



谢沛宁,武占会,王宝驹,刘宁,梁浩,王丽萍,佟静. 不同营养液温度对植物工厂生菜品质及干烧心的影响[J]. 中国农业大学学报,2025,30(01):65-75.
XIE Peining, WU Zhanhui, WANG Baoju, LIU Ning, LIANG Hao, WANG Liping, TONG Jing. Effects of different nutrient solution temperatures on quality and tipburn of lettuce in plant factory[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(01):65-75.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.01.06

不同营养液温度对植物工厂生菜品质及干烧心的影响

谢沛宁^{1,2} 武占会¹ 王宝驹¹ 刘宁¹ 梁浩¹ 王丽萍² 佟静^{1*}

(1. 北京市农林科学院 蔬菜研究所/农业农村部华北都市农业重点实验室,北京 100097;

2. 河北工程大学 园林与生态工程学院,河北 邯郸 056038)

摘 要 为促进人工光植物工厂中生菜(*Lactuca sativa* L.)的生长,降低生菜干烧心的发生率,以‘意大利’‘绿雅’生菜为试材,采用营养液培养法,设置3个不同营养液的温度:T1(16℃)、T2(21℃)、T3(26℃),分析不同的营养液温度对生菜品质以及干烧心情况的影响。结果表明:随着液温的升高,生菜的各项品质逐渐升高,在26℃时达到最大。与16℃相比,营养液温度在26℃时,‘意大利’‘绿雅’生菜可溶性糖含量增加66.79%和66.98%,根系活力增加105.83%和107.15%,总酚含量增加21.86%和18.75%,类黄酮含量增加33.17%和35.35%。2种生菜在液温26℃时,叶绿素含量和净光合速率均达到最大值,与其它处理差异显著($P<0.05$)。液温的升高降低了干烧心的发生率以及烧心的严重程度。综上,当营养液温度为26℃时生菜的品质提升最大,本研究对设施蔬菜高品质生产具有重要意义。

关键词 生菜;植物工厂;根区温度;干烧心;营养品质

中图分类号 S636.2

文章编号 1007-4333(2025)01-0065-11

文献标志码 A

Effects of different nutrient solution temperatures on quality and tipburn of lettuce in plant factory

XIE Peining^{1,2}, WU Zhanhui¹, WANG Baoju¹, LIU Ning¹, LIANG Hao¹, WANG Liping²,
TONG Jing^{1*}

(1. Beijing Vegetable Research Center/Key Laboratory of Urban Agriculture (North) of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

2. College of Landscape and Ecological Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract To promote the growth of lettuce in artificial light plant factories and reduce the incidence of tipburn of lettuce, this experiment took ‘Italian’ and ‘Luya’ lettuce as test materials, adopted nutrient solution cultivation method, and set three different nutrient solution temperatures including T1 (16℃), T2 (21℃) and T3 (26℃) to analyze the effects of different nutrient solution temperatures on lettuce quality and tipburn. The results showed that: With the increase of liquid temperature, the quality of lettuce was significantly improved at lower temperature, and reached the maximum at 26℃. Compared with 16℃, the soluble sugar content of ‘Italy’ and ‘Luya’ increased by 66.79% and 66.98%, respectively. Root activity increased by 105.83% and 107.15%; Total phenols increased by 21.86% and 18.75%; Flavonoids increased by 33.17% and 35.35%; Chlorophyll and net photosynthetic rate were the highest among all

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 北京市农林科学院青年科研基金资助项目(QNJJ202248);北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20210402);北京市农林科学院蔬菜研究中心改革与发展项目(KYCX202306)

第一作者: 谢沛宁(ORCID:0009-0008-0187-1066),硕士研究生,E-mail:445823205@qq.com

通讯作者: 佟静(ORCID:0009-0007-1963-2285),助理研究员,主要从事蔬菜栽培生理与品质调控研究,E-mail:tongjing@necv.org

treatments. The increase of liquid temperature reduces the incidence and severity of tipburn. In summary, when the nutrient solution temperature is 26 °C, the quality of lettuce is improved the most. This study is of great significance for the high-quality production of facility vegetables.

Keywords lettuce; plant factory; root zone temperature; tipburn; nutritional quality

生菜又名叶用莴苣,为菊科莴苣属一年或二年生草本植物^[1]。在人工光植物工厂中,生菜种植不受季节限制四季均可种植;生菜生长周期短、无连作障碍,清洁无污染,可以实现周年连续供应,是植物工厂中广泛种植的代表性蔬菜^[2]。生菜干烧心是蔬菜生产中常见的生理性病害,设施栽培中干烧心发生率比较高,严重降低了蔬菜产品的质量,限制产业的发展^[3]。近年来为了探究植物工厂内生菜品质提升和干烧心病的发病机制,降低其发病率,国内外学者在通风、环境湿度、光照和营养液等方面进行了一定的研究。通风、环境湿度影响植物的蒸腾作用;光照环境影响植物的光合作用;在水培条件下,植株生长发育所需要的水分和养分均由营养液提供,营养液的成分和特性发生变化时,植株的发育和品质就会受到影响^[4-8]。营养液温度作为蔬菜水培系统中一个重要的特性参数,影响植物的生长速度、营养液的溶氧含量、根系活性和养分吸收利用等^[9],营养吸收不均衡可能导致叶菜干烧心发生。目前在营养液的养分组成和空气温度等方面对水培蔬菜所产生的生理变化已积累了较多的资料^[10-11],但在营养液温度对水培生菜生长及对品质的影响方面研究相对较少。根区温度对植物根系的生长有很大影响,同时根系的生长对地上部的生长又有一定的调节作用^[12]。

