50'E$)。该站地处甘肃河西走廊东端,属温带大陆性干旱气候,光热资源丰富。太阳辐射量 $5\,694 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,年平均气温 8°C ,年平均降水量 150 mm ,年平均蒸发量 $2\,000 \text{ mm}$,降水分布季节性强。2023年春玉米生育时期降水总量为 117.6 mm ,其中抽雄期~成熟期(6—10月)降水量占整个生育时期的71.1%(图1)。该区土壤质地为粉质砂壤土,土壤pH值7.22,土壤容重 $1.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有效磷 $3.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $8.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱性水解氮 $50.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

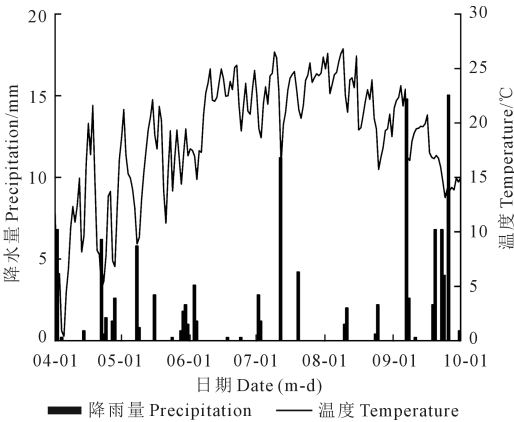
1.2 试验材料

供试玉米品种为‘先玉1225’。供试有机肥料为生物有机肥(N, 8.44%; P_2O_5 , 0.97%; K_2O , 0.98%;有机质 $\geq 40\%$),无机肥料为尿素(总氮 $\geq$

46%),过磷酸钙($P_2O_5 \geq 12\%$),农业用硫酸钾($K_2O \geq 24\%$)。

1.3 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,以当地推荐施氮量 $260\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为百分比基准,共设 6 个施肥处理: N_0 (不施氮肥), N_1 (30%有机氮肥+40%化学氮肥), N_2 (30%有机氮肥+55%化学氮肥), N_3 (30%有机氮肥+70%化学氮肥), N_4 (30%有机氮肥+85%化学氮肥)和对照 CK (100%化学氮肥)。每个处理 3 次重复,共 18 个小区,小区面积为 24 m^2 (长 6 m,宽 4 m),各小区之间用 1 m 的保护行隔开。各处理在播前分别施入有机肥 $78\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_0 和 CK 除外)、磷肥 $80\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、钾肥 $80\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为底肥,60 cm 深耕后人工将肥料均匀手撒入小区,机械旋耕 30 cm 后将肥料均匀翻进土壤,整平后覆盖 1.2 m 宽、 $8\text{ }\mu\text{m}$ 厚的聚乙烯塑料地膜,地膜两侧用土压实。化学氮肥的 35% 在玉米拔节期、40% 在吐丝期和 25% 在灌浆期于施肥罐中搅拌均匀后随灌水以滴灌的形式施入各小区。具体试验处理见表 1。



春玉米于 4 月 28 日播种,种植模式为一膜两管四行,株行距 $25\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,东西走向,理论种植密度为 $10\text{ 0000 株} \cdot \text{hm}^{-2}$;4 月 30 日灌出苗水保证其成活,采用内镶式扁平滴头地理式滴灌带,滴头间距 25 cm,额定流量 $2\text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$;6 月 10 日~8 月 30 日每隔 10 d 灌水,共进行 8 次灌溉,单次灌水定额为 $80\% ET_c$,蒸发蒸腾量 $ET_c = ET_0 \times K_c$,其中 ET_0 由试验区气象站数据通过 Penman-Monteith 公式计算获得(图 1), K_c 为作物系数(播种期为 0.7,拔节期~灌浆期为 1.2,乳熟期~成熟期为 0.6);全生育期灌溉定额为 322 mm。于 9 月 21 日各小区进行人工采收。种植模式如图 2 所示。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 春玉米产量测定 春玉米成熟期,每个小区选取 6 m^2 样方,统计穗长和穗粒数,脱粒风干后称量百粒重,估测产量。将新鲜的植株样品按地上部茎、叶、籽粒分割后置于档案袋中,105℃ 烘箱杀青 1 h,85℃ 烘干至恒重后,测定干物质累积量,计算收获指数。

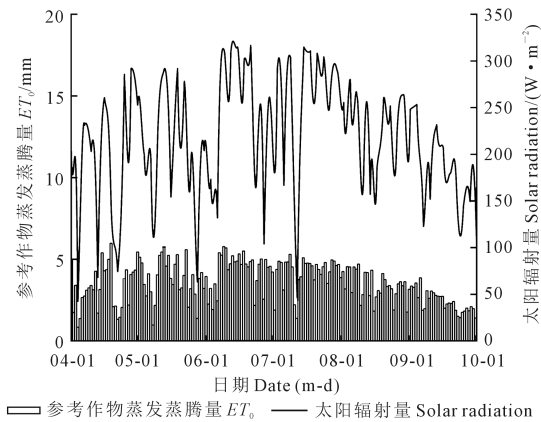


图 1 春玉米生育时期降水量、日均气温、参考作物蒸发蒸腾量及太阳辐射量

Fig.1 Precipitation, temperature, ET_0 , and solar radiation during the growth period of spring maize

表 1 不同处理施肥时期及施氮量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 1 Fertilization period and nitrogen application rate of different treatments

处理 Treatment	有机氮肥 Organic nitrogen	化学氮肥 Chemical nitrogen			氮肥总量 Total nitrogen fertilizer
		拔节期 Jointing period	吐丝期 Silking period	灌浆期 Milking period	
N_0	0	0.00	0.00	0.00	0
N_1	78	36.40	41.60	26.00	104
N_2	78	50.05	57.20	35.75	143
N_3	78	63.70	72.80	45.50	182
N_4	78	63.70	72.80	45.50	221
CK	0	91.00	104.00	65.00	260

收获指数($HI, \%$)= 籽粒产量/成熟期干物质累积量 (1)

1.4.2 春玉米品质测定 于春玉米灌浆期、乳熟期、蜡熟期、成熟期,各处理分别选取 3 株长势均一的植株,取籽粒样品烘干。磨碎籽粒后采用索式提取法,乙醚抽提 12 h 测定粗脂肪含量(CFC);蒽酮-硫酸比色法测定淀粉含量(SC)、还原性糖含量(RC)、可溶性糖含量(SSC)。

1.4.3 春玉米氮素含量测定 春玉米成熟期,各处理选取 3 株长势均一的植株于 105℃ 烘箱杀青 30 min,85℃ 烘干至恒重后用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,使用流动分析仪(AAA3 型)测定茎、叶和籽粒的全氮含量,即为器官氮累积量。

