

稳定性肥料形态和施肥方式对玉米产量的影响

李天娇¹, 李杰², 卢宗云^{1,2,3*}, 王颖⁴

(1. 沈阳中科新型肥料有限公司, 沈阳 110000; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110000; 3. 贵州天宝丰原生态农业科技有限公司, 贵阳 550200; 4. 辽宁省土壤肥料总站, 沈阳 110034)

摘要:为探究大颗粒肥料在我国东北地区玉米种植体系的应用潜力,以稳定性肥料为研究对象,设置4个处理:对照处理(CK)、稳定性肥料条施处理(T1)、稳定性肥料穴施处理(T2)及挤压造粒形成的大颗粒稳定性肥料处理(T3)。研究比较不同肥料形态与施用方式下土壤养分的动态释放特征及其对玉米产量的影响,从减少肥料损失、促进农业可持续发展的角度筛选最优施肥模式,为降低东北玉米种植施肥成本提供科学依据。结果表明,不同肥料形态与施用方式显著影响土壤养分的释放进程,尤以无机氮的释放最为显著,其中,稳定性肥料条施处理(T1)的无机氮释放速率最快。在玉米生长前期,T1处理的无机氮释放量达到峰值,且分别低于穴施处理(T2)和大颗粒处理(T3)峰值的22%和20%,之后逐渐下降。玉米前3个关键生育期内,T1、T2和T3处理的氮素累积释放量分别为69%、76%和65%;而在玉米生长后期,T3处理的氮素释放量最高,达35%。产量分析显示,T2与T3处理下玉米穗重较高,其中T3处理较T2处理提高了0.86%,且显著高于T1处理(增产10.38%)。各处理产量依次为:CK处理6 871.47 kg/hm²,T1处理7 413.50 kg/hm²,T2处理8 112.88 kg/hm²,T3处理8 182.82 kg/hm²。由此可见,大颗粒肥料可保障东北玉米稳产高产。同时,利用挤压造粒技术生产大颗粒肥料,能有效减少生产过程中的碳排放,降低加工成本,间接提高农户经济效益。

关键词:玉米;稳定性肥料;大颗粒肥料;穴施;降低成本;碳排放

中图分类号:S513.062

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2026)04-0083-06

Effects of Stabilized Fertilizer Forms and Application Methods on Maize Yield

LI Tianjiao¹, LI Jie², LU Zongyun^{1,2,3*}, WANG Ying⁴

(1. Shenyang Zhongke New Fertilizer Co., Ltd., Shenyang 110000; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110000; 3. Guizhou Tianbaofengyuan Ecological Agriculture Technology Co., Ltd., Guiyang 550200; 4. Liaoning Soil and Fertilizer Station, Shenyang 110034, China)

Abstract: To explore the application potential of large-particle fertilizers in the maize cultivation systems of Northeast China, stabilized fertilizers were utilized as the research subject in this study. Four experimental treatments were established: control treatment(CK), band application of stabilized fertilizer(T1), hole application of stabilized fertilizer(T2), and large-particle stabilized fertilizer produced via extrusion granulation(T3). The research compared the dynamic characteristics of soil nutrient release and their effects on maize yield under different fertilizer forms and application methods, aiming to select the optimal fertilization mode for reducing fertilizer loss and promoting sustainable agricultural development, and to provide a scientific basis for reducing fertilization costs in maize cultivation in Northeast China. The results showed that different fertilizer forms and application methods significantly affected the soil nutrient release process, with inorganic nitrogen release being particularly notable. The band application treatment(T1) exhibited the fastest release rate of inorganic nitrogen. During the early growth stage of maize, the peak release of inorganic nitrogen in treatment T1 was reached, which was 22% and 20% lower than the peaks of the hole application treatment(T2) and the large-particle treatment(T3), respectively. After that, it gradually decreased. During the first three key growth periods of maize, the cumulative nitrogen release in T1, T2, and T3 treatments was 69%, 76%, and 65%, respectively; while during the later growth stages, the nitrogen release in T3 treatment was the highest, reaching 35%. Yield analysis indicated that both T2 and T3