在水培条件下,由于植株根系直接浸泡在营养液中,所以一般用液温来代表根区温度。与气温相比,根区温度胁迫对植物根系和地上部分的影响更多^[13-14],这是由于植物根系在很长一段时间都生长在温度变化相对温和的地下而出现的一种生物学性质,同样也解释了根区温度对植物生理活性的影响大于大气温度这一现象^[15]。研究表明,营养液温度过高会降低营养液溶氧含量,加快植物根系呼吸作用,加速植物根系衰老,抑制根系对水分和养分的吸收,可能导致干烧心现象和叶片光合作用受阻^[16-18]。同样,营养液温度过低也会使植物根系对营养物质的吸收受阻,可能导致叶片因缺乏营养而发生干烧心现象,不能满足地上部的生长需求^[19]。根区温度对设施生菜生长发育的影响已有一定的

研究^[3],但是对根系活力、叶绿素含量和抗干烧病等方面缺乏系统研究。为了提升植物工厂生菜品质,降低生菜叶片干烧心的发病率,本研究拟通过调控水培生菜根系营养液温度的方法提升生菜品质、根系活力和干烧心抗性,分析不同营养液温度对生菜的生长、营养液品质、光合参数和干烧心发生的影响,确定适宜的营养液温度,以期为植物工厂以及设施蔬菜大面积高品质蔬菜的生产提供理论依据和科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用‘意大利’‘绿雅’生菜为试验材料,播种于2023年3月25日。在人工光植物工厂内将圆孔海绵放入盛水的塑料托盘中反复挤压令其完全浸透,选取饱满的种子置于海绵块中心圆孔,将播种好的托盘放置在暗处经过48 h加速催芽;2 d后种子露白,将生菜苗置于栽培架育苗13 d。育苗期光源为白光,光周期为14 h(光)/10 h(暗)。营养液采用国家蔬菜工程技术研究中心研发的营养液(pH 6.0±0.5;EC(1.5±0.1)mS/cm)。育苗完成后,于4月9日定植于六孔苗盘。

1.2 试验设计

试验在北京市农林科学院蔬菜研究所(116°29' E, 39°41' N)人工光植物工厂水培系统中进行。定植试验区光照采用LED灯光,光周期为14 h(光)/10 h(暗),光照强度为200 μmol/(m²·s),营养液采用国家蔬菜工程技术研究中心研发的营养液(pH 6.0±0.5;EC(2.2±0.1)mS/cm)。植物工厂室内温度恒定设定为22 °C,室内湿度为80%,CO₂浓度为1 800 μmol/mol。营养液温度通过在栽培系统循环营养液储液槽中置入制冷器和加热棒进行温度控制。试验设置3个不同营养液温度:16、21和26 °C,2个生菜品种每个处理定植36棵,每3 d测量生长指标,记录生菜的干烧心情况。具体处理为:T1(意)、T2(意)、T3(意):‘意大利’生菜,营养液温度分别为16、21和26 °C;T1(绿)、T2(绿)、T3(绿):‘绿雅’生菜,营养液温度分别为16、21和26 °C。于

4月29日采收,统一测量生菜品质,进行差异分析。

1.3 项目测定

1.3.1 生长指标测定

每3 d对生菜的各项生长指标进行测定,用直尺测定植株株高、叶长和叶宽,用天平称量地上、地下鲜重,分别统计各个处理的干烧心情况。在2023年4月29日最后一次测量记录各项生长指标以及干烧心情况,并将新鲜的生菜植株放入105℃的烘箱中青杀1 h,然后再置于75℃的烘箱中烘干至恒重,用分析天平称取干重,每处理3次重复。

1.3.2 品质与生理指标测定

对生菜叶片进行随机取样,采用2,6-二氯酚靛酚滴定法测定维生素C含量;采用硫酸-蒽酮比色法测定生菜叶片可溶性糖含量,采用考马斯亮蓝染色法测定可溶性蛋白含量,采用水杨酸法测定硝酸氮含量^[20]。采用紫外可见分光光度法测定总酚和类黄酮含量^[21],采用氯化三苯基四氮唑氯化物(TTC)还原法测定根系活力^[20],采用95%乙醇浸提法测定光合色素含量^[20]。

1.3.3 光合参数和叶绿素荧光参数测定

光合气体交换参数:包含净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr),利用LI-6400便携式光合仪测定。

叶绿素荧光参数:包括非光化学淬灭系数(NPQ)、光化学淬灭系数(qP)、稳态荧光衰减率(Rfd);计算参数包括PSII最大光化学效率(Fv/Fm)、PSII潜在光化学效率(Fv/Fo)、实际光化学效

率(ΦPSII)。将样品取下后迅速置于暗处暗适应20 min,用FluorCam叶绿素荧光成像仪测定。

1.3.4 干烧心指标测定

干烧心株数:每个处理中发生干烧心病害的生菜总株数。

单株最大叶片干烧心数:每个处理中所有干烧心病株中单株干烧心叶片数的最大值。

干烧心率=干烧心的叶片数/总叶片数 (1)

干烧心病株平均干烧心数=处理中干烧心叶片数/干烧心病株数 (2)

1.4 数据分析

采用模糊评价隶属函数法建立模型,对生菜叶片品质指标数据进行标准化处理,将得到的结果建立矩阵并结合各指标的权重系数得到各指标最终的隶属函数值。权重系数根据生菜评价标准及文献[22-23]确定,其中可溶性糖含量、维生素C含量、可溶性蛋白含量、硝态氮含量、总酚含量、总黄酮含量和抗干烧心率等评价指标的权重系数分别为0.30、0.15、0.20、-0.40、0.20、0.20和0.35。采用SPSS 26.0和Excel 2013软件进行数据统计与分析,采用Duncan新复极差法进行差异显著性检验(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 不同营养液温度对生菜形态的影响

不同营养液温度处理下生菜植株形态以及叶片数的变化见表1。在不同营养液温度处理下,随

表1 不同营养液温度对生菜形态的影响

Table 1 Effects of different nutrient solution temperatures on lettuce morphology

