

马 静, 韩四满, 程 岚. 包膜尿素配施有机肥对春玉米氮素吸收、产量及土壤团聚体稳定性的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 94–102.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.014

包膜尿素配施有机肥对春玉米氮素吸收、产量及土壤团聚体稳定性的影响

马 静¹, 韩四满¹, 程 岚²

(1. 宁夏工商职业技术学院, 宁夏银川 750001; 2. 宁夏回族自治区农业机械化技术推广站, 宁夏银川 750001)

摘要:以登海 605 为试验材料, 进行 3 年(2020 年、2021 年、2022 年)田间试验。设置无氮(CK)、普通尿素(CU)及以有机肥(F)替代包膜尿素(P)比例为 0、25%、50%、75%、100% (分别记为 P100F0、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100), 研究等氮条件下有机肥不同替代比例包膜氮肥对引黄灌区玉米氮素吸收、产量以及土壤团聚体结构的影响, 为春玉米土壤性能与农艺效益的科学施肥实践提供理论依据。结果表明, 包膜尿素配施有机肥显著改善了土壤团聚体稳定性, 影响土壤有效氮的供应特征, 促进玉米生长、氮吸收, 提高玉米氮素利用率(NUE)与产量。普通尿素处理提高了玉米生长前期表层土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 使得该阶段玉米长势较佳、伤流强度较高, 此后土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量迅速下降, 因此 NUE、产量较低。与 CU 相比, 包膜尿素配施有机肥处理延长了土壤氮素的供应周期, 改善了土壤团聚体粒级组成, 从而促进玉米生育中后期长势, 增强灌浆期根系氮代谢活性及伤流特征。3 年的平均 NUE 与平均产量以 P50F50 最大; 与 CU 相比, P50F50 处理 NUE 显著增加 6.71 百分点, 产量显著增加 6.24%。综上, 采用 50% 有机肥替代包膜尿素, 可提高表层土 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 改善土壤团聚体稳定性, 显著增强根系氮代谢, 从而提升玉米产量和氮素利用率, 是最佳的有机肥替代比例。

关键词:包膜尿素; 有机肥; 伤流液; 土壤团聚体; 氮素利用率; 产量

中图分类号:S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)05-0094-08

玉米(*Zea mays* L.)是世界范围内种植面积较大的谷类作物之一, 优化施肥是保证玉米产量与保护环境生态的主要可控性措施^[1]。我国是最大的农用化学品生产国和消费国, 其中化学氮肥占全球总氮肥使用量的 50% 以上^[2]。尿素是玉米生产的主要氮肥种类, 在玉米的田间生产中, 为保证产量玉米尿素施用量往往较高^[3]。在我国宁夏玉米种植区, 春玉米生育周期单次灌溉往往浸透土壤, 施用的化肥快速释放导致氮素当季利用率低, 氮肥利用率仅为 26%~30%, 极易造成氮素随水分流动使得底物氮富集、表层氮贫瘠及氮面源污染, 在高成本的同时造成氮素大量流失而威胁环境生态安全^[4]。分次施氮是玉米生产的传统性措施, 即在拔节期一大喇叭口期于土表撒施 1 次尿素, 从而满足

氮素供应期与植株旺长发育的需求, 可提高氮肥利用效率及产量^[5]。然而, 随着我国劳动力人口老龄化和农作物生产活动的劳动力短缺日益严重, 玉米生产轻简化势必成为未来农业发展方向之一^[6]。

包膜尿素是一类在速效肥外衣采用物理、化学或物理化学的方法进行相应改性而成的新缓/控释肥^[7]。包膜尿素养分释放期可控、释放速率缓慢, 可基本满足作物整个生育期对氮素的需求特点, 具有减少施肥量、人工成本及降低 N_2O 排放、硝酸盐淋溶风险等优点^[8], 现今已逐渐应用于粮食作物、油料作物、纤维作物、水果类及蔬菜类作物等。目前用于农业生产的主导包膜控释尿素产品主要分为硫包衣尿素(SCU)、聚合物包膜尿素(PCU)^[9]。SCU 即包衣有硫元素的尿素, 价格较低廉且包衣无公害, 是目前纤维作物种植的主要控释肥, 但 SCU 释放往往呈爆发式而使得持续周期短。PCU 则是采用醇酸树脂、聚氨酯、环氧树脂等材料作为包膜, 且内部可添加纳米材料、活性物质和/或其他小分子功能性物质的新型控释肥, 现已成为农业种植尤其是粮食作物种植用肥的热点^[10]。

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 宁夏回族自治区科技厅课题项目(编号: NGY2020147)。

作者简介: 马 静(1981—), 女, 宁夏银川人, 硕士, 副教授, 主要从事玉米生产与智能机械研究。E-mail: mjing0441@163.com。

通信作者: 程 岚, 高级农艺师, 主要从事农机农艺、农业机械技术推广研究。E-mail: Lanc86@126.com。

有机肥是一类采用动、植物残体等生物质加工,富含有机酸、肽类及大量养分的肥料制品。大量研究表明,施用有机肥可改善土壤结构、培肥地力、增加土壤缓冲性能、提高肥料利用率、改善土壤微生物群落结构、减少作物病害及降低温室气体排放等^[11]。采用有机肥部分替代氮肥,或可均衡利用总养分和速效养分,从而促进土壤的生物活性和理化特性^[12]。近年来,包膜尿素已广泛应用于玉米的田间生产,与普通尿素相比,包膜尿素氮素释放速率更慢,可促进玉米氮素积累,提高氮素利用效率,减少氮素淋失^[7-8,13]。然而,目前研究主要集中于包膜尿素的筛选、包膜尿素与普通尿素的配比比例及包膜尿素中功能性物质的添加比例等,关于包膜尿素与有机肥配施对玉米种植影响的研究较少。本研究探索了包膜尿素和成品有机肥对玉米种植土壤有效分布、玉米产量的影响,以期对春玉米生产兼顾环境效益和农艺效益的科学施肥实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2020—2022 年 3—7 月在宁夏回族自治区盐池县冯记沟乡三墩子村(106°51'17"E,37°40'23"N)进行。试验区属中温带干旱半干旱气候区,海拔 1 301 m,年均日照 2 800 h,降水量 280 mm,年均温度 22.6 ℃。3 年试验均为同一地块,土壤为黄绵土,0~30 cm 土壤理化性质:pH 值 7.41,有机质、全氮含量分别为 16.46、0.69 g/kg,碱解氮、速效磷及速效钾含量分别为 42.63、17.55、91.12 mg/kg。

