

任元龙, 马 蓉, 王晓卓, 等. 叶面喷施褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2140-2148.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.018

叶面喷施褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗的影响

任元龙, 马 蓉, 王晓卓, 张雪艳

(宁夏大学葡萄酒与园艺学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 土壤盐碱化和次生盐渍化是限制西瓜生产的重要因素。本研究选用西瓜品种硒砂瓜金城 5 号为试验材料, 分析叶面喷施褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗的影响。研究表明, 叶面喷施适宜浓度的褪黑素可有效缓解盐胁迫对西瓜幼苗造成的伤害, 促进西瓜幼苗生长, 提高盐胁迫下西瓜幼苗光合色素含量和抗氧化酶活性, 降低丙二醛含量和相对电导率。其中, 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理对西瓜幼苗盐胁迫的缓解效果最佳。

关键词: 西瓜; 褪黑素; 盐胁迫; 生长及生理指标

中图分类号: S651 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024) 11-2140-09

Effects of foliar melatonin spray on watermelon seedlings under salt stress

REN Yuanlong, MA Rong, WANG Xiaozhuo, ZHANG Xueyan

(College of Enology and Horticulture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil salinization and secondary salinization are important factors limiting watermelon production. In this study, we used selenium-contained watermelon Jincheng No. 5 as experimental material to analyze the effects of foliar application of melatonin on watermelon seedlings under salt stress. The results showed that spraying melatonin on the leaves could effectively alleviate the damage caused by salt stress on watermelon seedlings, promote the growth of watermelon seedlings, increase the photosynthetic pigment content and antioxidant enzyme activity under salt stress, and decrease the content of malondialdehyde and relative conductivity. Among them, 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin had the best effect on relieving salt stress of watermelon seedlings.

Key words: watermelon; melatonin; salt stress; growth and physiological indexes

土壤盐渍化是影响植物生长的非生物因素之一, 由于气候变化, 盐碱土壤的面积迅速增加, 对全球农业生产粮食安全构成了巨大挑战^[1-3]。干旱和半干旱地区 25% 的灌溉土地受盐胁迫影响^[4]。盐胁迫会抑

制作物生长, 最终导致作物品质和产量下降^[5-6]。西瓜(*Citrullus lanatus*)富含维生素以及钾、镁等多种矿物质, 具有广泛的生物活性, 对人类健康有积极影响^[7-8]。近年来, 人们在栽培过程中, 使用大量农药化肥, 土壤的盐渍化加快, 硒砂瓜的品质不断下降^[9]。

褪黑素(*N*-乙酰基-5-甲氧基色胺)是动物体内的重要激素, 也可以影响植株的生长和发育^[10]。有研究表明, 外源褪黑素可以提高植物 PS II 的最大光化学效率和抗氧化酶活性, 清除植物体内自由基, 促进植物生长, 增加其耐盐性^[11-14]。Jiang 等^[15]研究表明, 外源褪黑素可以促进可溶性糖和蛋白质等渗

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BBF02024)

作者简介: 任元龙(1998-), 男, 宁夏青铜峡人, 硕士研究生, 研究方向为设施蔬菜栽培与生理。(E-mail) 1057463174@ qq.com

通讯作者: 王晓卓, (E-mail) catree1988@ qq.com; 张雪艳, (E-mail) zhangxueyan123@ sina.com

透压调节物质的积累,增强棉花抗氧化能力,提高棉花对活性氧的清除能力,从而缓解棉花幼苗受到的盐胁迫伤害。高立杨等^[16]研究结果表明,褪黑素可抑制NaCl+NaHCO₃对垂丝海棠的氧化胁迫。魏茜雅等^[17]的研究结果表明,褪黑素能抑制朝天椒种子中氧化物质的生成,提高抗氧化酶活性,促进种子在盐胁迫下的萌发和幼苗生长。目前,褪黑素对盐胁迫下西瓜生长发育影响的研究较少。本研究拟分析叶面喷施褪黑素对西瓜幼苗的影响,以及对西瓜叶片和根系抗氧化酶系统的影响,确定褪黑素缓解西瓜幼苗盐胁迫的最佳浓度,为西瓜的耐盐栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试西瓜品种为硒砂瓜金城5号。供试盐胁迫试剂为氯化钠,分析纯,购于上海国药集团化学试剂有限公司。供试外源褪黑素,分析纯,购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 试验设计

西瓜幼苗长至两叶一心时,将其移栽至装有基质的塑料钵中,长至三叶一心时,进行处理,本试验设置6个处理如表1所示。

表1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

编号	处理
CK	0 μmol/L褪黑素+0 mmol/L NaCl
T0	0 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl
T1	50 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl
T2	100 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl
T3	150 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl
T4	200 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl

通过预试验筛选浓度为120 mmol/L的NaCl溶液为盐胁迫处理溶液。前5 d,每天下午19:00对T1、T2、T3、T4处理西瓜幼苗分别喷施50 μmol/L、100 μmol/L、150 μmol/L、200 μmol/L褪黑素。在第6 d、10 d、14 d,对对照西瓜根部浇灌蒸馏水,对T1、T2、T3、T4处理西瓜幼苗根部浇灌120 mmol/L NaCl溶液,每次浇灌120~150 mL。于第17 d下午,自下而上取植株第4、5片叶测定各项指标。

1.3 指标测定

1.3.1 生长指标的测定方法 用直尺测定西瓜幼

苗株高、叶面积;用电子游标卡尺测定茎粗;用电子分析天平测定全株鲜重、全株干重;采用根系扫描仪扫描西瓜幼苗根系,并用Win RHIZO根系分析软件^[18]分析根系参数。

1.3.2 生理指标的测定方法 各生理指标及测定方法如表2所示。

表2 生理指标及测定方法

Table 2 Physiological indexes and measuring methods

生理指标	测定方法
丙二醛含量	硫代巴比妥酸比色法 ^[19]
超氧化物歧化酶活性	氮蓝四唑(NBT)还原法 ^[20]
过氧化物酶活性	愈创木酚法 ^[20]
过氧化氢酶活性	紫外吸收法 ^[21]
可溶性糖含量	蒽酮比色法 ^[22]
可溶性蛋白质含量	考马斯亮蓝法 ^[22]
叶绿素荧光参数	参照Strasser等 ^[23] 的方法
叶绿素含量	叶绿素测定仪(SPAD-502) ^[24]
叶片相对电导率	参照高俊凤 ^[20] 的方法
光合色素含量	参照李合生 ^[21] 的方法

1.4 叶面喷施褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗的隶属函数综合评价

首先对西瓜幼苗的32个指标进行相关分析,然后利用主成分分析对32个指标降维,最后采用隶属函数法对褪黑素的处理效果进行综合评价,最终筛选出叶面喷施褪黑素的最佳浓度。

隶属函数值计算公式如下:

$$U(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, X_i 表示第*i*个综合指标; X_{\min} 表示在第*i*个综合指标中的最小值; X_{\max} 表示在第*i*个综合指标中的最大值。

综合指标权重计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中, ω_i 表示提取的第*i*个主成分的权重, P_i 表示提取的主成分所对应的贡献率。

综合评价值计算公式如下:

$$D = \sum_{i=1}^n [U(X_i) \times \omega_i], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

式中, D 为不同浓度褪黑素处理对盐胁迫下西瓜幼苗生长及生理影响的综合评价值。

1.5 数据的统计分析

采用SPSS 21.0和Origin2021进行数据分析与

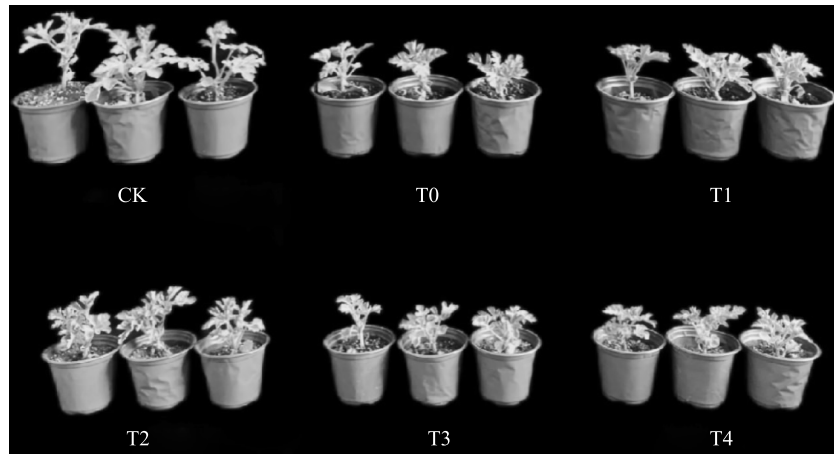
绘图,并进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan's 多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗生长的影响

分别测量西瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积、全株

鲜重和全株干重,图 1、表 3 显示,与对照相比,盐胁迫下的西瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、全株鲜重和全株干重分别显著下降了 66.96%、40.24%、40.19%、58.06%、52.37% ($P<0.05$)。与 T0 相比,T2 处理西瓜幼苗的株高、茎粗、叶面积、全株鲜重和全株干重分别显著上升了 63.34%、55.11%、42.22%、67.48%和 33.60% ($P<0.05$)。



CK:0 μmol/L褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0:0 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1:50 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2:100 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3:150 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4:200 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl。

图 1 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of melatonin on the growth of watermelon seedlings under salt stress

表 3 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗生长指标的影响

Table 3 Effects of different concentrations of melatonin on growth indexes of watermelon seedlings under salt stress

