

基质混拌控释肥对烟苗生理特性及成苗素质的影响

王利花¹, 柴祯阳¹, 王 陆¹, 程浩然¹, 唐兴贵², 罗明全², 刘晓昂², 莫泽刚², 朱英华^{1*}

1. 安徽农业大学农学院, 安徽 合肥 230036

2. 贵州省烟草公司黔南州公司, 贵州 都匀 558000

摘 要: 为明确基质混拌控释肥在烟草集约化育苗中的可行性, 实现施肥工序轻简化, 本研究以云烟87为试验材料, 以育苗常规施肥为对照(CK), 设置5个基质混拌控释肥用量: T1(23 g/盘)、T2(46 g/盘)、T3(69 g/盘)、T4(92 g/盘)和T5(115 g/盘), 测定了烟苗的光合特性、渗透性调节物质和碳氮代谢等指标。结果表明: 控释肥处理的育苗水电导率均显著低于CK, T2处理的出苗率和成苗率与CK差异不显著, 均显著高于T3-T5处理, 有效保障了出苗和成苗质量。T2处理较CK显著降低了烟苗的丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量, 维持了细胞稳定; 显著提高净光合速率(P_n)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)和蔗糖合成酶(SS)活性, 促进了烟苗可溶性糖含量、干物质积累量、壮苗指数的显著提高和移栽后烟苗的早生快发。T1处理的叶绿素总含量、 P_n 、最大光量子效率(F_v/F_m)、硝酸还原酶(NR)、SS和SPS显著低于CK, 降幅分别为7.37%、17.49%、3.84%、27.47%、13.37%和14.89%, 从而导致烟苗的可溶性糖和可溶性蛋白含量显著降低, 降幅为32.44%和11.17%, 最终显著降低了烟苗的干物质积累量、壮苗指数和成苗率。T4、T5处理的光化学猝灭系数(q_P)和电子传递速率(ETR)显著低于CK, 而Pro含量显著提高, 引发烟苗光系统和细胞膜损伤, 进而降低光合性能及碳氮同化能力。由主成分分析和隶属函数综合评价得出烟苗素质由高到低的顺序为T2>T3>CK>T4>T1>T5。综上可知, 采用一次性基质混拌均衡型控释肥(N-P₂O₅-K₂O=14:14:14), 在适宜用量(46 g/盘)下, 可通过优化烟苗光合性能、细胞渗透调节与碳氮代谢来培育壮苗, 在保证养分供应的情况下实现了施肥工序的轻简化。

关键词: 烟草; 控释肥; 光合特性; 渗透调节物质; 碳氮代谢

中图法分类号: S572

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)05-0817-11

Effects of Substrate-mixed Controlled-release Fertilizer on Physiological Characteristics and Tobacco Seedling Quality

WANG Li-hua¹, CHAI Zhen-yang¹, WANG Lu¹, CHENG Hao-ran¹,
TANG Xing-gui², LUO Ming-quan², LIU Xiao-ang², MO Ze-gang², ZHU Ying-hua^{1*}

1. College of Agronomy/Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Guizhou Tobacco Company Qiannan Prefecture Company, Duyun 558000, China

Abstract: To evaluate the feasibility of substrate-mixed controlled-release fertilizers (CRF) in the intensive tobacco seedling cultivation and to simplify the fertilization process, this study uses Yunyan 87 as the test material. It sets conventional seedling fertilization as the control (CK), and applies five gradient levels of substrate-mixed controlled-release fertilizer: T1 (23 g/tray), T2 (46 g/tray), T3 (69 g/tray), T4 (92 g/tray), and T5 (115 g/tray). It also measures various indicators such as photosynthetic characteristics, osmotic adjustment substances, and carbon-nitrogen metabolism. The results show that the electrical conductivity of the seedling water in all CRF treatments is significantly lower than that of CK. The emergence rate and seedling formation rate of the T2 treatment show no significant difference from CK, but they are significantly higher than those in the T3–T5 treatments, effectively ensuring the quality of emergence and seedling growth. Compared with CK, the T2 treatment significantly reduces the malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) content in tobacco seedlings, maintaining cellular stability; it also significantly increases the net photosynthetic rate (P_n), sucrose phosphate synthase (SPS) and sucrose synthase (SS) activity, promoting a significant increase in the soluble sugar content, dry matter accumulation, and strong seedling index, as well as early growth and rapid development after transplantation. The T1 treatment has significantly lower total chlorophyll content, P_n , maximum photochemical efficiency of PS II (F_v/F_m), nitrate reductase (NR), SS, and SPS compared to the CK, with reductions of 7.37%, 17.49%, 3.84%, 27.47%, 13.37% and 14.89%, respectively. This leads to significant decreases in soluble sugar and soluble protein contents in tobacco seedlings, by 32.44% and

收稿日期: 2025-11-11

修回日期: 2026-09-14

基金项目: 黔南州科技计划项目(黔南科合[2024]09号); 贵州省烟草公司黔南州公司科技项目(2024-522700-2-7-0160)

第1作者简介: 王利花(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 烟草栽培技术。E-mail: 399952329@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: zhuyinghua1973@126.com

11.17%, respectively, ultimately significantly reducing dry matter accumulation, strong seedling index, and seedling formation rate. The T4 and T5 treatments have significantly lower photochemical quenching coefficient (qP) and electron transport rate (ETR) than those in CK, while the proline content is significantly elevated, causing damage to the tobacco seedling photosystem and cell membrane, thereby reducing photosynthetic performance and carbon-nitrogen assimilation capacity. Based on principal component analysis and membership function evaluation, the ranking of seedling quality from highest to lowest is T2>T3>CK>T4>T1>T5. In conclusion, strong seedlings are cultivated by optimizing the photosynthetic performance, cell osmosis regulation, and carbon and nitrogen metabolism of tobacco seedlings with one-time fertilization of CRF (46 g/tray, N-P₂O₅-K₂O=14:14:14), achieving simplification of the fertilization process while ensuring nutrient supply.