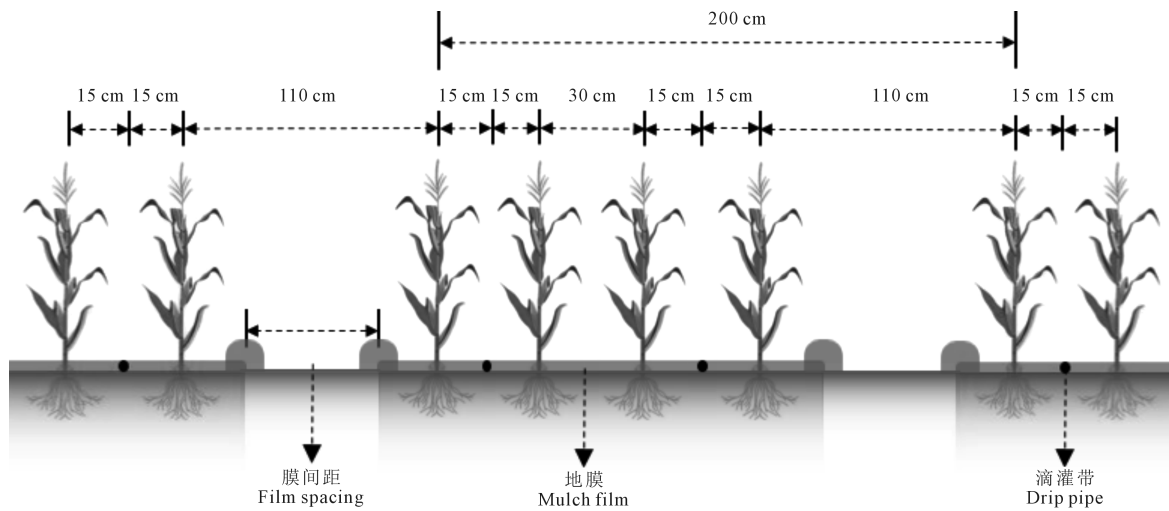


图 2 种植模式图

Fig.2 Planting patterns of maize in experimental plot

1.4.4 土壤硝态氮含量测定 采用土钻法取收获后各处理 10、20、30、40、60、80 cm 土层土样,重复测定 3 次。称取 5.0 g 鲜土样,KCl 溶液浸提,振荡 1 h 后过滤,使用流动分析仪(AAA3 型)测定土壤硝态氮含量。

1.4.5 作物耗水量计算 春玉米全生育期的耗水量(ET)采用水量平衡方程计算:

$$ET=W_0-W_t+P+I+K-R-D \quad (2)$$

式中, W_0 和 W_t 分别为试验前和玉米收获后 0~100 cm 土层土壤储水量(mm); P 为有效降雨量(mm); I 为全生育期灌水量(mm); K 为地下水补给量(mm); R 为地表径流量(mm); D 为深层渗漏量(mm)。本试验因地下水位较深(>40 m), K 可忽略不计,地势平坦, R 可忽略不计,滴灌条件下 D 忽略不计。

1.4.6 水氮利用效率计算

$$\text{水分利用效率}(WUE, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{\text{籽粒产量}}{\text{作物耗水量}} \quad (3)$$

$$\text{氮肥利用率}(NUE, \%) = (\text{施氮区地上部氮累积量} - \text{不施氮区地上部氮累积量}) / \text{施氮量} \quad (4)$$

$$\text{氮肥偏生产力}(PFP, \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{施氮区产量}}{\text{施氮量}} \quad (5)$$

$$\text{氮收获指数}(NHI, \%) = \frac{\text{籽粒氮累积量}}{\text{地上部氮累积量}} \quad (6)$$

1.4.7 经济效益计算

$$\text{总收益}(\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{籽粒单价} \times \text{产量} \quad (7)$$

$$\text{净收益}(\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{总收益} - \text{水费} - \text{肥料费用} - \text{其他投入} \quad (8)$$

式中,籽粒单价为 2.1 CNY · kg⁻¹;水费单价为 0.4 CNY · m⁻³;肥料费用包括有机肥、尿素、磷肥和钾

肥,有机肥单价为 2.55 CNY · kg⁻¹,尿素单价为 2 CNY · kg⁻¹,磷肥单价为 1.2 CNY · kg⁻¹,钾肥 4 CNY · kg⁻¹;其他投入包括玉米种子费、人工费、耕地费、电费、管材耗费、地租等,共 12 000 CNY · hm⁻²。

1.5 数据分析

使用 Excel 2016 进行数据整理;利用 SPASS 26.0 软件统计分析数据,采用单因素(One-way ANOVA)方差分析,使用最小显著性差异法在 $P < 0.05$ 的显著性水平上进行多重比较;采用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 有机肥配合化肥减施对春玉米产量及产量性状的影响

穗长和秃尖长为评价玉米穗部性状的重要指标,由表 2 可知,穗长随化肥减施先增加后减少,秃尖长随化肥减施总体上呈持续减少的趋势,与 CK 相比, N_3 处理穗长增加 4.27%,秃尖长减少 5.73%。穗粒数和百粒重作为产量的重要构成因素,均随化学氮肥施用比例降低而先增加后减少, N_3 处理最大,与 CK 相比, N_2 处理穗粒数减少 1.87%,百粒重增加 0.25%; N_3 处理穗粒数和百粒重分别显著增加 7.11%和 8.16%; N_4 处理穗粒数减少 0.52%,百粒重增加 3.38%;与 CK 相比, N_1 处理穗粒数和百粒重显著下降。春玉米产量随化学氮肥施用比例降低呈先增加后减少的趋势,表现为 $N_3 > N_4 > CK > N_2 > N_1 > N_0$,其中 N_3 和 N_4 处理产量较 CK 分别显著提高 9.65%和 8.63%。收获指数是衡量地上部生物量向籽粒分配的重要指标,其随化学氮肥减施呈先增加后降低的趋势, N_2 、 N_3 、 N_4 处理较 CK 分别增加 3.25%、7.00%、4.00%。有机肥配合化肥减施极显著影响春

玉米产量和收获指数($P<0.01$),显著影响穗长、穗粒数和百粒重($P<0.05$),表明有机肥配合适量化肥减施(N_3)可以改善穗部性状,增加穗粒数的同时促进地上部生物量向籽粒分配,从而提高春玉米产量。

产量、收获指数与化学氮肥施用量的拟合效果较好, R^2 分别为 0.912、0.964(图 3)。回归方程结果表明,基于当地推荐施氮量($260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),有机氮肥替代 30%化学氮肥($78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施 $211\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化学氮肥,即有机氮肥配合化学氮肥减施 18.85%可获得最高产量 $19\,323\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机氮肥替代 30%化学氮肥($78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施 $187\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化学氮肥,即有机氮肥配合化学氮肥减施 28.08%可获得最大收获指数 60.46%。