处理 Treatment	株高/cm Plant height	叶长/cm Leaf length	叶宽/cm Leaf width	冠幅/cm Crown width	叶片数/片 Blade number
T1(意)	7.60±0.20c	7.70±0.35c	8.37±0.58c	12.83±0.32b	12.00±0.33c
T2(意)	11.67±0.43b	11.87±0.33b	11.97±0.62b	16.70±0.44a	16.67±0.33b
T3(意)	14.43±0.26a	14.57±0.30a	14.73±0.39a	17.83±0.68a	18.67±0.33a
T1(绿)	8.77±0.15c	10.60±0.85c	12.73±0.43c	15.47±0.75b	12.67±0.33c
T2(绿)	13.33±0.09b	14.90±0.21b	16.13±0.35b	26.40±0.44a	17.33±0.33b
T3(绿)	16.80±0.21a	17.67±0.44a	18.37±0.35a	27.63±0.66a	18.67±0.33a

注:T1(意)、T2(意)、T3(意)表示‘意大利’生菜,营养液温度分别为16、21、26℃;T1(绿)、T2(绿)、T3(绿)表示‘绿雅’生菜,营养液温度分别为16、21、26℃。同列数值后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)水平。下同。

Note: T1 (Italy), T2 (Italy) and T3 (Italy) represent ‘Italian’ lettuce, and the nutrient solution temperatures are 16, 21 and 26 °C, respectively. T1 (green), T2 (green) and T3 (green) represent ‘Luya’ lettuce, and the nutrient solution temperatures are 16, 21 and 26 °C, respectively. Values followed by different lowercase letters within a column are significantly different at P<0.05. The same below.

着营养液温度的升高 T3处理的植株株高、叶长、叶宽和叶片数显著高于 T1、T2处理($P<0.05$)。T2、T3处理冠幅显著高于 T1处理($P<0.05$)，T2、T3处理差异不显著。从植株形态上综合得出，营养液温度为 26℃更有利于生菜的形态发育。

不同营养液温度处理对生菜生长影响显著(表 2)，叶片鲜重、根系鲜重、叶片干重随着营养液温度的增加呈增加趋势。在‘意大利’中，T2和 T3处理叶片

鲜重均显著高于 T1处理($P<0.05$)，T2、T3处理分别高出 T1处理 54.65% 和 66.79%。叶片干重和根系干重变化趋势一致，T3处理叶片干重显著高出 T1处理 43.51%、T2处理 18.18%。在‘绿雅’中，T3处理叶片鲜重最大，分别高出 T1、T2处理 110.63% 和 16.32%。叶片干鲜重和根系干鲜重变化趋势一致，3个温度处理之间差异显著($P<0.05$)。T3处理叶片干重最大，分别高出 T1、T2处理 66.98% 和 15.27%。

表 2 不同营养液温度对生菜生长的影响

Table 2 Effects of different nutrient solution temperatures on lettuce growth					g
处理 Treatment	叶片鲜重 Leaf fresh weight	根系鲜重 Root fresh weight	叶片干重 Leaf dry weight	根系干重 Root dry weight	
T1(意)	61.37±2.79b	17.38±0.12b	3.08±0.07c	0.70±0.03c	
T2(意)	94.91±1.85a	19.50±0.19ab	3.74±0.16b	0.87±0.03b	
T3(意)	102.36±2.91a	23.37±1.58a	4.42±0.19a	1.00±0.04a	
T1(绿)	66.99±1.11c	13.87±0.53c	3.21±0.12c	0.70±0.02c	
T2(绿)	121.30±2.72b	16.37±0.30b	4.65±0.19b	0.84±0.02b	
T3(绿)	141.10±3.36a	19.66±0.29a	5.36±0.13a	0.94±0.02a	

2.2 不同营养液温度对生菜品质的影响

不同营养液温度处理对生菜维生素 C 含量的影响无显著差异，可溶性糖和可溶性蛋白含量随着温度增加呈增加趋势，硝态氮含量随着温度增加呈减少趋势(表 3)。在‘意大利’生菜中，T2和 T3处理可溶性糖含量均显著高于 T1处理($P<0.05$)，分别高出 T1处理 1.58 和 3.17%；T3处理可溶性蛋白含

量最大，分别高出 T1和 T2处理 3.58%、0.73%；T1处理硝态氮含量显著大于 T2和 T3处理($P<0.05$)。在‘绿雅’生菜中，T3处理可溶性糖含量最大，分别高出 T1和 T2处理 2.38%、0.78%；T3处理可溶性蛋白含量最大，高出 T1和 T2处理 2.75% 和 0.90%；T1处理硝态氮含量最大，显著高出 T2处理 7.82%、T3处理 10.32%($P<0.05$)。

表 3 不同营养液温度对生菜品质的影响

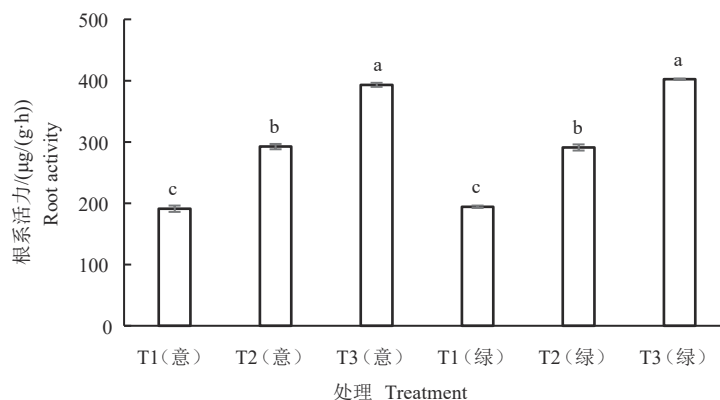
Table 3 Effects of different nutrient solution temperatures on lettuce quality				
处理 Treatment	维生素 C / (mg/100 g) Vitamin C	可溶性糖 / % Soluble sugar	可溶性蛋白 / (mg/g) Soluble protein	硝态氮 / (mg/kg) Nitrate nitrogen
T1(意)	20.24±0.39a	1.26±0.01b	5.31±0.02b	4 018.82±42.33a
T2(意)	20.65±0.67a	1.28±0.01a	5.46±0.01a	3 828.55±38.27b
T3(意)	20.63±0.02a	1.30±0.01a	5.50±0.02a	3 738.93±33.43b
T1(绿)	20.25±0.39a	1.26±0.01b	5.45±0.02b	4 086.86±30.26a
T2(绿)	20.23±0.38a	1.28±0.01a	5.55±0.02a	3 790.31±48.06b
T3(绿)	21.41±0.40a	1.29±0.01a	5.60±0.02a	3 704.40±37.43b

