

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22300

硫肥配施对不同氮磷钾水平下春玉米生长及氮肥利用效率的影响

李 昊, 耿玉辉*, 曹国军, 周丽娟, 申凯宏

(吉林农业大学资源与环境学院, 吉林 长春 130118)

摘 要: 为探究在农业生产过程中配施硫肥对不同氮磷钾施肥水平下春玉米生长及氮肥利用效率的影响, 于大田条件下, 设置低氮磷钾水平 + 不施硫 (LS0)、低氮磷钾水平 + 硫肥 (LS6)、中氮磷钾水平 + 不施硫 (MS0)、中氮磷钾水平 + 硫肥 (MS6)、高氮磷钾水平 + 不施硫 (HS0)、高氮磷钾水平 + 硫肥 (HS6) 6 个处理, 研究其对土壤碱解氮、玉米氮素积累、籽粒产量及氮肥利用效率的影响。结果表明: 提高氮磷钾施肥水平能够显著增加土壤碱解氮含量, 在相同氮磷钾施肥水平下施用硫肥对土壤碱解氮含量没有影响。春玉米地上部总氮素积累量和籽粒产量与氮磷钾施肥水平及硫肥施用呈显著正相关。氮磷钾配施硫肥与只施氮磷钾处理相比, 地上部总氮素积累量平均增加 10.24%, 籽粒产量平均增加 5.70%, 二者提升效果显著。但随着氮磷钾施肥水平的提高, 硫肥对氮素积累和籽粒产量的提升效果逐渐降低。相同施硫水平的氮肥偏生产力、农学效率和利用率均随着氮磷钾施肥水平的提高逐渐减小。在相同氮磷钾水平下, 施硫能够提高春玉米的氮肥偏生产力、农学效率和利用率。以上结果表明, 随着氮磷钾施肥水平的提高, 土壤碱解氮含量、春玉米地上部氮素积累量及籽粒产量逐渐增加, 但春玉米的氮肥利用效率反而逐渐降低。配施硫肥能够在提高氮磷钾施肥水平的基础上进一步增加春玉米地上部对氮素的吸收积累以及籽粒产量, 同时还能够在一定程度上提高氮肥利用效率。

关键词: 春玉米; 氮磷钾肥; 硫肥; 产量; 氮肥利用效率

为满足当前我国经济发展和人口增长对粮食增产的需求, 化肥的施用量不断增加。有研究表明, 作物施用化肥与不施化肥相比增产可达 48%^[1], 可见化肥在农业生产中有着举足轻重的地位。但是近些年来, 随着化肥施用量增加, 我国粮食增产速率却在逐渐变缓, 肥料利用效率更是逐渐减小。其原因主要是农民受“多施肥, 产量高”传统观念的影响, 在农业生产过程中普遍过量施肥, 导致肥料利用效率降低, 粮食增产速率放缓^[2]。氮素是促进作物生长, 增加作物产量最关键的营养元素^[3]。过量施用氮肥会导致土壤酸化^[4], 水资源污染^[5], 温室气体排放增加^[6-7], 作物产量和肥料利用率降低^[8-9]等一系列问题, 影响农业的可持续发展。

已有研究表明, 增加施氮量能够提高玉米产量, 但同时玉米的氮素利用效率降低^[10]; 减少施

氮量能够提高玉米的氮素利用效率, 但也降低了玉米的产量^[11]。如何保证作物增产的同时提高肥料利用效率对保障农业的可持续发展尤为重要。曾子豪等^[12]研究发现通过改变施肥方式, 将氮肥分次施用可以增加玉米产量, 同时提高了氮素利用效率。洪瑜等^[13]研究表明配施有机肥可以增加玉米产量, 还可以促进玉米吸收氮素, 提高氮肥利用率。李玉影等^[14]研究认为在氮、磷、钾大量元素肥料施用的基础上补充中、微量元素肥料进行平衡施肥能够实现作物的进一步增产, 并且增强作物吸收养分的能力, 提高肥料利用效率。以上方法均能实现在作物增产的同时提高肥料利用效率, 其中, 平衡施肥对保证作物的可持续生产以及减少化肥投入至关重要。中量元素硫是仅次于氮、磷、钾的第四大植物营养元素, 在玉米生产过程中施用硫肥可以提高产量, 增加植株的氮素含量^[15]。合理配施氮肥和硫肥不仅能够促进作物对土壤养分的吸收、减少氮素向下淋溶损失、提高氮肥利用率, 还能够提高产量、改善作物品质, 促进农业良好发展^[16-17]。