供试玉米品种为登海 605。供试磷、钾肥为磷酸二氢钾(P_2O_5 52%, K_2O 17%)和硫酸钾(K_2O 63%),均购自宁夏鲁西化工化肥有限公司。供试有机肥属于腐殖酸型有机肥,购自吴忠绿色能源开发有限公司,有机质含量>45%,总养分含量 3.5%,其中氮、磷、钾含量分别为 1.60%、0.96%、0.58%。供试氮肥:普通尿素(N 含量 46%),购自宁夏鲁西化工化肥有限公司;包膜尿素(N 含量 46.3%),购自山东金正大生态工程有限公司,由乙基纤维素涂层,内部除尿素主体外含有聚天冬氨酸和海藻提取物,在 25 ℃ 静水环境的释放周期为 67 d,制备工艺见 Yang 等所述方法^[14]。

1.2 试验设计

试验设置 7 个处理,即不施氮肥(CK)、普通尿

素以当地常规氮用量 240 kg/hm²(CU)及以有机肥(F)替代包膜尿素(P)比例为 0、25%、50%、75%、100%(分别记为 P100F0、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100)。重复 3 次,共 21 个小区。小区为长方形(6 m×5 m),随机区组排列。磷、钾肥用量: P_2O_5 150 kg/hm², $m(P_2O_5):m(K_2O)=6:5$ 。玉米种植期间 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用总量分别为 240、150、125 kg/hm²,以总氮量为折算标准,代替等量的化肥氮素量以计算有机肥用量,同时算出有机肥所提供的磷、钾含量,不足量由化学磷、钾肥补足。相应化学氮、磷、钾肥及有机肥按相应处理施用量一次性施入,采用玉米播种前机械撒施,然后结合旋耕施入土壤。采用 2BMYFQ 精量播种机(山东大华机械有限公司)播种、铺滴管带及覆土,玉米播种密度为 5.55 万株/hm²。采用宽窄行种植(70 cm、30 cm),株距 22 cm。滴灌带铺设于窄行之间,灌水定额 2 775 m³/hm²。其他病虫害防治及管理措施同当地玉米田间生产规程。

1.3 测定指标

1.3.1 玉米生长参数、伤流强度及氮浓度测定

2022 年分别于玉米拔节期、喇叭口期、抽雄期、灌浆期、乳熟期及完熟期采用手持叶面积仪(YMJ-D,浙江托普云农科技股份有限公司)测定叶面积。同时采用手持叶绿素计(TYS-1520,浙江托普云农科技股份有限公司)测定功能叶相对叶绿素含量(SPAD 值)。SPAD 值测定完毕后收获植株置于烘箱 105 ℃ 杀青 30 min,65 ℃ 烘干,记录干物重。氮含量采用全自动连续流动分析仪(HGCF-100,上海水尔分析仪器有限公司)测定。群体绝对生长率(AGR)的计算参照宋桂云等所述方法^[15]。

根系伤流强度采用质量差法进行测定,即在取样前准备脱脂棉、PE 保鲜袋,二者总干重记为 m_0 ;在距玉米主根系根部 3 cm 处横向切割,将准备好的脱脂棉和 PE 保鲜袋包裹在切割后的裸露植株横切面上,自封好后开始记录时间 t ,包裹约 5 h,取下脱脂棉称量记录,记为 m_1 ;根系伤流强度= $(m_1-m_0)/t$ 。伤流液中的氮含量采用全自动连续流动分析仪测定。

1.3.2 玉米根系氮代谢酶、游离氨基酸含量及产量测定 于 2022 年玉米灌浆期选取玉米幼嫩根系。根系游离氨基酸含量参照 GB/T 30987—2020《植物中游离氨基酸的测定》采用茚三酮比色法测定。氮代谢酶包括硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶

(GS)、谷氨酸合酶(GOGAT),上述 NR、GS、GOGAT 活性均采用上海瑞番生物科技有限公司生产的 Elisa 试剂盒测定,试剂盒型号分别为 psy02210、psy02262、psy02263。

产量测定包含 2020 年、2021 年、2022 年共 3 年数据,产量测定时收获每个小区玉米棒,采用室内风干考种,公顷产量由小区产量进行换算。

1.3.3 土壤团粒质量分数及土壤硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量测定 于 2022 年玉米不同生育期测定土壤的硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)及铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量。每个小区随机选取 3 株植株,距离植株主根系 10 cm 处采用 5 点取样法获取表层(0~20 cm)土壤。土壤样品采用 2 mol/L KCl 浸提后,分别采用盐酸-乙二胺四乙酸钠缓冲液、苯酚钠-乙二胺四乙酸钠作为缓冲液,采用全自动连续流动分析仪测定土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量^[16]。

土壤团聚体组成于 2022 年玉米灌浆期采用湿筛法^[16]进行测定。称取 50.0 g 土样,将其置于 5 级套筛(2.000、1.000、0.500、0.250、0.053 mm)最上层,采用恒温土壤团粒分析仪[WS1020,点将(上海)科技股份有限公司]以 30 次/min 的频率振荡筛分 10 min,收集各级筛层团聚体并烘干称量分析以得到团聚体的质量分数。平均重量直径(MWD)、 >0.25 mm 团聚体百分比($R_{0.25}$)的计算参照隋鹏祥等所述方法^[17]。

1.4 数据处理

叶面积指数(LAI)、氮素利用率相关指标参照以下公式计算:

植株氮素总含量(kg/hm^2) = Σ (器官干物质质量 × 器官氮浓度);

氮素利用率(NUE) = (施氮处理氮总累积量 - 不施氮处理氮总累积量)/施氮量 × 100%;

叶面积指数 = (单位叶面积 × 单位种植密度)/单位面积。

采用 SPSS 23.0 软件进行方差分析,采用邓肯氏新复极差法进行多重检验;所有图形皆采用 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理对春玉米生长相关指标的影响