Keywords: Tobacco; controlled release fertilizer; photosynthetic characteristics; osmotic adjustment substances; carbon-nitrogen metabolism

培育高素质烟苗是实现烤烟优质适产的先决条件^[1],为规避速效肥前期烧苗、后期脱肥风险,烟草育苗普遍采取多次配施营养液和分期追肥的方式^[2]。漂浮育苗存在烟苗素质差、根系活力低、抗逆性差等问题^[3],而湿润育苗^[3]、三段式育苗^[4]及潮汐育苗^[5]等新型育苗方式可显著提升成苗素质,但营养液供肥易因水分变化导致养分浓度骤变、灌溉频次增多等养分管理问题^[5,6]。因此,探索满足多种育苗方式的基质一次性混拌控释肥,可打破新型育苗方式养分供应的瓶颈,减少施肥次数,降低劳动力和育苗成本。控释肥是通过包膜技术精准调控养分释放的高效环保新型肥料,施用控释肥提高了玉米^[7]、苗木^[8]、蔬菜^[9]的出苗率和甜椒幼苗的壮苗指数^[10],促进了一串红幼苗栽后的早生快发^[11]。作物的生长发育是光合作用与氮碳代谢协同驱动的整合过程^[12,13]。一次性基施控释肥较常规分次施肥可显著提高设施番茄的光合速率、降低叶片丙二醛积累量^[14],改善光系统Ⅱ性能^[15],延缓叶片衰老、提高叶片高光合持续期,促进光合产物积累。一次性基施控释肥还可提高生菜的光合速率、降低叶片丙二醛积累量^[14],改善光系统Ⅱ性能^[15],延缓叶片衰老、提高叶片高光合持续期,促进光合产物积累。一次性基施控释肥还可提高生菜的光合速率、降低叶片丙二醛积累量^[14],改善光系统Ⅱ性能^[15],延缓叶片衰老、提高叶片高光合持续期,促进光合产物积累。一次性基施控释肥还可提高生菜的光合速率、降低叶片丙二醛积累量^[14],改善光系统Ⅱ性能^[15],延缓叶片衰老、提高叶片高光合持续期,促进光合产物积累。这些研究为基质一次性混拌控释肥在烟草育苗中的应用提供了理论参考与实践依据。然而控释肥的释放周期和施用量在不同作物育苗中存在颇多争议^[18,19],且在烟草育苗中的研究结果也不尽相同。刘文涛^[20]等研究表明4个月的控释肥处理(N-0.06 g/株)显著提高出苗率,而刘成林^[21]等则发现3个月不同用量控释肥处理出苗率均低于50%,6个月的控释肥处理(N-0.003 g/株)出苗率高于90%。此外,前人研究主要集中在产量与品质,从形成壮苗的光合产物来源及碳氮代谢方面的研究较少。本研究采用一次性基质混拌“一芯全元”控释肥

(释放周期3个月),探讨控释肥用量对烟草出苗特性、光合性能、渗透性调节物质、碳氮代谢酶活性及成苗素质的影响,以明确烟草培育壮苗的最佳控释肥用量,为烟草育苗高效养分管理方案制定及实施提供理论依据及技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2024—2025年在安徽农业大学智能育苗大棚中进行,设置8:00—18:00温度为26℃,光照强度为30 000 LUX,18:00—8:00温度为19℃,水体温度在18~26℃范围,空气湿度为70%,保持各处理环境条件一致。供试品种为云烟87,采用漂浮育苗方式。试验采用完全随机区组设计,共设置6个处理,3次重复,每重复随机选取10株烟苗进行测定。以烤烟育苗专用肥(N:P₂O₅:K₂O=20:10:12)为对照(CK),播种时以16.5 g/盘配制营养液,小十字期后一周内以15.7 g/盘施入营养液,并施入磷酸二氢钾(P₂O₅≥52%,K₂O≥34%)6.19 g/盘,硫酸钾0.95 g/盘。育苗水深8 cm,此后各处理补充纯水以保持8 cm水深。控释肥(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14,控释期为3个月)由茂施农业科技有限公司提供,设置5个控释肥用量:T1(23 g/盘)、T2(46 g/盘)、T3(69 g/盘)、T4(92 g/盘)和T5(115 g/盘),其中CK与T2的养分浓度N-P₂O₅-K₂O均为0.04 g/株。育苗盘为160穴(长×宽×高:52.5 cm×33.5 cm×6 cm),基质用量625 g/盘(椰糠+泥炭+草炭+蛭石等,30%含水率),将控释肥一次性均匀与基质混拌装盘,每个育苗盘单独放置于独立育苗盆(长×宽×高:61 cm×42 cm×15 cm)。成苗后,选择T2处理和CK同时进行移栽。移栽期基肥(复合肥N:P₂O₅:K₂O=14:16:15)用量为322.5 kg/hm²,移栽时定根水带药不带肥。

1.2 测定指标与方法

1.2.1 育苗水电导率的测定 使用电导率仪(DDS-307A)分别测定施肥前、施肥后15 d、30 d和40 d每个育苗盆水体的电导率。

1.2.2 烟草出苗指标的测定 从播种后7 d开始,每两天记录一次烟草的出苗数量,至40 d记录成苗数。通过计算得到出苗势、出苗率、出苗指数、活力指数^[22]和成苗率。

$$\text{出苗势(GV)} = (\text{初次记数发芽数} / \text{播种粒数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{出苗率(GT)} = (\text{出苗数} / \text{播种数}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{出苗指数(GI)} = \sum (\text{Gt} / \text{Dt}) \quad (3)$$

式中Dt为出苗天数,Gt为与Dt相对应的每天出苗的种子数

$$\text{活力指数(VI)} = \text{GI} \times \text{S}, \text{S为幼苗干重(小十字期)} \quad (4)$$

$$\text{成苗率(SR)} = (\text{成苗数} / \text{播种总粒数}) \times 100\% \quad (5)$$

1.2.3 烟草光合指标的测定 在烟草成苗期选用第五片真叶(从下往上)测定,叶绿素于成苗期采用95%乙醇萃取法测定;光合性能指标采用LI-6400XT光合仪(LICOR,美国)测定,使用二氧化碳压力圆柱体将CO₂浓度设为400 μmol·mol⁻¹,并使用内置光源将光照强度设为800 μmol·m⁻²·s⁻¹;先进行20 min黑暗预处理后使用JUNIOR-PAM基础型调制荧光仪(WALZ公司,德国)测定叶绿素荧光参数。

1.2.4 烟草渗透调节物质、丙二醛及碳氮代谢酶活性的测定 在烟草成苗期选用第五片真叶(从下往上)测定,可溶性糖采用水杨酸法测定^[23],可溶性蛋白、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)测定参照张姐等^[24]的方法,硝酸还原酶活性(NR)采用磺胺显色法(离体法)^[25],蔗糖合成酶(SS)、蔗糖磷酸合成酶(SPS)采用北京盒子生工科技有限公司试剂盒检测。

1.2.5 烟草农艺性状的测定 于播种后40 d烟草成苗时和移栽后15 d,测定茎高、茎围、叶面积、地上部茎叶和地下部根系的干重,计算壮苗指数^[1]和根冠比。

$$\text{壮苗指数} = (\text{茎围} / \text{茎高} + \text{根干物质质量} / \text{茎叶干物质质量}) \times \text{全株干物质质量} \quad (6)$$

1.3 数据统计及分析

采用DPS 9.01中新复极差法(Duncan)进行

差异显著性检验(α=0.05),采用Origin 2021软件作图,使用IBM SPSS Statistics 18.0(IBM公司,美国)采用Z-score法对原始数据进行标准化处理,以消除量纲差异,并使用主成分分析和隶属函数法进行综合评价^[26],计算公式为(7)~(9)。