收稿日期:2025-06-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD1700602, 2022YFD170060106, 2022YFD1500105);国家自然科学基金面上项目(42277324);中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA28090200)

作者简介:李天娇(1991-),女,硕士,从事植物营养研究。

通信作者:卢宗云, E-mail: zongyun2006@126.com

treatments resulted in higher maize ear weights, with T3 treatment increasing by 0.86% compared with T2 treatment, and showing a significant increase of 10.38% over T1 treatment. The grain yields were as follows: CK treatment 6871.47 kg/ha, T1 treatment 7413.5 kg/ha, T2 treatment 8112.88 kg/ha, and T3 treatment 8182.82 kg/ha. These findings demonstrate that large-particle fertilizers can ensure stable and high maize yields in Northeast China. Furthermore, the application of extrusion granulation technology effectively reduces carbon emissions during production, lowers processing costs, and indirectly enhances farmers' economic benefits. This study provides a new technical pathway for sustainable agricultural development, as well as a scientific and efficient fertilization solution for large-scale crop production under land-intensive management models.

Key words: Maize; Stabilized fertilizer; Large-particle fertilizer; Hole application; Cost reduction; Carbon emission

玉米作为我国三大粮食作物之一,在农业生产体系中占据战略地位。其种植面积与产量长期位居全球前列,虽然总产量仅次于美国,但在保障国家粮食安全中发挥着不可替代的作用。近年来,随着土地集约化经营模式的深化与农业劳动力成本的持续攀升,轻简化施肥技术成为玉米规模化生产的核心需求之一^[1]。稳定性肥料(添加脲酶抑制剂、硝化抑制剂)因具备一次性施肥、肥效期长(约120 d)等特性,且能通过缓慢释放养分匹配作物生长周期,已成为推动农业现代化的重要技术路径^[2-3]。

在施肥方式优化领域,条施覆土虽被证实可显著降低 NH_3 挥发损失^[4],但易导致土壤无机氮局部聚集,引发亚硝态氮累积及肥料利用率下降等问题^[5]。此外,条施作业的设备精度与操作规范性直接影响肥料空间分布均匀性,进而造成作物根系养分吸收失衡^[6-7]。相较于条施,穴施通过将肥料精准定位至根区,减少养分与土壤的无效接触面积,有效降低了养分固定、淋溶及挥发风险^[8]。在此基础上,通过改变肥料物理形态实现养分精准供给,成为提升化肥利用效率的研究热点。已有研究表明,剂型优化可显著提高经济作物产量与品质,同时降低养分淋失率^[9]。卢敬坤等^[10]在玉米田间试验中发现,大颗粒肥较掺混肥处理增产7.54%,氮肥利用率提升20.40%。李杰等^[11]在樱桃树试验中证实,大颗粒肥料可显著提高根区土壤硝态氮、铵态氮、速效磷及速效钾含量。土柱淋溶试验进一步表明,大颗粒肥料因体积较大、比表面积较小,可在土壤中形成养分集中扩散区域,通过浓度梯度驱动实现持续供肥,从而抑制磷素固定、缓解氮钾流失^[12-13]。

尽管常规大颗粒肥料在大田应用中已表现出显著的增产增效潜力,但稳定性大颗粒复合肥料的研究仍处于空白阶段。本研究通过挤压成型工艺制备稳定性大颗粒复合肥料,该技术路径不仅

