

氮肥后移对沿黄灌区制种玉米产量和土壤硝态氮分布的影响

崔云玲¹, 郑浩飞¹, 孙和折¹, 张立勤¹, 吴正强², 包会存²

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省农业建设项目管理站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过制种玉米膜下滴灌氮肥运筹试验, 为沿黄灌区制种玉米的高产、氮肥高效利用提供科学依据。在施氮量为 225 kg/hm² 条件下, 以农户常规施肥 (基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为 30%:0:30%:30%:10%) 为对照, 设置了基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期分别为 15%:15%:30%:20%:20%、0:30%:30%:20%:20%、0:0:50%:30%:20% 等 3 个处理, 对制种玉米播前、大喇叭口期、抽雄吐丝期和收获期土壤 0~100 cm 土层土壤硝态氮和种子产量、主要农艺性状进行了测定。结果表明, 与农户常规施肥相比, 基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期比例为 0:30%:30%:20%:20% 处理制种玉米种子产量显著提高 57.92%、氮肥偏生产力显著提高 58.15%。穗粒重与产量呈显著正相关, 而茎粗、穗长等性状无显著差异; 较农户常规施肥处理抽雄期 0~20 cm 土层硝态氮含量提高了 74.77%, 而 60~100 cm 土层显著降低了 66.65%~81.81%, 显著降低氮素淋溶风险。因此, 在沿黄灌区, 将氮肥后移至拔节期, 即基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为 0:30%:30%:20%:20% 可显著提高制种玉米产量和氮肥利用率, 同时降低深层土壤硝态氮残留, 本结果可为该地区制种玉米可持续绿色生产提供理论依据。

关键词: 氮肥后移; 制种玉米; 硝态氮分布; 氮盈余; 氮肥偏生产力

中图分类号: S513; S147.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)07-0617-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.07.005

Effects of Postponing Nitrogen Fertilizer Application on Seed Maize Yield and Nitrate Nitrogen Distribution in the Irrigation Region along the Yellow River

CUI Yunling¹, ZHENG Haoifei¹, SUN Hezhe¹, ZHANG Liqin¹, WU Zhengqiang², BAO Huicun²

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Gansu Provincial Agricultural Construction Project Management Station, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: To provide scientific evidence for high yield and efficient nitrogen use in seed maize production under drip irrigation in the irrigation region along the Yellow River, a nitrogen management experiment was conducted under a total N application rate of 225 kg/ha. Farmer's conventional fertilization (30% : 0 : 30% : 30% : 10% at basal, jointing, large bell, tasseling-silking, and filling stages) was used as control. 3 treatments were designed with nitrogen allocation ratios of 15% : 15% : 30% : 20% : 20%, 0 : 30% : 30% : 20% : 20%, and 0 : 0 : 50% : 30% : 20% (basal fertilizer : jointing stage : big trumpet stage : tasseling and silking stage : filling stage), respectively. Nitrate nitrogen concentration in 0 to 100 cm soil layer and seed yield, along with major agronomic traits, were measured at pre-sowing, big trumpet, tasseling-silking, and harvest stages. Results showed that, compared to the conventional fertilization practice, the 0 : 30% : 30% : 20% : 20% treatment significantly increased the seed yield by 57.92% and partial factor productivity of nitrogen fertilizer by 58.15%. Kernel weight per ear was significantly and positively correlated with yield, while stem diameter and ear length showed no significant differences. At tasseling stage, nitrate nitrogen content in the 0 to 20 cm soil layer increased by 74.77%, whereas that in the 60 to 100 cm layer decreased significantly by 66.65% to 81.81%, indicating reduced nitrogen leaching risk. Therefore, in the irrigation region along the Yellow River, postponing nitrogen application to the jointing stage with an allocation of 0 : 30% : 30% : 20% : 20% can significantly enhance seed maize yield and nitrogen use efficiency while reducing nitrate nitrogen residue in deep soil layers.

收稿日期: 2025-06-23

基金项目: 甘肃农业科技支撑项目(KJZC-2024-19); 国家重点研发计划(2016YFD0200404)。

作者简介: 崔云玲(1972—), 女, 甘肃永靖人, 研究员, 主要从事植物营养与土壤培肥方面的研究工作。Email: 376554126@qq.com。

通信作者: 张立勤(1970—), 男, 甘肃张掖人, 研究员, 主要从事水肥资源高效利用方面的研究工作。Email: 443090425@qq.com。

These results provide theoretical support for sustainable and green seed maize production in this region.