2.2 有机肥配合化肥减施对春玉米品质的影响

由图 4 可知,粗脂肪含量(CFC)、淀粉含量(SC)均随生育时期推进而持续增大,还原性糖含量

(RC)随生育时期推进呈先增大后减小的趋势,可溶性糖(SSC)含量则随生育时期推进持续减小。在灌浆期, CFC 、 RC 、 SC 变化规律相似,均随施氮量增加而增大, N_4 较 N_3 处理各指标分别增加 2.23%、15.63%、7.93%, N_4 较 CK 分别增加 0.24%、9.72%、5.21%。在乳熟期和蜡熟期, CFC 、 SC 、 RC 、 SSC 均随化肥减施呈先增加后减少的趋势,与 CK 相比,两个时期 N_3 处理 CFC 分别降低 2.47%和 5.12%, SC 分别增加 5.11%和 15.73%, RC 分别增加 4.55%和 20.99%, SSC 分别增加 8.06%和 19.41%。在成熟期, CFC 随化肥减施持续增大, SC 、 RC 、 SSC 均随化肥减施呈先增大后减小的趋势,与 CK 相比, N_3 处理 CFC 减少 7.01%, SC 、 RC 、 SSC 分别增加 19.53%、5.68%、13.19%。综上可知,有机肥配合适量化肥减施(N_3)可以增加春玉米籽粒淀粉、还原性糖和可溶性糖含量。

表 2 不同处理对春玉米产量及产量性状的影响
Table 2 Effects of different treatments on yield and yield traits of spring maize

处理 Treatment	穗长/cm Ear length	秃尖长/cm Bald tip length	穗粒数 Grain spike	百粒重/g Hundred grain weight	产量/(t·hm ⁻²) Yield	收获指数/% Harvest index
N ₀	19.6±0.46b	1.75±0.14b	401.23±0.95d	32.08±0.50d	14.24±5.35d	48.37±0.44d
N ₁	19.8±0.62b	1.79±0.12ab	489.43±2.74c	34.87±0.11c	16.24±1.55c	54.63±0.65c
N ₂	21.4±1.01a	1.82±0.15ab	521.78±3.98b	35.89±0.81bc	16.63±3.75c	58.71±1.14b
N ₃	22.0±0.36a	1.81±0.13ab	569.56±6.29a	38.72±0.71a	19.32±0.49a	60.73±1.34a
N ₄	20.0±0.20b	1.84±0.14a	528.95±6.30b	37.01±0.94b	19.14±2.08a	59.02±0.18ab
CK	21.1±0.37a	1.92±0.11a	531.75±4.45b	35.80±0.89bc	17.62±2.24b	56.75±1.13b
施氮 Nitrogen application	*	ns	*	*	* *	* *

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);*表示差异显著($P<0.05$),* *表示差异极显著($P<0.01$),ns表示差异不显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). * indicates significant difference ($P<0.05$), * * indicates extremely significant difference ($P<0.01$), ns means no significant difference. The same below.

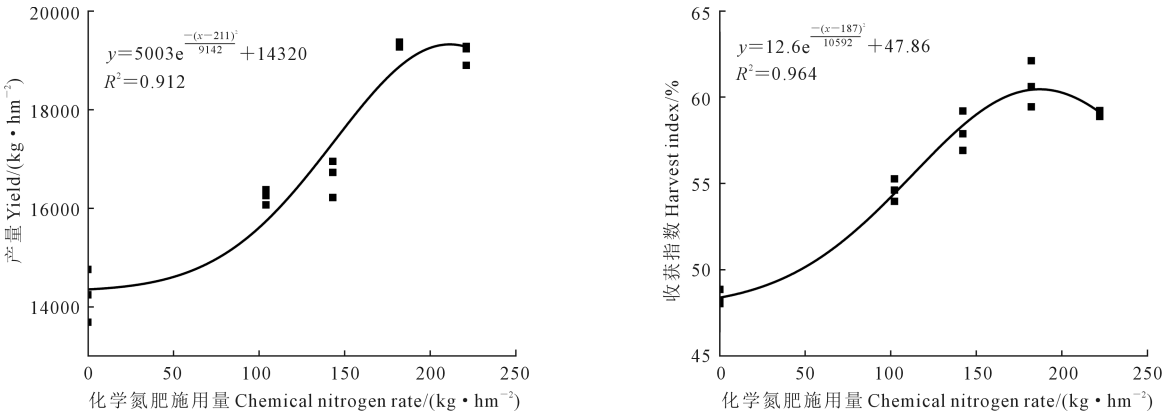


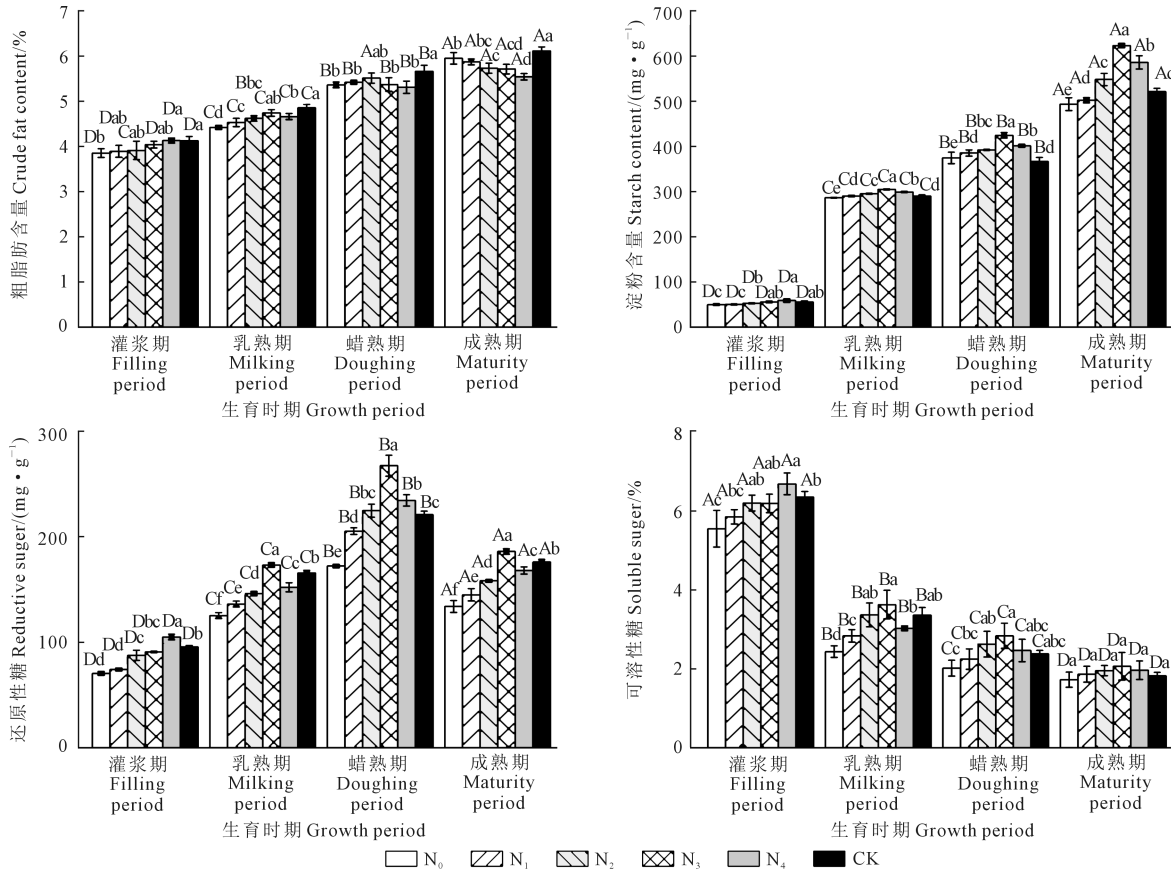
图 3 春玉米产量、收获指数与化学氮肥施用量的关系

Fig.3 Relationship between yield , harvest index of spring maize and chemical nitrogen rate

