

引用格式:

蒋宇仙, 向清慧, 黄杰, 陈治锋, 肖汉乾, 肖艳松, 成军平, 侯建林, 秦凌, 邓小华. 施用液态有机碳肥对低温胁迫烟苗生长及生理生化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 399–405.
JIANG Y X, XIANG Q H, HUANG J, CHEN Z F, XIAO H Q, XIAO Y S, CHENG J P, HOU J L, QIN L, DENG X H. Effects of liquid organic carbon fertilizer application on growth, physiological and biochemical characteristics of tobacco seedlings[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(4): 399–405.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



施用液态有机碳肥对低温胁迫烟苗生长及生理生化特性的影响

蒋宇仙^{1,2}, 向清慧¹, 黄杰¹, 陈治锋³, 肖汉乾³, 肖艳松⁴,
成军平⁴, 侯建林⁴, 秦凌², 邓小华^{1,3*}

(1.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省烟草公司永州市公司, 湖南 永州 425000; 3.中国烟草中南农业试验站, 湖南 长沙 410004; 4.湖南省烟草公司郴州市公司, 湖南 郴州 423000)

摘要: 为明确烟苗在低温胁迫环境下施用液态有机碳肥的效果, 采用盆栽试验, 设计 1.25、3.75、6.25 g/株等 3 个液态有机碳肥施用量, 在人工气候箱中模拟烤烟移栽初期的低温环境, 研究了液态有机碳肥施用量对低温胁迫烟苗的生长、干物质积累及叶片 SPAD 值、丙二醛含量、硝酸还原酶活性、氧化酶活性的影响。结果表明: 施用适宜浓度(1.25~3.75 g/株)液态有机碳肥能促进烟苗根系生长; 至移栽后 15 d, 较不施用液态有机碳肥, 烟苗地上部分和根系干物质积累可分别提高 26.19%~33.93%、75.28%~149.86%, 烟叶 SPAD 值、硝酸还原酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶的活性可分别提高 16.75%~23.39%、17.38%~61.71%、24.34%~47.11%、22.58%~23.53%、51.63%~62.70%。施用液态有机碳肥能促进烟苗的生长发育, 增强烟苗的抗逆性, 有利于南方稻茬烟区烟苗促早生快发。

关键词: 烟苗; 有机碳肥; 生长; 抗氧化酶; 低温胁迫

中图分类号: S572.062

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)04-0399-07

Effects of liquid organic carbon fertilizer application on growth, physiological and biochemical characteristics of tobacco seedlings

JIANG Yuxian^{1,2}, XIANG Qinghui¹, HUANG Jie¹, CHEN Zhifeng³, XIAO Hanqian³,
XIAO Yansong⁴, CHENG Junping⁴, HOU Jianlin⁴, QIN Ling², DENG Xiaohua^{1,3*}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Yongzhou Tobacco Company of Hunan Province, Yongzhou, Hunan 425000, China; 3.China Tobacco Mid-South Agricultural Experimental Station, Changsha, Hunan 410004, China; 4.Chenzhou Tobacco Company of Hunan Province, Chenzhou, Hunan 423000, China)

Abstract: To determine the application effect of liquid organic carbon fertilizer in low-temperature environment, a pot experiment was used to simulate the low-temperature environment in the early stage of flue-cured tobacco transplanting in an artificial climate box. The effects of liquid organic carbon fertilizer on the growth, dry matter accumulation and distribution, leaf SPAD value, malondialdehyde content, nitrate reductase activity and oxidase activity of tobacco

收稿日期: 2020-02-25

修回日期: 2021-05-07

基金项目: 湖南省烟草专卖局项目(19-22Aa03)

作者简介: 蒋宇仙(1983—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要从事烟叶生产技术与管理研究, 103033556@qq.com; *通信作者, 邓小华, 博士, 教授, 主要从事烟草科学与工程技术研究, yzdxh@163.com

seedlings under low-temperature stress were studied. The results showed that the application of liquid organic carbon fertilizer with suitable concentration (1.25-3.75 g/plant) could increase the dry matter accumulation of the above ground part and root system, increase the activity of root system and chlorophyll content, and increase the activities of nitrate reductase, superoxide dismutase, catalase and peroxidase of tobacco seedlings. The application of liquid organic carbon fertilizer can promote the growth and development of tobacco seedlings and enhance the stress resistance of tobacco seedlings, which is beneficial for promoting the growth and development of tobacco seedlings in south rice-tobacco area.