Key words: Delayed nitrogen application; Seed maize; Nitrate nitrogen distribution; Nitrogen surplus; Partial factor productivity of nitrogen fertilizer

种子是农业的芯片,保持种子产量对于稳定国家粮食安全意义重大。沿黄灌区景泰县得天独厚的自然环境适合种植制种玉米。制种玉米产业的可持续发展面临氮肥利用效率低、为实现高产过量施氮,和环境污染等多重挑战^[1]。优化氮肥管理是提高作物产量、减少氮损失的关键途径之一^[2-3]。氮肥后移技术通过调整施肥时期,将氮素供应与作物需氮关键期同步,有望在维持高产的同时提高氮肥利用率^[4-5],并降低土壤硝态氮淋溶风险。然而,在新建设高标准农田上不同氮肥管理对制种玉米产量形成及土壤氮残留的影响尚不明确,尤其在西北干旱灌区,灌溉条件下氮素的迁移可能影响施肥效果。

氮素作为作物生长的重要营养元素,极易随灌溉水向下淋溶迁移,不仅造成作物吸收利用率降低,还会导致深层土壤硝态氮累积和地下水污染等环境问题^[6]。这种氮素损失与污染的双重困境已成为制约当地农业可持续发展的关键因素。目前,农户在玉米生产中普遍采用“重基肥、轻追肥”的传统施肥方式,基肥比例常高达总施氮量的50%~100%。这种施肥模式存在明显的弊端,一方面,苗期作物需氮量较低时大量施用基肥,容易造成氮素通过挥发、淋溶等途径损失;另一方面,在玉米生长需氮高峰期土壤供氮下降,导致氮素供需失衡,严重制约产量潜力的发挥^[7]。研究表明,这种不合理的施肥方式可使氮肥利用率降低15%~20%,同时增加30%~50%的硝态氮残留风险^[8]。从作物生理需求角度看,玉米从种子萌发到前期营养生长阶段主要依靠种子胚乳储存的营养物质和有限的土壤养分供应^[9]。巨晓棠等^[10]研究表明,当播种前0~30 cm土层速效氮储量维持在30 kg/hm²左右时,即可充分满足小麦从出苗到返青期的养分需求,这一发现为旱作区作物早期养分管理提供了重要参考。在玉米栽培方面,李升东等^[11]研究证实,与传统注重基肥的施肥模式相比,优化氮肥运筹可显著改善氮素供需同步性,促进地上部干物质积累与转运效率,玉米籽粒增产9.3%,同时降低10%~15%的氮素损失风

险。但是现有研究多集中于普通大田玉米,而对制种玉米这一特殊栽培体系(其父母本需错期播种、花期调控严格,且收获目标是高活力种子而非籽粒产量)的氮肥施用研究报道较少。制种玉米因其独特的生长发育特性和产量形成机制,可能对氮肥运筹有不同于普通玉米的需求响应规律,特别是在沿黄干旱灌区,探究氮肥后移对制种玉米的产量构成、氮肥利用效率以及土壤硝态氮时空分布的影响,对实现当地玉米制种产业提质增效与生态环境保护协同发展具有重要的科学价值和现实意义。本研究通过设置不同氮肥后移比例,分析其对制种玉米农艺性状、种子产量、氮肥偏生产力及土壤硝态氮的影响,研究了氮肥后移比例对制种玉米农艺性状及产量的影响和不同处理下氮素利用效率及环境效应,为当地制种玉米绿色高效生产提供有益借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地状况

试验设在甘肃省景泰县条山农场新建高标准农田上(104°06'E、37°21'N)。该试验区降水量小而蒸发量大,昼夜温差大,多年平均气温8.25℃,年均降水量185 mm。供试土壤为砂壤土,播前0~20 cm土壤含有机质14.41 g/kg、碱解氮85.18 mg/kg、有效磷62.95 mg/kg、速效钾249.2 mg/kg, pH为8.54。