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (7)$$

公式中:μ(X_j)为处理j指标的隶属函数值,X_j表示处理j指标的测定值,X_{min}、X_{max}分别表示j指标在6个处理中的最小值和最大值。

$$W_j = P_j / \sum_{j=1}^m P_j \quad (8)$$

公式中:W_j表示j指标在所有指标中的重要性,也就是权重;P_j表示经主成分分析所得的各品种j综合指标的方差贡献率。m取值范围为1-23的整数(下同)。

$$D = \sum_{j=1}^m [\mu(X_j) \times W_j] \quad (9)$$

公式中:D代表某处理烟草综合素质的综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同处理对烟草育苗水电导率的影响

由表1可知,与CK相比,控释肥处理育苗水的电导率均显著降低,育苗水的电导率随着控释肥用量的增加显著提高,处理间差异均达到显著水平。与CK相比,T1—T5处理施肥后15 d的电导率降幅为84.11%、80.43%、73.26%、67.05%和58.91%,施肥后30 d的降幅为83.04%、78.04%、64.13%、57.17%和44.35%,施肥后40 d的降幅为82.07%、68.94%、45.45%、41.67%和38.13%。随着育苗时间的推进,控释肥养分释放逐渐增多,播种后15—40 d,T2—T4处理的育苗水电导率呈上升趋势,增幅为13.47%~36.11%。

2.2 不同处理对烟草出苗指标的影响

如表2所示,与CK相比,T1处理的出苗势显著提高,T3—T5处理则显著降低,降幅分别为21.28%、35.86%和38.51%。T2处理的出苗指数显著高于CK,增幅为6.59%,T4、T5较CK显著降低,降幅分别为19.12%和19.96%。T2处理的出苗率、活力指数和成苗率与CK差异未达到显著水平,T3—T5处理则显著低于CK,出苗率降幅分别为4.41%、6.12%和7.02%,活力指数降幅为32.86%、45.09%和46.36%,成苗率降幅为5.78%、12.56%和22.19%。

表 1 不同处理对烟苗育苗水电导率的影响
Table 1 Effects of different treatments on conductivity of seedling-raising water for tobacco seedlings

处理 Treatment	电导率/(mS·cm ⁻¹) Conductivity			
	施肥前	施肥后 15 d	施肥后 30 d	施肥后 40 d
	Before fertilization	15 d after fertilization	30 d after fertilization	40 d after fertilization
CK	0.21±0.01a	5.16±0.24a	4.60±0.21a	3.96±0.25a
T1	0.21±0.01a	0.82±0.04f	0.78±0.02f	0.71±0.02f
T2	0.21±0.01a	1.01±0.05e	1.01±0.06e	1.23±0.09e
T3	0.21±0.01a	1.38±0.07d	1.65±0.12d	2.16±0.13d
T4	0.21±0.01a	1.70±0.12c	1.97±0.12c	2.31±0.16c
T5	0.21±0.01a	2.12±0.11b	2.56±0.15b	2.45±0.12b

注:数据后未标有相同的小写字母表示处理间差异有统计学意义($P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant difference at $P<0.05$. The same below.

表 2 不同处理对烟草出苗指标的影响
Table 2 Effects of different treatments on tobacco seedling emergence indices

处理 Treatment	出苗势/% Emergence vigour	出苗率/% Emergence rate	出苗指数 Emergence index	活力指数 Vigor index	成苗率/% Seeding rate
CK	54.38±0.25b	96.33±1.34a	16.68±0.27b	13.33±0.60b	89.31±0.73a
T1	55.69±0.44a	96.32±0.90a	16.79±0.42ab	14.95±0.56a	78.30±0.47c
T2	54.25±0.38b	96.37±0.54a	17.78±0.68a	14.06±0.51ab	89.77±0.25a
T3	42.81±0.56c	92.08±0.76b	16.17±1.12b	8.95±1.07c	84.15±0.34b
T4	34.88±0.88d	90.43±0.81c	13.49±0.16c	7.32±0.51d	78.09±0.41c
T5	33.44±0.81e	89.57±0.74c	13.35±0.55c	7.15±0.71d	69.49±0.74d

2.3 不同处理对烟苗叶绿素含量的影响

如表3所示,烟苗叶片的叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量随控释肥用量的增加逐渐增加,其中T1处理显著最低。与CK相比,T1处理的叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量均显著降低,降幅

分别为5.80%、11.54%和7.37%;T2—T5处理的叶绿素a含量显著提高,增幅分别为5.31%、5.80%、6.76%和6.76%;T4、T5处理的叶绿素总含量显著提高,增幅分别为3.86%和4.21%。T1处理的叶绿素a和叶绿素总含量显著低于T2—T5处理。

表 3 不同处理对烟苗叶绿素含量的影响
Table 3 Effects of different treatments on chlorophyll content in tobacco seedlings

处理 Treatment	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹) Chlorophyll a	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹) Chlorophyll b	叶绿素总含量/(mg·g ⁻¹) Chlorophyll content
CK	2.07±0.09b	0.78±0.02a	2.85±0.02b
T1	1.95±0.04c	0.69±0.02b	2.64±0.04c
T2	2.18±0.05a	0.74±0.03ab	2.93±0.06ab
T3	2.19±0.06a	0.74±0.03ab	2.92±0.03ab
T4	2.21±0.09a	0.75±0.05a	2.96±0.03a
T5	2.21±0.07a	0.79±0.03a	2.97±0.08a

2.4 不同处理对烟苗光合特性的影响

由图1可知,与CK相比,T2处理的 P_n 显著提高,增幅为8.21%,T1处理的 P_n 显著降低,降幅为17.49%。T1—T5处理的 G_s 均与CK差异不显著,但T1、T5处理的 G_s 较T2处理显著降低,

降幅为18.31%、19.72%。烟苗的胞间 CO_2 浓度(C_i)随控释肥用量的增加而降低,T1处理显著高于CK,增幅为5.74%,T5处理显著低于CK,降幅为5.74%。蒸腾速率(Tr)则随控释肥用量的增加先升高后降低,T1处理的 Tr 显著低于CK,降