当前在硫肥对提高作物产量及氮肥利用效率方面已经做了大量研究, 但多数研究是在相同氮磷钾

收稿日期: 2022-05-16; 录用日期: 2022-06-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300604)。

作者简介: 李昊 (1998-), 硕士研究生, 从事土壤肥力调控研究。

E-mail: lihao112307@163.com。

通讯作者: 耿玉辉, E-mail: gengyuhui@163.com。

水平上比较施用硫肥与不施用硫肥的效果差异, 而由于不同氮磷钾水平下作物对养分的利用效率不同, 施用硫肥在不同氮磷钾水平上的影响也必然有所不同。为此, 本研究设置了低、中、高 3 个不同的氮磷钾施肥水平, 探究不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米产量及氮肥吸收利用效率的影响, 以期为指导合理施肥, 提高作物产量和肥料利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 5—10 月在吉林省乾安县赞字乡父字村 (124° 1' 49" E, 44° 88' 34" N) 进行。试验区域为温带大陆性季风气候, 土壤类型为黑钙土, 耕层土壤化学性质见表 1, 试验所在地常年进行玉米连作。

表 1 0 ~ 20 cm 耕层土壤化学性质

有机质 (g · kg ⁻¹)	碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	有效磷 (mg · kg ⁻¹)	速效钾 (mg · kg ⁻¹)	有效硫 (mg · kg ⁻¹)
17.39	102.36	35.86	109.38	15.36

1.2 试验设计

试验共设有 6 个处理: (1) 低氮磷钾水平 + 不施硫 (LS0); (2) 低氮磷钾水平 + 硫肥 (LS6); (3) 中氮磷钾水平 + 不施硫 (MS0); (4) 中氮磷钾水平 + 硫肥 (MS6); (5) 高氮磷钾水平 + 不施硫 (HS0); (6) 高氮磷钾水平 + 硫肥 (HS6), 各处理具体施肥量见表 2。同时为了计算氮肥利用效率, 试验分别在 3 个不同磷钾施肥水平上设置了不施氮肥处理, 氮磷钾施用量分别为: 低氮磷钾水平 (N 0 kg · hm⁻², P₂O₅ 60 kg · hm⁻², K₂O 60 kg · hm⁻²), 中氮磷钾水平 (N 0 kg · hm⁻², P₂O₅ 90 kg · hm⁻², K₂O 90 kg · hm⁻²), 高氮磷钾水平 (N 0 kg · hm⁻², P₂O₅ 120 kg · hm⁻², K₂O 120 kg · hm⁻²), 作为氮肥利用效率计算使用。氮肥按 4:3:3 的比例作为基肥、拔节期和喇叭口期追肥, 追肥方式为水肥一体化随水追施。磷肥、钾肥和硫肥一次性全部撒施在垄沟内作为基肥, 同时为保证硫肥施用均匀, 将其与少量土壤混合后均匀的撒施于垄沟内。供试玉米品种为 '富民 985', 密度为 80000 株 · hm⁻²。试验按照随机区组排列, 重复 3 次, 每小区 35 m², 于 2020 年 5 月 10 日播种, 2020 年 10 月 10 日收获, 其他管理同当地玉米大田。

表 2 各试验处理施肥量 (kg · hm⁻²)

处理	S	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
LS0	0	140	60	60
LS6	60	140	60	60
MS0	0	210	90	90
MS6	60	210	90	90
HS0	0	280	120	120
HS6	60	280	120	120