1.2 供试材料

供试玉米品种为汮丰19,由甘肃农垦良种有限责任公司提供。

1.3 试验设计

采用单因素试验设计,在施氮量为225 kg/hm²条件下,共设置4个处理,具体处理如表1。各处理均施入P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 45 kg/hm²。以尿素(含N 46%)为氮源、磷酸为磷源、硫酸钾为钾源。随机区组排列,3次重复,小区面积60 m²(10 m×6 m)。行距50 cm,株距19 cm。采用膜下滴灌方式灌水,膜宽70 cm,灌水量为3 600 m³/hm²。于2022年4月10日播种(点播),9月18日收获。其他田间管理同当地大田生产。

表 1 试验各处理施肥比例					
处理	基肥	拔节期	大喇叭口期	抽雄吐丝期	灌浆期
T1(CK)	30%	0	30%	30%	10%
T2	15%	15%	30%	20%	20%
T3	0	30%	30%	20%	20%
T4	0	0	50%	30%	20%

1.4 测定项目及方法

1.4.1 植株性状及产量 在制种玉米收获期, 在每个小区随机选取 10 株植株用于考种, 测定穗位高、茎粗、穗长、穗粗、秃顶长、穗粒重、百粒重; 另取 6 行(去除边株)进行脱粒测产, 自然风干计产。

1.4.2 土壤硝态氮取样及测定 在制种玉米播前、大喇叭口期、抽雄吐丝期和收获后, 用土钻按五点取样法取 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm 土层的土壤样品, 等层混匀拣去石头根系后过 2 mm 筛, 用烘干法测定土壤含水量, 用比色法测定土壤硝态氮含量^[12]。硝态氮储量指土壤中以硝酸盐形式存在的氮的总量, 是评估农业污染的重要指标。硝态氮盈余指施入土壤中的氮素经作物利用后残留到土壤中的硝态氮与播种前土壤硝态氮的差值。

土壤硝态氮储量= (土层厚度×土壤容重×土壤硝态氮含量)/10

土壤硝态氮盈余= 收获后的土壤硝态氮储量-播种前土壤硝态氮储量

1.4.3 氮肥偏生产力 氮肥偏生产力是指单位施用氮肥所能获得的作物产量。

氮肥偏生产力= 籽粒产量/施氮量

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理, R 4.3.2 对数据进行统计分析并作图。在进行组间比较时, 采用 Tukey HSD 法对数据进行差异显著性检验, 显著性水平为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 氮肥后移对制种玉米产量的影响

氮肥后移对制种玉米产量产生显著影响(图1)。

表 2 氮肥后移对制种玉米主要农艺性状的影响 ^①						
处理	穗位高 /cm	茎粗 /mm	穗长 /cm	穗粗 /mm	秃顶长 /cm	穗粒重 /g
T1(CK)	74.43±2.55 a	25.10±1.13 a	16.27±0.43 a	44.11±0.58 a	1.69±0.55 a	80.60±0.58 b
T2	78.47±5.60 a	24.91±1.38 a	15.56±0.40 a	43.23±1.26 a	2.98±0.69 a	44.30±0.58 d
T3	78.00±0.72 a	25.09±0.07 a	15.09±0.44 a	43.49±0.08 a	1.64±0.22 a	84.20±0.58 a
T4	76.77±3.50 a	24.22±0.28 a	15.31±0.72 a	45.20±0.70 a	3.42±0.29 a	64.00±0.58 c

①表中不同小写字母表示施氮量间的显著差异($P<0.05$); 表中数据为平均值($n=3$)±标准差。下同。

在施氮量为 225 kg/hm² 的条件下, 制种玉米籽粒产量为 3 755.39 ~ 6 539.47 kg/hm², 表现为 T3>T4>T1(CK)>T2 处理。与 T1(CK)相比, T3 处理能够显著提高制种玉米的籽粒产量 57.92% ($P<0.05$), T4 处理提高了 12.07%。对产量进行方差分析表明, T3 处理与其余各处理差异显著, T4、T1(CK)、T2 处理间差异不显著。