由图 1-A 可知,春玉米干物质含量中,包膜尿素配施有机肥 3 年后(2022 年)对抽雄期与完熟期中各处理均产生了一定影响。就抽雄期而言,各处

理干物质含量表现为 $\text{CK} < \text{P0F100} < \text{P25F75} < \text{P75F25} < \text{P100F0} < \text{P50F50} < \text{CU}$,且除 P50F50 处理外,其他处理均显著小于 CU 处理;完熟期中各处理呈 $\text{CK} < \text{CU} < \text{P100F0} < \text{P50F50} < \text{P0F100} < \text{P25F75} < \text{P75F25}$,与 CK 处理相比,其他处理显著提高 41.66%~55.03%。由图 1-B 可知,各处理叶绿素相关含量(SPAD 值)中,无论是抽雄期还是完熟期,均以 CK 处理 SPAD 值最低,其他施肥处理均显著大于 CK;在施肥处理中,整体以高有机肥比例处理(P50F50、P25F75、P0F100)具有较大的 SPAD 值。叶面积指数中,2022 年的 LAI 在 6 个关键生育期中均表现为随着生育期推进呈先升后降的趋势。从拔节期开始,LAI 开始增加,此后急剧上升,在抽雄期时达到最高,在拔节期至抽雄期,整体以单一尿素处理(CU、P100F0)的 LAI 较大,此后从抽雄期至完熟期逐渐平缓下降,且整体以含有机肥处理(P100F0、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100)大于 CU 处理,此时 LAI 最大值整体出现在 P50F50、P0F100 处理(图 1-C)。而在群体绝对生长率中,AGR 随着生育期推进亦呈先升后降的趋势,各处理于抽雄期存在峰值,抽雄期后 AGR 开始急剧降低,尤其表现在 CU、P100F0 处理;在完熟期时各处理差距较小(图 1-D)。

2.2 不同处理对春玉米根系伤流强度及伤流液氮浓度的影响

由图 2-A 可知,抽雄期的根系伤流强度中,各处理呈 $\text{CK} < \text{P100F0} < \text{P0F100} < \text{CU} < \text{P25F75} < \text{P50F50} < \text{P75F25}$,与 CK 处理相比,相关施肥处理(CU、P100F0、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100)提高 8.91%~40.50%,其中 CK 与 P100F0 处理差异不显著,但显著低于其他处理。灌浆期的伤流强度中,与 CK 处理相比,施肥处理显著提高 203.50%~352.62%,其中施肥处理中以 P75F25 处理伤流强度最高,P25F75、P0F100 较 P75F25 分别显著降低 24.03%、16.28%。由图 2-B 可知,抽雄期的伤流液氮浓度中,各处理呈 $\text{CK} < \text{CU} < \text{P25F75} < \text{P50F50} < \text{P0F100} < \text{P75F25} < \text{P100F0}$,但处理间波动较小,各处理间均差异不显著。灌浆期的伤流液氮浓度中,以 CK 处理最低,相关施肥处理较其提高 7.37%~53.92%,其中 CK 与 CU、P100F0 处理差异不显著,但该三者皆显著小于其他有机肥处理(P75F25、P50F50、P25F75、P0F100);各有机肥处理呈 $\text{P100F0} < \text{P0F100} < \text{P75F25} < \text{P25F75} < \text{P50F50}$,与 P50F50 处