可省略传统复合肥生产中的高温造粒环节(降低水、电、气能耗及设备折旧等成本),更能避免高温对无机/有机增效物质稳定性的破坏^[14]。针对当前大田施肥分散、土壤大量元素利用率偏低的突出问题,本研究旨在通过稳定性大颗粒复合肥料的田间应用,探索土地集约化种植模式下“稳产量、降成本、减碳排”的技术路径,为绿色农业与生态农业的可持续发展提供理论支撑与实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米品种为“苞米720”。供试肥料为稳定性复合肥料,含量48%(26-10-12),直径3.5 mm,硬度约20 N;挤压成大颗粒的稳定性肥料,颗粒厚度1.5 cm,直径3.0 cm,质量15 g,硬度约200 N。稳定性肥料及大颗粒肥料均由中国科学院沈阳应用生态研究所自主研制。新民市属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均气温7.6℃,年均降水量600 mm,耕作制度为一年一熟制。供试土壤为棕壤土,耕层土壤pH值为7.2,土壤理化性质如下:有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为1.76%、92.86、12.86、369.36 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于2023年5月6日在沈阳新民试验地进行,试验共设4个处理:CK为不施肥;T1为稳定性肥料条施;T2为稳定性肥料穴施;T3为稳定性大颗粒肥料穴施。每个处理重复3次,共计12个小区,进行正常田间管理(图1)。施肥的各个处理以基肥形式于播种前一次性施入作底肥(施肥量15 g/株),玉米种植株距为33.33 cm,作物生长期不再追肥。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤样品采集和测定方法

本研究于玉米出苗期(两叶一心)、拔节期、喇叭口期、抽雄期、灌浆期及成熟期6个关键生育时

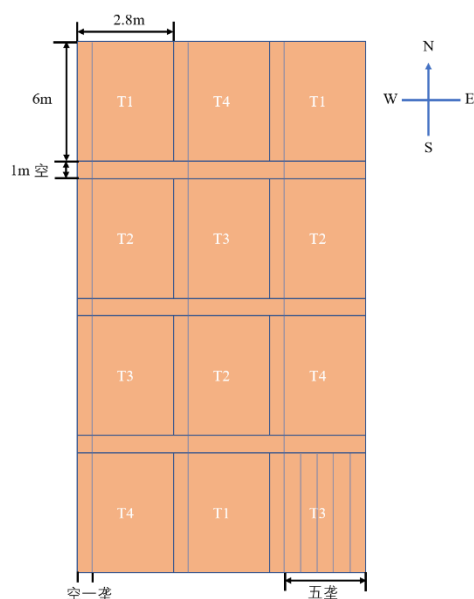


图1 模拟试验区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulated experimental area
期,采集耕层土壤样本。采样位点设定为距离玉米根系 10 cm 处、土壤深度 15 cm,所采样本用于测定土壤养分含量,以分析养分动态变化特征。土壤中的无机态氮含量:采用凯氏法进行测定;土壤速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO_3 溶液浸提,然后通过全自动智能化学分析仪(Smart Chem 200, Alliance, 法国)测定;土壤速效钾含量采用 1 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 浸提液浸提后通过火焰光度法测定。

1.3.2 植株样品采集和测定方法

叶片叶绿素值分别于拔节期至蜡熟期使用叶绿素仪(SPAD-502, Minolta, 日本)测定;玉米株高在拔节期、喇叭口期和抽雄期测定,用直尺测定从地面裸露的位置到植株顶部的距离表示株高。玉米成熟后在试验田中从不同区组采集生长大小程度均匀的玉米穗,并从中随机选取 5 个代表穗,测量单穗指标,根据 5 穗籽粒风干重量计算产量,产量(kg/hm^2)=小区产量/小区面积。

1.4 数据分析与统计

采用 Excel 进行数据录入、整理和计算,采用 SPSS 29.0 软件进行统计学的显著性分析,采用 Origin 2024 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化

图2~图4展示了玉米生长各关键时期土壤养分的动态演变过程。就土壤无机态氮浓度变化特征而言,T1处理(稳定性肥料条施)自玉米两叶一心期起,氮素释放速率即达峰值,此后在整个生