2.3 有机肥配合化肥减施对春玉米水氮利用的影响

有机肥配合化肥减施极显著影响春玉米地上部氮累积量 (*NA*)、氮肥利用率 (*NUE*) 和水分利用效率 (*WUE*) ($P<0.01$), 三者均随化肥减施呈先增大后减小的趋势 (表 3), 与 CK 相比, N_3 处理 *NA* 增加 6.19%, *NUE* 增加 19.67%, *WUE* 增加 10.03%。有机

肥配合化肥减施显著影响氮肥偏生产力 (*PFP*) 和氮收获指数 (*NHI*) ($P<0.05$), *PFP* 随化肥减施持续增大, *NHI* 随化肥减施呈先增大后减小的趋势, 与 CK 相比, N_3 处理 *PFP* 增加 9.64%, *NHI* 增加 12.62%。以上结果表明有机肥配合适量化肥减施 (N_3) 可以增加春玉米地上部氮累积量, 促进氮累积量向籽粒分配, 提高水氮利用效率。



注: 图中不同大、小写字母分别表示不同时期相同处理间和相同时期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences between different periods under the same treatment and significant differences between different treatments in the same period ($P<0.05$), respectively.

图 4 不同处理对春玉米品质的影响

Fig.4 Effects of different treatments on the quality of spring maize

表 3 不同处理对氮素吸收及水氮利用率的影响

Table 3 Effects of different treatments on nitrogen uptake and water and nitrogen use efficiency

处理 Treatment	氮累积量 <i>NA</i> /($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	氮肥利用率 <i>NUE</i> /%	氮肥偏生产力 <i>PFP</i> /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	氮收获指数 <i>NHI</i> /%	水分利用效率 <i>WUE</i> /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
N ₀	158.65±4.71e			59.34±0.84b	3.22±0.13d
N ₁	208.40±3.68d	27.33±0.85b	89.21±0.85a	61.47±1.87ab	3.68±0.03c
N ₂	224.12±4.77c	29.63±1.01ab	75.26±1.70b	62.68±0.26a	3.78±0.08c
N ₃	245.65±2.44a	33.46±1.54a	74.30±0.19b	63.55±0.97a	4.39±0.01a
N ₄	236.71±2.33b	26.11±0.88b	64.00±0.70c	62.70±1.22a	4.35±0.04a
CK	231.34±2.39b	27.96±2.67ab	67.77±0.86d	56.43±1.51c	3.99±0.05b
施氮 Nitrogen application	* *	* *	*	*	* *

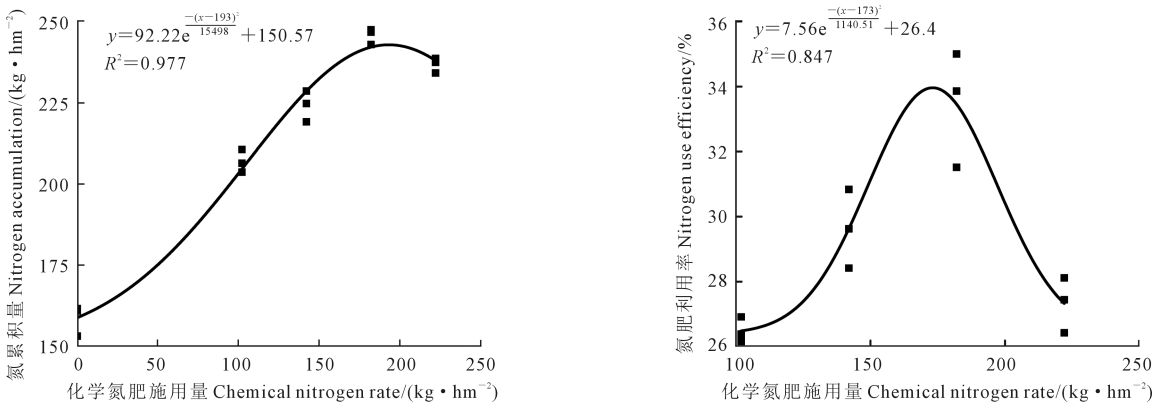


图 5 氮累积量、氮肥利用率与化学氮肥施用量的关系

Fig.5 Relationship between nitrogen accumulation, nitrogen use efficiency and chemical nitrogen fertilizer rate

氮累积量、氮肥利用率与化学氮肥施用量的拟合效果较好, R^2 分别为 0.977 和 0.847 (图 5)。回归方程结果表明, 基于当地推荐施氮量 (260 kg · hm⁻²), 有机肥替代 30% 化肥 (78 kg · hm⁻²) 配施 193 kg · hm⁻² 化肥, 即有机肥配合化肥减施 25.77% 可获得最大氮累积量 242.79 kg · hm⁻²。有机肥替代 30% 化肥 (78 kg · hm⁻²) 配施 173 kg · hm⁻² 化肥, 即有机肥配合化肥减施 33.46% 可获得最高氮肥利用率 33.96%。

2.4 有机肥配合化肥减施对土壤硝态氮含量的影响

各化肥减施处理 (N₄、N₃、N₂、N₁、N₀) 和对照 (CK) 0~80 cm 土层土壤硝态氮平均含量分别为 17.32、11.94、10.96、6.39、3.58 mg · kg⁻¹ 和 18.10 mg · kg⁻¹, 表现为 CK>N₄>N₃>N₂>N₁>N₀ (图 6)。土壤硝态氮含量随土层深度增加呈先增加后减少的趋势, CK 和 N₄ 处理硝态氮峰值出现在 60 cm 土层, 分别为 26.62 mg · kg⁻¹ 和 19.52 mg · kg⁻¹; N₃ 和 N₂ 处理硝态氮峰值出现在 40 cm 土层, 分别为 13.43 mg · kg⁻¹ 和 12.41 mg · kg⁻¹。以上结果表明有机肥结合适量化肥减施 (N₂、N₃) 可以有效固定土壤表层 (0~40 cm) 硝态氮, 降低其向深层渗漏的风险。