幅为3.86%, T2—T5处理的 T_r 显著提高,增幅分别为16.31%、24.23%、36.10%和28.38%。

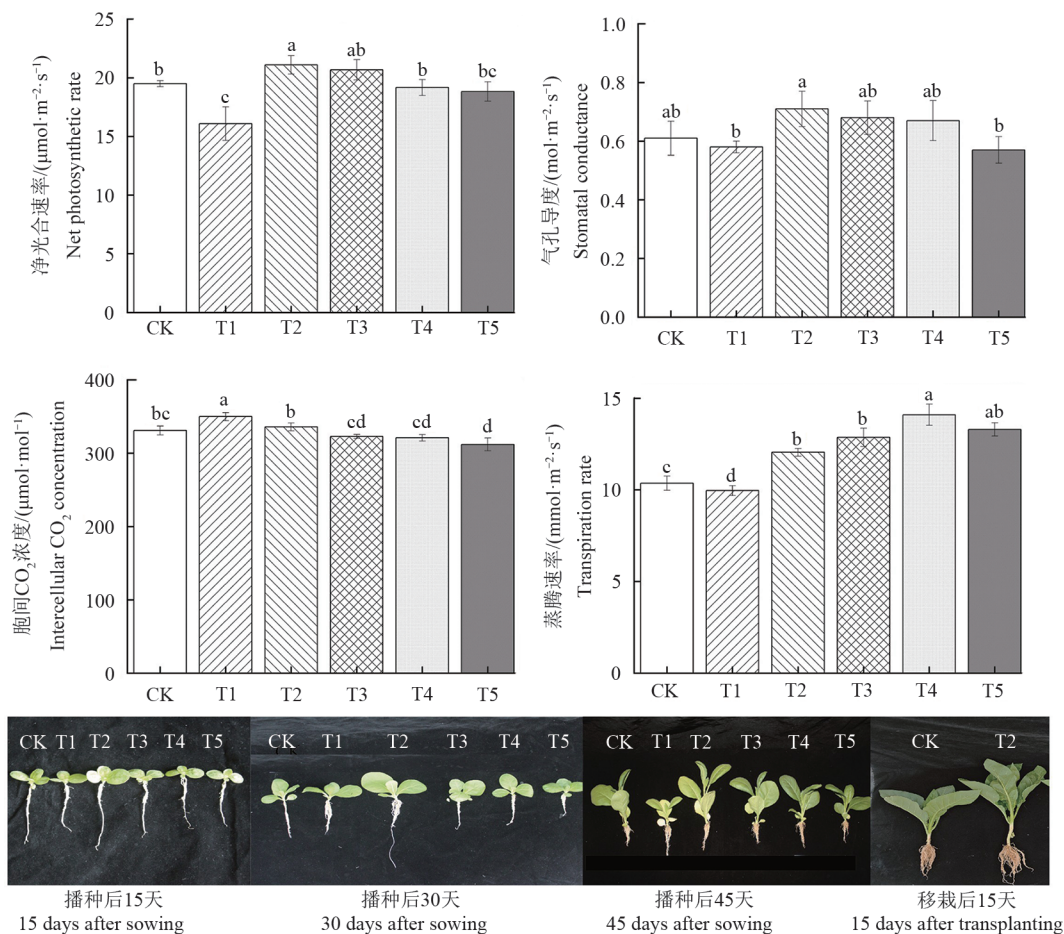


图1 不同处理对烟苗光合特性的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on photosynthetic characteristics of tobacco seedlings

注:不同上标字母表示5%水平显著性。下同。

Note: Different letters on the bars indicate significant at 0.05 level. The same below.

2.5 不同处理对烟苗叶绿素荧光参数的影响

由图2可知,随控释肥用量增加,烟苗的光化学猝灭系数(q_p)和电子传递速率(ETR)逐渐降低,T3—T5处理较CK处理显著降低。在光辐照强度 $66\sim 420\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,T3—T5处理的非光化学猝灭系数(NPQ)显著高于CK,但在 $420\sim 845\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 内,各处理间的NPQ差异不显著。T1和T5处理的最大光量子效率(F_v/F_m)显著低于CK处理,降低了光系统II(PSII)性能,降幅分别为3.68%、3.28%,T2—T4处理的 F_v/F_m 与CK差异不显著。

2.6 不同处理对烟苗渗透性调节物质及MDA的影响

由图3可知,与CK相比,T2处理的可溶性

糖含量显著增高,增幅为13.64%;T1处理的可溶性蛋白、可溶性糖含量均显著降低,降幅为11.17%、32.44%;T5处理的可溶性糖含量显著降低,降幅为19.26%。与CK相比,T2处理的Pro显著降低,降幅为6.94%,T4、T5处理的Pro显著提高,增幅为9.98%、11.65%。T2、T3处理的MDA较CK显著降低,降幅分别为17.28%、9.25%;T1、T5处理的MDA较CK显著提高,增幅分别为26.14%、22.86%。

2.7 不同处理对烟苗碳氮代谢酶活性的影响

如图4所示,烟苗的碳氮代谢酶活性随控释肥用量增加先增后降,峰值集中在T2、T3处理。与CK相比,T1处理的硝酸还原酶(NR)显著降低,降幅为27.47%,T2—T5处理的NR均未达到