1.3 测定项目与方法

分别从拔节期 (7 月 3 日)、喇叭口期 (7 月 14 日)、抽雄期 (7 月 29 日)、灌浆期 (8 月 17 日)、乳熟期 (9 月 1 日)、完熟期 (10 月 10 日) 这 6 个具有代表性的时期进行田间采样。按照多点取样法采集 0.5 kg 左右的耕层土壤, 风干后过 1 mm 筛, 采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量。同时在各小区内随机采集长势相近、大小均匀的 3 株玉米, 按叶片、茎秆、穗和籽粒四部分进行分类, 杀青烘干后, 粉碎备用, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮、凯氏定氮法测定植株中各器官的氮素含量。从完熟期各小区中间两垄 (7.7 m 长) 选取 10 个具有代表性的果穗, 风干后考种, 以新鲜籽粒含水量为 14% 进行折算得到产量。

1.4 数据处理与分析

植株总氮素积累量 (kg · hm⁻²) = 每公顷样品干物质质量 × 烘干样品含氮量

$$\text{氮肥偏生产力 (kg · kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{施氮处理产量}}{\text{施氮量}}$$

$$\text{氮肥农学效率 (kg · kg}^{-1}\text{)} = \frac{\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}}{\text{施氮量}}$$

$$\text{氮肥利用率 (\%)} = \frac{\text{施氮处理氮素积累量} - \text{不施氮处理氮素积累量}}{\text{施氮量}} \times 100$$

试验数据采用 Excel 2019 进行整理和初步分析, 采用 SPSS 21.0 进行方差分析和显著性检验 (Duncan 法), 采用 Origin 2018 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对土壤碱解氮含量动态变化的影响

如图 1 所示, 各处理的土壤碱解氮含量在整

个生育期内均呈现先增加后降低的趋势,均在喇叭口期达到最大值,之后土壤碱解氮含量不断下降,在完熟期达到最低。各处理在完熟期的土壤碱解氮含量表现为 HS0>HS6>MS0>MS6>LS0>LS6,HS0 处理是所有处理中土壤碱解氮含量的最高值,为 $115.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。完熟期不施硫处理中,MS0 处理比 LS0 处理增加 5.10%,HS0 处理比 MS0 处理增加 7.13%,土壤碱解氮含量随着氮磷钾施肥水平的提高显著增加。完熟期,LS6 处理的土壤碱解氮含量比 LS0 处理减少了 1.94%,MS6 处理比 MS0 处理减少了 2.03%,HS6 处理比 HS0 处理减少了 1.86%,但差异不显著,说明在相同氮磷钾施肥水平下施硫对土壤碱解氮含量没有影响。

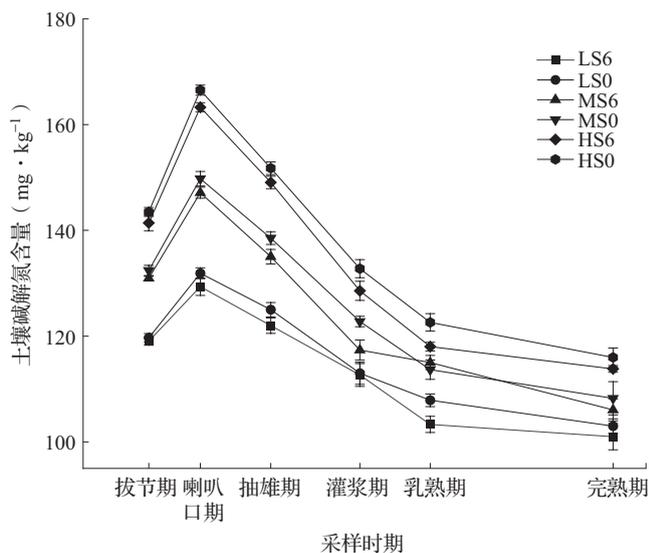


图1 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对土壤碱解氮含量动态变化的影响

2.2 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米地上部总氮素积累量的影响

由图2可以看出,随着生育期的推进,各处理的地上部总氮素积累量均表现为持续增长的趋势。各处理的总氮素积累量在抽雄至灌浆期间增长速率最快,到完熟期达到最大值,其中,HS6 处理的总氮素积累量在完熟期所有处理中最大,为 $211.10 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在完熟期,不施硫的3个处理总氮素积累量表现为 HS0>MS0>LS0,HS0 处理比 MS0 处理增加 14.64%,MS0 处理比 LS0 处理增加 15.54%,提高氮磷钾施肥水平能够促进玉米地上部积累氮素。施硫处理的总氮素积累量在各生育期均大于相同氮磷钾施肥水平下的不施硫处理,