2.3 不同营养液温度对生菜根活、总酚、类黄酮、光合色素的影响

2.3.1 对生菜根系活力的影响

不同营养液温度处理对生菜根系活力的影响差异显著，生菜根系活力随着营养液温度增加呈增

加趋势(图 1)。在‘意大利’中，T3处理根系活力最大，分别高出 T1和 T2处理 105.83%、34.47%。在‘绿雅’中，T3处理根系活力最高，分别高出 T1和 T2处理 107.15%、38.28%。随着营养液温度的升高，2种生菜的根系活力均为 T3>T2>T1。



T1(意)、T2(意)、T3(意)表示‘意大利’生菜,营养液温度分别为16、21、26℃;T1(绿)、T2(绿)、T3(绿)表示‘绿雅’生菜,营养液温度分别为16、21、26℃。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

T1 (Italy), T2 (Italy) and T3 (Italy) represent ‘Italian’ lettuce, and the nutrient solution temperatures are 16, 21 and 26 °C, respectively. T1 (green), T2 (green) and T3 (green) represent ‘Luya’ lettuce, and the nutrient solution temperatures are 16, 21 and 26 °C, respectively. Values followed by different lowercase letters within a column are significantly different at $P<0.05$. The same below.

图1 不同营养液温度对生菜根系活力的影响

Fig. 1 Effects of different nutrient solution temperatures on root activity of lettuce

2.3.2 对生菜总酚以及类黄酮含量的影响

营养液温度不同对生菜总酚含量影响较大,生菜总酚含量随着营养液温度增加呈增加趋势(图2)。在‘意大利’中,T3处理总酚含量最大,分别高

出T1和T2处理21.86%、12.34%。在‘绿雅’中,T3处理总酚含量最大,分别高出T1和T2处理18.75%、10.91%。随着营养液温度的升高,2种生菜中总酚含量均为T3>T2>T1。

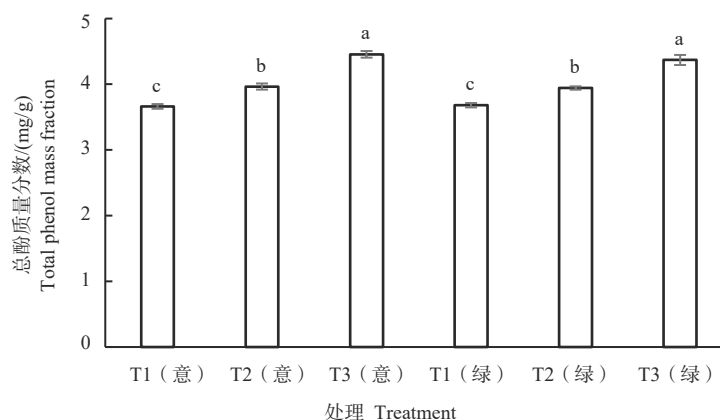


图2 不同营养液温度对生菜总酚含量的影响

Fig. 2 Effects of different nutrient solution temperatures on the total phenol content of lettuce

不同营养液温度处理中生菜类黄酮含量随着营养液温度增加呈增加趋势(图3)。2种生菜中类黄酮含量均为T3>T2>T1,且T3和T1、T2处理间差异显著($P<0.05$)。

2.3.3 对生菜光合色素含量的影响

生菜叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和总叶绿素

2.4 不同营养液温度对生菜光合参数的影响

不同营养液温度处理对生菜光合参数的影

含量随着温度增加呈增加趋势(表4)。在‘意大利’中,T3处理叶绿素总量最大,分别高出T1和T2处理15.25%、7.94%。在‘绿雅’中,T3处理叶绿素总量最大,分别高出T1和T2处理23.00%、11.82%。叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素与总叶绿素含量变化趋势一致,均随着温度增加呈增加趋势。

响如表5所示。2种生菜叶片的净光合速率随着营养液温度的增加而增加,在T3处理达到最大,

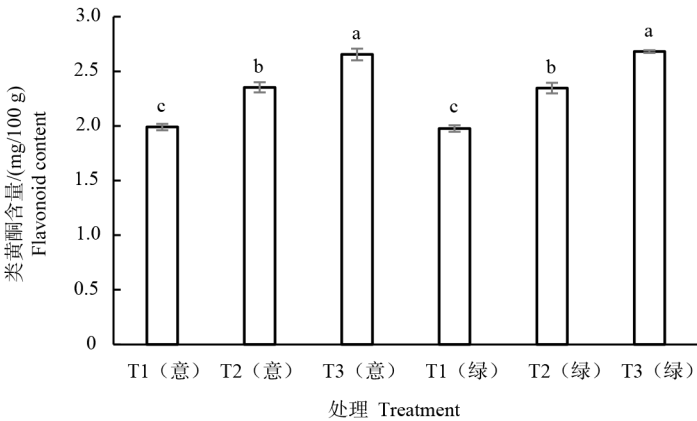


图3 不同营养液温度对生菜类黄酮含量的影响

Fig. 3 Effects of different nutrient solution temperatures on flavonoid content in lettuce

表4 不同营养液温度对生菜光合色素含量的影响

Table 4 Effects of different nutrient solution temperatures on photosynthetic pigment of lettuce mg/g

