

柳雯雯,黄 鹏,张云鹤,等. 枯草芽孢杆菌与液态水溶碳肥配施对鲜食玉米生长和产量品质的提升效应[J]. 江苏农业科学,2025,53(21):243-251.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.21.030

# 枯草芽孢杆菌与液态水溶碳肥配施对鲜食玉米生长和产量品质的提升效应

柳雯雯<sup>1</sup>,黄 鹏<sup>2</sup>,张云鹤<sup>2</sup>,张洒洒<sup>1</sup>,王 琛<sup>3</sup>,郭岩彬<sup>3</sup>,焦子伟<sup>1</sup>

(1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院/新疆薰衣草资源保护与利用重点实验室,新疆伊宁 835000;

2. 河北省植物营养与生物肥料创制重点实验室,河北邢台 054000; 3. 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

**摘要:**研究液态水溶碳肥与枯草芽孢杆菌 N24 的施用对鲜食玉米生长的影响,为科学合理施肥提供技术依据。采用盆栽试验及大田试验的方法分析液态水溶碳肥和枯草芽孢杆菌 N24 配施对鲜食玉米根系、植株生长、产量及品质提升的影响。盆栽试验结果表明,T3(枯草芽孢杆菌 N24 与液态水溶碳肥配施)与 T0(常规施肥)处理相比,T3 处理的玉米叶绿素含量、根总长、根系体积、根平均直径、地上鲜重、地上干重、地下鲜重、地下干重分别增加 23.28%、11.36%、19.97%、10.39%、3.64%、5.85%、17.68%、14.55%;T3 与 T0 处理相比,T3 处理的土壤碱性磷酸酶、蔗糖酶活性分别增加 14.09%、85.07%。田间试验结果表明,T3 与 T0 处理相比,乳熟期玉米株高、叶绿素含量、鲜穗穗长、穗粗、产量、穗粒数以及籽粒蔗糖、可溶性糖、粗蛋白含量等方面起到促进作用,分别增加 8.95%、10.51%、4.38%、3.13%、16.73%、11.69%、19.93%、18.50%、16.80%。综合分析可知,枯草芽孢杆菌 N24 + 液态碳肥配施对玉米生长起到了促生作用,并提高了玉米的产量和品质。该施肥模式优于常规施肥模式,也为替代化肥或减施化肥提供了一种可行方式。

**关键词:**液态水溶碳肥;枯草芽孢杆菌;玉米产量;玉米品质;土壤酶活性

**中图分类号:**S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)21-0243-08

鲜食玉米具有口感独特、营养丰富、易于食用、生长期短、采收时间集中、种植效益高的优点<sup>[1]</sup>。农业农村部发布的《“十四五”全国种植业发展规划》提出,到 2025 年玉米播种面积扩大到 4 200 万  $\text{hm}^2$  以上,适当发展鲜食玉米,鲜食玉米面积稳定在 133 万  $\text{hm}^2$  以上,表明鲜食玉米发展前景越来越广阔<sup>[2]</sup>。植物根际促生菌(plant-growth-promoting rhizobacteria,PGPR)是能够促进植物生长的植物根际细菌的统称,其应用可以减少农药化肥的使用,有助于农业可持续发展<sup>[3]</sup>。目前,国内外已发现 20 多个具有防病促生功能的根际微生物种属,包括假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、农杆菌属(*Agrobacterium*)、欧文氏菌属

(*Erwinia*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)等<sup>[4]</sup>。其中枯草芽孢杆菌能增加土壤养分、改善土壤结构、提高化肥利用率,并能促使土壤中的有机质分解,促进作物生长,提高产量<sup>[5]</sup>。液态水溶碳肥是在高浓度乙醇废水的搅拌罐底部输浓硝酸和双氧水,并经过搅拌后获得的呈棕色且富含有机碳的液态水溶肥,是有机碳肥的一种,能够在水中快速溶解,易被植物吸收<sup>[6-7]</sup>。据报道,液体有机碳肥可以明显提高向日葵产量、改善土壤质量、优化土壤真菌群落结构等<sup>[8]</sup>。有研究表明,单施化肥表现出明显的“氮阻遏”效应,而有机肥替代化肥后具有缓解“氮阻遏”的作用,可通过提高花生根瘤固氮酶活性来保持根瘤的固氮潜力,最终使花生植株氮素吸收利用能力增强<sup>[9]</sup>。Huang 等研究表明,利用微生物发酵工业废水能够制备农业微生物肥料<sup>[10]</sup>。也有研究表明,适宜用量的生物有机肥与微生物菌剂配施可显著促进蒜苗植株生长,提高产量,增强根系活力及硝酸还原酶活性,提高蒜苗叶绿素、维生素 C、可溶性糖及大蒜素含量,降低硝酸盐含量<sup>[11]</sup>。

鲜食玉米的试验研究大多围绕品种筛选、种植密度调控、播种时期优化以及微生物肥料应用等方

收稿日期:2024-10-26

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发专项(编号:2022B02021-2);伊犁州重点研究与技术开发专项(编号:YZ2023A05);新疆维吾尔自治区“三农”骨干人才培养项目(编号:2023SNGGCCC015)。作者简介:柳雯雯(1998-),女,山东烟台人,硕士,研究方向为生物化学与分子生物学。E-mail:2833944314@qq.com。

通信作者:焦子伟,博士,教授,研究方向为微生物生态及绿色有机农业有害生物防控。E-mail:741285332@qq.com。

向展开。但在借助有机碳肥与微生物菌剂合理配施,以此促进植株茁壮生长、显著提高鲜食玉米产量和品质层面,相关研究数量相对有限,还有较大的探索空间。化肥的长期过度应用会导致土壤环境恶化,降低土壤有机碳的腐殖化程度,不利于有机碳固存<sup>[12-13]</sup>。我国化肥养分的当季作物利用率明显低于国际平均水平,严重阻碍农业绿色发展<sup>[14]</sup>。笔者所在课题组以鲜食玉米为研究对象,从其生长态势、最终产量以及品质表现等多个维度深入剖析,将枯草芽孢杆菌 N24 与液态水溶碳肥搭配使用,用以替代传统化肥的实际可行性,以期调控玉米生长和减少化肥施用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