说明施用硫肥可以促进春玉米地上部的氮素积累。在完熟期,HS6 处理的总氮素积累量较 MS0 处理增加了 24.23%,MS6 处理较 LS0 处理增加了 26.42%,相较于之前单独提高氮磷钾施肥水平对氮素积累的影响,配施硫肥能够进一步增加植株对氮素的积累。LS6、MS6 和 HS6 处理的总氮素积累量在完熟期比相同氮磷钾施肥水平下的不施硫处理分别增加了 10.39%、9.42% 和 8.37%,说明硫肥促进氮素积累的效果随氮磷钾施肥量的增加而下降。

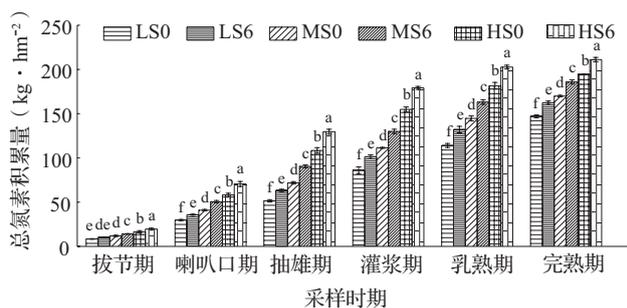


图2 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米地上部总氮素积累量的影响

注:不同小写字母表示同一生育时期处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米产量及产量构成因素的影响

如表3所示,不同氮磷钾施肥水平和施用硫肥对春玉米的千粒质量、穗粒数和产量的影响均达到极显著差异水平。在不施硫的情况下,HS0 处理比 MS0 处理增产 11.81%,MS0 处理比 LS0 处理增产 8.36%,说明提升氮磷钾施肥水平可以提高春玉米产量。施硫处理的千粒质量、穗粒数和产量较相同氮磷钾施肥水平下的不施硫处理平均分别提高了 10.73 g、13 粒和 $665.63 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,说明施硫可以提高春玉米产量。在所有处理中,HS6 处理比 MS0 处理增产 16.82%,MS6 处理比 LS0 处理增产 14.76%,说明提高氮磷钾施肥水平的同时配施硫肥比单独提高氮磷钾施肥水平的增产效果更明显。HS6 处理在所有处理中产量最高,为 $12937 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,增产效果最明显。此外,施硫处理的产量在低、中、高氮磷钾施肥水平下较不施硫处理分别提高了 7.72%、5.90%、4.48%,可见在不同氮磷钾施肥水平下,硫肥对春玉米的增产效果不同,氮磷钾施肥水平越高,增产效果越小。

表 3 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米产量及产量构成因素的影响

处理	千粒质量 (g)	穗粒数	产量 (kg · hm ⁻²)
LS0	298.52f	455e	10220e
LS6	307.71e	478d	11009d
MS0	316.53d	501c	11075d
MS6	325.74c	508b	11728c
HS0	334.13b	512b	12383b
HS6	347.93a	520a	12937a
变异来源			
NPK	**	**	**
S	**	**	**
NPK × S	NS	**	NS