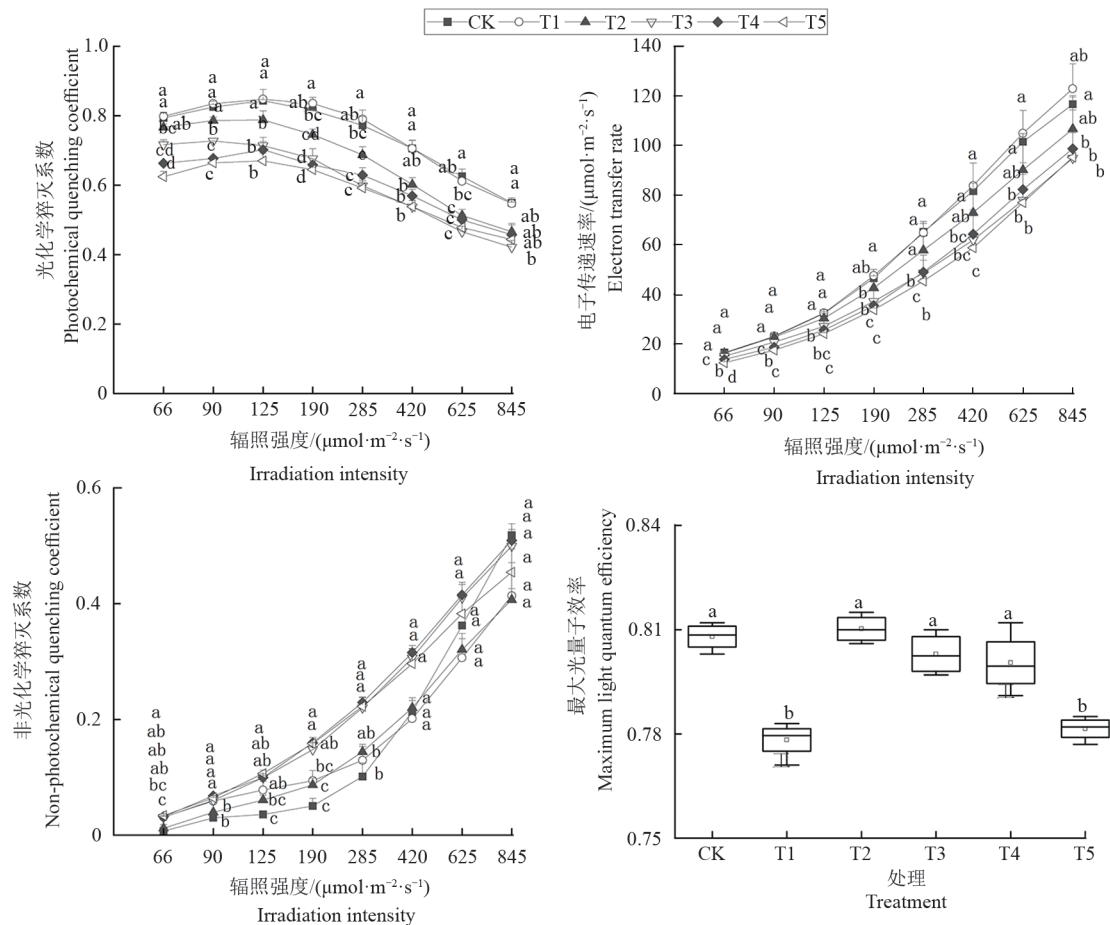


图 2 不同处理对烟苗荧光参数的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on fluorescence parameters of tobacco seedlings

注:图中箱体实线表示中位数,□表示均值。

Note: In the figure, the solid line in the box represents the median, and □ represents the mean.

显著差异。T1、T5 处理的蔗糖合成酶(SS)显著较 CK 处理降低,降幅分别为 13.37%、8.61%,T2 处理的 SS 较 CK 显著提高,增幅为 9.18%。与 CK 相比,T1 的蔗糖磷酸合成酶(SPS)显著降低,降幅 14.89%,T2、T3 处理的 SPS 显著提高,增幅为 6.53%、9.15%,T4、T5 处理与 CK 差异不显著。

2.8 不同处理对烟草农艺性状及干物质积累量的影响

由表 4 可知,在成苗期,烟苗的农艺性状及干物质积累量均随控释肥用量的增加呈现先升后降的趋势,最大值出现在 T2、T3 处理。与 CK 相比,T2 处理的茎高、叶面积、地上部干重和壮苗指数显著提高,增幅分别为 15.71%、18.49%、19.39% 和 9.09%;T3 处理的茎高和茎围显著提高,增幅为 10.00% 和 13.09%;T1、T5 处理的茎高、茎围、叶面积、地上部干重和壮苗指数均显著

降低;T4 处理的茎高、地上部干重和壮苗指数显著降低,降幅为 17.14%、26.53% 和 12.12%。在移栽后 15d,T2 处理的烤烟叶面积、茎高、茎围、地上部干重和地下部干重均显著高于 CK,增幅分别为 16.38%、30.91%、8.66%、24.44% 和 44.44%。

2.9 不同处理的烟苗生长及生理指标的主成分分析

KMO 检验和巴特利特球形度检验是评估数据是否适合进行主成分分析的统计方法^[26]。基于烟苗的 23 个生长指标进行分析,得出 KMO 取样适切性量数为 0.618,高于 0.5;巴特利特球形度检验近似卡方值为 935.06,显著性为 6.71×10^{-79} ,表明烟苗各项指标具有强相关性。采用荷载绝对值 >0.7 作为强关联的阈值,对指标进行关联分析。烟苗农艺性状、Pn、Gs、碳氮代谢酶、

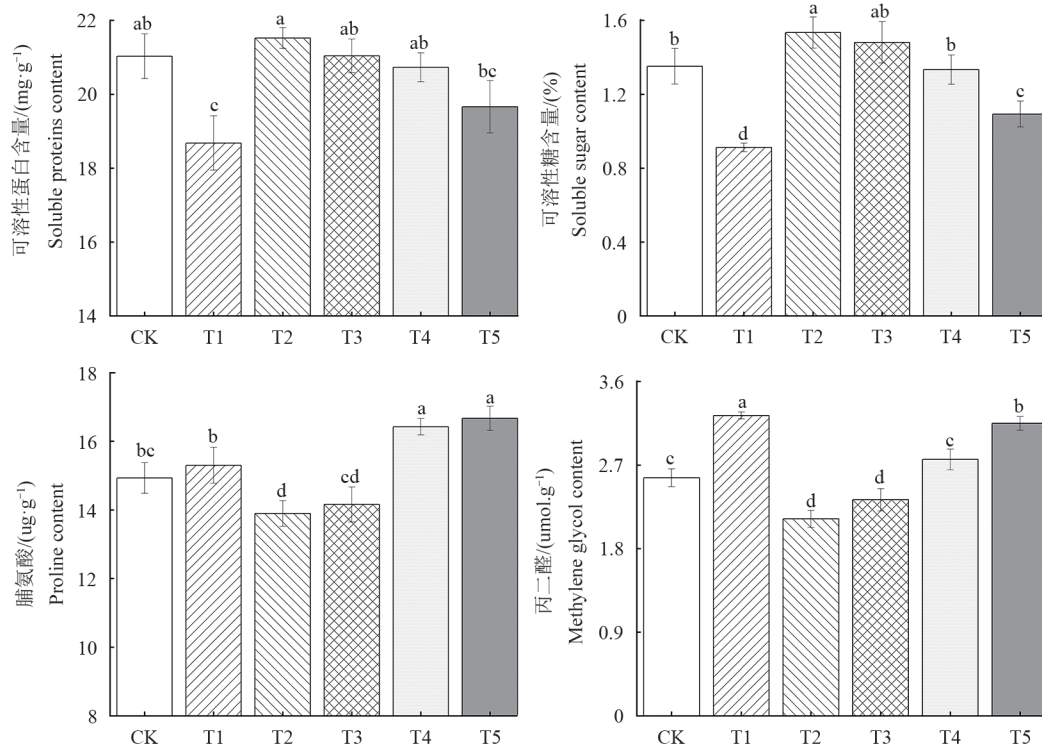


图3 不同处理对烟苗渗透性调节物质及MDA的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on osmotic adjustment substances and MDA in tobacco seedlings