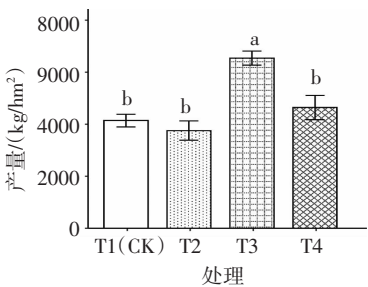


图 1 氮肥后移对制种玉米产量的影响

2.2 氮肥后移对制种玉米主要农艺性状的影响

由表 2 可知, 氮肥后移对制种玉米穗位高、茎粗、穗长、穗粗、秃顶长等主要农艺性状无显著影响, 但穗粒重各处理间差异显著。穗粒重对氮肥后移的响应表现从大到小依次为 T3、T1(CK)、T4、T2 处理。与 T1(CK)相比, T3 处理显著提高了穗粒重 4.47%, 而 T2、T4 处理则分别降低 45.04%、20.60%。

2.3 氮肥后移对制种玉米氮肥偏生产力的影响

氮肥后移对制种玉米氮肥偏生产力具有显著影响(图2), 在 225 kg/hm² 的施氮量下, 制种玉米的氮肥偏生产力为 16.7 ~ 29.1 kg/kg。其中 T3 处理的氮肥偏生产力最高, 为 29.1 kg/kg, 较 T1(CK)

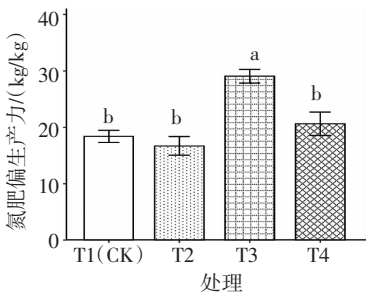


图 2 氮肥后移对氮肥偏生产力的影响

显著提高了 58.15%；其次是 T4 处理，为 20.63 kg/kg，与 T2 处理、T1(CK) 差异不显著。

2.4 产量、氮肥偏生产力与农艺性状的关系

由图 3 可知，茎粗、穗粗、穗位高和穗粒重 ($P<0.05$) 与产量和氮肥偏生产力之间存在正相关关系。秃顶长、穗长与氮肥偏生产力、产量间存在负相关关系，但不显著。

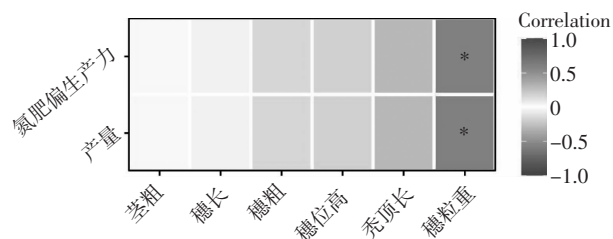


图 3 产量、氮肥偏生产力与农艺性状的关系

2.5 氮肥后移下制种玉米土壤硝态氮分布及其盈余

2.5.1 土壤硝态氮分布 大喇叭口期氮肥后移对各土层硝态氮含量均无显著性差异(图 4 a)，与 T1(CK) 相比，其他处理各土层硝态氮浓度均较低。抽

雄吐丝期氮肥后移对制种玉米 0~20、60~80、80~100 cm 土层硝态氮含量具有显著影响(图 4 b)。0~20 cm 土层硝态氮含量从大到小依次为 T4、T3、T1(CK)、T2 处理，T3、T4 处理较 T1(CK) 分别提高了 74.77%、117.50%，T2 较 T1(CK) 降低了 48.05%；60~80 cm 土层 T2、T3、T4 处理较 T1(CK) 分别显著降低了 76.87%、81.81%、66.65% ($P<0.05$)。80~100 cm 土层各处理间存在显著差异，T4 处理和 T1(CK) 高于 T2、T3 处理。制种玉米收获期，0~20 cm 土层硝态氮含量从大到小依次为 T2、T3、T1(CK)、T4 处理，T2、T3 处理较 T1(CK) 分别高 73.68%、10.57%，但差异不显著；其他土层差异均不显著，整体表现为 T2 处理的硝态氮含量各土层均高于其他处理 (20~40 cm 土层除外) 的趋势(图 4 c)。