处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoids	叶绿素总量 Total chlorophyll
T1(意)	0.43±0.01b	0.16±0.01c	0.08±0.00b	0.59±0.01b
T2(意)	0.46±0.02ab	0.17±0.03b	0.09±0.01ab	0.63±0.02ab
T3(意)	0.49±0.01a	0.18±0.04a	0.10±0.00a	0.68±0.01a
T1(绿)	0.72±0.00c	0.28±0.00c	0.14±0.00c	1.00±0.01c
T2(绿)	0.79±0.01b	0.31±0.00b	0.16±0.00b	1.10±0.01b
T3(绿)	0.89±0.01a	0.34±0.01a	0.18±0.01a	1.23±0.01a

且显著高于 T1、T2 处理 ($P<0.05$)；胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率随着营养液温度的增加变化趋势相似，均在 T3 处理达到最大；气孔导度随着营养液温度的增加，在 T3 处理时最大且显著高于 T1、T2 处理 ($P<0.05$)，T1、T2 处理间无显著差异。

表5 不同营养液温度对生菜光合参数的影响

Table 5 Effects of different nutrient solution temperatures on photosynthetic parameters of lettuce

处理 Treatment	净光合速率/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Net photosynthetic rate	气孔导度/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度/ ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) Intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率/ ($\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) Transpiration rate
T1(意)	14.58±0.61c	0.14±0.01b	248.64±12.57b	1.44±0.03c
T2(意)	17.19±0.20b	0.16±0.01b	263.81±9.25ab	1.65±0.04b
T3(意)	19.37±0.62a	0.19±0.01a	298.56±8.78a	1.82±0.05a
T1(绿)	17.16±0.57c	0.17±0.01b	260.68±8.77c	1.50±0.03b
T2(绿)	18.90±0.46b	0.19±0.01b	285.54±5.00b	1.70±0.08ab
T3(绿)	21.44±0.63a	0.22±0.01a	312.98±5.74a	1.88±0.06a

2.5 不同营养液温度对生菜叶绿素荧光参数的影响

不同营养液温度处理下,2 种生菜叶片的最大光化学效率随着营养液温度的增加而增加,在 T3

处理达到最大;2 种生菜的实际光化学效率和非光化学淬灭均在 T3 处理达到最大且显著高于 T1、T2 处理($P<0.05$);光化学淬灭也在 T3 处理达到最大值(表 6)。

表 6 不同营养液温度对生菜叶绿素荧光参数的影响
Table 6 Effects of different nutrient solution temperatures on chlorophyll fluorescence parameters of lettuce

处理 Treatment	最大光化学效率 Maximum photochemical efficiency	实际光化学效率 Actual photochemical efficiency	光化学淬灭 Photochemical quenching	非光化学淬灭 Non-photochemical quenching
T1(意)	0.75±0.01b	0.63±0.01c	0.33±0.01b	0.31±0.003c
T2(意)	0.81±0.01a	0.66±0.00b	0.39±0.01a	0.35±0.01b
T3(意)	0.82±0.00a	0.68±0.00a	0.41±0.00a	0.41±0.01a
T1(绿)	0.74±0.01b	0.63±0.01c	0.33±0.01c	0.32±0.01c
T2(绿)	0.81±0.01a	0.65±0.01b	0.38±0.01b	0.36±0.01b
T3(绿)	0.83±0.00a	0.67±0.00a	0.42±0.01a	0.42±0.01a

2.6 不同营养液温度对生菜干烧心的影响

不同营养液温度处理对生菜干烧心病情影响结果见表 7。在‘意大利’中,T1 处理总干烧心株数为 23 株,随着营养液温度的升高,干烧心病情呈降低趋势;T3 处理中,烧心株数降为 11 株,分别比 T1 和 T2 处理降低了 52.17%、47.62%。在‘绿雅’中,T1 处

理烧心株数为 16 株,随着营养液温度的升高,干烧心病情呈降低趋势;T3 处理中,烧心株数降为 7 株,分别比 T1 和 T2 处理降低了 56.25%、50.00%。在‘意大利’和‘绿雅’2 种生菜中,总干烧心株数、干烧心占全部比例、最大单株干烧心叶片数和病株平均干烧心叶片数均随着液温的升高,呈现降低趋势。

表 7 不同营养液温度对生菜干烧心的影响
Table 7 Effects of different nutrient solution temperatures on dry heartburn of lettuce

处理 Treatment	总干烧心株数/株 No. of tipburn plants	干烧心株数占全部比例/% No. of tipburn plants accounted for all proportion	最大单株干烧心叶片 数/片 Maximum of tipburn leaves per plant	病株平均干烧心叶片 数/片 Average number of tipburn leaves
T1(意)	23	63.9	8	7.33±0.33
T2(意)	21	58.3	6	5.33±0.66
T3(意)	11	30.6	4	3.33±0.66
T1(绿)	16	44.4	6	5.33±0.33
T2(绿)	14	38.8	5	4.33±0.33
T3(绿)	7	19.4	4	3.00±0.57

调控营养液温度对生菜第一次发生干烧心的时间有明显的影 响,从图 4 可以看出,对营养液进行降温的 T1 处理虽然推迟了生菜第一次烧心病害的发生时间和烧心程度,但随着生长天数的增加,烧心株数和总烧心株数逐渐高于 T2 和 T3 处理。在统计的最后一天总干烧心株数 T1>T2>T3。

2.7 不同营养液温度对生菜品质的综合评价

不同处理间品质指标的隶属函数值、累加的最终隶属函数值和排名结果如表 8 所示。结果表明‘意大利’‘绿雅’生菜均在 T3 处理隶属函数值最高,品质最好,排名第一;2 种生菜均在 T2 处理位列第二,品质较好;在 T1 处理隶属函数值最低,品质最低。