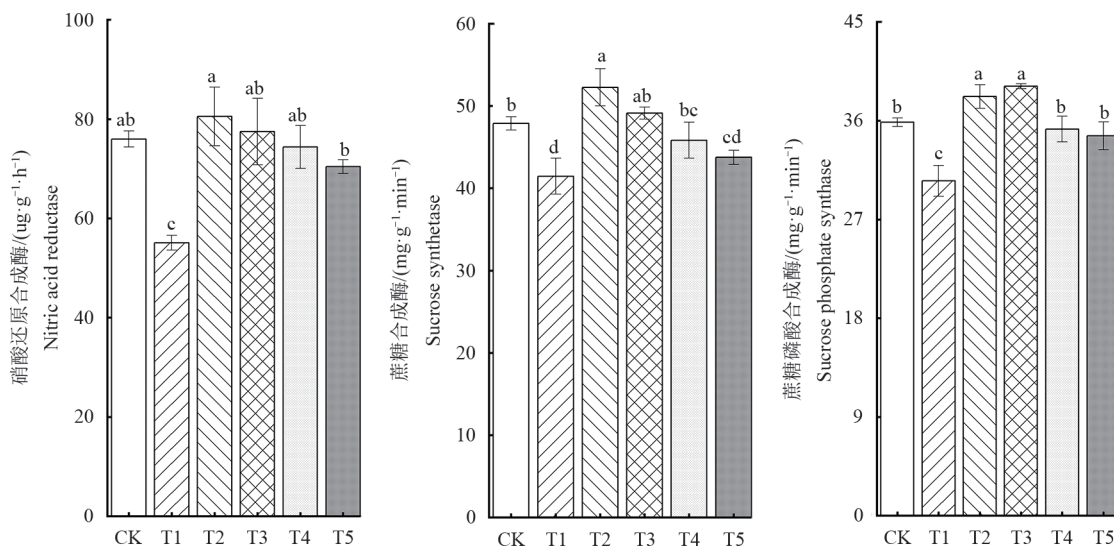


图4 不同处理对烟苗碳氮代谢酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on carbon and nitrogen metabolic enzyme activities in tobacco seedlings

渗透性调节物质、叶绿素含量及壮苗指数在F1因子上具有较高荷载,F1因子的贡献率为52.67%。出苗指标、Tr、Ci与根干重则在F2因子上有较高荷载,F2因子的贡献率为29.02%。两个因子累计贡献率为81.68%,可实现烟苗生长状态的全面、精准监控,表征烟苗移栽适应性及

后期生长潜力。

2.10 不同处理的烟苗生长及生理指标的综合评价

根据表5可知,将23个单项指标重构为2个独立的综合指标 F_1 - F_2 ,之后根据2个综合指标 F

表 4 不同处理对烟草农艺性状及干物质积累量的影响

Table 4 Effects of different treatments on tobacco agronomic traits and dry matter accumulation

时期 Stage	处理 Treatment	茎高/cm Stalk height	茎围/cm Stalk girth	叶面积/ (cm ² /株) Leaf area	每株地上部 干重/g Stem dry weight	每株地下部 干重/g Root dry weight	根冠比 Root-shoot ratio	壮苗指数/g Seeding index
成苗期 Seedling- formation stage	CK	7.0±0.21c	1.91±0.15c	173.21±3.52b	0.98±0.09b	0.05±0.01ab	0.07±0.01ab	0.33±0.01b
	T1	4.2±0.10f	1.40±0.20e	94.77±2.47d	0.51±0.15d	0.04±0.03ab	0.09±0.03a	0.22±0.03d
	T2	8.1±0.13a	1.96±0.19bc	205.23±8.70a	1.17±0.44a	0.06±0.02a	0.05±0.01b	0.36±0.04a
	T3	7.7±0.26b	2.16±0.10a	188.16±4.35ab	1.00±0.24b	0.05±0.01a	0.05±0.01b	0.35±0.04a
	T4	5.8±0.13d	2.02±0.09b	177.86±3.06b	0.72±0.16c	0.03±0.01ab	0.05±0.01b	0.29±0.02c
移栽 15 d 15 d after transplanting	T5	4.8±0.24e	1.78±0.16d	154.99±7.54c	0.46±0.12d	0.03±0.02b	0.06±0.02b	0.21±0.01e
	CK	5.5±0.50b	2.77±0.93b	580.91±0.15b	3.15±0.31b	0.18±0.04b	0.06±0.01a	-
	T2	7.2±1.89a	3.01±1.19a	676.05±4.79a	3.92±0.44a	0.26±0.05a	0.07±0.01a	-

表 5 烟苗 23 个生长指标的荷载矩阵、指标特征值及贡献率

Table 5 Load matrix, eigenvalues and contribution rates of 23 growth indices for tobacco seedlings

生长指标 Growth indicator	各主成分的荷载 Load of each principal component		主要关联 Primary association
	F1	F2	
叶面积 Leaf area	0.967	-0.140	F1
茎高 Stalk height	0.948	0.286	F1
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.939	-0.292	F1
蔗糖磷酸合成酶 Sucrose phosphate synthase	0.922	-0.074	F1
可溶性糖 Soluble sugar	0.912	0.075	F1
丙二醛 Methylene glycol	-0.897	-0.338	F1
蔗糖合成酶 Sucrose synthetase	0.873	0.263	F1
茎围 Stalk girth	0.872	-0.231	F1
硝酸还原酶 Nitric acid reductase	0.865	-0.151	F1
可溶性蛋白 Soluble proteins	0.828	0.069	F1
气孔导度 Stomatal conductance	0.824	0.136	F1
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.744	-0.574	F1
壮苗指数 Seeding index	0.728	0.499	F1
根冠比 Root-shoot ratio	-0.516	0.509	F1
出苗势 Emergence vigour	-0.055	0.968	F2
出苗率 Emergence rate	-0.044	0.937	F2
出苗指数 Emergence index	0.209	0.933	F2
蒸腾速率 Transpiration	0.086	-0.830	F2
地下部干重 Root dry weight	0.401	0.788	F2
胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration	-0.258	0.726	F2
成苗率 Seeding rate	0.618	0.722	F2
脯氨酸 Proline	-0.516	-0.687	F2
特征值 Eigenvalue	12.11	6.67	-
贡献率 % Contribution rate	52.67	29.02	-
累计贡献率 % Accumulate contribution rate	52.67	81.68	-

值,利用公式(7),计算对应隶属函数值 $\mu(x)$ 。权重 W_j 由公式(8)计算,2个独立的综合指标权重分

别为0.64和0.36。从表6可知, D 值越大表明该处理的烟苗素质越强,最终表现为 $T2>T3>CK>$

T4>T1>T5,6 个处理的综合评价值为(0.24~0.98),差异较大($CV=28.18\%>10.00\%$)。

表 6 不同处理的综合性状 F 指标值、权重、 $\mu(x)$ 及综合评价值(D)
Table 6 Comprehensive trait F -index values, weights, $\mu(x)$ and comprehensive evaluation scores (D) for different treatments

处理 Treatment	综合指标值 Comprehensive indicator value		隶属函数值 Membership function value		D 值 D -value	排序 Order
	F_1	F_2	μ_1	μ_2		
CK	0.16	0.62	0.66	0.84	0.72	3
T1	-1.76	1.03	0.00	1.00	0.36	5
T2	1.15	0.93	1.00	0.96	0.98	1
T3	0.90	-0.06	0.91	0.56	0.79	2
T4	0.18	-1.08	0.67	0.15	0.48	4
T5	-0.64	-1.44	0.38	0.00	0.24	6