2.5 基于春玉米产量、籽粒品质和水氮利用的相关性分析

由图 7 可知, 春玉米产量与淀粉含量、还原性糖含量、氮累积量、氮肥利用率、水分利用效率、硝态氮含量呈极显著正相关关系 ($P<0.001$), 与氮肥偏生产力呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 与可溶性糖、氮收获指数正相关, 与粗脂肪呈极显著负相关关系。相关性大小依次为产量与水分利用率 (1.00)、产量与氮累积量 (0.92)、产量与还原性糖 (0.88)、产量与淀粉 (0.85)、产量与硝态氮 (0.78)、产量与氮肥

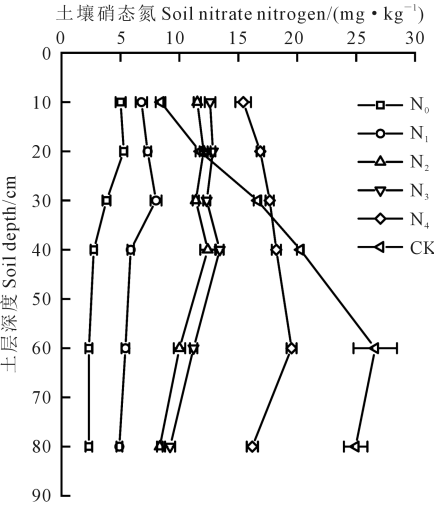


图 6 不同处理对 0~80 cm 土层土壤硝态氮的含量影响

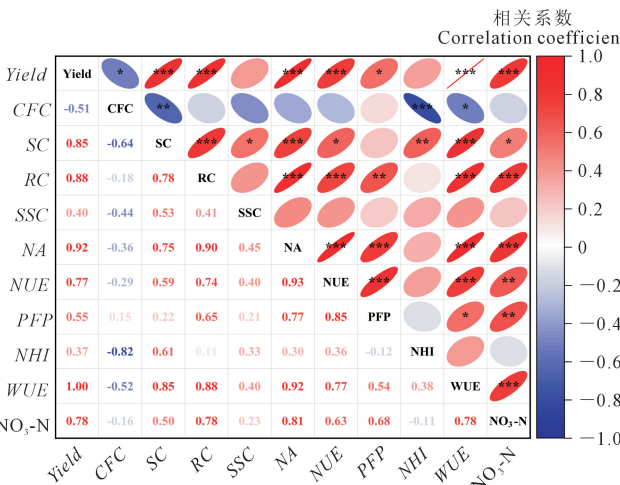
Fig.6 Effects of different treatments on soil nitrate nitrogen content in 0~80 cm depth

利用率 (0.77)、产量与氮肥偏生产力 (0.55)、产量与可溶性糖 (0.40)、产量与氮收获指数 (0.37)、产量与粗脂肪 (-0.51)。

2.6 基于春玉米产量、籽粒品质和水氮利用的主成分分析

主成分分析图总结了春玉米产量、籽粒品质与水氮利用的相关关系, 前两个主成分解释了 11 项指标 82.3% 的信息 (图 8)。主成分 1 (PC1) 解释了总方差的 62.2%, 与产量、淀粉含量、可溶性糖含量、还原性糖含量、氮累积量、氮肥利用率、氮收获指数、硝态氮含量呈正相关关系, 与粗脂肪呈负相关关系, PC1 更倾向于体现增产提质增效及土壤硝态氮含量的增加。主成分 2 (PC2) 解释了总方差的 20.1%, 与粗脂肪含量呈正相关关系。所有不施氮或高量化肥减施处理 (N₀、N₁) 均在 PC1 阴性区, N₂、N₃、N₄ 处理在 PC1 阳性区。因此, PC1 是决定有

机肥配合化肥减施影响春玉米产量、籽粒品质与水氮利用的主要成分,在 PC1 方向上 N₃处理取值一直高于 N₂和 N₄处理,表明 N₃获得了更高的产量和水氮利用效率,提高了籽粒淀粉、可溶性糖和还原性糖含量;在 PC2 方向上 N₀处理取值高于其他处理,表明 N₀获得了更多的粗脂肪。



注: CFC:粗脂肪含量;SC:淀粉含量;RC:还原性糖含量;SSC:可溶性糖含量;NA:氮累积量;NUE:氮肥利用率;PFP:氮肥偏生产力;NHI:氮收获指数;WUE:水分利用效率;NO₃-N:土壤硝态氮含量;*, **, and *** 分别表示在 P<0.05 水平显著相关、P<0.01 和 P<0.001 水平极显著相关。

Note: CFC: crude fat content; SC: starch content; RC: reductive suger content; SSC: soluble suger content; NA: nitrogen accumulation; NUE: nitrogen use efficiency; PFP: partial factor productivity of nitrogen fertilizer; NHI: nitrogen harvest index; WUE: water use efficiency; NO₃-N: soil nitrate nitrogen; *, **, and *** indicate a significant correlation at the P<0.05 level, and a very significant correlation at the P<0.01 and P<0.001 levels, respectively.

图 7 相关性分析热点图

Fig.7 Correlation analysis heat map

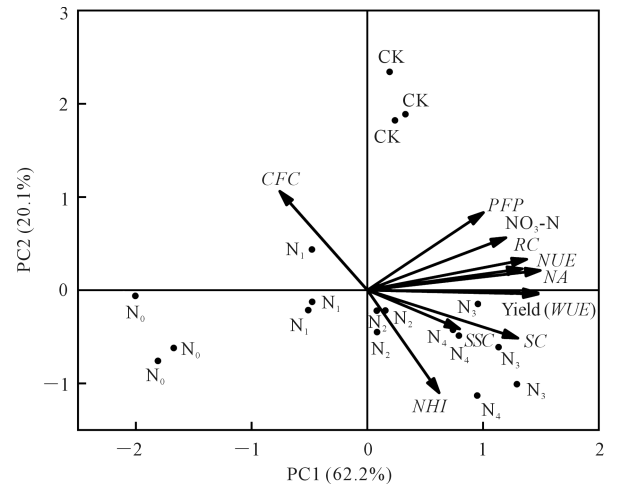


图 8 不同指标主成分分析

Fig.8 Principal component analysis of different indicators

2.7 基于主成分分析综合评价春玉米产量、籽粒品质和水氮利用

为揭示有机肥配合不同化肥减施处理下春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的综合表现,针对产量、粗脂肪含量、淀粉含量、还原性糖含量、可溶性糖含量、氮累积量、氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮收获指数、水分利用效率、硝态氮含量共 11 个指标,利用主成分分析进行综合评价。由表 4 可知,前 3 个主成分累计贡献率达到 89.05% (>85%),说明 3 个主成分具有良好的代表性,能够综合评价有机肥配合化肥减施下春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的情况。第 1 主成分特征值为 6.844,贡献率为 62.20%,主要反映产量、淀粉含量、还原性糖含量、氮累积量、水分利用效率、硝态氮含量,其载荷值分别为 0.862、0.718、0.865、0.734、0.859、0.854;第 2 主成分主要反映粗脂肪含量、氮收获指数,其载荷值分别为 0.873、0.977,其特征值为 2.206,贡献率为 20.10%;第 3 主成分主要反映氮肥利用率、氮肥偏生产力,其载荷值分别为 0.827、0.882,其特征值为 0.743,贡献率为 6.75%。