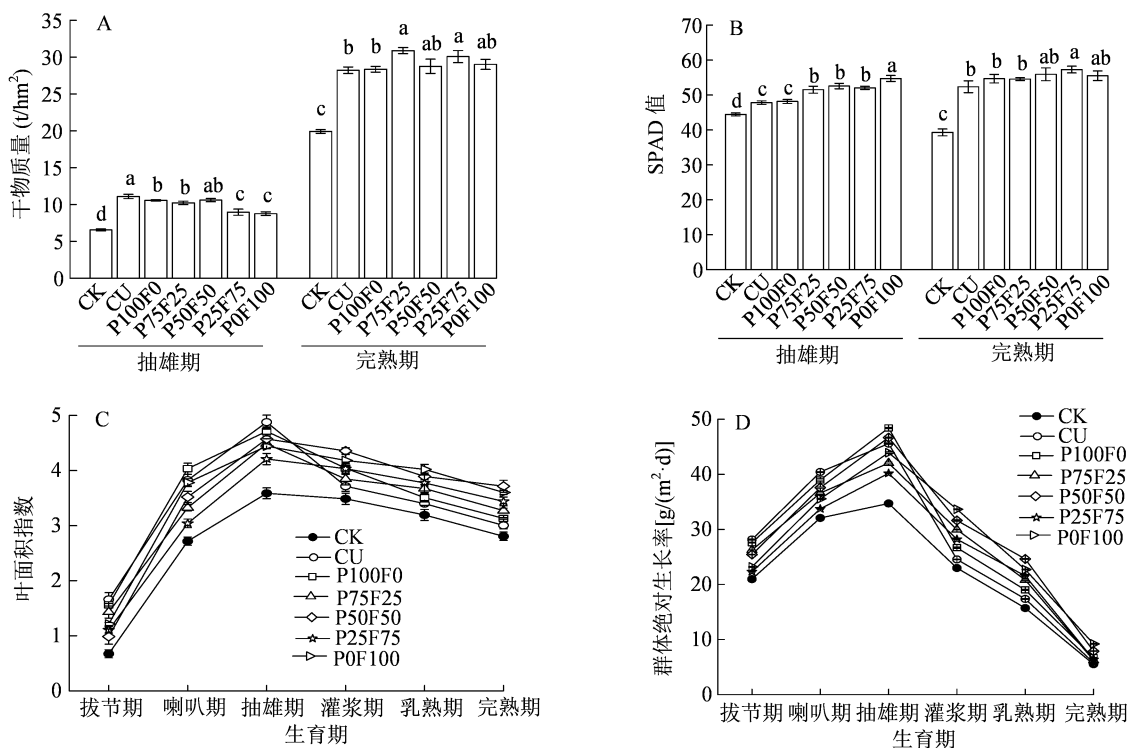


图1 不同处理对春玉米生长相关参数的影响

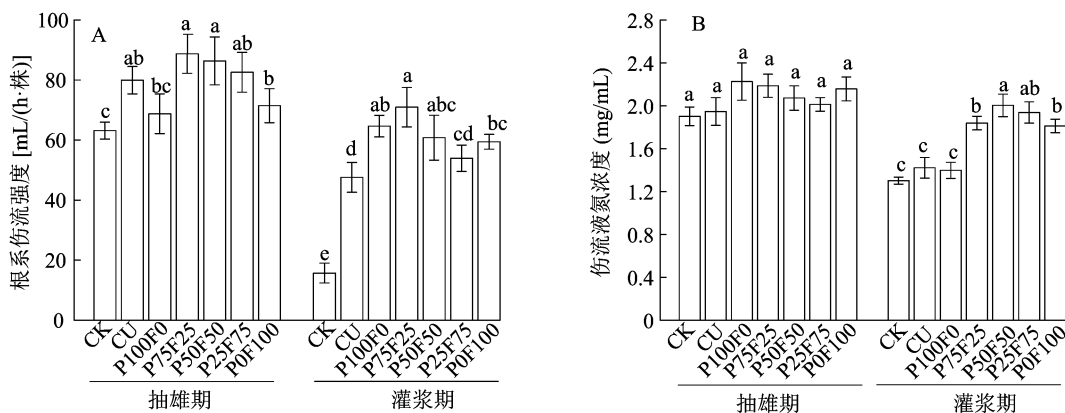


图2 不同处理对春玉米伤流强度及伤流液氮浓度的影响

理相比, P100F0、P0F100、P75F25 处理分别显著降低 30.24%、9.58%、8.23%。

2.3 不同处理对灌浆期春玉米根系氮代谢特征的影响

由图 3 - A 可知, 硝酸还原酶中, 与 CK 处理相比, 相关施肥处理显著提高 203.51% ~ 352.63%, 其中施肥处理中以 P50F50 处理 NR 活性最高, CU、P100F0、P75F25、P25F75 处理较 P50F50 分别显著降低 32.95%、16.28%、24.03%、14.34%。由图 3 - B 可知, 在谷氨酰胺合成酶活性中, 各处理表现为 CK < CU < P100F0 < P75F25 < P50F50 < P25F75 < P0F100, 与 CK 处理相比, 施肥处理显著提高

39.31% ~ 69.01%, 且 CU、P100F0 均显著小于 P25F75、P0F100 处理。各处理谷氨酸合酶活性与 GS 活性规律基本一致(图 3 - C)。由图 3 - D 可知, 各处理游离氨基酸含量高低顺序表现为 CK < CU < P0F100 < P75F25 < P50F50 < P100F0 < P25F75, 与 CK 处理相比, CU 提高 9.26%, 但二者间差异不显著, 而有机肥处理较 CK 显著提高 16.67% ~ 35.19%。

2.4 不同处理对春玉米土壤铵态氮、硝态氮含量的影响

由图 4 可知, 在包膜尿素配施有机肥第 3 年

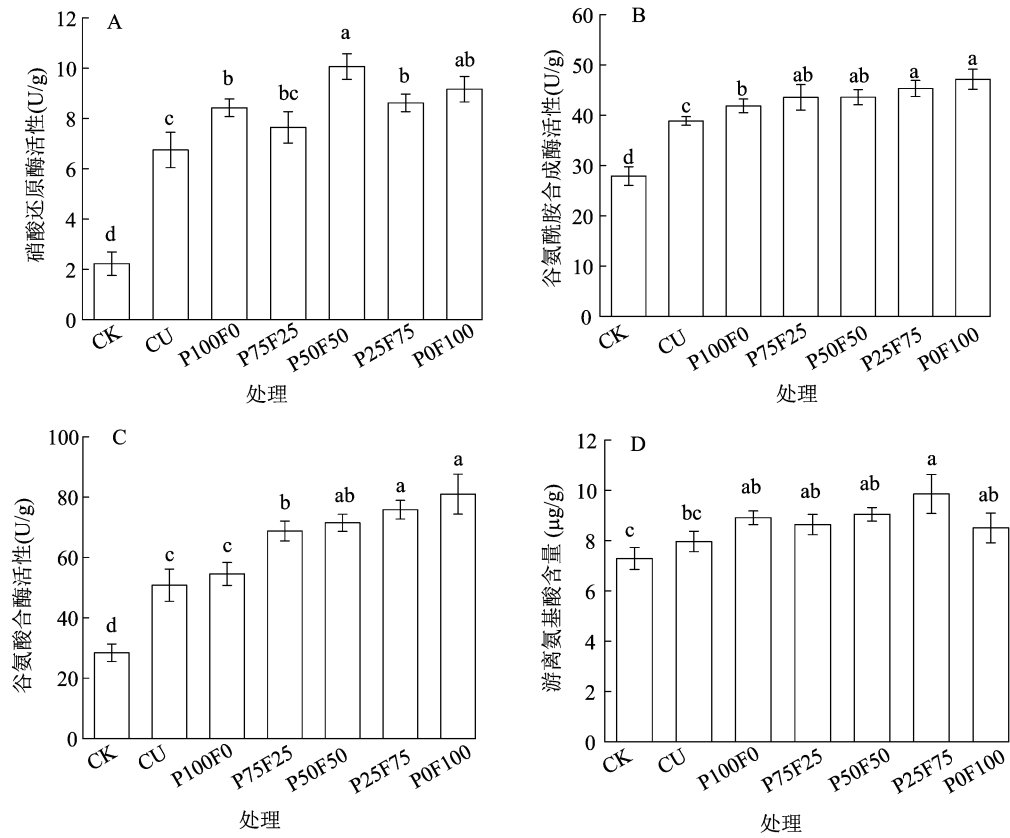


图3 不同处理对春玉米灌浆期氮代谢酶活性及游离氨基酸含量的影响

(2022 年)的田间试验中,不施肥处理(CK)、普通尿素处理(CU)、有机肥处理(P100F00、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100)对不同生育期 0 ~ 20 cm 表层土壤的硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)及铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)含量均具有一定影响。就 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量而言,随着生育期推进,所有处理均整体呈降低的趋势,但不同处理在不同生育期阶段的降幅存在较大差异;就单一尿素处理(CU、P100F0)而言,其 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量从拔节期至抽雄期阶段迅速下降,而后降幅相对放缓;与单一尿素处理相比,其他有机肥替代处理(P75F25、P50F50、P25F75、P0F100)在全生育期降