育周期内呈持续衰减趋势,其峰值比T2(稳定性肥料穴施)、T3(稳定性大颗粒肥料)处理低 22% 和 20%。至玉米喇叭口期,T2处理氮素释放速率显著提升,呈快速上升态势,该阶段无机态氮浓度峰值分别超出 T1、T3 处理同期水平的 68% 和 25%;进入抽雄期后,T2处理无机态氮浓度迅速下降,至成熟期氮素减少量相较于峰值超过 84%,但整个生育期内其氮素累积释放量仍居首位。T3处理采用稳定性大颗粒肥料,氮养分释放呈现“前期缓升—喇叭口期达峰值—后期缓降”的特征:自玉米生长初期起,氮素释放速率稳步上升,于喇叭口期达到最大值后逐渐回落。

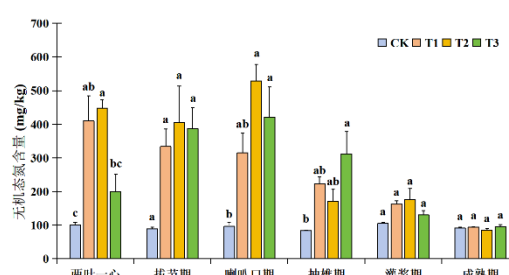


图2 不同处理在土壤中无机态氮的释放特征

Fig. 2 Release characteristics of inorganic nitrogen in soil under different treatments

注:柱状图上不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$, the same below.

从氮素释放的阶段分布来看,在玉米生长前 3 个关键时期(两叶一心期、拔节期、喇叭口期),T1、T2、T3 这 3 个处理的氮养分累积释放量分别占总释放量的 69%、76%、65%;而在生育后期(抽雄期至成熟期),T3 处理氮素释放量占比达 35%,显著高于其他处理。与对照处理(CK)相比,T1、T2、T3 施肥处理均表现出更为显著的氮素动态释放特征,而 CK 处理土壤无机态氮浓度在整个玉米生长周期内未呈现明显波动变化。非峰值状态下,各处理间差异较小。

图3显示,各施肥处理下土壤速效磷浓度的动态变化规律。T2处理在玉米两叶一心期即达到速效磷释放峰值,具有显著性,其峰值浓度分别超过 T1 处理(灌浆期达峰)的 1.7 倍、T3 处理(拔节期达峰)的 2 倍;该时期过后,T2处理速效磷释放速率减缓,呈缓慢释放态势。T3处理的速效磷释放较为平稳,于拔节期达到释放量最大值,此阶段释放量占总监测期的 23%,其整体速效磷释放量与 T1 处理相近。T1 处理则在灌浆期出现速效磷浓度释放高峰,该时期释放量占总监测期的

25%。CK处理在整个监测期内速效磷浓度无明显波动。

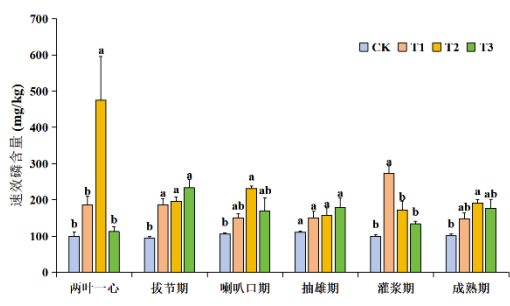


图3 不同处理在土壤中速效磷的释放特征

Fig. 3 Release characteristics of soil available phosphorus under different treatments

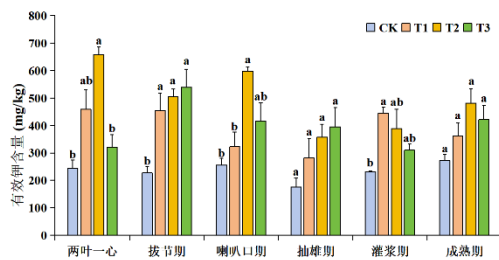


图4 不同处理在土壤中有效钾的释放特征

Fig. 4 Release characteristics of soil available potassium under different treatments