为消除不同单位和数据量纲的影响,将原始数据极差标准化。根据标准化后的原始指标与主成分载荷值的乘积计算各主成分得分,如下式:

$$F_1 = 0.862X_1 + 0.255X_2 + 0.718X_3 + 0.865X_4 + 0.193X_5 + 0.734X_6 + 0.463X_7 + 0.387X_8 + 0.003X_9 + 0.859X_{10} + 0.625X_{11} \tag{9}$$

$$F_2 = 0.345X_1 + 0.873X_2 + 0.568X_3 + 0.025X_4 + 0.238X_5 + 0.225X_6 + 0.267X_7 - 0.223X_8 + 0.977X_9 + 0.353X_{10} - 0.145X_{11} \tag{10}$$

$$F_3 = 0.321X_1 - 0.100X_2 + 0.071X_3 + 0.357X_4 + 0.138X_5 + 0.605X_6 + 0.827X_7 + 0.882X_8 + 0.109X_9 + 0.321X_{10} + 0.336X_{11} \tag{11}$$

基于上述 11 个指标建立了有机肥配合不同化肥减施下春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的综合评价函数 $F = 0.698F_1 + 0.226F_2 + 0.076F_3$ 。依据该函数计算各处理的综合得分,并对其进行综合评价(表 5),综合得分从高到低依次为 N₃、N₄、CK、N₂、N₁、N₀,其中 N₃处理的综合得分最高,说明该处理可以有效增产提质,提高水氮利用效率。

2.8 有机肥配合化肥减施下春玉米经济效益分析

就成本投入而言,有机肥配合不同化肥减施下水费和其他投入包括玉米种费、人工费、耕地费、电费、管材耗费、地租均无差异;不同化肥减施处理肥料费有所不同,不施肥或高量化肥减施处理(N₀、N₁)的肥料成本较低。综合收益情况可知,N₃处理

表 4 不同处理相关指标载荷值、特征值及贡献率
Table 4 Load value, eigenvalue and contribution rate of the relevant indexes of different treatments

指标 Index	主成分载荷值 Principal component load value		
	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3
产量 Yield(X_1)	0.862	0.345	0.321
粗脂肪 CFC(X_2)	0.255	0.873	-0.100
淀粉 SC(X_3)	0.718	0.568	0.071
还原性糖 RC(X_4)	0.865	0.025	0.357
可溶性糖 SSC(X_5)	0.193	0.238	0.138
氮累积量 NA(X_6)	0.734	0.225	0.605
氮肥利用率 NUE(X_7)	0.463	0.267	0.827
氮肥偏生产力 PFP(X_8)	0.387	-0.223	0.882
氮收获指数 NHI(X_9)	0.003	0.977	0.109
水分利用效率 WUE(X_{10})	0.859	0.353	0.321
硝态氮 $\text{NO}_3\text{-N}$ (X_{11})	0.854	-0.145	0.336
特征根 Eigenvalue (λ)	6.844	2.206	0.743
贡献率 Contribution/%	62.20	20.10	6.75
累计贡献率 Cumulative contribution/%	62.20	82.30	89.05

表 5 不同处理相关指标主成分综合评价
Table 5 Comprehensive evaluation of principal components of relevant indexes of different treatments

处理 Treatment	F_1	F_2	F_3	F	综合排名 Comprehensive ranking
N_0	0.506	0.941	0.188	0.580	6
N_1	2.152	1.639	1.367	1.976	5
N_2	3.277	2.259	1.960	2.947	4
N_3	5.209	3.179	2.847	4.571	1
N_4	4.605	2.921	1.958	4.023	2
CK	4.146	0.892	2.738	3.304	3

表 6 不同处理下春玉米经济效益/($\text{CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Table 6 Economic benefits of spring maize under different treatments

处理 Treatment	投入 Input			收益 Profit	
	肥料费 Fertilizer cost	水费 Water cost	其他投入 Other input	总收益 Total profit	净收益 Net profit
N_0	1066.68	1288	12000	29894.14±1123.39d	15539.46±1123.39d
N_1	3875.48	1288	12000	34095.95±325.65c	16932.47±325.65c
N_2	4045.05	1288	12000	34929.94±787.66c	17596.89±787.66c
N_3	4214.62	1288	12000	40565.41±102.69a	23062.79±102.69a
N_4	4384.18	1288	12000	40188.09±437.14a	22515.91±437.14ab
CK	2197.11	1288	12000	36998.93±469.49b	21513.82±469.49b

肥($78\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)配施 $187\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥,即有机肥配合化肥减施 28.08% 获得最大收获指数 60.46%。这主要是由于化学氮肥保证了玉米生育前期的养分供应,有机肥满足了玉米生育后期所需养分,二者协同促进了光合产物累积^[23]。本研究结果与前人基本一致,可见在有机肥施用和化肥减施改土培肥地力的作用下,作物增产潜力被充分发挥,春玉米可实现稳产甚至增产。

总收益和净收益,分别为 $40\ 565.41\text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $23\ 062.79\text{ CNY} \cdot \text{hm}^{-2}$,分别较其余处理提高 0.94%~35.70% 和 2.43%~48.41%(表 6)。

3 讨 论

3.1 有机肥配合化肥减施对玉米产量的影响

本研究结果表明,在较低肥力砂壤土中,有机肥配合适量化肥减施($78\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机肥配合 $182\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥)可以改善穗部性状,增加穗粒数的同时促进地上部生物量向籽粒分配,从而提高春玉米产量。前人不少研究也得到相似结论。赵亚南等^[14]研究发现,适量减施化肥可以促进地上部生物量向籽粒转运,有利于籽粒灌浆,进而增加小麦产量。周慧等^[10]研究表明,基于河套灌区优化施氮量($240\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),有机无机氮施入比例为 3:2 时最有利于作物增产。吕梦等^[19]研究结果表明,基于豫西旱区推荐施氮量($210\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),有机肥替代 20% 化肥($42\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)配施 $168\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥可以增加玉米穗长,提高穗粒数和百粒重,促进干物质向籽粒转运。刘斌祥等^[22]研究也发现,基于常规施氮量($270\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),化肥减施 20% 配施有机肥($1\ 500\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)可以改善穗部性状,促进地上部生物量向籽粒转运,进而提高玉米穗粒数、百粒重和产量。本研究中,基于当地推荐施氮量($260\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),有机肥替代 30% 化肥($78\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)配施 $211\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 化肥,即有机肥配合化肥减施 18.85% 获得最高产量 $19\ 323\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;有机肥替代 30% 化