幅均较为稳定;且在抽雄期前,与单一尿素处理相比而言,其 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较低,而在抽雄期至成熟期阶段则较高(图 4 - A)。就 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量而言,CK 处理在全生育期处于降低趋势,但降幅较小,CU 处理随生育期推进呈迅速下降趋势,尤其表现在拔节期至抽雄期阶段;有机肥处理随着生育期推进亦呈下降趋势。在拔节期和喇叭期,各施肥处理呈 $\text{CK} < \text{有机肥处理} < \text{CU}$,而抽雄期之后,以有机肥处理的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量高于 CU,尤其表现在 P50F50 处理(图 4 - B)。

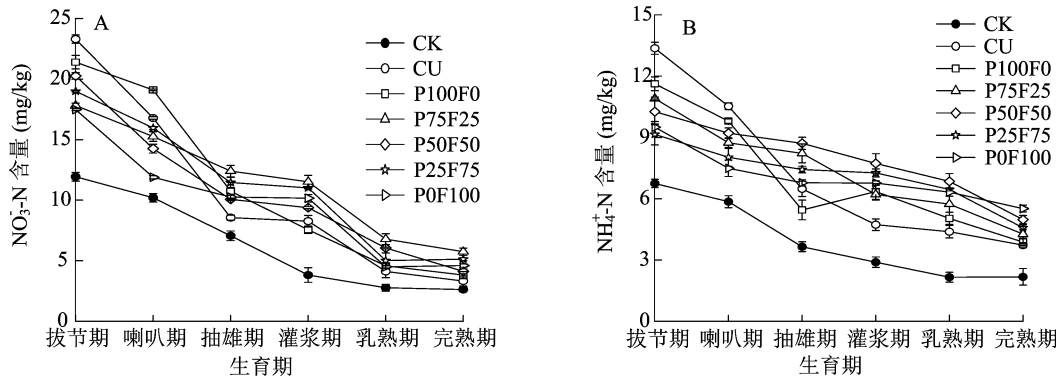


图4 不同处理对生育期表层土壤硝态氮及铵态氮含量的影响

2.5 不同处理对春玉米土壤团聚体组成及其稳定性的影响

由图 5 - A 可知,各处理的 5 级 (> 2.000 、 $> 1.000 \sim 2.000$ 、 $> 0.250 \sim 1.000$ 、 $> 0.053 \sim 0.250$ 、 ≤ 0.053 mm) 中以 > 2.000 mm 为优势团聚体, $> 0.250 \sim 1.000$ mm 其次,而 $> 1.000 \sim 2.000$ 、 $> 0.053 \sim 0.250$ mm 团聚体组分比例较低。其中, > 2.000 mm 团聚体中,以 P0F100 处理最高,其他处理显著降低 20.06% ~ 38.78%; $> 1.000 \sim 2.000$ mm 团聚体中,以 P25F75 处理比例最高,除 P75F25 外,其他处理均显著小于 P25F7; $> 0.250 \sim 1.000$ mm 团聚体中,以 CK、CU、P100F0、P50F50 处理较高,该

4 者处理均显著大于 P75F25、P25F75、P0F100 处理; $> 0.053 \sim 0.250$ mm 团聚体中,以 P0F100 处理最低,其他处理显著提高 39.86% ~ 93.88%; ≤ 0.053 mm 团聚体中,各处理表现为 P25F75 < P0F100 < P50F50、P100F0 < P75F25 < CU < CK,与 CK 相比,施肥处理显著降低 17.57% ~ 29.40%。不同处理亦能明显影响土壤团聚体稳定性。 > 0.25 mm 团聚体 ($R_{0.25}$)、平均重量直径 (MWD) 及几何平均直径 (GMD) 皆以高比例有机肥处理 (P50F50、P25F75、P0F100) 较高 (图 5 - B、图 5 - C、图 5 - D),表明施用较高比例的有机肥更有利于提高水稳性团聚体稳定性。