2.5.2 土壤硝态氮盈余 通过分析收获期和播前各功能层的硝态氮储量，施氮较播前均能提高土壤硝态氮储量(图 5)。氮肥后移显著影响耕层的硝态

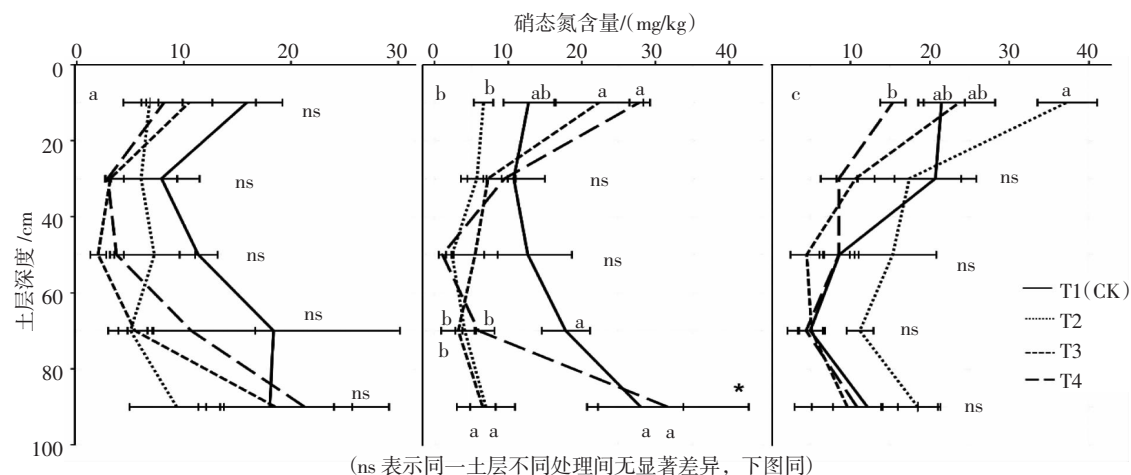


图 4 氮肥后移对制种玉米大喇叭口期(a)、抽雄吐丝期(b)和收获期(c)土壤硝态氮含量分布的影响

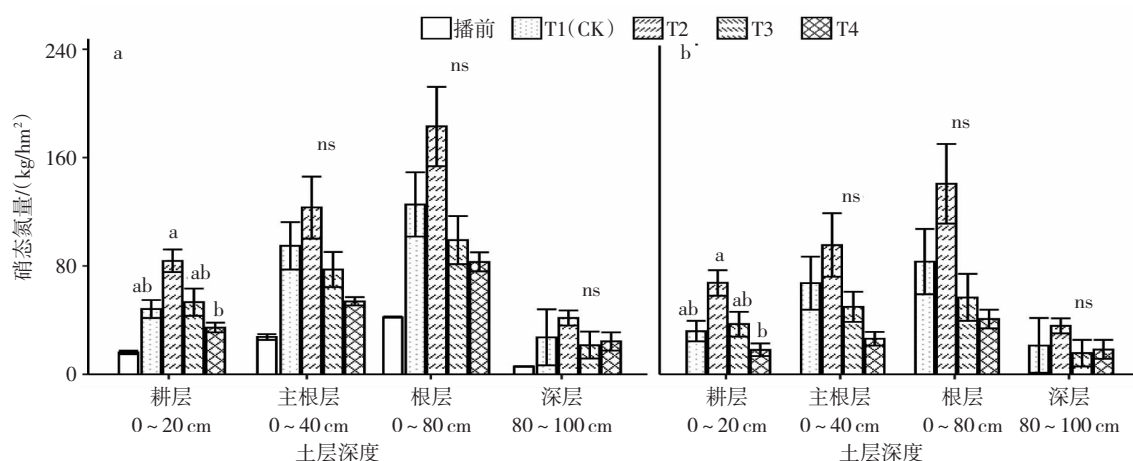


图 5 氮肥后移条件下制种玉米土壤各功能层硝态氮储量(a)及硝态氮盈余量(b)

氮储量,各功能层存在一致趋势但均不显著。对于耕层,T2、T3处理较T1(CK)分别提高了73.67%、10.54%,T4处理较T1(CK)降低了28.46%,但均未达到显著水平。从主根层和根层硝态氮储量来看,各层硝态氮储量均表现为T2>T1(CK)>T3>T4>播前;深层硝态氮储量来看,硝态氮储量表现为T2>T1(CK)>T4>T3>播前。

硝态氮盈余量表现出相同趋势。从耕层来看,硝态氮盈余量表现为T2>T3>T1(CK)>T4,T2、T3处理较T1(CK)提高了111.36%、15.93%,但处理间差异均不显著;T4处理较T2处理显著降低了73.04%,处理间差异显著。主根层和根层均表现为T2>T1(CK)>T3>T4,各处理间无显著差异。深层则表现为T2>T1(CK)>T4>T3,各处理间无显著差异。