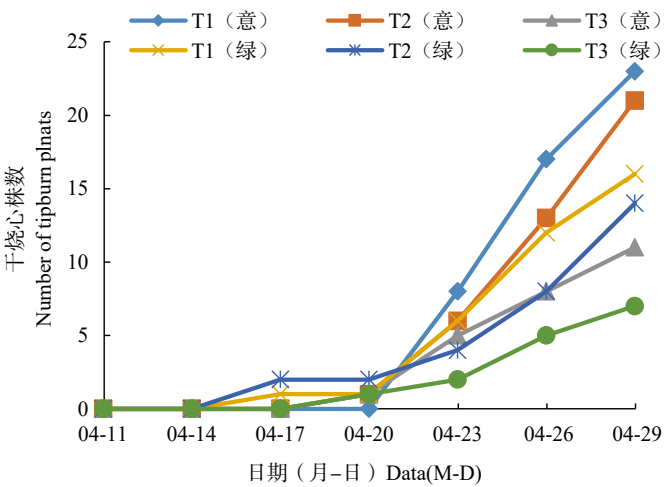


图4 不同营养液温度对生菜干烧心株数的影响

Fig. 4 Effects of different nutrient solution temperatures on the number of dry-boiled lettuce plants

表8 不同营养液温度对生菜品质的综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of different nutrient solution temperatures on lettuce quality

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar	维生素C Vitamin C	可溶性蛋 白 Soluble protein	硝态氮 Nitrate nitrogen	总酚 Total phenol	类黄酮 Flavonoids	抗烧心率 Resistance tipburn probability	隶属函数值 Membership function value	排名 Ranking
T1(意)	0.000	0.000	0.000	−0.400	0.000	0.000	0.000	−0.400	3
T2(意)	0.150	0.150	0.158	−0.128	0.076	0.110	0.064	0.579	2
T3(意)	0.300	0.143	0.200	0.000	0.200	0.200	0.350	1.393	1
T1(绿)	0.000	0.003	0.000	−0.400	0.000	0.000	0.000	−0.397	3
T2(绿)	0.200	0.000	0.133	−0.090	0.076	0.105	0.070	0.495	2
T3(绿)	0.300	0.150	0.200	0.000	0.200	0.200	0.350	1.400	1

3 讨论与结论

温度是影响植物生长的重要因素之一,营养液温度作为植物工厂营养液栽培的一个特性指标^[16-17,24],与植株根系生长密切相关,营养液温度会影响植物营养生长阶段干物质的积累^[25]。本研究对营养液温度进行调节后,生菜的形态出现差异,随着营养液温度的升高,T3处理叶长、叶宽、叶片数的数值显著高于其他处理,冠幅高于其他处理。T3处理叶片鲜重、根系鲜重、叶片干重高于其他处理,这与前人的研究相一致^[26]。

抗氧化物是清除自由基的重要物质,通过日常饮食,摄取足够的抗氧化物,才可免除自由基对人体健康造成的伤害。维生素C是生菜重要的营养衡量指标之一,参与抗坏血酸谷胱甘肽循环系统清除

活性氧^[27-28]。植物的抗氧化活性通常被认为与总酚、总黄酮含量相关,总酚和类黄酮等酚类物质是植物体内重要的次生代谢产物,能够清除自由基,提高植物的抗氧化能力^[29]。本试验结果表明随着营养液温度的升高,生菜维生素C含量无显著差异,黄酮以及总酚类物质随着营养液温度的升高含量增高,说明根区温度在26℃时,可以提升生菜的品质指标。

植物根系是植物吸收水分和养分的器官,植物正常的生长发育是地上叶片光合作用和地下根系吸收水分和养分的系统过程^[30]。营养液温度升高使植物根系代谢加快,细胞分裂素合成增多,从而增加了根长和根系干物重,根系活力也得到了增强,进而改善了根系向地上部供应水分和养分的能力^[31]。前人关于营养液温度对生菜根系活力的研

究缺乏,本研究发现,随着营养液温度的升高,生菜根系活力也随之升高。叶绿素作为植物叶绿体内参与光合作用的重要色素,其合成所需要的营养元素主要通过植物根系吸收。前期对生菜叶绿素含量影响研究主要聚焦在光强、光质方面^[32],温度对叶绿素影响的研究较少。本研究表明,随着营养液温度的升高,叶绿素含量也得到了提高。

植物的光合作用受外界多种因素影响,其中温度是影响植物光合作用的重要因素之一^[33]。有研究表明根区温度胁迫比气温胁迫对植物生长抑制更为显著,主要原因是低温抑制了蔗糖磷酸合成酶和蔗糖合成酶的活性,导致植物光合速率降低^[33]。胞间CO₂浓度的变化是判定植物气孔与非气孔限制的一个不可或缺的依据,光合速率是判断光合作用强弱的重要参数。前人研究表明,根区温度25℃下,生菜叶片的光合速率最大,35℃下叶片的Pn值随胞间CO₂浓度上升,明显小于其它4种根区温度,表明25℃根区温度下叶片的1,5-二磷酸核酮糖(RuBP)羧化酶活性与碳同化能力较强。本试验中随着营养液温度的升高,胞间CO₂浓度、气孔导度、蒸腾速率随着温度升而升高,在26℃最高,说明营养液温度对生菜的光合过程有显著影响,这与前人的研究一致^[34-35]。

植物获取光能的效率可以从叶绿素荧光参数中体现出来,同时可以看出植株对逆境胁迫的耐受性^[36]。在适宜的环境下,Fv/FM值保持在0.83左右,当出现胁迫时Fv/FM值会下降^[37]。本试验中在营养液温度为16℃时,各项叶绿素荧光参数数值最低,产生了明显的光抑制,随着营养液温度的升高各项参数数值也升高,在营养液温度为26℃时达到最大,光合效率最佳。最大光化学量子效率、有效光化学量子效率、光化学猝灭系数均随着根区温度的增加先增加后减少,在26℃时达到最大值。本研究结果与前人研究基本一致^[34]。