液态水溶碳肥<sup>[7]</sup>购自福建绿洲生化有限公司,基本理化性质为 pH 值 5.8、有机碳含量 146 g/L、总氮(N)含量 22.53 g/L、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)含量 1.19 g/L、钾(K<sub>2</sub>O)含量 47.67 g/L。磷酸二铵、尿素购自伊宁市城东综合市场;盆栽、田间试验鲜食玉米种子为鲜白糯,购自新疆禾旺农业科技有限公司。

供试菌种:枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) N24<sup>[15]</sup>,保藏编号为 CCTCCNO: M2020873,为植物根际促生菌。盆栽土壤基本理化性质:pH 值 8.85、有效磷含量 24.23 mg/kg、速效氮含量 20.60 mg/kg、速效钾含量 272.51 mg/kg、全磷含量 0.91 g/kg、全氮含量 0.406 g/kg、全钾含量 11.99 g/kg、有机质含量 3.76 g/kg。

### 1.2 试验设计

1.2.1 温室试验设计 2024年6月3日于伊犁师范大学产学研示范基地设置温室盆栽试验。温室大棚内温度 15~35℃,湿度 50%~70%。按施肥等价的原则进行,设置 5 个处理,即 T0(常规施肥),尿素 0.5 g/株 + 磷酸二铵 1.0 g/盆;T1(液态水溶碳肥),50 mL/盆;T2(枯草芽孢杆菌 N24 发酵液,活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL),50 mL/盆;T3(枯草芽孢杆菌 N24,活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL + 液态水溶碳肥),50 mL/盆;CK(清水对照),50 mL/盆。每个处理重复 5 次。

T0 处理将每盆按照 0.5 g 尿素和 1.0 g 磷酸二铵的量添加,碾碎后进行拌土装盆。T1 处理以液态水溶碳肥为原料,稀释 20 倍,调节 pH 值至 7.0 使用。T2 处理以液态水溶碳肥为原料,稀释 20 倍,调

节 pH 值至 7.0,加入枯草芽孢杆菌 N24(活菌数 2 × 10<sup>6</sup> CFU/mL)发酵,待活菌数达到 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL 后使用。T3 处理将液态水溶碳肥稀释 20 倍,调节 pH 值至 7.0,不经发酵直接加入枯草芽孢杆菌 N24(活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL)配施使用。

精选饱满且规格均匀的玉米种子,先以清水冲净表面红衣,继而置于 75% 乙醇内消毒 15 s,随后放进 10% 次氯酸钠溶液中浸泡 10 min,最终用清水漂洗 3 遍。

土、沙、蛭石、珍珠岩按体积比 3:1:1:1 的比例掺匀装盆,每盆装 2 kg 的混合土。每盆播种 3 粒种子,播种深度为 1 cm 左右。

采取完全随机摆放,定期定量浇水,出苗 3 d 后进行间苗,每盆保留 1 株大小高度一致的苗。间苗后第 1 次分别按 T1、T2、T3 操作,每盆 10 mL,每隔 7 d 进行 1 次施肥,共 3 次。施肥量为田间施用量的 1/5。在幼苗生长至苗期阶段(即 30 d)时,从各个组别里挑选出长势一致的植株的同一部位,选取该部位已完全舒展的玉米,对相关指标进行测定。

1.2.2 田间试验设计 于 2024 年 4—8 月在伊宁市禾旺种业试验田布置田间试验。采用随机区组设计,重复 3 次,每个小区长 10 m、宽 5 m,总面积为 50 m<sup>2</sup>。设置 5 个处理,T0 在播种前作为基肥施入,T1、T2、T3 处理的施肥量按照与 T0 处理经济成本等价计算,T0(常规施肥):磷酸二铵 2.0 kg/hm<sup>2</sup> + 尿素 1.0 kg/hm<sup>2</sup>;T1(液态水溶碳肥),1.90 kg/hm<sup>2</sup>;T2(枯草芽孢杆菌 N24 发酵液,活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL),1.88 kg/hm<sup>2</sup>;T3(枯草芽孢杆菌 N24,活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL + 液态水溶碳肥),1.88 kg/hm<sup>2</sup>;CK 为不施肥处理。

T1 处理以液态水溶碳肥为原料,稀释 20 倍,调节 pH 值 7.0 使用。T2 处理以液态水溶碳肥为原料,稀释 20 倍,调节 pH 值 7.0,加入枯草芽孢杆菌 N24(活菌数 2 × 10<sup>6</sup> CFU/mL)发酵,待活菌数达到 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL 后使用。T3 处理将液态水溶碳肥稀释 20 倍,调节 pH 值 7.0,不经发酵,与枯草芽孢杆菌 N24(活菌数 2 × 10<sup>8</sup> CFU/mL)现配现用。

T1、T2、T3 处理分别在出苗期、拔节期、大喇叭口期进行施肥,后期追肥管理同对照处理一致。于鲜食期收获各小区中间完整的 2 行玉米,随机取样 6 株,调查株高、茎粗、叶绿素含量、穗长、穗粗、穗粒数、产量及品质。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 盆栽玉米农艺指标测定 培养 30 d 后,用

卷尺测定各处理鲜食玉米植株株高,在离土面茎高 3 cm 处用游标卡尺测茎粗。采用称重法测定玉米的鲜重和干重,将地上部与地下部分离,分别称取地上部和地下部的鲜重;将玉米幼苗在 105 ℃ 下杀青 30 min,然后在 80 ℃ 左右烘干至恒重后测定干重。用叶面积仪测量叶面积和叶长,选取玉米植株上同一空间位置叶片(向阳面主茎自上而下第 3 张功能叶),用叶绿素仪测定叶绿素含量,用根系扫描仪进行根系扫描<sup>[16]</sup>。

1.3.2 盆栽玉米土壤酶活性测定 分别用土壤蔗糖酶、脲酶、碱性蛋白酶、磷酸酶试剂盒测定土壤蔗糖酶、脲酶、碱性蛋白酶、酸性磷酸酶、中性磷酸酶、碱性磷酸酶活性。用湿筛法测定土壤团聚体含量<sup>[17]</sup>。