Keywords: tobacco seedling; organic carbon fertilizer; growth; antioxidant enzymes; low temperature stress

湖南稻作烟区的烤烟移栽期,遇低温阴雨影响烟苗早生快发,导致烤烟植株矮小、叶片数少、产量低,已成为生产中迫切需要解决的问题。施用促根剂^[1]、壳聚糖^[2]、生根粉^[3]等对促进烤烟根系生长、缓解低温胁迫具有一定作用。有机碳肥含有水溶性强、易被作物吸收的有机碳化合物^[4],已应用在多种农林作物上并取得了良好的效果。有机碳肥可促进香榧地径、新梢生长和减少成本投入,提高种植效益^[5];有机碳肥施用能改善油茶林地土壤肥力水平,提高油茶产量^[6];液态有机碳肥对蔬菜增产增收效果明显,蔬菜品质较好^[7];100 mg/kg 酚酸的胁迫条件下施加有机碳肥能缓解马铃薯连作障碍中酚酸物质的毒害作用^[8]。有机碳肥对缓解低温胁迫烟苗生长的研究还少有报道,据此,笔者研究不同浓度液态有机碳肥对低温胁迫下烟苗生长状况、根系发育状况、叶绿素相对含量、丙二醛含量、硝酸还原酶活性及保护酶活性的影响,旨在为液态有机碳肥在南方稻茬烟区应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

烟草品种为云烟 87。液态有机碳肥为福建绿洲生化有限公司产品,水溶有机碳 150 g/L,水溶有机碳有效率 95%。育苗基质为烟草育苗专用基质。花盆规格为 31.5 cm×23.0 cm×7.5 cm,盆底通气,每盆装 1.5 kg 基质,每盆 12 株烟苗。

1.2 试验设计

试验于 2019 年 4 月在湖南农业大学进行。烟草种子漂浮育苗。试验设 4 个处理:T1,施液态有机碳肥 15 g/盆(1.25 g/株);T2,施液态有机碳肥 45 g/盆(3.75 g/株);T3,施液态有机碳肥 75 g/盆(6.25 g/株);CK,不施液态有机碳肥。每盆种植长势基本一致的四叶一心烟苗 12 株,每处理重复 3 盆。将

液态有机碳肥均匀喷施在基质上,烟苗移栽后移入人工气候箱中,并在 10 °C 胁迫处理 5 d。将解除低温胁迫后的花盆和烟苗置于 25 °C 培养室,恢复生长至移栽后 15 d。

1.3 检测指标及方法

于移栽后第 5 天和第 15 天,每处理选取 5 株烟苗,冲洗干净烟苗根系,采用 LA-2400 多参数根系分析系统^[9-10],测定根长、根表面积、根体积、根直径及根尖数。采用改良的氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[11]测定根系活力。测定烟株地上部的茎长、茎围、最大叶长、最大叶宽。将干净烟苗分离根系和地上部分,于烘箱中 105 °C 杀青 30 min,然后 70 °C 烘干至恒重,分别称取干物质质量,计算烟株根系和地上部的干物质比例。

烟叶 SPAD 值测定。取第 2 片展开叶,采用 SPAD-502plus 便携式叶绿素测定仪(日本柯尼卡美能达公司)测定烟叶的 SPAD 值,每片烟叶在离主脉 3 cm 两侧对称处各选择 6 个点进行测量^[12],求平均值。

烟叶丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法^[13]测定。

叶片硝酸还原酶(NR)活性采用活体法测定^[14]。叶片过氧化物酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(POD)活性均采用 Solarbio 公司生产的试剂盒测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS17.0 进行数据处理和统计分析;采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 施用液态有机碳肥对烟苗根系的影响

2.1.1 对烟苗根系生长的影响

由表 1 可知,施用液态有机碳肥后,烟苗根系

平均直径没有显著差异。移栽后第 5 天,施用液态有机碳肥处理的烟苗根尖数高于 CK 的;随液态有机碳肥施用量增加,烟苗根系的长度、表面积、体积和根尖数增加。恢复生长至第 15 天,施用液态有机碳肥处理的烟苗根尖数多于 CK 的,但随液态