图4显示,T1、T2、T3这3个施肥处理的有效钾释放峰值均集中在玉米生长前期。在6个连续监测生长期,有效钾总释放浓度呈T2>T3>T1>CK的趋势,其中,T1处理峰值释放量占总监测期释放量的20%,T2和T3处理均为22%。在玉米整个生长后期,3个施肥处理的有效钾释放趋势均较为平缓,各处理间差异较小;而对照处理(CK)的有效钾浓度始终处于较低水平且无明显变化。

2.2 株高及叶绿素含量

图5显示,不同处理组玉米株高的动态变化特征。在拔节期,T1、T2和T3处理组的株高分别为对照组(CK)的0.12、0.11和0.13倍;至喇叭口期,上述处理组株高与CK组的比值分别为0.08、0.03和0.16;抽雄期时,T1、T2和T3处理组株高进一步增长,分别达到CK组的0.16、0.17和0.21倍。

叶片叶绿素含量的动态变化如图6所示。各处理组叶绿素含量均呈现先快速上升后趋于平缓的变化趋势。其中,T2和T3处理组变化趋势较为相似,其叶绿素含量平均值超出CK处理组7%和9%,而T1处理组叶绿素含量平均值超出CK处理组9%。

2.3 产量结果

施稳定性大颗粒肥料处理的百粒重与稳定性

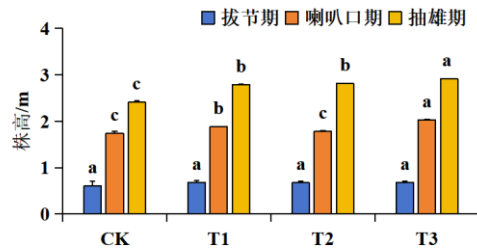


图5 不同处理对玉米株高的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on maize plant height

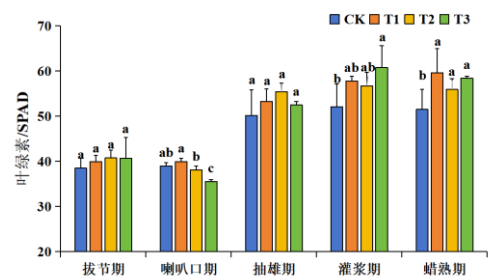


图6 不同处理玉米叶绿素的变化

Fig. 6 Changes in chlorophyll content of maize under different treatments

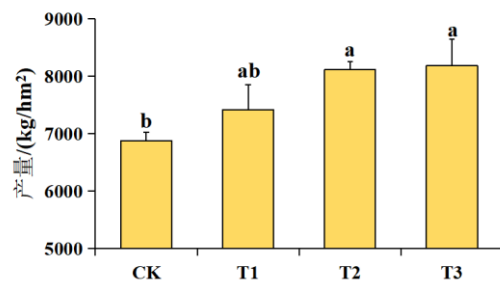


图7 不同处理玉米产量的变化

Fig. 7 Changes in maize yield under different treatments

肥料穴施处理无太大差异,T3略高于T2约0.69%,较T1处理百粒重分别高出0.5%和1.2%。三者均显著高于不施肥处理。各处理产量较不施肥(CK)处理均显著增加,产量为7 413.5~8 182.82 kg/hm²,增幅为7.89%~19.08%。与T1(条施)处理相比,T2(穴施)和T3(大颗粒)处理分别增产9.43%和10.38%,两者差异不显著(图7)。上述结果表明,在相同施肥量条件下,稳定性大颗粒肥料可通过优化养分释放模式适当提升玉米产量。

3 讨论与结论

传统肥料平均粒径约为3.5 mm,虽能基本满足作物营养需求,但在肥料生产、运输、施用等环节仍面临诸多挑战。制造工艺方面,高塔喷淋造粒与转鼓造粒的能量成本分别达120~140元/t和