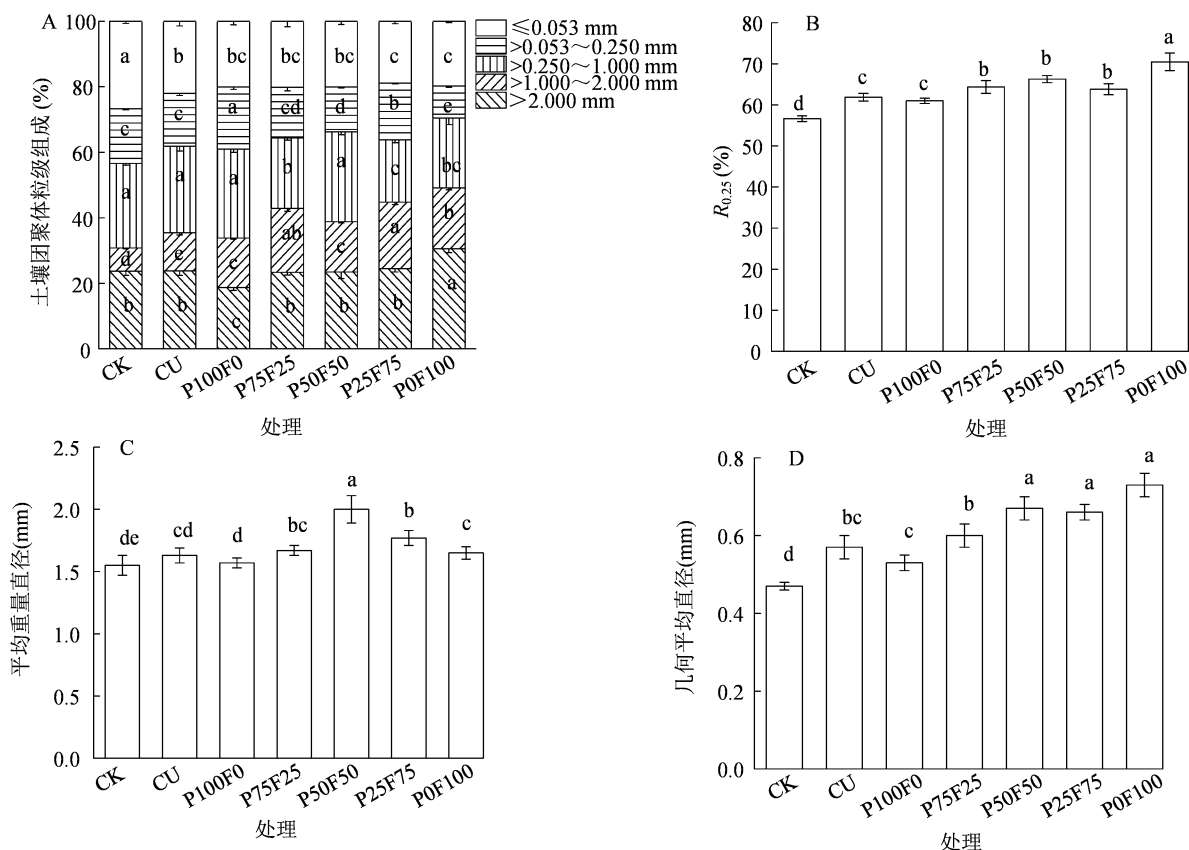


图5 不同处理对表层土壤团聚体特征的影响

2.6 不同处理对春玉米氮素利用率及产量的影响

由表 1 可知,2020 年、2021 年、2022 年共 3 年中各处理的玉米总氮含量均以 CK 处理最低,CU 处理均显著大于 CK 处理;就施用有机肥处理而言,随着有机肥施用比例的增加,玉米总氮含量呈先升高后降低趋势,整体以 P50F50 处理存在较大值。3 年平均氮素利用率中,各处理表现为 CU < P0F100 < P25F75 < P100F0 < P75F25 < P50F50,其中与 P50F50 处理相比,CU、P0F100、P25F75、P100F0、P75F25 处理分别

减少 6.71、4.49、4.25、3.03、1.57 百分点。3 年的玉米产量中,P50F50 处理整体存在较大值;3 年的平均产量表现为 CK < CU < P100F0 < P75F25 < P25F75 < P0F100 < P50F50,其中与 CU 处理相比,P100F0、P75F25、P50F50、P25F75、P0F100 处理产量分别提高 2.08%、2.77%、6.24%、3.70%、5.08%。

3 讨论与结论

施用尿素是农业过程中氮素补给的常规措施,

表 1 不同处理对春玉米氮素利用率及产量的影响

处理	玉米总氮含量(kg/hm ²)			年均氮素利用率(%)	玉米产量(kg/hm ²)				与 CU 相比平均增产(%)
	2020 年	2021 年	2022 年		2020 年	2021 年	2022 年	平均产量	
CK	107.48 ± 0.65d	103.56 ± 1.43e	101.71 ± 1.07d	—	8.18 ± 0.05c	6.91 ± 0.08d	6.54 ± 0.10e	7.21 ± 0.39c	—
CU	176.99 ± 1.19b	172.78 ± 1.04d	168.05 ± 1.55c	28.48 ± 0.52e	8.71 ± 0.13ab	8.82 ± 0.07c	8.45 ± 0.07d	8.66 ± 0.19b	—
P100F0	184.46 ± 1.72a	179.06 ± 1.87c	180.77 ± 2.74b	32.16 ± 0.93bc	8.78 ± 0.11a	9.03 ± 0.09b	8.71 ± 0.12c	8.84 ± 0.17ab	2.08
P75F25	187.62 ± 2.06a	183.61 ± 1.93b	183.61 ± 1.52b	33.62 ± 0.87ab	8.57 ± 0.09b	8.92 ± 0.11bc	9.21 ± 0.09b	8.90 ± 0.14ab	2.77
P50F50	186.41 ± 1.39a	188.22 ± 1.47a	191.51 ± 1.23a	35.19 ± 1.11a	8.75 ± 0.09ab	9.29 ± 0.07a	9.57 ± 0.13a	9.20 ± 0.22a	6.24
P25F75	176.29 ± 3.11bc	178.84 ± 2.35c	180.42 ± 1.57b	30.94 ± 0.50cd	8.87 ± 0.10a	8.93 ± 0.09bc	9.15 ± 0.11b	8.98 ± 0.15ab	3.70
P0F100	173.25 ± 1.70c	181.15 ± 1.24bc	179.36 ± 1.99b	30.70 ± 0.64d	8.62 ± 0.08b	8.99 ± 0.09bc	9.68 ± 0.09a	9.10 ± 0.25ab	5.08

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。

由于尿素水解产物不稳定,缓控释尿素逐渐广泛运用于农业生产^[7,18],然而关于包膜尿素配施有机肥对玉米种植影响的研究较少。本研究中,3 年的田间试验表明,包膜尿素与有机肥配施第 3 年时,拔节期至抽雄期阶段,单一尿素处理(CU、P100F0)的叶面积指数与群体绝对生长率均整体高于其他有机肥处理(P75F25、P50F50、P25F75、P0F100),而在抽雄期至完熟期则以施用有机肥处理相对较高。SPAD 值与干物质含量进一步表明,抽雄期时单一尿素处理的干物质含量较高,而在完熟期时则以施用有机肥处理较高;而无论是抽雄期还是灌浆期,相应有机肥处理的 SPAD 值均高于单一尿素处理。LAI、SPAD 值、AGR 及干物质含量与玉米灌浆效率、最终产量之间关系密切。叶片的蒸腾作用受叶片大小和光合作用强度的影响,也是影响根系吸收氮素能力的重要因素^[19];在灌浆期,包膜尿素配施有机肥处理具有较高的 LAI、SPAD 值,表明蒸腾代谢速率较高;此外,旗叶 SPAD 值增加可促进光合速率和能量转化,从而促进光合产物累积^[20]。以上结果说明包膜尿素配施有机肥可提高叶片光合效率、促进植株的最终形态建成。

根系木质部的伤流液是从根部到地上部的主要营养物质,伤流强度及伤流液物质浓度可以准确地反映根系的生理活动和地上生长的旺盛程度^[21]。本研究中,相同氮素施用量条件下,P75F25、P50F50、P25F75 处理在抽雄期、灌浆期整体具有较大的伤流强度及伤流液氮浓度,这表明适宜的包膜尿素配施有机肥处理可有效促进灌浆效率。本研究中,灌浆期阶段,玉米根系硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶活性及游离氨基酸含量整体以高比例的有机肥处理(P50F50、P25F75、P0F100)较