注: 同列数据后不同小写字母表示不同施肥处理间差异达 0.05 显著性水平, “**” 表示在 P<0.01 水平差异极显著, “NS” 表示差异不显著。下同。

2.4 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米氮肥利用效率的影响

由表 4 可得, 各处理的氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥利用率在不同氮磷钾施肥水平和施用硫肥这 2 个方面存在极显著差异, 且两者的交互作用下也达到极显著差异。在施硫量相同的情况下, 各处理的氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥利用率均随着氮磷钾施肥水平的提高呈现递减趋势, 说明提高氮磷钾施肥水平降低了春玉米的氮肥利用效率。在相同氮磷钾施肥水平下, 施硫处理的氮肥偏生产力、农学效率和利用率皆显著高于不施硫处理, 其中 LS6 处理是所有处理中的最大值, 分别为 78.63 kg · kg⁻¹、21.88 kg · kg⁻¹ 和 47.03%, 说明施硫能够提高春玉米的氮肥利用效率。除此之外, 在同一氮磷钾施肥水平下, LS6 处理的氮肥利用率比 LS0 处理提高了 30.23%, MS6 处理比 MS0 处理提高了 24.91%, HS6 处理比 HS0 处理提高了 19.80%, 可以看出, 施硫能够在一定程度上提高氮肥利用率, 但是随着氮磷钾施肥水平的提高对氮肥利用率的提高效果逐渐降低。

表 4 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米氮肥利用效率的影响

处理	氮肥偏生产力 (kg · kg ⁻¹)	氮肥农学效率 (kg · kg ⁻¹)	氮肥利用率 (%)
LS0	73.00b	16.25b	36.12bc
LS6	78.63a	21.88a	47.03a
MS0	52.74d	14.44c	30.58d
MS6	55.85c	17.55b	38.20b
HS0	44.23f	14.40c	29.39d
HS6	46.20e	16.38b	35.21c
变异来源			
NPK	**	**	**
S	**	**	**
NPK × S	**	**	**

3 讨论

3.1 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对土壤碱解氮含量动态变化的影响

在玉米生长过程中, 随着时间推进玉米对氮素的吸收量逐渐增加, 导致土壤碱解氮含量不断下降^[18-21]。本研究中, 各处理的土壤碱解氮含量在拔节至喇叭口期短暂增加后至完熟期不断降低, 这与李世清等^[22]和隗英华等^[23]的研究结果一致。出现土壤碱解氮含量增加的原因可能是随着温度升高, 土壤矿化作用增强, 提高了土壤中无机态氮的含量, 同时作物生长前期对氮肥进行追施也能够增加土壤中碱解氮的含量。有研究表明, 土壤中碱解氮的含量与氮肥施用量呈正相关^[24-25]。本研究中, 不施硫条件下, 各时期的土壤碱解氮含量均表现为 HS0>MS0>LS0, 且差异显著, 表明氮磷钾施肥水平越高, 土壤碱解氮含量越大。在完熟期, 相同氮磷钾施肥水平下施硫处理的土壤碱解氮含量较不施硫处理无显著性差异, 表明在相同氮磷钾施肥水平下, 硫肥对土壤碱解氮含量没有影响。

3.2 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米地上部总氮素积累量的影响

本研究中, 各处理的总氮素积累量随着氮磷钾施肥水平的提高不断增加, 说明增加施氮量促进了玉米对氮素的积累^[26-27]。刘烁然等^[28]研究指出, 硫肥的施用能够提高玉米吸收氮素的能力, 进而增加玉米的氮素积累量。本研究通过比较同一氮磷钾施肥水平下施硫与不施硫处理的总氮素积累量, 发现施硫处理在各生育期均大于不施硫处理, 施硫能够增加植株对氮素的积累。此外还发现, 提高氮磷钾施肥水平同时配施硫肥比单独提高氮磷钾施肥水平对氮素积累的增加效果更明显。王丽等^[29]研究也证实, 在一定氮磷钾施肥水平下, 施用适量硫肥能够进一步增加植株地上部的氮素积累量。

大量研究证明, 在整个生育期内, 提高氮肥施用量同时会增加玉米对硫素的需求, 二者之间存在正向交互效应^[30-31]。本研究中, LS6、MS6 和 HS6 处理的总氮素积累量在完熟期比相同氮磷钾施肥水平下的不施硫处理分别增加了 10.39%、9.42% 和 8.37%, 氮磷钾施肥水平越高, 硫肥的促进效果越小, 出现这种情况的主要原因可能是在相同施硫量下, 随着氮磷钾施肥水平的提高, 对硫素的需求也逐渐增加, 本研究中的硫素施用量在高氮磷钾条件