3 讨论

与传统营养液多次供肥育苗相比,新型控释肥一次性基质混拌施用可减少施肥次数,节约人工,减少育苗工序^[2]。本研究中,控释期3个月控释肥(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14)处理的烟草出苗率均高于89%,T2处理(N-0.04 g/株)的出苗率和成苗率与CK差异不显著,均显著高于T3—T5处理(表2)。而刘成林等^[21]研究认为控释期3个月控释肥不同用量均不利于出苗,可能是其选用控释肥的释放速率过快,导致基质中养分浓度过高,引起烟草出苗期的盐胁迫,导致出苗迟缓、整齐度差、成苗率低^[27,28]。本研究中T3~T5处理的成苗率低于85%的生产成苗率标准^[1],印证了过量施肥对烟草育苗产生了盐害风险。T1处理的出苗率与T2、CK无显著差异,但成苗率显著降低,这与李玮成等^[29]关于控释肥导致水稻育苗成秧率低的研究结论相符,表明养分供应不足是限制作物成苗的关键因素。主成分分析进一步揭示,出苗指数、出苗率和成苗率与 F_2 因子高度关联(表5),而T2处理在这些关键指标上的优势保障了烟苗的高效建苗。育苗水的电导率可反映盐离子含量,控释肥处理的育苗水电导率均显著低于CK,表明控释肥释放的养分主要集中于基质中,这可能有助于养分利用效率的提高及移栽后养分的持续供应,但其相应机理需要进一步研究。

光合作用、渗透调节物质及碳氮代谢协同调节了烟苗的生长发育进程^[30,31]。本研究中,T2处理的Pro、MDA含量均显著低于CK,而T1、T4和T5处理则高于CK,这与于浩东等^[32]在不同控释

肥比例对玉米叶片衰老影响上的研究结果相似。由主成分分析可知,MDA与Pro分别在 F_1 因子和 F_2 因子上呈现较高的负荷(分别为-0.897与-0.687),二者积累均与烟苗综合素质呈负向关联。这可能是适宜的控释肥用量可以通过“前控后保”特性维持细胞结构稳定性,保障烟苗生理代谢正常进行^[30]。而MDA与Pro过度积累则会加剧功能叶衰老,破坏细胞内的生理代谢平衡,进而影响 $PSII$ 与 PSI 的功能稳定性^[33]和碳氮代谢酶活性^[32],制约烟苗生长。本研究结果表明,T2处理的 P_n 显著高于CK,这与控释肥提升辣椒光合性能的研究结果相符^[34],高效的光能利用为碳氮代谢提供充足能量和碳骨架^[14]。T1处理的 P_n 和 F_v/F_m 显著低于CK,源于养分供应不足导致了叶绿素总含量和胞间CO₂利用率^[15]降低。而叶绿素含量作为 F_1 因子的核心特征,其含量变化影响了烟苗的光合捕获与碳同化能力,因此T1处理同时从源库两个层面限制了烟苗的物质积累与形态建成。T4、T5处理的 q_p 和ETR显著低于CK,这可能是由于高盐胁迫导致 $PSII$ 反应中心蛋白含量下降^[35],抑制了光能的吸收与电子传递^[36]。碳氮代谢关键酶活性可调控碳氮同化协同进程,适宜的控释肥用量可以增强小叶榄仁幼苗碳氮代谢关键酶活性^[37]。本研究中,T2的可溶性糖及碳代谢酶活性均显著高于CK、T1、T4和T5,这与曹兵^[16]和安文博等^[38]观点相同。这主要是T2控释用量在提高烟苗的光合性能(图2)与维持细胞稳态(图3)的基础上,进一步强化了碳氮代谢,促进了可溶性糖积累^[39],为烟苗干物质高效分配提供了代谢基础^[30],最终表现

为地上部干重显著高于其他处理。T2 处理的壮苗指数与 T3 无显著差异,均显著高于其他处理,这与前人在玉米^[7]、苗木^[8]、雪菜^[9]和甜椒^[10]等作物上的研究基本相符。由此可知,适宜的控释肥用量通过优化光合系统功能、细胞渗透调节及碳氮代谢等关键生理过程^[12],促进了烟苗的干物质积累和壮苗指数的提高(表 4)。而上述指标均与 F1 因子高度关联,T2 处理通过优化这些核心指标,主导了烟苗的物质合成与地上部形态建成。与 F2 因子关联密切的出苗指标和根干重,T2 处理也高于其他处理,表征了该处理具有良好的成苗潜力与发达的地下部结构。正因在 F1 和 F2 因子上均表现出协调优势,T2 处理在隶属函数综合评价中表现最优(D 值为 $T2 > T3 > CK > T4 > T1 > T5$)。综上,T1 与 T4—T5 处理因养分不足或盐分胁迫导致烟苗素质下降、生理代谢紊乱,而 T3 处理虽综合表现高于 CK,但从肥料成本和节能减排的角度出发,其施肥量不符合节能减排要求,因此仅推荐 T2(46 g/盘)作为烟草集约化育苗的施肥用量。

控释肥缓释特性可以促进作物幼苗移栽后的早生快发^[11]。本研究中,在定根水不额外带肥条件下,T2 处理烟苗移栽后 15 d 的干物质积累量、株高、茎围和叶面积均显著高于 CK,这不仅得益于成苗期烟苗的良好生理基础与生长优势,也与基质中残留控释肥的持续释放肥效相关,二者共同保障了烟苗移栽后的早生快发。传统定根水带肥方式存在烧苗的风险^[39],而本研究规避了该问题,在保障烟苗成活率的同时,也提高了肥料利用率,节省了施肥用工量。相比之下,CK 处理采用的营养液分次供肥模式,存在养分浪费和环境污染问题,其经济效益和生态效益远不如控释肥(T2 处理),但不同控释肥用量育苗对移栽后烟苗生长发育的影响值得进一步研究。

4 结论

控释肥 T2(46 g/盘)通过优化光合系统功能、细胞渗透调节及碳氮代谢等关键生理过程,显著提高烟苗的出苗指数、叶面积、茎高、壮苗指数及栽后烤烟的农艺性状,实现了烟草壮苗的培育和育苗养分供应的轻简化。过低(T1)或过高(T4、T5)控释肥用量均显著影响了烟苗细胞的稳定性,导致其光合性能及碳氮代谢降低,从而显著降

低了烟苗的成苗率和壮苗指数。育苗方式、育苗环境、控释肥类型及用量等因素对其释放周期、释放规律及养分供应的影响仍需深入研究,这将共同为控释肥的高效利用和多种育苗方式的养分管理技术奠定理论基础与提供技术支持。