1.3.3 田间玉米农艺性状及产量测定 于鲜食期收获各小区中间完整的 2 行玉米,随机取样 6 株,调查株高、茎粗、叶绿素含量、穗长、穗粗、穗粒数等农艺性状<sup>[18]</sup>。在鲜食期,收获各小区中间完整的 2 行玉米,随机取样 6 株,去除苞叶后称重,计算鲜果穗产量(kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[19]</sup>。

1.3.4 田间玉米品质测定 于鲜食期收获各小区中间完整的 2 行玉米,随机取样 6 穗,籽粒杀青烘

干、粉碎过筛后检测可溶性糖、淀粉、蔗糖、粗蛋白含量。测定方法如下:籽粒中可溶性糖和淀粉含量采用蒽酮-硫酸比色法<sup>[19]</sup>测定;蔗糖含量参照张志良等<sup>[20]</sup>的方法测定;粗蛋白含量采用凯氏定氮法<sup>[21]</sup>测定。

#### 1.4 数据处理

采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,采用 Excel 2007 软件对试验数据进行统计、整理,使用 Origin 2022 对数据进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 温室试验对鲜食玉米生长的影响分析

2.1.1 对玉米农艺性状的影响 由图 1、表 1 可知,各肥料处理(T0、T1、T2、T3 处理,下同)与对照相比玉米的株高、茎粗、叶长、叶面积、叶绿素含量影响差异显著( $P < 0.05$ ,下同),对玉米生长均表现出促进作用。T0、T1、T2、T3 各处理间对玉米的株高、茎粗、叶长、叶面积影响差异不显著。在叶绿素含量方面,T3 处理与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 23.28%、7.24%、7.13%,T1 与 T2 处理间对叶绿素含量影响差异不显著,表明 T3 处理对叶绿素含量的促进作用最好。

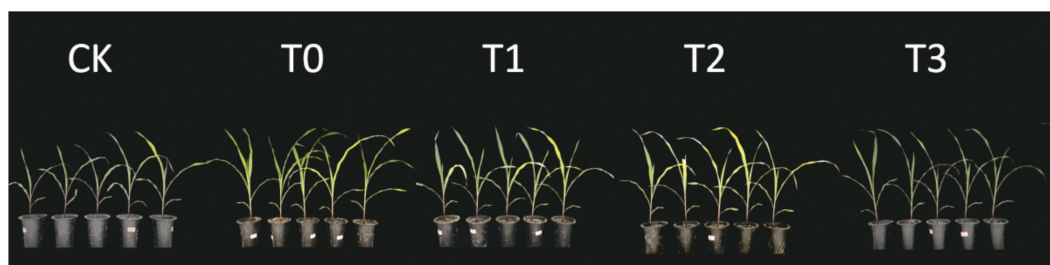


图1 不同施肥处理对苗期玉米生长的影响

表 1 不同施肥处理对苗期玉米农艺性状的影响

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶长 (mm)	叶面积 (cm <sup>2</sup> )	叶绿素含量 (SPAD 值)
CK	69.76 ± 1.54b	5.62 ± 0.31b	474.54 ± 29.21b	74.46 ± 3.38b	30.40 ± 0.57d
T0	74.90 ± 0.55a	7.32 ± 0.60a	631.18 ± 86.99a	130.42 ± 7.30a	34.62 ± 1.52c
T1	75.12 ± 0.95a	7.54 ± 0.42a	573.10 ± 30.44a	126.52 ± 8.86a	39.80 ± 1.79b
T2	75.84 ± 0.51a	7.46 ± 0.32a	583.00 ± 43.71a	136.20 ± 7.85a	39.84 ± 1.83b
T3	76.26 ± 1.49a	7.04 ± 0.40a	616.66 ± 44.86a	141.40 ± 4.61a	42.68 ± 1.43a

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( $P < 0.05$ )。下表同。

2.1.2 对玉米根系的影响 由图 2、图 3 可知,各施肥处理与对照相比对玉米根系的根总长、根表面积、根系体积影响差异显著。在根总长方面,T2、T3 与 T0 处理差异显著,分别增加 14.65%、11.36%,T1

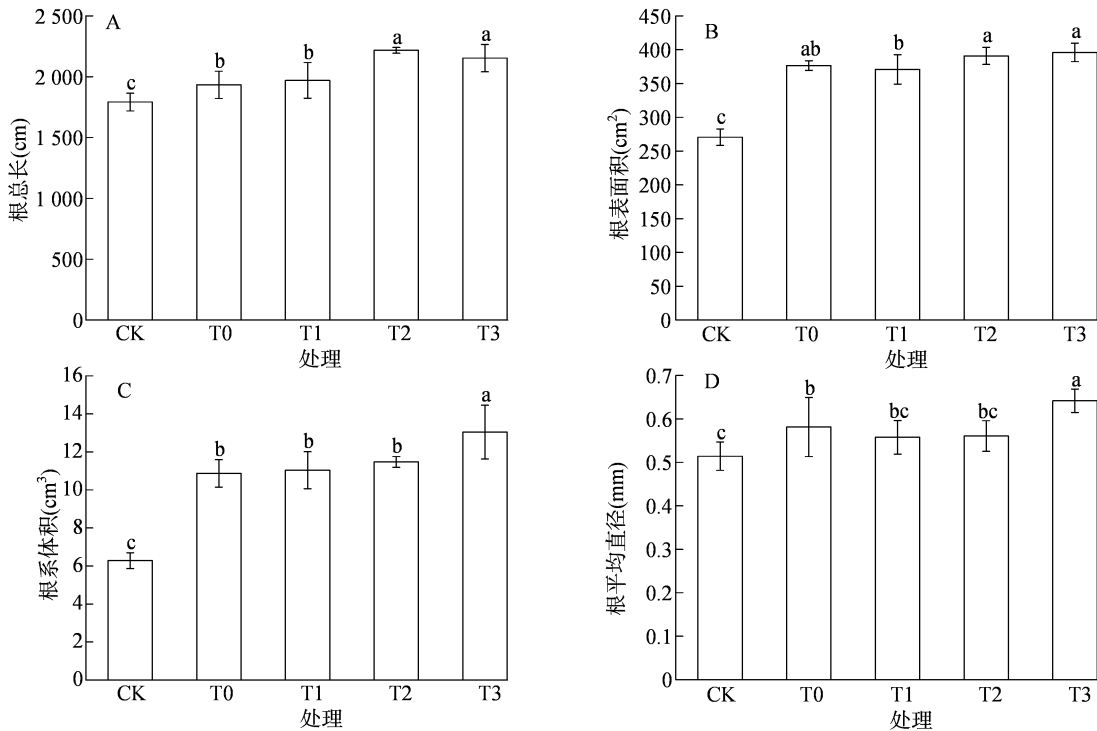
与 T0 处理间对根总长的影响差异不显著,表明 T2、T3 处理对根总长的促进作用最大(图 3 - A);在根表面积方面,T2、T3 与 T1 处理差异显著,较 T1 处理分别提高 5.39%、6.80%,T0 与 T1 处理对根表面积