有机碳肥施用增加,烟苗根系的长度、表面积、体积和根尖数减少,这可能与 T3 处理的液态有机碳肥量过大有关。表明施用液态有机碳肥可减缓低温胁迫危害,适宜浓度可促进烟苗根系生长。

表 1 施用液态有机碳肥的烟苗根系性状和活力

Table 1 Root character of tobacco seedling under liquid organic carbon fertilizer application

处理	移栽后时间/d	根长/cm	根表面积/cm ²	根体积/cm ³	根直径/mm	根尖数	根系活力/(mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
T1	5	(114.50±8.24)c	(28.16±2.18)c	(0.55±0.06)c	(0.78±0.17)a	(106±12)b	(0.53±0.07)b
	15	(337.96±6.24)a	(104.34±9.40)a	(2.56±0.17)a	(0.98±0.11)a	(195±12)a	(0.41±0.01)c
T2	5	(161.29±17.22)b	(45.71±4.53)b	(1.03±0.08)b	(0.90±0.18)a	(105±6)b	(0.67±0.09)a
	15	(273.82±5.27)b	(81.97±11.22)b	(1.95±0.34)b	(0.95±0.13)a	(158±16)b	(0.76±0.06)a
T3	5	(254.66±16.03)a	(68.18±3.11)a	(1.45±0.20)a	(0.85±0.05)a	(167±24)a	(0.50±0.04)b
	15	(181.05±12.88)c	(57.46±8.26)c	(1.45±0.22)c	(1.01±0.12)a	(106±22)c	(0.62±0.02)b
CK	5	(86.48±7.68)d	(19.70±4.08)d	(0.36±0.12)d	(0.73±0.09)a	(85±10)c	(0.36±0.02)c
	15	(97.12±6.31)d	(39.82±2.66)d	(0.97±0.13)d	(1.09±0.08)a	(103±8)c	(0.03±0.03)d

同列同一移栽时间不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 对烟苗根系活力的影响

由表 1 可知,移栽后第 5 天,施用液态有机碳肥处理的烟苗根系活力均大于 CK 的,其中 T2 的根系活力大于 T1、T3 的。恢复生长后至第 15 天,不同处理的烟苗根系活力均大于 CK 的,且 T2 的根系活性最强,T3,T1 的根系活力最弱。表明施用液态有机碳肥可提高根系活力,以 T2 处理的烟苗根系活力最强。

2.2 施用液态有机碳肥对烟苗地上部生长性状的影响

由表 2 可知,施用液态有机碳肥处理的烟苗茎长、茎围、最大叶面积均大于 CK 的。移栽后第 5 天,T3 的烟苗茎长、茎围、最大叶面积均大于 T1、T2 的;恢复生长后至第 15 天,T1 处理的烟苗茎长、茎围、最大叶面积均大于 T2、T3 的,这可能与 T3 的液态有机碳肥量过大有关。表明适量施用液态有机碳肥可促进烟苗地上部的生长。

表 2 施用液态有机碳肥的烟苗地上部生长性状

Table 2 Growth of tobacco above-ground seedling under liquid organic carbon fertilizer application

处理	移栽后时间/d	茎长/cm	茎围/cm	最大叶面积/cm ²	SPAD 值
T1	5	(8.35±0.22)b	(1.26±0.03)b	(61.65±3.31)b	(21.1±0.42)b
	15	(11.78±0.16)a	(1.69±0.29)a	(83.27±2.08)a	(29.54±0.59)a
T2	5	(8.45±0.34)b	(1.39±0.09)ab	(67.63±2.35)ab	(21.5±0.42)b
	15	(9.86±0.13)b	(1.46±0.15)b	(78.90±1.15)ab	(27.95±0.55)ab
T3	5	(10.10±0.40)a	(1.45±0.12)a	(71.37±2.08)a	(24.35±0.21)a
	15	(9.51±0.08)b	(1.41±0.26)b	(71.92±3.05)b	(26.79±0.73)b
CK	5	(8.05±0.15)c	(1.09±0.07)c	(48.17±5.56)c	(19.05±0.21)c
	15	(8.74±0.12)c	(1.20±0.16)c	(56.20±3.04)c	(23.94±0.46)c