参考文献

- [1] 云菲,许跃奇,王明鑫,等.不同植物源育苗基质与功能微生物菌剂配施对烟苗生长的影响[J].河南农业大学学报,2025,59(05):814-825.
- [2] 贾海江,范晓苏,袁维,等.缓释肥对烤烟湿润育苗烟苗素质的影响[J].江西农业学报,2022,34(12):85-89.
- [3] 王颢杰,郑潜,苗圃,等.烤烟育苗和移栽方式对鲜烟叶和烤后烟理化性质的影响[J].河南农业大学学报,2025,59(05):826-837.
- [4] 王颢杰,常栋,李俊营,等.不同生境下烤烟三段式育苗微生物群落变化及抗逆酶活分析[J].生物技术通报,2024,40(04):242-254.
- [5] 高斯曼,刘光亮,段武丽,等.烟草智慧育苗潮汐参数优化研究[J].中国农学通报,2025,41(23):38-44.
- [6] 李倩,田雅楠,尚庆茂,等.潮汐灌溉供液高度对番茄穴盘苗水分和氮素利用效率的影响[J].华北农学报,2019,34(06):126-132.
- [7] 程志鹏,王富贵,王钰凯,等.寒旱区秸秆覆盖条耕玉米适宜氮肥运筹方式研究[J].植物营养与肥料学报,2023,29(10):1830-1842.
- [8] 孙巧玉,刘勇.控释肥和灌溉方式对栓皮栎容器苗苗木质量及造林效果的影响[J].林业科学研究,2018,31(05):137-144.
- [9] 王飞,秦方锦,章余,等.不同施肥模式对雪菜产量和效益的影响[J].中国土壤与肥料,2025,62(03):178-183.
- [10] 董传迁,尹程程,魏珉,等.控释肥、保水剂和壳聚糖对甜椒穴盘育苗的交互效应研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2015,46(06):801-807.
- [11] 周波,刘登民,聂宜民,等.花卉专用控释肥对一串红穴盘育苗及移栽后的效应[J].山东农业大学学报(自然科学版),2010,41(04):517-521.
- [12] 李耕,冯雨晴,赵园园,等.白肋烟和烤烟嫁接对白肋烟碳氮代谢及硝酸盐含量的影响[J].河南农业大学学报,2021,55(05):837-843.
- [13] Luo J, Yang Z Q, Zhang F Y, et al. Effect of nitrogen application on enhancing high-temperature stress tolerance of tomato plants during the flowering and fruiting stage[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14(16):1172078-1172091.
- [14] 曲兆鸣.优化施肥和灌水对设施番茄生长及土壤环

- 境的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
- [15] 董庆玲,娄焕昌,张慧,等. 普通和控释尿素配合深施提高冬小麦花期旗叶光合性能与氮素利用效率[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(07):1134-1145.
- [16] 曹兵,王学霞,倪小会,等. 控释掺混肥在结球生菜上的减量施用效应[J]. 华北农学报,2022,37(02): 104-111.
- [17] Zhang Y J, Ren W C, Zhu K Y, et al. Substituting readily available nitrogen fertilizer with controlled-release nitrogen fertilizer improves crop yield and nitrogen uptake while mitigating environmental risks: A global meta-analysis[J]. Field Crops Research,2024,306(48):109221-109234.
- [18] Trientini F, Fisher P R. Hydroponic fertilizer supply for basil using controlled-release fertilizer[J]. Hort Science,2020,55(10):1683-1691.
- [19] Jalpa L, Mylavarapu R S, Van S E. Nitrogen use efficiency and yield levels using soluble and controlled-release urea formulations in tomato production[J]. Hort Science,2024,59(04):442-452.
- [20] 刘文涛. 包膜控释肥在烤烟漂浮育苗上应用效果研究[J]. 山东农业科学,2012,44(04):71-72.
- [21] 刘成林. 烟草漂浮育苗控释肥筛选和施用技术的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
- [22] Deng J J, Zhang Y L, Hu J W, et al. Autotoxicity of phthalate esters in tobacco root exudates: Effects on seed germination and seedling growth[J]. Pedosphere, 2017,27(06):1073-1082.
- [23] 王莉丽,梅文泉,陈兴连,等. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定大米中水溶性糖含量[J]. 中国粮油学报, 2020,35(09):168-173.
- [24] 张妞,崔潇,陈春艳,等. 遮光胁迫下外源硅对侧柏幼苗形态特征和生理抗逆性的调控效应[J]. 浙江农林大学学报,2026,43(01):86-95.
- [25] Kong M M, Xu H L, Shen Y. Nitrate reductase drives c nutrition ontrol and disease resistance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars[J]. Journal of Science and Plant Nutrition,2024,24(01):818-830.
- [26] 赵锦洋,高福禄,李玉斌,等. 30份甘薯品种耐低磷能力评价及种质筛选[J]. 热带作物学报,2026,47(01): 217-230.
- [27] 陈雅琦,苏楷淇,李春杰. 盐胁迫对醉马草和高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业科学,2021,38(05):870-879.
- [28] Tarchoun N, Saadaoui W, Mezghani N, et al. The Effects of salt stress on germination, seedling growth and biochemical responses of tunisian squash (*Cucurbita maxima Duchesne*) germplasm[J]. Plants, 2022,11(06):800-818.
- [29] 李祎成,熊远福,文祝友,等. 晚稻种衣肥 ZFWW-8 的养分释放特性及应用效果初探[J]. 江西农业大学学报,2022,44(06):1340-1348.
- [30] Chai J L, Yang H, Chen Z, et al. Biochar and nitrogen fertilizer promote alfalfa yield by regulating root development, osmoregulatory substances and improve soil physicochemical properties[J]. Agriculture,2025,15(03):239-258.
- [31] 丁怡梦,陈慕琪,丁文锐,等. 谷类作物碳氮代谢互作机制的研究进展[J]. 植物生理学报,2024,60(05):753-761.
- [32] 于浩东,初振宇,汪顺源,等. 不同控释氮素比例对夏玉米叶片衰老和籽粒灌浆特性的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(18):3511-3529.
- [33] Qi Z X, Sun W Z, Luo C, et al. Differential responses of rice genotypes to nitrogen supply: Impacts on nitrogen metabolism and chlorophyll fluorescence kinetics[J]. Plants,2025,14(16):2467-2483.
- [34] 叶洁,颜建明,郁继华,等. 不同控释氮肥水平对辣椒生长和品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2018, 53(01):42-48+57.
- [35] Urban A, Rogowski P, Wasilewska D W, et al. Understanding maize response to nitrogen limitation in different light conditions for the improvement of photosynthesis[J]. Plants,2021,10(09):1932-1949.
- [36] 张敏,赵延宽,王欣倩,等. 红叶石楠和荷花木兰 *PS II* 和 *PSI* 功能对冬季短暂升温的响应[J]. 江西农业大学学报,2025,47(05):1289-1299.
- [37] 金丹丹,宫亮,李波,等. 2种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响[J]. 水土保持学报, 2020,34(04):334-339.
- [38] 安文博,孙焱鑫,李占台,等. 不同缓控释肥对鲜食玉米产量、品质及氮挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2020,31(07):2422-2430.
- [39] 李旭,金江华,于大鹏,等. 优化基肥和提苗肥对烤烟生长及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(11):13-20.