的影响差异不显著,表明 T2、T3 对根表面积促进作用最好(图 3 - B);在根系体积方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别增加 19.97%、18.17%、13.69%,T1、T2 与 T0 处理间对根系体积影响差异不显著,表明 T3 处理对根系体积促进作用最好(图

3 - C)。根平均直径方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别增加 10.39%、15.06%、14.46%,T1、T2 与 T0 处理间对根平均直径影响差异不显著,表明 T3 处理对根系直径促进作用最好(图 3 - D)。



图2 不同肥料处理对玉米形态的影响



同一指标不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著(P<0.05)。图 4、图 5 同

图3 不同肥料处理对苗期玉米根系生长的影响

2.1.3 对玉米生物量的影响 由图 4 可知,各肥料处理与对照相比对玉米生物量(地上鲜重、地上干重、地下鲜重、地下干重)均影响显著,表现为促进作用。在鲜重方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别增加 3.64%、3.21%、3.22%,T1、T2 与 T0 处理间对地上鲜重的影响差异不显著,表明 T3 处理对玉米地上鲜重增加最大(图 4 - A);在干重方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别增加 5.85%、6.87%、6.53%,T0、T1、T2 处理间对地上干

重的影响差异不显著,表明 T3 处理对温室玉米地上干重增加最大(图 4 - B);在地下鲜重方面,T2、T3 与 T0 处理差异显著,分别增加 17.04%、17.68%,T1 与 T0 处理间对地下鲜重的影响差异不显著,表明 T2、T3 处理对温室玉米地下鲜重增加最大(图 4 - C);在地下干重方面,T3 与 T0、T1 处理间差异显著,分别增加 14.55%、13.06%,T2 与 T0、T1 处理间对地下干重的影响差异不显著,表明 T3 处理对地下干重增加最大(图 4 - D)。

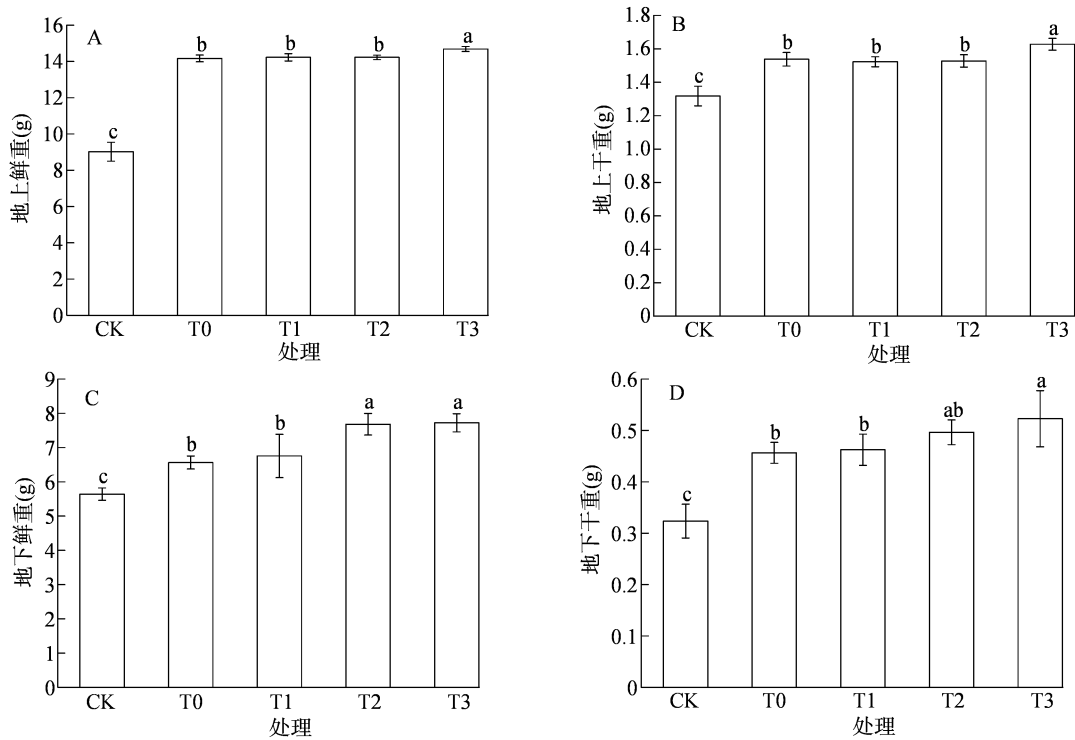


图4 不同施肥处理对苗期玉米生物量的影响

2.1.4 对玉米土壤酶活性及团聚体的影响 如表 2 所示,在蛋白酶活性方面,T0、T3 与 T2 处理差异显著,分别提高 39.39%、40.66%。T0、T1、T3 处理间差异不显著,表明 T0、T3 处理能够更好地提高蛋白酶活性;在酸性磷酸酶活性方面,T0、T2、T3 与 T1 处理间差异显著,分别提高 34.21%、36.84%、42.43%,表明 T0、T2、T3 处理能更好地提高酸性磷酸酶活性;在中性磷酸酶活性方面,各处理间差异不显著;在碱性磷酸酶活性方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 14.09%、37.53%、26.77%,表明 T3 能更好地提高碱性磷酸酶活性;在脲酶活