下不能满足春玉米生长需要,引起氮素积累量增长幅度的降低。

3.3 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米产量及产量构成因素的影响

张杰等^[32]研究指出春玉米的千粒质量、穗粒数和产量在一定范围与氮肥施用量成正相关。本研究中,不施硫处理的产量随着氮磷钾施肥水平的提高显著增加,表明氮磷钾施肥水平的提高显著增加了春玉米产量。李娜等^[33]研究发现在低硫土壤中施硫可显著提高玉米籽粒产量。本研究中,施硫处理的千粒质量、穗粒数和产量均较相同氮磷钾水平下的不施硫处理有显著提高,说明施硫对春玉米有显著增产的效果。此外,与单独提高氮磷钾施肥水平相比,提高氮磷钾施肥水平的同时配施硫肥能够进一步增加春玉米产量。

曹殿云等^[15]在潜在缺硫土壤上研究梯度施硫对玉米产量的影响,发现 80 ~ 120 kg · hm⁻²的施硫量能够实现玉米增产。本研究中,硫肥对春玉米的增产幅度随着氮磷钾施肥水平的提高逐渐降低,这可能是由于本研究供试土壤有效硫含量为 15.36 mg · kg⁻¹,属于缺硫土壤,60 kg · hm⁻²的硫肥施用量不能满足中、高氮磷钾施肥水平下的春玉米对硫素的需求,从而使得硫肥的增产效果逐渐降低。研究也说明,在不同氮磷钾施肥量条件下,作物对硫素的需求也有所不同。本研究在不同氮磷钾施肥水平下未设置梯度施硫试验,无法确定在不同氮磷钾施肥水平下实现玉米增产的最佳施硫量,这在将来的研究中有待进一步完善。

3.4 不同氮磷钾施肥水平配施硫肥对春玉米氮肥利用效率的影响

大量研究表明,增加氮肥施用量会降低玉米的氮肥利用效率^[34-35]、增加氮素损失^[36]。本研究中,随着氮磷钾施肥水平的提高,相同施硫处理的氮肥偏生产力、农学效率和利用率逐渐降低,表明提高氮磷钾施肥水平降低了春玉米的氮肥利用效率。有研究指出,硫肥的施用可以平衡土壤养分,增强作物吸收氮素的能力,提高氮素利用效率^[37]。本研究中,同一氮磷钾施肥水平下的氮肥偏生产力、农学效率和利用率均表现为施硫处理大于不施硫处理,说明施硫可以显著提高春玉米的氮肥利用效率。以上研究表明,在春玉米生产过程中,提高氮磷钾施肥水平的同时配施硫肥能够提高春玉米的氮肥利用效率,减少对氮素的浪费。本研究还发现

在相同氮磷钾施肥水平下,施用硫肥对氮肥利用率的增加效果随着氮磷钾施肥水平的提高逐渐减小,这可能主要是因为本研究的施硫量在高氮磷钾施肥水平时相对不足,导致硫肥对氮肥利用率的增加效果减小,这也说明不同氮磷钾水平下,对硫素的需求也有所不同。在将来的试验中可以进一步研究不同氮磷钾水平下的硫素适宜用量,从而为不同施肥水平下的平衡施肥,进而高产高效提供理论依据。

4 结论

提高氮磷钾施肥水平可以提高土壤碱解氮含量,增加春玉米地上部的氮素积累量及籽粒产量,春玉米的氮肥利用效率随着氮磷钾施肥水平的提高而逐渐降低。在相同氮磷钾施肥水平下,施用硫肥对土壤碱解氮含量没有影响,但提高了春玉米地上部氮素积累量、籽粒产量和氮肥利用效率,随着氮磷钾施肥水平提高,硫肥对地上部氮素积累量以及籽粒产量的促进效果降低。综上所述,氮磷钾肥配施硫肥可以进一步促进春玉米氮素积累,提高春玉米产量,并提高氮肥利用效率,最终实现春玉米生产的高产高效。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [3] 谢婷婷,赵欢,肖厚军,等. 缓效和速效氮配施对春玉米产量、养分积累及氮肥利用的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(1): 130-137.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. Science, 2010, 327: 1008-1010.
- [5] 郭星宇,刘朋召,王瑞,等. 旱地冬小麦产量、氮肥利用率及土壤氮素平衡对降水年型与施氮量的响应[J]. 作物学报, 2022, 48(5): 1262-1272.
- [6] Scheer C, Wassmann R, Kienzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(2): 290-301.
- [7] Su M, Kuang F, Yang L, et al. Nitrous oxide and methane emissions from paddy soils in southwest China [J]. Geoderma Regional, 2016, 8: 1-11.
- [8] 邓丽娟,任其然,焦小强. 曲周县小麦-玉米轮作体系氮收支特征及氮管理对策研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1422-1429.