高。前人研究表明,当土壤中有有效氮含量充足时,铵、硝转运蛋白可被激活,铵盐在 GS 和 GOGAT 的催化下形成谷氨酸(Glu),从而进入根尖分生组织,促进根细胞分裂与增强养分吸收能力^[19]。游离氨基酸是氮在源库之间分配、转运和再分配的形式,也是谷物蛋白质合成的主要底物^[22]。这表明较高的有机肥比例有利于提高氮素吸收、促进根系氮代谢与同化。

土壤团聚体的构成比例及稳定性是反映土壤结构的重要体现,稳定的团聚体可降低土壤可侵蚀性和提高土壤肥力^[23]。本研究中,不同施肥处理下机械稳定性团聚体和水稳性团聚体组成以 >2.000 mm 的团聚体占比最高,为土壤优势团聚体,且大团聚体(>2.000 mm)对 R_{0.25} 的影响更大(图 5-B)。几何平均直径和平均重量直径是表征水稳定性土壤团聚体的重要表征。本研究中,高比例的有机肥处理(P50F50、P25F75、P0F100)具有较高的 GMD、MWD 值。这与邵慧芸等的研究结果基本一致:有机肥施用量越高,大颗粒团聚体比例、GMD 及 MWD 越高^[24]。其原因是在玉米一次性施肥后,土壤扰动少,且有机肥富含一定量的纤维和残渣有机物质,可以降低雨水对土壤的冲刷,且这些有机残留物可以在分解过程中激活微生物群落,从而促进真菌和细菌增殖,它们产生的根系分泌物和酶可以增强土壤团聚体的稳定性^[25]。

尿素通过脲酶和糠醛转化为碳酸铵,进而转化为硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N),二者是植物吸收的主要氮源形态^[19];在肥沃的土壤中,常规尿素通常在 4 d 内完全水解,但大约只有 25% 的氮被植物吸收利用,约 20% 被土壤胶体吸附,其余部分则随水分移动或气体挥发产生流失^[19,26]。土

壤中无机氮含量可体现土壤中可利用氮水平的高低,可直接反映其对作物的养分供给能力,是评价外源氮投入是否适宜的重要判断依据之一^[27]。本研究中,在拔节期时单一尿素处理(CU、P100F0)下表层土壤的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均较高,这表明尿素发生迅速水解;在玉米植株亟需氮素的拔节期至灌浆期阶段,包膜尿素配施有机肥处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均明显高于单一尿素处理。这表明包膜尿素配施有机肥可为玉米生长提供稳定的氮素供应,且与氮素需求较吻合,这可能是玉米干物质在发育后期含量较高的原因。

肥料的功能作用受立地土壤条件、作物类型及肥料物质组成等多因素的综合影响,最终的产量收获、养分利用效率是评价施肥适宜性的主要参考依据^[28]。本研究中,3年平均氮素利用率、产量整体以CU最低,P50F50最高,与CU处理相比,P50F50处理的NUE显著增加6.71百分点。即50%有机肥替代控释尿素处理最佳,这与于文勇等的研究结果^[29]趋于一致。这可能是因为控释型尿素的释放期仅为60 d左右,而有机肥可长期、缓慢地提高养分,因此包膜尿素配施尿素可有效满足玉米全生育期的养分需求^[30]。综上,包膜尿素与有机肥长期施用可有效改善土壤团聚体粒级组成及土壤水稳团聚体、提高玉米生长、促进根系氮代谢、延长氮素的供应周期;从提高产量与氮素利用率来看,50%有机肥替代包膜尿素处理(P50F50)可显著提升玉米产量和氮素利用率,是最佳的有机肥替代比例。

参考文献:

- [1] Kong F L, Wu Y W, Cui S L, et al. Effect of chemical fertilizer application on maize production in China over the past 15 years: a meta-analysis[J]. *Agronomy*, 2022, 12(12): 3005.
- [2] Yu X M, Li H G, Doluschitz R. Towards sustainable management of mineral fertilizers in China: an integrative analysis and review[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7028.
- [3] 郑春雨, 沙珊伊, 朱琳, 等. 基于生态和社会效益优化黑土区高产玉米氮肥施用量[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(11): 2129 - 2140.
- [4] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 283 - 293.
- [5] 严嵩旒, 石晓旭, 刘海翠, 等. 一次性施肥方式在夏玉米上的应用效果[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(21): 109 - 114.
- [6] 刘仲阳, 吴小宾, 郑福丽, 等. 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 667 - 675.
- [7] 王小军, 张智, 王春丽, 等. 不同新型包膜尿素对油菜产量、品

- 质及氮肥利用率的综合影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(6): 129 - 137.
- [8] 刘永红, 郑文涛, 张晋天, 等. 缓/控释肥研究进展及其应用[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(4): 167 - 176.
 - [9] Zou H T, Ba C A, Hou Z H, et al. How optimizing application of coated controlled-release urea affects crop yield in China[J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(2): 991 - 999.
 - [10] 庞敏晖, 李丽霞, 董淑祺, 等. 纳米材料在缓控释肥中的应用研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1708 - 1719.
 - [11] 晁赢, 付钢锋, 阎祥慧, 等. 有机肥对作物品质、土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(29): 103 - 107.
 - [12] 胡新元, 柳永强, 谢奎忠, 等. 旱区有机肥替代氮肥对多年连作土壤理化性质和马铃薯品质的影响[J]. *作物杂志*, 2023(4): 159 - 164.
 - [13] Lawrencía D, Wong S K, Low D Y S, et al. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release[J]. *Plants*, 2021, 10(2): 238.
 - [14] Yang X Y, Zhang C, Ma X L, et al. Combining organic fertilizer with controlled-release urea to reduce nitrogen leaching and promote wheat yields[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 802137.
 - [15] 宋桂云, 韩中华, 张冬梅, 等. 氮肥运筹对粮饲兼用型玉米生理特性的影响[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(1): 31 - 34, 57.
 - [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 57 - 61, 96 - 98.
 - [17] 隋鹏祥, 罗洋, 郑洪兵, 等. 长期耕作对农田黑土团聚体和有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1853 - 1861.
 - [18] Chen J, Lü S Y, Zhang Z, et al. Environmentally friendly fertilizers: a review of materials used and their effects on the environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613 - 614: 829 - 839.
 - [19] Gao Y X, Song X, Liu K X, et al. Mixture of controlled-release and conventional urea fertilizer application changed soil aggregate stability, humic acid molecular composition, and maize nitrogen uptake[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147778.
 - [20] Ji P T, Li X L, Peng Y J, et al. Effect of polyaspartic acid and different dosages of controlled-release fertilizers on nitrogen uptake, utilization, and yield of maize cultivars[J]. *Bioengineered*, 2021, 12(1): 527 - 539.
 - [21] 王岩, 王永平, 曾庆稳, 等. 不同铵硝配比供应下的辣椒根系形态、伤流组分和养分积累[J]. *四川农业大学学报*, 2023, 41(4): 602 - 608.
 - [22] 张明辉, 时曼丽. 钼与氮形态对不同氮效率冬小麦氮吸收、代谢及根系发育的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(4): 114 - 121.
 - [23] 王逸韵, 赵文栋, 孙泽强, 等. 有机肥替代对鲁西北轻度盐碱地土壤性状和小麦、玉米产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(1): 93 - 99.
 - [24] 邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 等. 有机肥施用量对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4691 - 4699.