性方面,T0、T3 与 T1 处理对脲酶活性影响差异显著,分别提高 19.04%、16.91%,表明 T0、T3 处理能更好地提高脲酶活性,促进土壤氮循环;在蔗糖酶活性方面,T3 与 T0、T2 处理差异显著,分别提高 85.07%、93.29%,T1、T3 处理对蔗糖酶活性的差异不显著,表明 T1、T3 处理能更好地提高蔗糖酶活性;在水稳性大团聚体方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 32.89%、28.34%、7.63%,表明 T3 处理能增加水稳性大团聚体比例,能更好地改善土壤物理结构。

表 2 不同肥料处理对苗期玉米土壤酶活性及团聚体的影响

处理	蛋白酶活性 [mg/(d·g)]	酸性磷酸酶活性 [μmol/(d·g)]	中性磷酸酶活性 [μmol/(d·g)]	碱性磷酸酶活性 [μmol/(d·g)]	脲酶活性 [μg/(d·g)]	蔗糖酶活性 [mg/(d·g)]	水稳性大团聚体 (%)
CK	3.87 ± 0.24b	2.93 ± 0.38b	0.94 ± 0.21a	3.65 ± 0.39c	619.91 ± 51.24c	19.66 ± 0.29b	16.24 ± 0.25c
T0	5.45 ± 1.33a	4.08 ± 0.66a	1.12 ± 0.15a	4.40 ± 0.09b	885.80 ± 22.02a	22.11 ± 1.47b	15.81 ± 0.16c
T1	4.05 ± 1.07ab	3.04 ± 0.51b	0.90 ± 0.16a	3.65 ± 0.21c	744.13 ± 13.28b	35.98 ± 7.62a	16.37 ± 0.13c
T2	3.91 ± 0.15b	4.16 ± 0.41a	1.09 ± 0.27a	3.96 ± 0.54bc	836.46 ± 91.94ab	21.17 ± 1.92b	19.52 ± 0.55b
T3	5.50 ± 0.09a	4.33 ± 0.75a	1.22 ± 0.09a	5.02 ± 0.28a	869.99 ± 85.83a	40.92 ± 5.08a	21.01 ± 0.52a

## 2.2 田间试验对鲜食玉米生长、产量和品质的影响分析

2.2.1 对玉米生长的影响 由图 5 可知,各施肥处理与对照相比对乳熟期玉米株高、叶绿素含量影响差异显著。在株高方面,T3 与 T0、T1 处理差异显

著,分别提高 8.95%、6.22%,T2 与 T0、T1 处理间差异显著,分别提高 7.24%、4.55%,表明 T2、T3 处理能更好地提高玉米株高(图 5 - A);在茎粗方面,T0、T1、T3 处理与对照相比差异显著,分别提高 4.99%、4.57%、5.48%,T1、T2、T3 处理与 T0 处理

差异不显著,表明 T0、T1、T3 处理能够较好地提高玉米茎粗(图 5 - B);在叶绿素含量方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 10.51%、6.58%、

7.38%,表明 T3 处理能更好地提高玉米叶绿素含量(图 5 - C)。

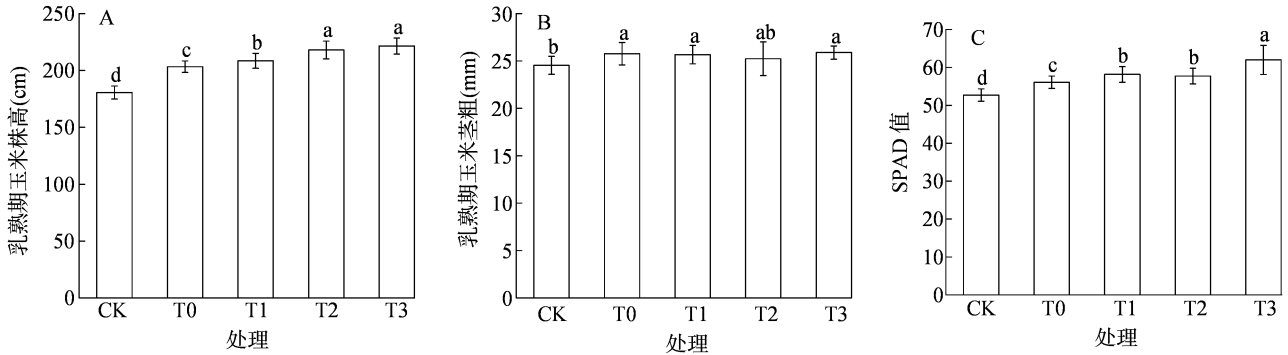


图5 不同肥料处理对乳熟期玉米植株生长的影响

2.2.2 对玉米产量的影响 由图 6、表 3 可知,各肥料处理与对照相比均显著提高穗长、穗粗、产量。在穗长、穗粗、穗粒数方面,T3 与 T0 处理差异显著,分别提高了 4.38%、3.13%、11.69%,T1、T2 与 T0

处理差异不显著;在穗数方面,各处理间差异不显著。在产量方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 16.73%、6.38%、8.41%,整体来说,T3 处理对玉米产量及其构成的影响效果最好。

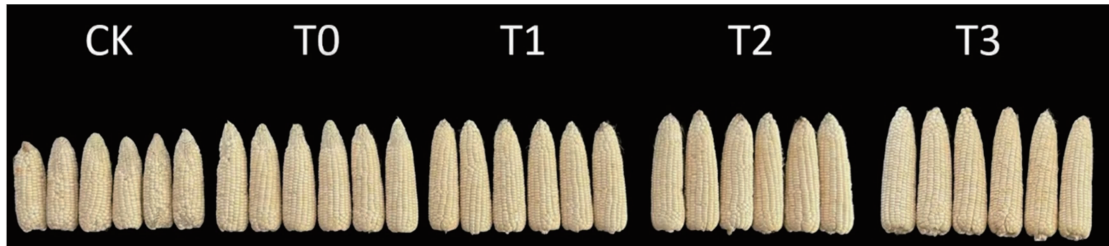


图6 不同肥料处理对田间玉米生长的影响

表 3 不同肥料处理对玉米产量的影响

处理	穗长 (cm)	穗粗 (mm)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	穗数 (穗/m <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)
CK	16.46 ± 1.12c	50.16 ± 2.17c	21 614.10 ± 1 466.40d	9.56 ± 0.38a	509.56 ± 67.39c
T0	18.96 ± 0.95b	51.51 ± 1.15b	25 249.65 ± 1 624.65c	9.67 ± 0.33a	531.83 ± 70.26bc
T1	19.14 ± 0.82ab	51.28 ± 1.07b	27 705.45 ± 1 058.55b	9.78 ± 0.19a	572.28 ± 75.66ab
T2	19.28 ± 1.08ab	52.27 ± 1.64ab	27 186.90 ± 1 497.75b	9.78 ± 0.19a	568.00 ± 93.52ab
T3	19.79 ± 0.86a	53.12 ± 1.23a	29 474.25 ± 1 276.20a	9.89 ± 0.19a	594.00 ± 67.41a