同列同一移栽时间不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

由表 2 可知,施用液态有机碳肥处理的烟苗叶片 SPAD 值均大于 CK 的。移栽后第 5 天,T3 的 SPAD 值高于 T1、T2 的。恢复生长后至第 15 天,T1 的 SPAD 值高于 T3 的。说明施用液态有机碳肥可提高烟苗叶片的叶绿素含量。

2.3 施用液态有机碳肥对烟苗干物质积累与分配的影响

由表 3 可知,移栽后第 5 天,随液态有机碳肥施用量增加,烟苗干物质积累量增加,但只有 T3

的烟苗总干物质和地上部干物质积累量高于 CK 的, T3、T2 的烟苗根干物质积累量高于 CK 的;不同处理的烟苗地上部干物质分配比例为 92%~93%, 根干物质比例 7%~8%。恢复生长后至第 15 天, 施用液态有机碳肥处理的烟苗干物质积累量均高于 CK 的, 但随液态有机碳肥施用量增加而烟苗干物

质积累量降低;其中, T1 的烟苗干物质积累量高于 T2、T3 的; T1 的烟苗根干物质占比较 T2、T3 的高 2%左右, 较 CK 的高 5%左右。表明适量施用液态有机碳肥可提高烟苗干物质积累量, 特别是可提高烟苗根干物质比例。

表 3 施用液态有机碳肥的烟苗干物质积累及分配

Table 3 Dry matter accumulation and distribution of tobacco seedling under liquid organic carbon fertilizer application

处理	移栽后时间/d	每株干物质积累量/mg		占比/%	
		地上部	地下部	地上部	地下部
T1	5	(299.05±20.01)b	(25.48±4.98)c	92.18±0.93	7.82±0.93
	15	(750.00±84.85)a	(87.95±5.16)a	89.48±0.51	10.52±0.51
T2	5	(340.50±35.64)ab	(29.22±1.31)b	92.06±0.84	7.94±0.84
	15	(706.67±73.71)ab	(61.70±10.8)b	92.01±0.53	7.99±0.53
T3	5	(419.70±52.60)a	(34.00±9.69)a	92.59±1.36	7.41±1.36
	15	(623.33±47.26)b	(60.07±14.77)b	91.27±1.53	8.73±1.53
CK	5	(286.85±6.15)b	(23.42±3.43)c	92.45±1.17	7.55±1.17
	15	(560.00±40.00)c	(35.20±4.56)c	94.07±0.84	5.93±0.84

同列同一移栽时间不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.4 施用液态有机碳肥对叶片生理生化特性的影响

2.4.1 对烟叶丙二醛含量的影响

由表 4 可知, 移栽后第 5 天, T3 的烟叶 MDA 含量显著高于其他处理, T1 的叶片 MDA 含量显著低于

T2、T3、CK 的。恢复生长后至第 15 天, T1 的叶片 MDA 含量低于 T2、T3、CK 的。可见, 施用低浓度液态有机碳肥可减缓低温胁迫对烟苗的伤害。

表 4 施用液态有机碳肥的烟叶酶活性和丙二醛含量

Table 4 Enzymatic activities and malonaldehyde content of tobacco leaf under liquid organic carbon fertilizer

处理	移栽后时间/d	MDA 含量/ (mmol·g ⁻¹)	NR 活性/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	SOD 活性/ (U·g ⁻¹)	CAT 活性/ (U·g ⁻¹)	POD 活性/ (U·g ⁻¹)
T1	5	(0.67±0.02)c	(4.66±0.71)b	(345.05±18.33)c	(420.36±47.39)b	(1652.87±92.43)a
	15	(0.60±0.05)b	(16.58±0.33)a	(951.53±84.90)a	(2422.72±39.54)a	(666.00±18.98)a
T2	5	(0.80±0.06)b	(6.42±0.57)ab	(417.51±49.27)b	(444.09±57.66)b	(1675.74±31.82)a
	15	(0.68±0.03)a	(14.91±0.54)b	(804.24±70.47)ab	(2404.64±60.77)a	(618.22±58.61)a
T3	5	(0.95±0.05)a	(7.26±0.89)a	(628.06±86.60)a	(491.55±55.55)a	(1754.1±83.61)a
	15	(0.71±0.03)a	(12.76±1.05)c	(796.27±50.05)b	(2431.76±69.14)a	(523.11±41.18)a
CK	5	(0.77±0.07)b	(3.97±0.35)c	(311.17±16.50)c	(344.66±34.13)c	(711.28±55.25)b
	15	(0.71±0.05)a	(9.47±1.75)d	(646.83±54.32)c	(1961.68±21.06)b	(409.33±16.16)b