140~160元/t^[15-16];存储、运输、使用过程中需添加防板结剂以避免肥料结块;田间作业时,人工施肥成本较高,且为追求养分供应常导致化肥过量施用。相比之下,本研究采用的稳定性大颗粒肥料通过挤压成型技术,将基础养分与增效剂直接混合后挤压造粒,无需高温工艺,有效保障增效剂稳定性,其造粒成本仅为60~80元/t,具备显著的经济优势。

本研究结果表明,不同形态肥料处理的养分释放规律均符合肥料养分释放机理^[17]。在土壤大量元素动态监测中,稳定性肥料条施处理的无机态氮浓度自种植初期便快速下降,至成熟期较峰值降低77%。这主要归因于条施肥料的分散性及较大的比表面积,使其与土壤水分充分接触后快速释放养分,部分氮素被作物吸收利用,另一部分则因条施改变了土壤微生物群落结构与功能,加速了微生物对无机氮的固定^[18]。与之形成对比,稳定性肥料穴施和大颗粒肥料处理因养分集中、溶解速率较慢,尤其是大颗粒肥料,初期溶解促使局部氮素浓度快速升高,结合其缓释特性,实现了氮素的持续稳定供应^[19-20]。在速效磷释放方面,穴施处理因肥料快速溶解导致速效磷浓度骤升;条施处理因肥料空间分布分散,速效磷浓度低于穴施;大颗粒肥料则凭借结构紧实的特性,实现速效磷的缓慢释放^[21]。有效钾释放呈现相似趋势,3个处理的释放峰值均集中于玉米生长前期,其中,穴施处理释放量最高且最为集中,条施次之,大颗粒处理相对较低;而在作物生长后期,各处理有效钾释放量趋于接近。

植株生长指标与产量数据进一步验证了新型肥料的应用潜力。稳定性肥料穴施和大颗粒处理在玉米全生育期内展现出更优的养分持续供应能力,株高与叶绿素含量均显著优于条施处理。结果显示,穴施和大颗粒处理均显著高于条施处理,其中大颗粒处理产量较穴施处理高出0.68%。以2023年年底玉米价格2488元/t为基础计算,稳定性肥料条施和穴施处理的玉米收入分别为18449元/hm²和20189元/hm²,大颗粒处理的玉米收入为20364元/hm²,较条施增收约1915元/hm²、较穴施增收约175元/hm²。从造肥成本对比(平均最多可降低80元/t),用肥生产成本降低66元/hm²左右,综合计算,稳定性大颗粒肥料较目前常规大田条施肥可以实现增收约1981元/hm²。稳定性大颗粒肥料不仅实现了稳产增效,还通过一次性施肥减少了因化肥过量施用带来的土壤养分失衡、地下水污染等环境风