综上所述,在人工光植物工厂的水培生菜生产中,对营养液进行加温处理可以提升生菜的形态和营养品质,同时有效缓解了干烧心的发生,减轻了发生程度,提高了生菜的外观品质和商品价值。说明对营养液进行加温处理是一种有效缓解植物工厂内生菜干烧心的方法,当营养液温度为26℃时生菜的品质提升最大且在一定程度上缓解了植物工厂内生菜的干烧心情况。

参考文献 References

- [1] 杨晓,余志,高丽伟,黄丹枫. 叶用莴苣抗氧化物及其生物活性研究进展[J]. 中国蔬菜, 2015(2): 17-24
Yang X, Yu Z, Gao L W, Huang D F. Research progress of antioxidants and its bioactivity in lettuces[J]. *China Vegetables*, 2015(2): 17-24 (in Chinese)
- [2] 齐红伟,周俊国,姜立娜. 生菜植物工厂栽培技术[J]. 长江蔬菜, 2021(1): 33-34
Qi H W, Zhou J G, Jiang L N. Cultivation techniques of lettuce in plant factories[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2021(1): 33-34 (in Chinese)
- [3] 路军灵,全宇欣,杨其长. 设施环境下蔬菜干烧心的发生原因及防控策略[J]. 中国蔬菜, 2019(9): 24-29
Lu J L, Tong Y X, Yang Q C. Tipburn occurrence reason of vegetables and its control strategies under protected environment[J]. *China Vegetables*, 2019(9): 24-29 (in Chinese)
- [4] Lee J G, Choi C S, Jang Y A, Jang S W, Lee S G, Um Y C. Effects of air temperature and air flow rate control on the tipburn occurrence of leaf lettuce in a closed-type plant factory system[J]. *Horticulture Environment, and Biotechnology*, 2013(54): 303-310
- [5] 李琨,邹志荣. 植物工厂生菜根际通风对冠层和根际环境影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 178-187
Li K, Zou Z R. Environmental effects of root zone ventilation on canopy and rhizosphere of lettuce in plant factory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 178-187 (in Chinese)
- [6] 李扬眉,刘鑫,贾梦晗,全宇欣. 光期湿度对植物工厂生菜干烧心及其营养品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(20): 4011-4019
Li Y M, Liu X, Jia M H, Tong Y X. Tipburn injury and nutritional quality of lettuce plants as affected by humidity control during the light period in a plant factory[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(20): 4011-4019 (in Chinese)
- [7] 姜岳丛,佟静,武占会,白宝锁,王丽萍,王宝驹,梁浩,刘宁. 不同光质对植物工厂生菜干烧心及品质的影响[J]. 蔬菜, 2023(6): 10-17
Jiang Y C, Tong J, Wu Z H, Bai B S, Wang L P, Wang B J, Liang H, Liu N. Effects of different lights on tipburn and quality of lettuce in plant factory[J]. *Vegetables*, 2023(6): 10-17 (in Chinese)
- [8] 姜岳丛,佟静,王丽萍. 氯化钙溶液对植物工厂生菜品质及干烧心病情的影响[J]. 北方园艺, 2023(5): 46-52
Jiang Y C, Tong J, Wang L P. Effects of foliar spraying of calcium chloride on lettuce quality and tipburn[J]. *Northern Horticulture*, 2023(5): 46-52 (in Chinese)
- [9] 杨其长,魏灵玲,刘文科,程瑞锋. 植物工厂系统与实践[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012
Yang Q C, Wei L L, Liu W K, Cheng R F. *Plant Factory: System and Practice*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012 (in Chinese)
- [10] Gent M P N. Modeling the effect of nutrient solution composition and irradiance on accumulation of nitrate in hydroponic lettuce[J]. *Acta Horticulturae*, 2006(718): 469-476
- [11] 严妍. 温度和光周期对水培生菜生长的影响及生长模型初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008
Yan Y. Effects of temperature and photoperiod on the growth of hydroponic lettuce and primary research on growth modelling[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008 (in Chinese)