3.2 有机肥配合化肥减施对玉米籽粒品质的影响

本研究发现,在较低肥力砂壤土中,有机肥配合适量化肥减施可以增加春玉米淀粉、可溶性糖和还原性糖含量,且随着化肥减施比例增加,籽粒体内形成更多的粗脂肪。邓帅帅等^[24]研究表明,黄瓜的可溶性固形物、葡萄糖和维生素 C 含量随施氮量和有机肥配施量的增加而增大。张迎春等^[25]研究发现,化肥减施 20% 配合 $400\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机肥可以

降低茎、叶中硝酸盐含量,增加可食用部分可溶性糖含量,进而改善莴笋风味品质。杨莉莉等^[26]研究表明,有机肥替代50%化肥措施下,苹果果实的可溶性固形物、可溶性糖及糖酸比增加,可滴定酸含量有所降低。陈云梅等^[27]研究表明,减氮配施菜籽饼可以增加玉米籽粒粗蛋白、淀粉和还原性糖,降低粗纤维含量。周芸等^[28]研究也发现,有机肥等氮替代30%化肥可以提高玉米籽粒蛋白质、淀粉和可溶性糖。本研究进一步确定,基于当地推荐施氮量($260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),有机肥替代30%化肥($78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施 $182\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥对春玉米籽粒淀粉、可溶性糖和还原性糖含量提升较显著;此外,粗脂肪、淀粉、可溶性糖含量在籽粒建成前期随施氮量增加而增大,中后期淀粉、还原性糖、可溶性糖随化肥减施先增大后减小。这可能是因为有机肥配合化肥减施较好地协调了生育后期作物氮素需求,提升了叶片叶绿素含量和净光合速率。推测随着试验年限的增加,有机肥可以延缓作物营养器官的衰老,稳定提升该区域春玉米籽粒品质,具体影响仍待进一步研究。

3.3 有机肥配合化肥减施对玉米水氮利用的影响

研究发现,有机肥配合化肥减施可有效协调作物耗水量与籽粒产量的关系,提高水分利用效率^[18]。吕梦等^[19]研究表明,有机肥结合减施化肥可提高玉米植株地上部氮累积量,促进氮素向籽粒分配,基于豫西旱区推荐施氮量($210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),有机肥替代20%化肥($42\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施 $168\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥措施的效果最佳。娄菲等^[29]研究表明,基于常规施氮量($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),有机肥替代20%化肥可获得最高氮肥利用率,有机肥替代40%化肥可获得最高氮肥偏生产力^[26]。本研究表明,有机肥配合适量化肥减施可以增加春玉米地上部氮累积量,促进氮累积量向籽粒分配,提高水氮利用效率;基于当地推荐施氮量 $260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥替代30%化肥($78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施 $193\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥,即有机肥配合化肥减施25.77%下氮累积量最大,有机肥替代30%化肥配施 $173\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 化肥,即有机肥配合化肥减施33.46%下氮肥利用率33.96%最高。本研究与前人推荐结果略有不同,可能是不同地域间气候条件、种植结构、施肥方式和土壤性质的差异所致。可见,有机肥配合适量化肥减施措施可有效提高玉米水氮利用效率,有助于因地制宜进行低肥力砂壤土的养分管理,优化资源配置,进而提高区域生产力。

3.4 有机肥配合化肥减施对土壤硝态氮含量的影响

姜春霞等^[30]研究发现,减量施氮可有效降低土壤硝态氮含量,其中化肥减施25%较高氮处理0~200 cm土层土壤硝态氮累积量降低58.3%。周慧等^[10]研究表明,有机肥配合化肥减施可以增强土壤硝态氮固持能力,降低硝态氮淋失。邓正昕等^[31]研究发现,有机肥配合化肥减施提高了作物根际/非根际土壤硝态氮含量。本研究也表明,有机肥配合化肥减施可以有效固定较低肥力砂壤土0~40 cm土层土壤硝态氮含量,降低其向深层渗漏的风险。这一方面可能是施用有机肥可增加土壤团聚体粒径和有机质含量,为微生物提供所需能量,进而促进了作物根层硝态氮的储存和硝化^[32];另一方面化肥减施避免了氮素因作物未能及时吸收而产生大量淋失,降低了地下水污染的风险^[33]。本研究结果与前人基本一致,随着试验年限的增加,该区域土壤硝态氮将更好地集中在春玉米根层,污染环境的风险降低,这对于保持良好的地下水水质及实现农业绿色可持续发展具有重要意义。

4 结 论

(1)有机氮肥配合适量化学氮肥减施可以改善穗部性状,增加穗粒数的同时促进地上部生物量向籽粒分配,从而提高春玉米产量。有机肥配合化肥减施18.85%可获得最高产量 $19\,323\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥配合化肥减施28.08%可获得最大收获指数60.46%。

(2)有机氮肥配合适量化学氮肥减施可以增加春玉米籽粒淀粉、还原性糖和可溶性糖含量,且随着化肥减施,籽粒体内形成更多的粗脂肪,其中30%有机氮肥+70%化学氮肥处理表现最优,较100%化学氮肥处理SC、RC、SSC分别增加19.53%、5.68%、13.19%,CFC减少7.01%。

(3)有机氮肥配合适量化学氮肥减施可以增加春玉米地上部氮累积量,促进地上部氮累积量向籽粒分配,提高水氮利用效率。有机肥配合化肥减施25.77%可获得最大氮累积量 $242.79\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,有机肥配合化肥减施33.46%可获得最高氮肥利用率33.96%。

(4)有机肥配合适量化肥减施可以有效固定土壤表层(0~40 cm)硝态氮,降低其向深层渗漏的风险,其中30%有机氮肥+55%化学氮肥和30%有机氮肥+70%化学氮肥处理表现最优,0~80 cm土层土壤硝态氮含量稳定且较100%化学氮肥处理分别减少7.14、6.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

综合分析不同处理对春玉米产量、籽粒品质及水氮利用的影响,同时考虑经济效益,基于当地推荐施氮量 $260\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,推荐有机肥替代 30% 化肥 ($78\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 配合化肥减施 18.85%~33.46% ($49\sim 87\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 可作为河西绿洲灌区较低肥力砂壤土适宜的提质增效技术进行推广应用。

参 考 文 献:

[1] GUO J J, FAN J L, XIANG Y Z, et al. Synchronizing nitrogen supply and uptake by rainfed maize using mixed urea and slow-release nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2022, 122: 157-171.

[2] LI Y P, GU X B, LI Y N, et al. Ridge-furrow mulching combined with appropriate nitrogen rate for enhancing photosynthetic efficiency, yield and water use efficiency of summer maize in a semi-arid region of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 287: 108450.