同列同一移栽时间不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.4.2 对烟叶硝酸还原酶活性的影响

硝酸还原酶(NR)是高等植物氮素同化的限速酶, 可直接调节硝酸盐还原, 从而调节氮代谢。由表 4 可看出, 施用液态有机碳肥的叶片 NR 活性均高于 CK 的。移栽后第 5 天, T3 的叶片 NR 活性高于其他处理。恢复生长后至第 15 天, T1 的叶片 NR 活性高于其他处理的。可见, 施用液态有机碳肥可

提高烟叶对氮素的同化能力。

2.4.3 对烟叶氧化酶活性的影响

由表 4 可知, 移栽后第 5 天, 施用液态有机碳肥处理的叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性均高于 CK 的; 以 T3 的叶片 SOD、CAT、POD 活性最高, 其次是 T2。恢复生长后至第 15 天, 施用液态有机碳肥处理的叶

片 SOD、CAT、POD 活性均高于 CK 的；以 T1 处理的叶片 SOD、CAT、POD 活性最高，其次是 T2。表明施用液态有机碳肥后能增强烟苗的抗寒能力。

3 讨论

南方烟区的伸根期常遇低温阴雨天气，这种低温冷害的非生物逆境胁迫严重影响烤烟的早生快发。植物最先感受逆境胁迫的器官是根系^[15]。烟草根系形态和生理特性与地上部的生长发育、产量和品质形成均有密切的关系^[16]。减少低温胁迫，促进烤烟早生快发，是南方烟区优质适产的一种重要且有效的栽培措施。本研究结果表明，在烟苗移栽初期施用适宜浓度的有机碳肥能促进烟苗根系的生长发育和形态建成，可增强根系对营养物质的吸收能力，从而增加干物质的合成与积累量，对缓解低温胁迫具有一定作用。

叶绿素含量与光合作用强度密切相关，作物在遭受低温胁迫时，叶绿素含量会显著降低^[17-18]。通过增水、施肥^[19]或施加外源物质^[20]等方法可以提高作物叶绿素含量。本研究结果表明，在低温胁迫环境中施用一定量的液态有机碳肥可以提高烟苗叶绿素含量，可能是由于有机碳肥的施入补充了一部分烟苗进行正常生理活动所需的化学物质，这在一定程度上可缓解低温胁迫带来的伤害。

生物量是衡量作物生长状况的重要指标，生物量的积累和分配是作物对环境最直接的响应。施用液态有机碳能提高烤烟干物质积累量的原因：一方面是提高烟叶的叶绿素含量，增强了光合作用，从而增加了烟苗同化物产量；另一方面是因为施用的碳肥是小分子有机碳，可以直接被根系吸收^[21]，继而参与后续的生理生化反应，相比于无机化肥肥效更好^[22]。

硝酸还原酶活性与烟叶氮素代谢密切相关。本研究结果表明，低温条件下的烟苗 NR 活性与有机碳施用量呈正相关，解除低温后烟苗 NR 活性与有机碳施用量呈负相关，说明在正常条件下较低的有机碳用量更适宜烟苗的生长，而在低温条件下烟苗氮代谢受到抑制，有机碳用量越高，烟苗对低温的抵抗能力越强。