2.2.3 对玉米品质的影响 由表 4 可知,T1、T2、T3 处理可溶性糖、蔗糖含量与对照相比对均有显著差异,具有促进作用。在可溶性糖方面,T1、T2、T3 与 T0 处理差异显著,分别提高 7.00%、17.34%、18.50%,以 T2、T3 处理效果最为显著。在直链淀粉含量方面,T2 与 T0、T1、T3 处理差异显著,分别提高 383.56%、387.11%、19.44%,以 T2 处理效果最为显著。在粗蛋白含量方面,T3 与 T0 处理差异显著,提高 16.80%;T1、T2 与 T3 处理无显著性差异。在蔗糖含量方面,T3 与 T0、T1、T2 处理差异显著,分别提高 19.93%、19.26%、23.02%,以 T3 处理促进

效果最为显著。

### 3 讨论

#### 3.1 对鲜食玉米生长的影响

已有研究报道液体有机肥能显著减少干旱胁迫对玉米和小麦生物量造成的损失,并促进玉米和小麦的根系发育<sup>[22]</sup>。单施无机肥或无机肥配施水溶性生物有机肥,都可以显著提高生菜的株高、最大叶面积、单株鲜重、SPAD 值和产量<sup>[23]</sup>。也有研究表明枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌能够产生生长素,促进番茄生长,并在根际定植和持续存在<sup>[24]</sup>。

表 4 不同肥料处理对玉米品质的影响

处理	可溶性糖含量 (mg/g)	直链淀粉含量 (mg/g)	粗蛋白含量 (mg/g)	蔗糖含量 (mg/g)
CK	172.76 ± 0.94c	111.55 ± 0.86c	89.69 ± 2.92b	31.03 ± 0.92c
T0	172.84 ± 1.49c	104.13 ± 10.62c	94.30 ± 10.76b	37.38 ± 0.25b
T1	184.94 ± 5.39b	103.37 ± 1.91c	97.25 ± 1.98ab	37.59 ± 0.14b
T2	202.81 ± 5.85a	503.53 ± 9.05a	98.58 ± 13.20ab	36.44 ± 0.49b
T3	204.82 ± 4.46a	421.57 ± 30.15b	110.14 ± 2.70a	44.83 ± 0.89a

PSWY(解磷生物肥)能够显著增加土壤有效磷含量,促进辣椒根系发育,增加地上部干重,大幅提高产量,同时减少农业面源污染<sup>[25]</sup>。本研究也有类似结果,即 T0(常规施肥)、T1(液态水溶碳肥)、T2(枯草芽孢杆菌 N24 发酵液)、T3(枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥)处理与对照相比均能够对鲜食玉米苗期的株高、茎粗、叶长、叶面积、叶绿素含量,根系的总根长、根表面积、根系体积,玉米生物量以及乳熟期玉米株高、茎粗、叶绿素含量等方面起到促进作用。与 T0 相比,T3 处理的玉米乳熟期株高、叶绿素含量、苗期根系生长指标、生物量等方面表现较好,表明枯草芽孢杆菌 N24 与适宜浓度的液态水溶碳肥配合使用有助于玉米农艺性状表现,其配施效果优于常规施肥。也在玉米生长相关指标如叶绿素含量、生物量等方面高于单施液态水溶碳肥或单施枯草芽孢杆菌 N24 发酵液处理。

### 3.2 对鲜食玉米土壤酶活性及团聚体的影响

据报道,有机肥配施生物菌肥处理明显提高了黄瓜土壤中的速效养分和酶活性,最大增幅分别达 22.80% 和 43.88%<sup>[26]</sup>。也有研究表明,与施用全量化肥处理相比,施用有机肥或者生物有机肥可以提升土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性,增幅分别为 0 ~ 107.01%、0 ~ 94.44%、2.74% ~ 100.00%<sup>[14]</sup>。这是由于有机物料的长期投入提高了土壤腐殖质的含量,不仅增加土壤微生物的碳源,促进微生物繁殖,还显著增加土壤酶的保护性位点,进一步刺激酶活性提高<sup>[14]</sup>。施用有机肥可以提升土壤大团聚体的比例,增强土壤团聚体的稳定性,维持较好的土壤物理结构<sup>[14]</sup>。本研究表明,T3 处理能很好地提高蛋白酶、蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶的活性,T3 与 T0 处理相比在蔗糖酶、碱性磷酸酶活性方面表现较好;T3 处理增加了水稳性大团聚体比例,更好地改善土壤物理结构。这表明枯草芽孢杆菌 N24 与适宜浓度的液态水溶碳肥配合使用有助于提高

土壤酶活性(蛋白酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、脲酶),且蔗糖酶、碱性磷酸酶活性方面其配施效果优于常规施肥。

### 3.3 对鲜食玉米产量的影响

对 1991—2020 年间公开发表的田间肥效试验文献进行综合分析后发现,高达 91% 的研究成果都证实微生物肥料可有效提升玉米产量,整体增产幅度处于 1.3% ~ 39.7% 区间<sup>[27]</sup>。也有相关报道表明,在玉米受到逆境胁迫时的增产效应更明显,选择有芽孢杆菌或木霉菌复合菌剂的微生物肥料,适当提高玉米种植密度,可充分挖掘微生物肥料的增产潜力<sup>[28]</sup>。本研究表明,T1(液态水溶碳肥)、T2(枯草芽孢杆菌 N24 发酵液)、T3(枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥)处理能显著提高玉米的产量,T3 处理的增产效应最大,为 36.36%。其增产原因一是菌肥中的有益微生物可分解释放土壤中被固定的养分供作物吸收利用,如解磷微生物分泌出的有机酸可以降低土壤 pH 值,提高 P、Ca、Fe、Mn 等矿物元素的有效利用率<sup>[21]</sup>;二是液态水溶碳肥中富含有机碳,提高了土壤肥力,从而提高玉米产量。