[3] 赵洪祥, 边少锋, 孙宁, 等. 氮肥运筹对玉米氮素动态变化和氮肥利用的影响[J]. *玉米科学*, 2012, 20(3): 122-129.

ZHAO H X, BIAN S F, SUN N, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen dynamic changes and nitrogen use efficiency in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(3): 122-129.

[4] 易镇邪, 王璞, 刘明, 等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表观盈亏[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 63-67.

YI Z X, WANG P, LIU M, et al. Water and nitrogen utilization and apparent budget of soil nitrogen under different types of nitrogen fertilizer and different application rates in summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 63-67.

[5] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[6] RAMIREZ K S, CRAINE J M, FIERER N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1918-1927.

[7] SOGBEDJI J M, ES H M, YANG C L, et al. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(6): 1813-1820.

[8] KIM S, DALE B E. Effects of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions and economics of corn production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 6028-6033.

[9] ANDREWS M, EDWARDS G R, RIDGWAY H J, et al. Positive plant microbial interactions in perennial ryegrass dairy pasture systems[J]. *Annals of Applied Biology*, 2011, 159(1): 79-92.

[10] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机氮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.

[11] WEI W L, YAN Y, CAO J, et al. Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 225: 86-92.

[12] 霍琳, 王成宝, 逢焕成, 等. 有机无机肥配施对新垦盐碱荒地土壤理化性状和作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 105-111.

HUO L, WANG C B, PANG H C, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on physical and chemical properties and crop yields in alkali-saline soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 105-111.

[13] 杨小梅, 刘树伟, 秦艳梅, 等. 中国玉米化学氮肥利用率的时空变异特征[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(10): 1184-1192.

YANG X M, LIU S W, QIN Y M, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of synthetic nitrogen fertilizer use efficiency in maize fields in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1184-1192.

[14] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 864-873.

ZHAO Y N, SU M M, LV Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiency and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 864-873.

[15] 王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿肥还田结合减量施氮对玉米干物质积累分配及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(7): 1283-1294.

WANG P F, YU A Z, WANG Y L, et al. Effects of returning green manure to field combined with reducing nitrogen application on the dry matter accumulation, distribution and yield of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7): 1283-1294.

[16] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(20): 3934-3943.

XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(20): 3934-3943.

[17] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 852-864.

ZHANG X C, YU X F, WANG H L, et al. Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 852-864.

[18] 陈倩, 谢军红, 李玲玲, 等. 不同比例有机肥替代化肥对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 162-170.

CHEN Q, XIE J H, LI L L, et al. Effects of different proportions of organic fertilizer substitutes for chemical fertilizer on growth characteristics and water use efficiency of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 162-170.

[19] 吕梦, 黄明, 侯园泉, 等. 减氮配施有机肥对豫西旱区玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. *玉米科学*, 2023, 31(4): 158-164.

- LV M, HUANG M, HOU Y Q, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer application on maize yield and nitrogen use efficiency in western Henan arid region[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2023, 31(4): 158-164.
- [20] 黄鹏, 代平平, 陈雅慧, 等. 矿物质有机肥与化肥配施对甘肃河西绿洲区玉米产量构成的影响[J]. *玉米科学*, 2014, (2): 117-122.
- HUANG P, DAI P P, CHEN Y H, et al. Effect on yield components of maize under combined application mineral organic fertilizer with chemical fertilizer in Hexi corridor oasis irrigation area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2014, (2): 117-122.
- [21] ZOU H Y, FAN J L, ZHANG F C, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105986.
- [22] 刘斌祥, 王兴龙, 周芳, 等. 减氮配施不同种类有机肥对玉米物质分配、转运与产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(1): 130-138.
- LIU B X, WANG X L, ZHOU F, et al. Effects of reducing nitrogen combined with application of different types of organic fertilizers on dry matter allocation, transport, and yield of maize[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 130-138.
- [23] 刘占军, 谢佳贵, 张宽, 等. 不同氮肥管理对吉林春玉米生长发育和养分吸收的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 38-47.
- LIU Z J, XIE J G, ZHANG K, et al. Maize growth and nutrient uptake as influenced by nitrogen management in Jilin province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 38-47.
- [24] 邓帅帅, 闫浩芳, 张川, 等. 灌溉量与减氮配施有机肥模式对温室黄瓜及土壤的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(19): 93-102.
- DENG S S, YAN H F, ZHANG C, et al. Effects of irrigation amounts and nitrogen reduction combined with organic fertilizer pattern on greenhouse cucumber and soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(19): 93-102.
- [25] 张迎春, 颀建明, 郁继华, 等. 生物有机肥部分替代化肥对莴笋生长、产量及品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 66-73.
- ZHANG Y C, JIE J M, YU J H, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on the growth yield and quality of asparagus lettuce[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 66-73.
- [26] 杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 等. 氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(3): 631-639.
- YANG L L, WANG Y H, HAN W S, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer and applying organic fertilizer on apple yield and quality and soil biological characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 631-639.
- [27] 陈云梅, 赵欢, 肖厚军, 等. 减氮配施有机物料对玉米-白菜轮作系统作物产量、光合特性和产品品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4391-4400.
- CHEN Y M, ZHAO H, XIAO H J, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic materials on crop yield, photosynthetic characteristics, and product quality of corn-cabbage rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4391-4400.
- [28] 周芸, 李永梅, 范茂攀, 等. 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J]. *作物杂志*, 2019, (4): 125-132.
- ZHOU Y, LI Y M, FAN M P, et al. Effects of nitrogen in organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on aggregates of red-soil, maize yield and quality[J]. *Crops*, 2019, (4): 125-132.
- [29] 娄菲, 左恽平, 李萌, 等. 有机肥替代部分化肥氮对糯玉米产量、品质及氮素利用的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(4): 1053-1064.
- LOU F, ZUO Y P, LI M, et al. Effects of organic fertilizer substituting chemical fertilizer nitrogen on yield, quality, and nitrogen efficiency of waxy maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(4): 1053-1064.
- [30] 姜春霞, 刘化涛, 张伟, 等. 减量施氮对鲜食玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (12): 61-67.
- JIANG C X, LIU H T, ZHANG W, et al. Effect of reduced nitrogen application on yield, nitrogen utilization of fresh waxy maize and soil nitrate nitrogen content in Shanxi dryland[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2022, (12): 61-67.
- [31] 邓正昕, 高明, 王莹燕, 等. 化肥减量配施有机肥对柠檬根际/非根际土壤细菌群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1074-1084.
- DENG Z X, GAO M, WANG Y Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer application on bacterial community structure in rhizosphere/non-rhizosphere soil of lemon[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1074-1084.
- [32] TIAN S Y, ZHU B J, YIN R, et al. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: 108533.
- [33] 秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 等. 化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1558-1567.
- QIN X C, PAN J T, GUO S F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat - maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1558-1567.