- [9] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (2): 170-177.
- [10] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (5): 622-627.
- [11] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (3): 458-462.
- [12] 曾子豪, 袁静超, 张水梅, 等. 氮肥一次性基施与分次施用对春玉米氮素利用的差异 [J]. 玉米科学, 2021, 29 (5): 151-157.
- [13] 洪瑜, 王芳, 刘汝亮, 等. 长期配施有机肥对灌淤土春玉米产量及氮素利用的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 248-252.
- [14] 李玉影, 刘双全, 姬景红, 等. 玉米平衡施肥对产量、养分平衡系数及肥料利用率的影响 [J]. 玉米科学, 2013, 21 (3): 120-124.
- [15] 曹殿云, 王宏伟, 徐晓旭. 硫肥用量对玉米氮硫吸收分配和产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (9): 1298-1305.
- [16] Rahman M M, Soaud A A, Darwish F H A, et al. Growth and nutrient uptake of maize plants as affected by elemental sulfur and nitrogen fertilizer in sandy calcareous soil [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10 (60): 12882-12889.
- [17] Rahman M M, Soaud A A, Darwish F H A, et al. Effects of sulfur and nitrogen on nutrients uptake of maize using acidified water [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10 (42): 8275-8283.
- [18] 张水清, 林杉, 郭斗斗, 等. 长期施肥下潮土全氮、碱解氮含量与氮素投入水平关系 [J]. 中国土壤与肥料, 2017 (6): 23-29.
- [19] 朱梓弘, 朱同彬, 杨霖, 等. 中国土壤碱解氮含量与影响因子的空间关系研究 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (11): 2199-2207.
- [20] 赵如浪, 刘鹏涛, 冯佰利, 等. 黄土高原春玉米保护性耕作农田土壤养分时空动态变化研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28 (6): 69-74.
- [21] Yu S, Wang J K, Wang X. Dynamical changes of soil fertility and microbial biomass carbon and nitrogen in different fertilizations within maize development period [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2007, 21 (4): 137-140.
- [22] 李世清, 李凤民, 宋秋华, 等. 半干旱地区不同地膜覆盖时期对土壤氮素有效性的影响 [J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1519-1526.
- [23] 隗英华, 汪仁, 孙文涛, 等. 辽西石灰性褐土不同施氮模式下的土壤养分动态研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (2): 10-15.
- [24] 齐红岩, 李天来, 富宏丹, 等. 不同氮钾施用水平对番茄营养吸收和土壤养分变化的影响 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (2): 2268-2272.
- [25] 穆金丽, 谭钧, 刘国顺, 等. 腐植酸和氮肥用量及其互作对植烟土壤质量的影响 [J]. 土壤, 2017, 49 (1): 27-32.
- [26] 常晓, 王小博, 吴嫚, 等. 施氮对不同氮效率类型玉米自交系产量、干物质及氮素积累的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021 (2): 221-227.
- [27] 刘凡, 刘斌祥, 刘佳媛, 等. 水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39 (6): 200-206.
- [28] 刘烁然, 应飞宇, 崔帅, 等. 氮硫互作对玉米苗期生长及养分吸收的影响 [J]. 玉米科学, 2020, 28 (5): 148-154.
- [29] 王丽, 王东, 周杰, 等. 氮硫互作对冬小麦旗叶衰老、产量和氮素利用效率的影响 [J]. 土壤学报, 2016, 53 (6): 1476-1488.
- [30] 谢瑞芝, 董树亭, 胡昌浩, 等. 不同基因型玉米硫素吸收利用效率的研究 II. 硫素吸收利用的基因型差异 [J]. 作物学报, 2004, 30 (1): 52-59.
- [31] Caviglia O P, Melchiori R, Sadras V O. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops [J]. Field Crops Research, 2014, 168: 27-37.
- [32] 张杰, 徐芳蕾, 薄其飞, 等. 常规尿素掺混控释尿素一次施用对旱作春玉米产量及氮素利用的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (6): 969-979.
- [33] 李娜, 杨阳, 赵玉霞, 等. 施用硫肥对关中地区夏玉米硫素吸收及产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31 (5): 168-172.
- [34] 王博博, 徐新朋, 侯云鹏, 等. 东北中部黑土连续秸秆还田下玉米适宜氮肥用量研究 [J]. 华中农业大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (2): 71-79.
- [35] 侯云鹏, 孔丽丽, 尹彩侠, 等. 覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (1): 54-65.
- [36] 李娟娟, 李利敏, 马理辉. 不同滴灌施肥量对沙地玉米氮效率及硝态氮的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (5): 56-63.
- [37] Salvagiotti F, Castellarin J M, Miralles D J, et al. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake [J]. Field Crops Research, 2009, 113 (2): 170-177.