温度是对酶活性影响最大的因素之一。低温胁迫使作物体内产生大量自由基，引起膜系统损伤，造成低温伤害。抗氧化酶是一类对氧化还原反应具

有催化作用，能够清除或代谢氧化物质的酶类，在作物逆境适应和生存中起着至关重要的作用^[23-24]。主要包括 SOD、POD 和 CAT，可在逆境胁迫中清除植物体内产生的 H_2O_2 ，减少氢氧自由基的形成，维持体内的活性氧代谢平衡和保护膜结构，减轻有毒物质对活细胞的毒害，从而使植物能在一定程度上忍耐、减缓或抵抗逆境胁迫^[25]。本研究中，在低温条件下，烟苗叶片膜脂过氧化程度加深，MDA 含量增加，施用液态有机碳肥的处理 SOD、POD 和 CAT 酶活性均高于对照处理，解除低温胁迫后 MDA 含量下降，且施用量 1.25 g/株的处理 MDA 含量显著低于对照，说明烟苗的抗氧化防御系统得到了充分响应，施加有机碳肥能降低低温胁迫的逆境生理，改善烟苗的生长环境，消减逆境胁迫，促进烟苗生长发育。

随着对碳营养重要性认识和有机碳肥研发的不断深入，在作物生产中应用有机碳肥取得了明显的增产、提质和抗逆效果，显示了有机碳肥的各种优势，提供了良好的示范和引领作用^[26-27]。理论上作物存在氮饥饿现象^[28]，现应用于烟草生产的氮+磷+钾+有机肥的平衡施肥体系已经建立，但有机碳肥与有机肥有着较大的区别，有机肥虽含碳丰富，但水溶性低，因而有效性低，其功效往往需要通过微生物的分解作用释放或改良土壤而缓慢显示出来，难以作为补碳的有效途径；而有机碳肥水溶性高(多为液态)，有效性强，易被植物吸收，能快速见效，能作为原有施肥体系有利的补充。有机碳营养在一定程度上可克服低温对烟苗生长的制约的效果，可以考虑把有机碳肥纳入烟草施肥体系。本试验研究对象为移栽期的烟苗，关于施用液态有机碳肥对烤烟整个生育期及烤后烟叶产质量的影响，还需进一步深入研究。

4 结论

施用有机碳肥可增强烟苗抗逆性，促进烟苗生长，在宏观上表现为地上部农艺性状、根系形态更佳及干物质积累更多，在微观上反映在根系活力、叶绿素含量及各抗氧化酶活性参数上。具体表现为：在低温胁迫条件下施用适宜浓度液态有机碳肥，可增加烟苗根系的干物质积累，提高根系活力，促进烟苗根系生长；可提高烟苗干物质积累量，提

高烟苗叶片的叶绿素含量,促进烟苗地上部分生长;可提高烟苗硝酸还原酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶的活性,从而提高烟叶对氮素的同化能力,增强烟苗的抗寒能力,减缓低温胁迫对烟苗的伤害。生产上,以施用 1.25~3.75 g/株的液态有机碳肥为宜。

参考文献:

- [1] 陈鹏宇,杨超,汪代斌,等.基于盆栽试验的促根剂对低温条件下烤烟地上部生长和根系发育的影响[J].烟草科技,2021,54(1):17-23.
CHEN P Y, YANG C, WANG D B, et al. Effects of root-promoting agents on flue-cured tobacco's shoot and root development grown at low temperature based on pot experiment[J]. Tobacco Science & Technology, 2021, 54(1): 17-23.
- [2] 祁帅,赖勇林,王军,等.壳聚糖对土壤栽培条件下烟草根系生长的影响[J].生态学杂志,2016,35(3):698-708.
QI S, LAI Y L, WANG J, et al. Effect of chitosan on tobacco root growth under soil cultivation condition[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(3): 698-708.
- [3] 周乾,王可,樊芬,等.生根粉在大田作物上的应用效果[J].作物研究,2014,28(4):447-450.
ZHOU Q, WANG K, FAN F, et al. Application effect of rooting powder on field crops[J]. Crop Research, 2014, 28(4): 447-450.
- [4] 向清慧,肖汉乾,杨坤,等.有机碳肥在作物生产上的应用研究进展[J].作物研究,2020,34(2):196-200.
XIANG Q H, XIAO H Q, YANG K, et al. Research progress on application of organic carbon fertilizers in crop production[J]. Crop Research, 2020, 34(2): 196-200.
- [5] 赖根伟,叶飞林,胡双台.有机碳肥对香榉幼林生长影响研究初报[J].林业科技,2017,42(4):10-12.
LAI G W, YE F L, HU S T. Preliminary report on the effect of organic carbon fertilizer on the growth of *Torreya grandis* young forest[J]. Forestry Science & Technology, 2017, 42(4): 10-12.
- [6] 付红梅,曹华,温从育.有机碳肥对油茶林地土壤养分和产量的影响[J].江苏林业科技,2017,44(3):31-34.
FU H M, CAO H, WEN C Y. Effects of organic carbon fertilizer on soil nutrients and yield of *Camellia oleifera* plantation[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology, 2017, 44(3): 31-34.
- [7] 陈秀莲,魏晓琼,吴德森.液态有机碳肥对蕹菜品质的影响[J].中国果菜,2014,34(12):67-69.
CHEN X L, WEI X Q, WU D M. Effect of liquid organic carbon fertilizer on the quality of water spinach quality[J]. China Fruit Vegetable, 2014, 34(12): 67-69.
- [8] 周少猛,马海艳,郑顺林,等.有机碳肥对酚酸胁迫下马铃薯开花期叶片抗逆性的影响[J].四川农业大学学报,2019,37(6):836-841.
ZHOU S M, MA H Y, ZHENG S L, et al. Effects of organic carbon fertilizer on the resistance of potato leaves to anthesis under phenolic acid stress[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(6): 836-841.
- [9] 王新月,肖汉乾,邓小华,等.追肥氮量对稻茬烤烟生长和养分积累的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(2):153-160.
WANG X Y, XIAO H Q, DENG X H, et al. Effect of different amounts of topdressing nitrogen on the growth and nutrient accumulation of flue-cured tobacco in rice-tobacco rotation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(2): 153-160.
- [10] 罗井清,邓小华,陈金,等.凹形双垄侧覆膜对耕层水热环境和上部烟叶生长及质量的影响[J].土壤,2019,51(5):1013-1019.
LUO J Q, DENG X H, CHEN J, et al. Effects of concave ridge double-row and side mulching on moisture and temperature of plough soil and growth of tobacco during late period of field-planting and quality of tobacco upper leaves[J]. Soils, 2019, 51(5): 1013-1019.
- [11] 张志良,瞿伟菁,李小方.植物生理学实验指导[M].4版.北京:高等教育出版社,2009.
ZHANG Z L, QU W J, LI X F. Experimental Guidance of Plant Physiology[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [12] 孙光伟,陈振国,王玉军,等.烤烟上部叶采收时 SPAD 值与鲜烟组织结构、生理指标及烤后烟叶内在质量的关系[J].中国烟草学报,2019,25(5):63-69.
SUN G W, CHEN Z G, WANG Y J, et al. Relationships of SPAD value with tissue structure, physiological index and internal quality of flue-cured tobacco upper leaves[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2019, 25(5): 63-69.
- [13] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2003:167-169.
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 167-169.
- [14] 刘海英,崔长海,刘萍,等.适当增添实验内容的活体法测定植物体内硝酸还原酶活性的实验教学[J].植物生理学通讯,2010,46(2):171-172.
LIU H Y, CUI C H, LIU P, et al. Experimental teaching of determining nitrate reductase activity in plants by in vivo method with appropriate experimental content[J]. Plant Physiology Communications, 2010, 46(2): 171-172.
- [15] 刘莹,盖钧镒,吕慧能.作物根系形态与非生物胁迫耐受性关系的研究进展[J].植物遗传资源学报,2003,4(3):265-269.
LIU Y, GAI J Y, LYU H N. Advances of the relationship between crop root morphology and tolerance abiotic stress[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2003, 4(3): 265-269.