险,为绿色农业发展提供了新的技术路径^[22]。

面向大田玉米轻简化施肥需求,本研究基于稳定性肥料体系,通过创新肥料形态研发的新型大颗粒复合肥料,兼具养分高效利用、生产成本显著降低及施用模式现代化等多重优势。该肥料在维持作物产量的前提下,一方面通过简化生产工艺、减少能源消耗,有效降低了单位面积肥料生产成本,进而提升农业经济效益;另一方面,稳定性大颗粒复合肥料在实现“低碳、低成本”造肥的前提下,为“4R”精准施肥提供技术应用路径,为农业绿色低碳转型提供了技术支撑,对农业生态系统的可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 谭德水,刘兆辉.一次性施肥技术实现三大粮食作物轻简化绿色生产[J].中国农业科学,2018,51(20):3823-3826.
TAN D S, LIU Z H. One-off fertilization technology realized light-simplified and green production for the three major grain crops[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3823-3826. (in Chinese)
- [2] 武志杰,石元亮,李东坡,等.稳定性肥料发展与展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1614-1621.
WU Z J, SHI Y L, LI D P, et al. The development and outlook of stabilized fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(6): 1614-1621. (in Chinese)
- [3] 武志杰,张丽莉,石元亮,等.绿色肥料缘起、现状与发展趋势[J].中国农业科学,2023,56(13):2530-2546.
WU Z J, ZHANG L L, SHI Y L, et al. Origin, present situation and development trend of green fertilizer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(13): 2530-2546. (in Chinese)
- [4] SOMMER S G, SCHJOERRING K, DENMEAD O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops[J]. Advances in Agronomy, 2004, 82: 557-622.
- [5] 徐侠影.几种典型土壤氧化亚氮产生过程与氮素转化的关系[D].北京:中国农业大学,2014.
- [6] MENG W J, XING J L, NIU M. Optimizing fertigation schemes based on root distribution[J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: 107994.
- [7] WU H L, WANG L M, LIU X P. Layered-Strip fertilization improves nitrogen use efficiency by enhancing absorption and suppressing loss of urea nitrogen[J]. Agronomy, 2023, 13: 2428.
- [8] PIETRO S, TOMAS J S, DORETTE M. Strategic placement of mineral and biobased fertilizers for optimizing phosphorus use efficiency: A comprehensive review[J]. Soil Use Manage, 2025, 41: e70039.
- [9] ZHOU P Y, ZHANG Z, DU L S. Effect of deep placement of large granular fertilizer on ammonia volatilization, soil nitrogen distribution and rice growth[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 2066.
- [10] 卢敬坤,刘春光,隋标,等.大颗粒球肥氮素释放特性及其肥效研究[J].玉米科学,2019,27(3):148-154.
LU J K, LIU C G, SUI B, et al. Study on the nitrogen release