Effects of combined application of sulfur fertilizer on growth and nitrogen use efficiency of spring maize at different nitrogen, phosphorus and potassium levels

LI Hao, GENG Yu-hui*, CAO Guo-jun, ZHOU Li-juan, SHEN Kai-hong (College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun Jilin 130118)

Abstract: In order to explore the effect of the application of sulfur fertilizer in the agricultural production on the growth of spring maize and the utilization efficiency of nitrogen fertilizer under different levels of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer, six treatments were set up, including low nitrogen, phosphorus and potassium level + no sulfur application (LS0), low nitrogen, phosphorus and potassium level + sulfur fertilizer (LS6), medium nitrogen, phosphorus and potassium level + no sulfur application (MS0), medium nitrogen, phosphorus and potassium level + sulfur fertilizer (MS6), high nitrogen, phosphorus and potassium level + no sulfur application (HS0), high nitrogen, phosphorus and potassium level + sulfur fertilizer (HS6), to study their effects on soil alkaline nitrogen, maize nitrogen accumulation, grain yield and nitrogen fertilizer utilization efficiency. The results showed that increasing the fertilization level of nitrogen, phosphorus and potassium significantly increased the alkaline nitrogen content of soil. Applying sulfur fertilizer at the same level of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization had no effect on soil alkaline nitrogen content. There was a significant positive correlation between the total nitrogen accumulation of aboveground or grain yield of spring maize and the fertilization level of nitrogen, phosphorus and potassium and the application of sulfur fertilizer. Compared with only nitrogen, phosphorus and potassium treatments, the total nitrogen accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium combined with sulfur fertilizer increased significantly by an average of 10.24%, and the grain yield increased significantly by an average of 5.70%. However, with the increase of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization levels, the effect of sulfur fertilizer on nitrogen accumulation and grain yield gradually decreased. The productivity, agronomic efficiency and utilization rate of nitrogen fertilizer with the same sulfur application level gradually decreased with the increase of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization level. At the same level of nitrogen, phosphorus and potassium, sulfur application improved the nitrogen fertilizer productivity, agricultural efficiency and utilization rate of spring maize. The above results showed that with the increase of nitrogen, phosphorus and potassium fertilization, the alkaline nitrogen content of soil, the accumulation of aboveground nitrogen and grain yield of spring maize gradually increased, but the utilization efficiency of nitrogen fertilizer of spring maize gradually decreased. The application of sulfur fertilizer can further increase the absorption and accumulation of nitrogen and grain yield on the ground of spring maize on the basis of increasing the level of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer, and at the same time improve the utilization efficiency of nitrogen fertilizer to a certain extent.

Key words: spring maize; nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers; sulfur fertilizer; yield; nitrogen fertilizer utilization efficiency