黄人杰,王 娇,龙尚沅,等. 不同烤烟品种间碳氮代谢关键酶及其产物的差异[J]. 江苏农业科学,2024,52(5):102–107.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.05.015

不同烤烟品种间碳氮代谢关键酶及其产物的差异

黄人杰¹,王 娇¹,龙尚沅¹,熊 晶²,郜军艺²,高焕晔¹

(1. 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质研究重点实验室,贵州贵阳 550025; 2. 贵州省烟草公司毕节市公司,贵州毕节 551700)

摘要:为探究不同品种间碳、氮代谢关键酶及其主要产物间的差异和内在联系,寻找碳氮代谢适宜的后备烤烟品种,进行 4 个品种(云烟 87、云烟 105、云烟 116、云烟 121)的田间试验,观测其团棵期、旺长期、现蕾期总糖、还原糖、总氮、烟碱含量及代谢关键酶[蔗糖合成酶(SS)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)、硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)、谷氨酰胺合成酶(GS)]活性。结果表明,碳代谢方面,云烟 87 总糖含量在旺长期达到最高;云烟 105 团棵期还原糖含量最高,旺长期 SPS 活性最高,云烟 116 现蕾期总糖含量最高,SS 活性最高;云烟 121 现蕾期还原糖含量最高,团棵期和旺长期 SS 活性最高,现蕾期 SPS 活性最高。氮代谢方面,云烟 87 旺长期和现蕾期总氮含量最高,云烟 105 团棵期总氮含量最高,现蕾期烟碱含量最高,云烟 116 现蕾期总氮含量最高,团棵期 NR 和 NiR 活性最高, NiR 活性旺长期最高,云烟 121 整个生长期 GS 活性均处较高水平。相关性分析结果表明,碳代谢方面,云烟 105 和云烟 116 的 SS 活性与总糖含量呈极显著相关,云烟 87 则是 SPS 活性与总糖含量呈极显著相关。氮代谢方面,除云烟 87 和云烟 121 外,其他品种 NR 和 GS 活性与烟碱含量均存在显著相关性,云烟 121 NiR 活性与总氮和烟碱含量存在显著或极显著相关性。综合以上因素,云烟 116 生长前期氮代谢旺盛,生长后期碳代谢旺盛,相比起云烟 87 有更优质的碳氮代谢机制,可作为威宁烤烟栽培的后备品种。

关键词:烤烟;碳氮代谢;酶活性;烟叶品质;相关性分析

中图分类号:S572.04;S572.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)05–0102–06

碳氮代谢是烟株生长过程中的基础代谢,其代谢强度影响着烤烟大田生育期的物质合成、转化和分解^[1–2]。碳代谢为氮代谢提供能量和支架,氮代谢为碳代谢提供关键的酶和蛋白质^[3]。烤烟碳代

谢过程中,蔗糖合成酶(SS)和蔗糖磷酸合成酶(SPS)直接影响蔗糖的生物合成。SS 催化尿苷二磷酸葡萄糖(UDPG)与果糖合成蔗糖,属于可逆反应,SS 通过这种可逆反应维持植物体内蔗糖含量的平衡。SS 和 SPS 可以调控植株体内碳同化物的分配及流向^[4–5]。在氮代谢过程中,硝酸还原酶(NR)起着决定性的作用,是植物氮代谢的限速酶^[6]。亚硝酸还原酶能将亚硝酸盐降解为铵,使氮素能够以铵的形式参与蛋白质的合成^[7]。谷氨酰胺合成酶(GS)及其同工酶活性在植物氮素转运、分配中均有

收稿日期:2023–06–12

基金项目:贵州省烟草公司毕节市公司项目(编号:2022520500240190)。

作者简介:黄人杰(1996—),男,贵州大方人,硕士研究生,主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail:872887951@qq.com。

通信作者:高焕晔,博士,副教授,硕士生导师,主要从事烟草栽培生理生化研究。E-mail:hygao@gzu.edu.cn。

[25]张 艳,刘彦伶,李 渝,等. 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J]. 土壤通报,2021,52(6):1308–1315.

[26]Fan Z, Tian X F, Zhai S, et al. Co-application of controlled-release urea and a superabsorbent polymer to improve nitrogen and water use in maize[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(7):914–928.

[27]张 倩,韩本高,张 博,等. 控失尿素减施及不同配比对夏玉米产量及氮肥效率的影响[J]. 作物学报,2022,48(1):180–192.

[28]Jariwala H, Santos R M, Lauzon J D, et al. Controlled release fertilizers (CRFs) for climate-smart agriculture practices: a

comprehensive review on release mechanism, materials, methods of preparation, and effect on environmental parameters [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(36):53967–53995.

[29]于文勇,葛祥茜,孙娅婷,等. 有机肥与控释尿素配施对坡耕地土壤氮素淋溶及玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(12):53–60.

[30]Li Z L, Liu Z G, Zhang M, et al. The combined application of controlled-release urea and fulvic acid improved the soil nutrient supply and maize yield [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(5):633–646.