- 265–269 .
- [16] 安飞飞, 李庚虎, 陈霆, 等. 低温胁迫对木薯叶片叶绿素荧光参数及 PS II 相关蛋白表达水平的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(2): 148–152 .
AN F F, LI G H, CHEN T, et al . Influence of low temperature stress on chlorophyll fluorescence parameters and expression levels of proteins in PS II cassava[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2014, 40 (2) : 148–152 .
- [17] VAN HASSELT P R .Photo-oxidation of leaf pigments in *Cucumis* leaf discs during chilling[J] . Acta Botanica Neerlandica , 1972 , 21(5) : 539–548 .
- [18] FRIEND D J C . The control of chlorophyll accumulation in leaves of marquis wheat by temperature and light intensity[J] .Physiologia Plantarum ,1961 ,14(1) :28–39 .
- [19] 张晓琳, 陈梦恬, 翟鹏辉, 等. 增水和施肥对苜蓿-冬小麦轮作系统冬小麦叶片光合速率和叶绿素含量的影响[J] . 山西农业大学学报(自然科学版), 2019, 39(4) : 40–46 .
ZHANG X L, CHEN M T, ZHAI P H, et al . Effects of water and fertilizer addition on photosynthetic rate and chlorophyll content of winter wheat leaves in alfalfa winter wheat rotation system[J] . Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 39 (4) : 40–46 .
- [20] 王志红, 孔德钧, 陈丽莉, 等. 低氮下外源海藻糖对烤烟叶绿素代谢及叶绿体发育的影响[J] . 南方农业学报, 2019, 50(6) : 1191–1196 .
WANG Z H, KONG D J, CHEN L L, et al . Effects of exogenous trehalose on chlorophyll metabolism and chloroplast development of flue-cured tobacco under low nitrogen condition[J] . Journal of Southern Agriculture , 2019, 50 (6) : 1191–1196 .
- [21] 莫良玉, 吴良欢, 陶勤南. 高等植物对有机氮吸收与利用研究进展[J] . 生态学报, 2001, 22(1) : 118–124 .
MO L Y, WU L H, TAO Q N . Advance in study of plant organic nitrogen nutrition[J] . Acta Ecologica Sinica , 2001, 22 (1) : 118–124 .
- [22] 吴良欢, 陶勤南. 水稻氨基酸态氮营养效应及其机理研究[J] . 土壤学报, 2000, 37(4) : 464–473 .
WU L H, TAO Q N . Effects of amino acid-n on rice nitrogen nutrition and its mechanism[J] . Acta Pedologica Sinica , 2000, 37(4) : 464–473 .
- [23] 刘强, 贺根和, 柳正葳, 等. 外源一氧化氮对铝胁迫下烟草叶片光能利用和光保护系统及活性氧代谢的影响[J] . 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(6) : 615–621 .
- LIU Q, HE G H, LIU Z W, et al . Effects of exogenous nitric oxide on light energy utilization, photoprotective systems and reactive oxygen metabolism in leaves of tobacco seedling under aluminum stress[J] . Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2016, 42 (6) : 615–621 .
- [24] 胡国霞, 马莲菊, 陈强, 等. 植物抗氧化系统对水分胁迫及复水响应研究进展[J] . 安徽农业科学, 2011, 39(3) : 1278–1280 .
HU G X, MA L J, CHEN Q, et al . Research progress on the response of plant antioxidant system to water stress and rewatering[J] . Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(3) : 1278–1280 .
- [25] 赵卫星, 刘喜存, 李晓慧, 等. 甜瓜幼苗对逆境胁迫的生理响应及抗逆性综合评价[J] . 西南农业学报, 2017, 30(2) : 322–326 .
ZHAO W X, LIU X C, LI X H, et al . Physiological responses of muskmelon seedlings of different adversity stresses and synthetical evaluation of stress resistance[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30 (2) : 322–326 .
- [26] 桂丕, 廖宗文, 汪立梅, 等. 弱光照条件下有机碳营养对水稻生长的影响[J] . 土壤通报, 2015, 46(4) : 936–939 .
GUI P, LIAO Z W, WANG L M, et al . Effects of organic carbon nutrition on rice growth under weak light conditions[J] . Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(4) : 936–939 .
- [27] 桂丕, 陈娴, 廖宗文, 等. 不同氮水平下有机碳对蔬菜碳氮代谢及生长的影响[J] . 土壤学报, 2016, 53(3) : 746–756 .
GUI P, CHEN X, LIAO Z W, et al . Effect of organic carbon on carbon and nitrogen metabolism and the growth of water spinach as affected by soil nitrogen [J] . Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(3) : 746–756 .
- [28] 廖宗文, 毛小云, 刘可星. 重视有机营养研究与有机碳肥创新——关于植物营养经典理论的现代思考[J] . 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6) : 1694–1698 .
LIAO Z W, MAO X Y, LIU K X . More attention to organic nutrition research and innovation of organic carbon fertilizers : A modern thinking about classic plant nutrient theory[J] . Journal of Plant Nutrition and Fertilizer , 2017, 23 (6) : 1694–1698 .

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维