3 讨论和结论

合理的氮肥后移比例能够通过减少营养生长期的作物徒长,提高花后氮素积累和氮素转运效率^[10,13-14],促进氮素由营养器官向籽粒转运^[15-16],减少氮损从而显著增产^[4]。在沿黄灌区新建高标准农田上,本研究结果表明,在施氮量为225 kg/hm²水平下,通过氮素运筹,即降低底肥投入增加拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期和灌浆期的氮肥比例,即基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为0:30%:30%:20%:20%处理能够显著提高制种玉米种子产量57.92%。结合农艺性状和产量构成因素分析发现,氮肥后移并未降低制种玉米生长相关的农艺性状,反而显著增加了穗粒重4.47%,说明氮肥后移主要通过影响籽粒而非植株性形态来增产。基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为15%:15%:30%:20%:20%处理产量最低,可能由于拔节期氮肥比例不足,导致营养生长受限,影响生殖生长最终降低产量^[17]。基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为0:0:50%:30%:20%处理可能虽然提高了抽雄期的氮素供应,但可能由于前期氮素亏缺,导致穗分化期养分储备不足,最终影响穗粒数及百粒重,该处理有增产趋势但均不显著。这与侯云鹏等^[18]的研究结果一致,即玉米大喇叭口期前保证氮素供应量,否则会限制玉米穗发育最终导致减产。

土壤硝态氮浓度很大程度上决定着土壤氮淋溶。玉米生育期田间氮素损失主要是由于玉米生长前期施氮比例过高造成的,采用分次施氮可降低氮肥损失并减少对环境危害^[19-20]。沿黄灌区农户为减少田间人力投入而重基肥,轻关键时期追肥,播前作物尚未播种,且在很长时间内作物无法(苗期作物根系小)对土壤氮素形成有效吸收,从而造成氮素损失。大喇叭口期是玉米氮素吸收强度最大时期,并延至籽粒形成,因此通过氮肥运筹增加大喇叭口期氮素供给是提高玉米产量的重要做法^[21]。农户传统施肥因增加底肥,而降低了抽雄吐丝期到灌浆期的氮素供应,易引起氮肥亏缺致使减产^[22-23]。制种玉米父本和母本间的花期相遇决定着种子产量,不合理的氮肥施用时期可能造成花期不遇,从而减产。氮肥后移通过协调玉米源库特性最终提高产量^[24]。苗期至拔节期玉米根系弱,对养分的吸收获取能力差,施氮不合理会造成氮淋溶,随着生育前期氮素的缺乏,会促进玉米的根系发育,从而更好地获取养分^[25-26],在施氮量为225 kg/hm²水平下,抽雄吐丝期基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为0:30%:30%:20%:20%处理、0:0:50%:30%:20%处理0~20 cm土层的硝态氮含量较农户常规施肥(基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为30%:0:30%:30%:10%)硝态氮含量提高了74.77%~117.5%,而60~100 cm土层降低66.65%~81.81%,表明氮肥后移减少了氮素向深层淋溶^[22]。收获期时,基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为15%:15%:30%:20%:20%处理在各土层的硝态氮残留量最高,说明其氮素未被充分吸收,可能增加环境风险;而基肥:拔节期:大喇叭口期:抽雄吐丝期:灌浆期为0:30%:30%:20%:20%处理的氮素残留最低,表明其氮素利用效率更高^[27-28]。合理的氮肥后移量能够降低0~100 cm土层的硝态氮积累,减少硝酸盐淋溶风险。推荐该区域施氮制度为,不施底肥,拔节期和大喇叭口期分别施用总施氮量的30%,抽雄吐丝和灌浆期分别施用总施氮量的20%,可协同实现该区域制种玉米高产和减少环境污染。但该结果仅在一年试验下得出,后续应探讨不同降水年型下氮肥后移对制种玉米

种子产量的稳定性,并评估其对深层硝态氮积累所致的污染风险。

参考文献:

- [1] TIAN Z, ZHANG M, LIU C, et al. Optimizing fertilization depth to promote yield performance and economic benefit in maize for hybrid seed production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 159: 127245.
- [2] MI X, XIE W, FAN L, et al. Paired nitrogen management for improving wheat yields while minimizing nitrogen loss—es[J/OL]. *Journal of Integrative Agriculture*, 1–24. (2024–12–28) [2025–05–13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311924004398>.
- [3] ZHU X Q, ZHOU P, MIAO P, et al. Nitrogen use and management in orchards and vegetable fields in China: challenges and solutions[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2022, 9(3): 386–395.
- [4] 赵凯男, 丁 豪, 刘阿康, 等. 氮肥减量后移改善植株光合特性提高麦-玉周年产量及经济效益[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(5): 868–884.
- [5] 彭伟国, 刘玉春, 康 猛, 等. 氮肥后移对滴灌夏玉米氮素利用和产量的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2025, 48(2): 126–136.
- [6] 安志装, 索琳娜, 刘宝存. 我国农业面源污染研究与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7): 1422–1436.
- [7] 刘 帅, 徐宇凡, 贾 靖, 等. 施氮量及追氮时期对滴灌夏玉米干物质积累及氮素利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 122–129.
- [8] SHI Z, LIU D, LIU M, et al. Optimized fertilizer recommendation method for nitrate residue control in a wheat-maize double cropping system in dryland farming [J]. *Field Crops Research*, 2021, 271: 108258.
- [9] 耿 杰, 张琳捷, 岳小红, 等. 铵态氮和硝态氮调节盐胁迫豌豆幼苗生长和根系呼吸的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 1001–1009.
- [10] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. *中国农业科学*, 2002(11): 1361–1368.
- [11] 李升东, 冯 波, 韩 伟, 等. 优化施氮对夏玉米产量及水氮利用的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(8): 57–63.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 彭科研, 赵凯男, 周发宝, 等. 氮肥减量后移对冬小麦-夏玉米两熟体系籽粒产量和氮素吸收利用的影响[J]. *华北农学报*, 2025, 40(1): 133–145.
- [14] 姚 瑞, 赵凯能, 谢 畅, 等. 氮肥后移对花生氮代谢相关酶活性、氮素利用效率及产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(4): 877–883.
- [15] 高 钰, 闫耀廷, 赵 刚, 等. 氮肥运筹对黄土高原春玉米产量形成和氮代谢的调控效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 186–195.
- [16] 连彩云, 马忠明, 王智琦, 等. 膜下微喷灌条件下水氮耦合对制种玉米产量及水肥效应的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2025, 4(1): 39–46.
- [17] 崔云玲, 张立勤, 张志成, 等. 滴灌条件下新型水溶肥对制种玉米产量及效益的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2022, 1(12): 235–239.
- [18] 侯云鹏, 杨 建, 尹彩侠, 等. 氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响[J]. *玉米科学*, 2019, 27(2): 146–154.
- [19] 董 智, 靖 凯, 邓林军, 等. 氮肥运筹对春玉米生长动态与产量及经济效益的影响[J]. *辽宁农业科学*, 2017(3): 15–18.
- [20] 李典军, 高 尚, 吴丽倩, 等. 滴灌下高密氮肥运筹对夏玉米产量及营养品质的影响[J/OL]. *玉米科学*, 1–12. (2025–05–27) [2025–06–20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1201.s.20250527.1441.002.html>.
- [21] 赵士诚, 裴雪霞, 何 萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 492–497.
- [22] 刘汝亮, 李友宏, 张爱平, 等. 氮肥后移对引黄灌区水稻产量和氮素淋溶损失的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 16–20.
- [23] 张丽丽, 齐 华, 樊 叶, 等. 氮肥后移对玉米冠层内物质分配及氮素利用的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 127–132.
- [24] 王佳慧, 高 震, 曲令华, 等. 氮肥后移对滴灌夏玉米源库特性及产量形成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(8): 1–8.
- [25] 邹晓锦, 张 鑫, 安景文. 氮肥减量后移对玉米产量和氮素吸收利用及农田氮素平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(6): 25–29.
- [26] 武文明, 王世济, 陈洪俭, 等. 氮肥后移促进受渍夏玉米根系形态恢复和提高花后光合性能[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 1008–1015.
- [27] 苗任重. 氮肥后移对玉米灌浆、光合特性与氮效率的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2024(2): 15–22.
- [28] 孙和折, 崔云玲, 张立勤, 等. 水氮运筹对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响[J]. *寒旱农业科学*, 2024, 3(11): 1025–1031.