- rate and fertility effect of large round granular fertilizer[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(3): 148–154. (in Chinese)
- [11] 李杰, 卢宗云, 王文宇, 等. 新型大颗粒肥料的养分释放特征及应用效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 169–174.
LI J, LU Z Y, WANG W Y, et al. Research on nutrient release characteristics and application effects of new large-grained fertilizer[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 169–174. (in Chinese)
- [12] 李天娇, 李杰, 卢宗云, 等. 新型大颗粒复合肥特性及对艳红桃产量影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(4): 159–164.
LI T J, LI J, LU Z Y, et al. Characteristics of the new type of large particle compound fertilizer and its effects on Yanhong peaches yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(4): 159–164. (in Chinese)
- [13] 高妮. 腐植酸与生化抑制剂对大颗粒肥料氮素形态转化的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [14] 马丽. 稳定性肥料不同生产工艺对氮肥增效剂稳定性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2024.
- [15] 李付兴, 张坤, 袁利剑. 大颗粒尿素项目的前景分析[J]. 炼油与化工, 2010, 21(1): 12–15, 57.
LI F X, ZHANG K, YUAN L J. Analysis on prospect of large granular urea project[J]. Refining and Chemical Industry, 2010, 21(1): 12–15, 57. (in Chinese)
- [16] 王洪富, 高进华, 徐勤政, 等. 中量元素(钙)水溶肥板结影响因素分析[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(12): 22–23.
WANG H F, GAO J H, XU Q Z, et al. Cause analysis on influence factors of medium element(calcium) water-soluble fertilizer caking[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(12): 22–23. (in Chinese)
- [17] 谷守玉, 王光龙, 许秀成. 包裹型控释肥养分释放动力学的
~~~~~  
(上接第82页)
- [29] 牟文燕, 罗一诺, 张学美, 等. 影响我国主要麦区小麦籽粒硫含量的品种(系)与土壤因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 273–286.  
MOU W Y, LUO Y N, ZHANG X M, et al. Varieties(lines) and soil factors affecting sulfur content in wheat grains in major wheat regions of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(2): 273–286. (in Chinese)
- [30] ABDUL QADIR A, MURTAZA G, ZIA-UR-REHMAN M, et al. Application of gypsum or sulfuric acid improves physiological traits and nutritional status of rice in calcareous saline-sodic soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(2): 1846–1858.
- [31] 李辛玮, 陈莫军, 杨浩, 等. 施氮对鲜食糯玉米主要商品品质与咀嚼品质性状的影响[J]. 玉米科学, 2025, 33(6): 88–94.  
LI X B, CHEN M J, YANG H, et al. Effects of nitrogen application on main commercial quality and chewing quality traits of fresh waxy maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2025, 33(6): 88–94. (in Chinese)
- [32] 刘晓丽, 韩洁楠, 李冉, 等. *opaque2* 对糯玉米籽粒食味和营养品质的影响分析[J]. 玉米科学, 2023, 31(4): 52–58.  
LIU X L, HAN J N, LI R, et al. Effects of *opaque2* on eating and nutritional quality of waxy maize grains[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(4): 52–58. (in Chinese)
- 研究[J]. 化肥工业, 2002, 30(2): 15–17, 59.  
GU S Y, WANG G L, XU X C. Study of release kinetics of nutrients from encapsulated controlled-release fertilizers[J]. Journal of Chemical Fertilizer Industry, 2002, 30(2): 15–17, 59. (in Chinese)
- [18] CAO Y S, XIE Y J, ZHU T B, et al. Response patterns of soil nitrogen cycling to crop residue addition: A review[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24: 1761–1774.
- [19] LIU H L, LEI F, LI D, et al. Evaluation of nitrogen release characteristics and enhanced efficiency of a novel synthetic Slow-Release nitrogen fertilizer[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23: 5671–5682.
- [20] 李世龙, 桑启恒, 雷吉琳, 等. 增殖肥料和稳定性肥料的应用研究进展[J]. 肥料与健康, 2023, 50(5): 2096–2047.  
LI S L, SANG Q H, LEI J L, et al. Research progress on application of proliferative fertilizer and stable fertilizer[J]. Fertilizer and Health, 2023, 50(5): 2096–2047. (in Chinese)
- [21] PRATIBHA R, DAS S, DEEPTI S, et al. Phosphate-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 21(1): 49–68.
- [22] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(6): 554–558.  
WANG S P, YU L Z, XU S Y, et al. Nitrogen leaching in the purple clay and analysis on its influence on water environmental quality in Shanghai[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(6): 554–558. (in Chinese)
- (责任编辑: 朴红梅)
- ~~~~~
- [33] 郭长英, 王春语, 张丽霞. 蜡熟期粒用高粱和甜高粱糖锤度和糖组分差异分析[J]. 辽宁农业科学, 2023(3): 44–47.  
GUO C Y, WANG C Y, ZHANG L X. Analysis on differences of sugar brix and sugar components between grain sorghum and sweet sorghum at the dough stage[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2023(3): 44–47. (in Chinese)
- [34] 王唯先, 张昊, 仝晓鹏, 等. 甜高粱杂交组合糖锤度及相关农艺性状遗传分析[J]. 分子植物育种, 2026, 24(2): 470–475.  
WANG W X, ZHANG H, TONG X P, et al. Genetic analysis of sugar brix and related agronomic traits in sweet sorghum hybrid combinations[J]. Molecular Plant Breeding, 2026, 24(2): 470–475. (in Chinese)
- [35] 张苏江, 艾买尔江·吾斯曼, 薛兴中, 等. 南疆玉米和不同糖分甜高粱的青贮品质分析[J]. 草业学报, 2014, 23(3): 232–240.  
ZHANG S J, AIMAIERJIANG W S, XUE X Z, et al. Silage quality analysis of maize and sweet sorghum with different sugar contents in southern Xinjiang[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(3): 232–240. (in Chinese)
- [36] RAHMAN M M, SOAUD A A, DARWISH F H A, et al. Effects of sulfur and nitrogen on nutrients uptake of corn using acidified water[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(42): 8275–8283.  
(责任编辑: 朴红梅)