- [12] 闫秋艳, 段增强, 李汛, 董金龙, 王媛华, 邢鹏, 董飞. 根区温度对黄瓜生长和土壤养分利用的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 752-760
Yan Q Y, Duan Z Q, Li X, Dong J L, Wang A H, Xing P, Dong F. Effect of root zone temperature on growth of cucumber and nutrient utilization in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 752-760 (in Chinese)
- [13] Tahir I S A, Nakata N, Yamaguchi T, Nakano J, Ali A M. Influence of high shoot and root-zone temperatures on growth of three wheat genotypes during early vegetative stages[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2008, 194(2): 141-151
- [14] Watts W R. Leaf extension in *zea mays* L. Leaf extension and water potential in relation to root-zone and air temperatures [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1972, 23(3): 704-712
- [15] Walker J M. One-degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(5): 729-736
- [16] Kleier C, Farnsworth B, Winner W. Photosynthesis and biomass allocation of radish cv 'Cherry Belle' in response to root temperature and ozone[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111(1): 127-133
- [17] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258-2264
Song M L, Wen X Z, Li Y L. Effects of high rhizosphere temperature on plant growth and metabolism: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2258-2264 (in Chinese)
- [18] 孙世军, 崔世茂, 宋阳, 付崇毅, 潘璐, 孙潜. 不同根区温度对嫁接黄瓜生长和光合参数的影响[J]. 北方园艺, 2018, 7(2): 27-31
Sun S J, Cui S M, Song Y, Fu C Y, Pan L, Sun Q. Effects of root zone temperature on growth and photosynthetic parameters of grafted cucumber [J]. *Agricultural Biotechnology*, 2018, 7(2): 27-31 (in Chinese)
- [19] Nagasuga K, Murai-Hatano M, Kuwagata T. Effects of low root temperature on dry matter production and root water uptake in rice plants [J]. *Plant Production Science*, 2011, 14(1): 22-29
- [20] 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, 2000
Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [21] 唐璐. 氮磷钾营养对芥菜和生菜生长及总酚含量的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016
Tang L. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium nutrition on growth and total phenol content of mustard and lettuce[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [22] 刘凯歌, 朱宗文, 张丽丽, 赵玥璐, 宋云鹏. 不同生菜品种品质性状分析与评价[J]. 分子植物育种, 2023(1): 1-10
Liu K G, Zhu Z W, Zhang L L, Zhao Y L, Song Y P. Analysis and evaluation of quality traits in different lettuce varieties [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023(1): 1-10 (in Chinese)
- [23] 王晓茜, 段雨琳, 杨景爱, 刘蕊, 范双喜, 韩莹琰. 结球生菜营养品质品种比较[J]. 北京农学院学报, 2017, 32(1): 28-32
Wang X Q, Duan Y L, Yang J A, Liu R, Fan S X, Han Y Y. Comparison of nutrition quality of green cabbage leaf lettuce varieties [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2017, 32(1): 28-32 (in Chinese)
- [24] Haghighi M, Mozafariyan M, Abdollahipour B. Effect of cucumber mycorrhiza inoculation under low and high root temperature grown on hydroponic conditions [J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2015, 18(2): 89-96
- [25] Kwaek Y, Kim S D, Chun C. Root-zone cooling affects growth and development of paprika transplants grown in rockwool cubes [J]. *Horticulture, Environment and Biotechnology*, 2014, 55(1): 14-18
- [26] Li S Y, Jiang H L, Wang J J, Wang Y D, Pan S G, Tian H, Duan M Y, Wang S L, Tang X R, Mo Z W. Responses of plant growth, physiological, gas exchange parameters of super and non-super rice to rhizosphere temperature at the tillering stage [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10618
- [27] 闫慧芳, 毛培胜, 夏方山. 植物抗氧化剂谷胱甘肽研究进展[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 428-434
Yan H F, Mao P S, Xia F S. Research progress in plant antioxidant glutathione (review)[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3): 428-434 (in Chinese)
- [28] Maisuthisakul P, Pongsawatmanit R, Gordon M H. Characterization of the phytochemicals and antioxidant properties of extracts from Teaw (*Cratoxylum formosum* Dyer) [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(4): 1620-1629
- [29] 李亚华, 陈龙, 高荣广, 杨凤娟, 王秀峰, 魏琨, 史庆华, 米庆华. LED光质对茄子果实品质及抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2728-2734
Li Y H, Chen L, Gao R G, Yang F J, Wang X F, Wei M, Shi Q H, Mi Q H. Effects of LED qualities on quality and antioxidation capacity of eggplant fruits [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2728-2734 (in Chinese)
- [30] 裴红宾, 张永清, 上官铁梁. 根区温度胁迫对小麦抗氧化酶活性及根苗生长的影响[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2006, 20(2): 78-81
Pei H B, Zhang Y Q, Shangguan T L. Effect of root zone temperature stress on antioxidant enzymes activity and root and seedling growth of wheat [J]. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2006, 20(2): 78-81 (in Chinese)
- [31] Yan Q Y, Duan Z Q, Mao J D, Li X, Dong F. Low root zone temperature limits nutrient effects on cucumber seedling growth and induces adversity physiological response [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(8): 1450-1460
- [32] 贾梦晗, 杨洋, 张一含, 陈灿, 全宇欣. 不同蓝光强度连续供光对生菜形态建成、光合特性及营养离子吸收的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(5): 839-850
Jia M H, Yang Y, Zhang Y H, Chen C, Tong Y X. Effects of different blue light intensities with continuous light on morphogenesis, photosynthetic characteristics and nutrient ion absorption of lettuce [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(5): 839-850
- [33] 孙世君, 付崇毅, 崔世茂, 宋阳, 高宇, 刘琦. 根区温度对黄瓜嫁接苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(8): 71-80
Sun S J, Fu C Y, Cui S M, Song Y, Gao Y, Liu Q. Effects of root-zone temperature on carbon and nitrogen metabolism and activities of related enzymes of cucumber seedlings [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2018, 46(8): 71-80 (in Chinese)
- [34] 李润儒. 根区温度对水培生菜生长与光合特性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2015
Li R R. Effect of root zone temperatures on the growth and photosynthesis of hydroponically-grown lettuce [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015
- [35] Malcolm P, Holford P, McGlasson B, Barchia I. Leaf development, net assimilation and leaf nitrogen concentrations of five *Prunus* rootstocks in

response to root temperature[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 115(3): 285-291

- [36] 莫亿伟, 郭振飞, 谢江辉. 温度胁迫对柱花草叶绿素荧光参数和光合速率的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(1): 96-101

Mo Y W, Guo Z F, Xie J H. Effects of temperature stress on chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic rates of *Stylosanthes*

guianensis [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(1): 96-101 (in Chinese)

- [37] Baker J T, Reddy V R. Temperature effects on phenological development and yield of muskmelon[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(5): 605-613

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 谢沛宁, 硕士研究生, 就读于河北工程大学园林与生态工程学院。硕士期间, 认真完成全部课程并取得优异成绩, 参加多项国内外学术活动, 现已连续获得三年“研究生二等奖学金”。



通讯作者简介: 佟静, 博士, 北京市农林科学院蔬菜研究所助理研究员, 国家特色蔬菜产业技术体系土肥水管理岗位团队成员。研究方向为蔬菜水肥高效利用与品质调控。近年来主要从事生菜、韭菜等叶菜和莲藕、茭白、水芹等水生蔬菜的水肥高效利用与品质调控研究。曾参加“十三五”国家重点研发项目, “十三五”、“十四五”现代农业产业技术体系项目, 林业公益项目以及北京园林绿化局、北京市委等省部级项目 10 余项, 主持院级项目 2 项。发表研究论文 20 余篇, 其中 SCI 论文 7 篇; 授权专利 3 项, 参编行业标准 1 项。