### 3.4 对鲜食玉米品质的影响

鲜食玉米以销售鲜穗为主要目的,在追求高产的同时,营养、品质同样重要<sup>[18]</sup>。据报道,颗粒结合淀粉合成酶与直链淀粉的合成有关<sup>[29]</sup>。在医疗方面,高直链淀粉的抗消化性强,不会引起餐后血糖水平的快速升高,可用来制备糖尿病患者的专用食品<sup>[30]</sup>。也有研究表明,施用生物有机肥和微生物菌剂可改善土壤肥力和土壤微生物群落结构,增加土壤养分有效供给,显著促进茶菊生长,提高产量、改善品质<sup>[31]</sup>。本研究有类似结果,即 T1(液态水溶碳肥)、T2(枯草芽孢杆菌 N24 发酵液)、T3(枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥)处理均显著影响玉米品质,T3 处理的效果最佳,能显著提高玉米可溶性糖、

蔗糖、直链淀粉及粗蛋白含量。氮素穗肥的施用会显著改变杂交稻灌浆期籽粒 GBSS(颗粒结合淀粉合成酶)、SSS(可溶性淀粉合成酶)、ADPG(ADPG 焦磷酸化酶)、SBE(淀粉分支酶)、DBE(淀粉脱分支酶)的活性,进而调控直链淀粉的合成<sup>[32]</sup>。ZmSUS1 通过调节蔗糖代谢、提高可溶性糖含量来提高玉米的耐旱性,并赋予转基因玉米较高的相对含水量和光合作用水平<sup>[33]</sup>。除草剂、安全剂或其他杀虫剂的应用破坏了植物的生化途径,有可能改变与食用作物相关的营养质量、味道和整体植物健康<sup>[34]</sup>。因此,未来可进一步探究其抗逆、生防等效果,从而提高其应用价值。

#### 4 结论

常规施肥、液态水溶碳肥、枯草芽孢杆菌 N24 发酵液、枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥处理均能促进鲜食玉米的植株生长,提高土壤的酶活性,增加鲜食玉米产量和提高籽粒的品质;枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥处理的效果最好。“枯草芽孢杆菌 N24 + 液态水溶碳肥”施肥模式优于常规施肥模式,具有良好的应用前景,有望成为一种替代或减量施用化肥的模式。

#### 参考文献:

- [1]倪雪梅,胡玉兰,谈 聪,等. 南方鲜食玉米秸秆营养品质评价[J]. 中国饲料,2024(21):168-174.
- [2]石子建,唐 鹏,许竹激,等. 化肥减量配施有机肥对鲜食玉米产量品质和土壤理化性质的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(5):77-82.
- [3]李笑淳,宋 凯,陈 博,等. 植物根际促生菌:作用机制与未来[J]. 激光生物学报,2024,33(3):193-200.
- [4]贺文婧,陆旭桐,蒋毅宁,等. 植物根际促生菌研究文献计量分析[J]. 土壤通报,2023,54(4):978-988.
- [5]李荣发,刘 鹏,董树亭,等. 肥料配施枯草芽孢杆菌对夏玉米产量及养分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(9):1607-1614.
- [6]李俊鹏,陈日远,刘厚诚,等. 有机碳肥对叶用莴苣生长品质及碳氮代谢酶活性的影响[J]. 中国蔬菜,2023(1):98-103.
- [7]朱昌雄,李瑞波,吴少全. 一种用高浓度有机废水生产液态水溶碳肥的方法:CN102757262A[P]. 2012-10-31.
- [8]Li H Y,Luo N Y, Ji C L, et al. Liquid organic fertilizer amendment alters rhizosphere microbial community structure and co-occurrence patterns and improves sunflower yield under salinity-alkalinity stress[J]. Microbial Ecology,2022,84(2):423-438.
- [9]张勇勇,冯良山,赵凤艳. 化肥有机替代对连作花生产量和根瘤固氮的影响[J]. 农业资源与环境学报,2024,41(3):539-548.
- [10]Huang J F,Zhuo Y Z,Lu J Q, et al. *Bacillus cereus* liquid fertilizer was produced from *Agaricus bisporus* industrial wastewater[J]. Journal of Biotechnology,2021,327:74-85.
- [11]王立辉,何志学,李 静,等. 生物有机肥配施微生物菌剂对蒜苗生长、生理、产量及品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(5):63-70.
- [12]宋红梅,吴昕阳,石馨晔,等. 长期施肥对黄土旱塬麦田土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 应用与环境生物学报,2024,30(4):726-734.
- [13]Hui K L, Xi B D, Tan W B, et al. Long-term application of nitrogen fertilizer alters the properties of dissolved soil organic matter and increases the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Research,2022,215:114267.
- [14]李其胜,杨 凯,蒋伟勤,等. 有机(类)肥料对作物产量、土壤养分及土壤微生物多样性的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(8):1772-1783.
- [15]郭岩彬,张云鸽,王秀艳,等. 枯草芽孢杆菌 N24 及其应用:202110394139[P]. 2022-05-27.
- [16]龚牙会,杨 敏,林 萍,等. 播期对不同海拔地区带状间作大豆茎叶生长和产量的影响[J]. 中国农业大学学报,2024,29(10):187-198.
- [17]张思培,伊 森,王建国,等. 小麦-玉米||花生周年轮作对土壤理化性状和有机碳的影响[J]. 中国油料作物学报,2024,46(3):554-564.
- [18]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.
- [19]姚霄宇,邱 纹,陆德华,等. 种植密度和施肥方式对春播鲜食糯玉米产量、品质及氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(12):2258-2271.
- [20]张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003:128-129.
- [21]陈 龙,姚 拓,柴 强,等. 微生物肥料替代部分化学肥料对玉米生长及品质的影响[J]. 草原与草坪,2016,36(1):20-25.
- [22]贾南豫,朱水英,蒋 栋,等. 施用液体有机肥对干旱胁迫下玉米和小麦生长及根际微生物的影响[J]. 南京农业大学学报,2025,48(5):1060-1069.
- [23]任宇泽,申丽霞,刘淑慧,等. 滴灌无机肥配施水溶性有机肥对大棚生菜产量和品质的影响[J]. 节水灌溉,2024(9):96-103.
- [24]de O Nunes P S, de Medeiros F H V, de Oliveira T S, et al. *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis* promote tomato growth[J]. Brazilian Journal of Microbiology,2023,54(1):397-406.
- [25]吴红艳,于 森,冯 健,等. 解磷生物肥对温室土壤磷有效性及辣椒产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(10):189-197.
- [26]金 珊,刘 雪,陈卓阜,等. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报,2023,42(9):1995-2003.
- [27]李可可,陈 腊,米国华,等. 微生物肥料在玉米上的应用研究

苏嘉颖,余 淋,侯建霞,等. 减氮和控释肥替代对巢湖流域直播稻产量和环境效益的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(21):251-257.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.21.031

## 减氮和控释肥替代对巢湖流域直播稻产量和环境效益的影响

苏嘉颖<sup>1</sup>, 余 淋<sup>2</sup>, 侯建霞<sup>2</sup>, 陈 勇<sup>3</sup>, 陈 骏<sup>3</sup>, 李慧敏<sup>3</sup>, 熊启中<sup>4</sup>, 李增源<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学国家农业绿色发展研究院/资源与环境学院营养素利用与管理国家重点实验室,北京 100083;  
2. 西南大学资源环境学院,重庆 400716; 3. 中盐安徽红四方股份有限公司绿色智能复合肥研究院,安徽合肥 230001;  
4. 农田生态保育与养分资源高效利用安徽省重点实验室/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心/  
自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室/安徽农业大学资源与环境学院,安徽合肥 230036)

**摘要:**为探究巢湖流域保护区内减氮增效潜力,在安徽巢湖中埠设置对照(CK,不施氮)、农户常规(N100,水稻配方肥,氮肥用量 263 kg/hm<sup>2</sup>)、农户常规减氮 25%(N75,水稻配方肥,氮肥用量 210 kg/hm<sup>2</sup>)、农户常规减氮 50%(N50,水稻配方肥,氮肥用量 156 kg/hm<sup>2</sup>)、农户常规减氮 50%施用控释肥(K50,增效控释肥,氮肥用量 156 kg/hm<sup>2</sup>)共 5 个处理开展田间试验,研究减氮+产品的综合技术组合模式对直播稻产量、氮素利用率和环境成本的影响。结果表明,控释肥对巢湖流域直播稻减氮增效有显著积极影响,与 N100 处理相比,N75 处理及 N50 处理可以实现稳产,且环境成本分别降低 30.67% 和 32.67%,但依靠减氮+产品的技术组合方案 K50 处理则在保持稳产和较高氮素利用率的情况下,可大幅降低施肥带来的环境成本 40.80%。综上,为实现巢湖地区水稻绿色减排,宜推广应用减氮 50%施用控释肥的减氮+产品的综合技术组合模式 K50 处理。

**关键词:**直播稻;控释肥;氮肥减量;干物质积累量;氮素利用效率;环境成本

**中图分类号:**S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)21-0251-07

氮素是影响水稻生长发育及产量形成的主要因素,其管理策略直接关系到农业生产的可持续性与环境健康<sup>[1-2]</sup>。但在实际生产中,农户为追求高产而大量施肥的现象屡见不鲜,不仅造成养分供应

失衡和利用率低,还给流域环境带来污染<sup>[3]</sup>。巢湖流域作为我国重要的五大淡水湖之一,长期受到环境污染的影响,其中农业氮素污染占流域污染的比例高达 52.5%<sup>[4]</sup>。王雪蕾等通过 DPERS 模型情景分析发现,如果巢湖流域农田施肥量减少 30%,总氮和总磷产生量能分别减少 43% 和 30%<sup>[5]</sup>。因此,安徽省合肥市于 2023 年颁布了巢湖流域化肥减量政策,在保证粮食不减产的情况下,一级保护区内的所有耕地氮肥用量需控制在 210 kg/hm<sup>2</sup> 以下,该政策给巢湖流域水稻减肥增效带来了经济和环境

收稿日期:2024-10-29

基金项目:绿色智能复合肥研究院人员培训服务与巢湖养分管理政策研究项目。

作者简介:苏嘉颖(2000—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事新型肥料研究。E-mail:sujiayingzz@outlook.com。

通信作者:李增源,博士研究生,主要从事养分资源管理及绿色智能肥料产品研究。E-mail:514851596@qq.com。

进展[J]. 玉米科学,2021,29(3):111-122.

[28] 甘元炜,冯小杰,李永华,等. 施用微生物肥料对我国玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(12):2247-2257.

[29] 彭估松,郑志仁,刘 涤,等. 淀粉的生物合成及其关键酶[J]. 植物生理学通讯,1997,33(4):297-303.

[30] 黄承刚,李津源,徐任园,等. 直链淀粉含量对淀粉-脂肪酸复合物形成及理化特性的影响[J]. 食品工业科技,2022,43(13):49-55.

[31] 王艳平,李 萍,吴文强,等. 生物有机肥和微生物菌剂对北京山区连作茶菊生长及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料,

2023(12):107-113.

[32] 吴子牛,何丽梅,熊 莹,等. 氮素穗肥对杂交水稻籽粒灌浆影响及其与淀粉合成关键酶活性间关系[J]. 中国水稻科学,2024,38(1):48-56.

[33] Xiao N, Ma H Z, Wang W X, et al. Overexpression of ZmSUS1 increased drought resistance of maize (*Zea mays* L.) by regulating sucrose metabolism and soluble sugar content[J]. *Planta*,2024,259(2):43.

[34] Cutulle M A, Armel G R, Kopsell D A, et al. Several pesticides influence the nutritional content of sweet corn[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*,2018,66(12):3086-3092.