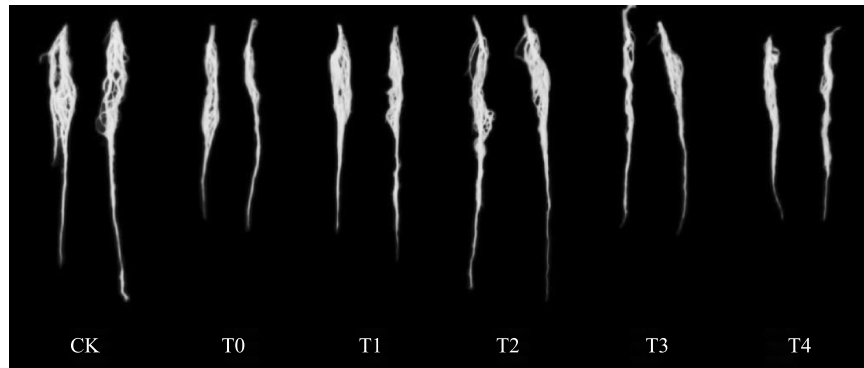
处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶面积 (cm ²)	全株鲜重 (g)	全株干重 (g)
CK	15.133±0.433a	8.137±0.118a	40.433±2.266a	17.217±0.235a	2.087±0.099a
T0	5.000±0.361e	4.863±0.375c	24.183±1.044d	7.220±0.163e	0.994±0.063c
T1	6.833±0.176c	6.615±0.173b	26.730±1.586cd	9.400±949.000cd	1.270±0.162bc
T2	8.167±0.176b	7.543±0.664ab	34.393±1.898b	12.092±0.576b	1.328±0.063b
T3	6.067±0.186cd	6.670±0.246b	33.417±0.398b	10.124±0.693c	1.229±0.046bc
T4	5.633±0.219de	4.833±0.149c	30.680±0.415bc	8.172±0.153de	1.086±0.040c

CK:0 μmol/L褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0:0 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1:50 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2:100 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3:150 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4:200 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗根系形态的影响

与对照相比,T0 处理西瓜幼苗根系生长受到抑制,根系长度显著减少 41.09% ($P<0.05$),平均直径显著减少 27.28% ($P<0.05$),表面积显著减少 44.72% ($P<0.05$),体积显著减少 49.00% ($P<0.05$),根系分叉数显著减少 74.59% ($P<0.05$)。

叶面喷施褪黑素可以明显缓解盐胁迫对西瓜幼苗生长的抑制作用,在T0~T4 处理中,T2 处理西瓜幼苗根系长度、根系平均直径、根系表面积、根系体积及根系分叉数均最大,与 T0 处理相比,T2 处理西瓜幼苗根系长度、根系平均直径、根系表面积、根系体积及根系分叉数分别显著提高了 94.12%、27.60%、74.00%、94.23%、61.75% ($P<0.05$) (图 2,表 4)。



CK:0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0:0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1:50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2:100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3:150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4:200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。

图2 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗根系形态的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of melatonin on root morphology of watermelon seedlings under salt stress

表4 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗根系形态指标的影响

Table 4 Effects of different concentrations of melatonin on root morphological indexes of watermelon seedlings under salt stress

处理	根系长度 (cm)	根系平均直径 (mm)	根系表面积 (cm^2)	根系体积 (cm^3)	根系分叉数
CK	8 308±140.845b	7.92±0.248a	21 581±1 290.598a	9 110±111.474a	3 416±37.596a
T0	4 894±173.613d	5.76±0.126d	11 931±1 291.134d	4 646±193.505c	868±27.745c
T1	8 494±173.813b	6.49±0.291c	18 466±410.662b	6 523±315.878b	1 291±37.834b
T2	9 500±194.351a	7.35±0.159ab	20 760±709.137ab	9 024±273.070a	1 404±39.755b
T3	6 421±293.532c	7.09±0.152bc	15 432±276.437c	6 427±288.430b	877±46.972c
T4	5 087±239.137d	6.43±0.110c	10 477±401.121d	4 946±106.724c	646±17.436d

CK:0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0:0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1:50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2:100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3:150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4:200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗叶片光合色素的影响

如图3所示,与对照相比,T0处理西瓜叶片的SPAD值显著降低($P<0.05$)。与对照相比,T0处理西瓜叶片的SPAD值、叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素a+b含量、类胡萝卜素含量分别显著下降了26.30%、38.22%、29.41%、34.47%、25.33%($P<0.05$)。T0~T4处理中,T2处理西瓜幼苗的SPAD值、叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素a+b含量、类胡萝卜素含量均最高,与T0处理相比,T2处理西瓜幼苗的SPAD值、叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素a+b含量、类胡萝卜素含量分别显著上升40.41%、116.26%、105.56%、111.31%、100.00%($P<0.05$)。

2.4 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

在叶绿素荧光参数中,非光化学猝灭系数(NPQ)与光化学猝灭系数(qP)之间存在竞争关系。

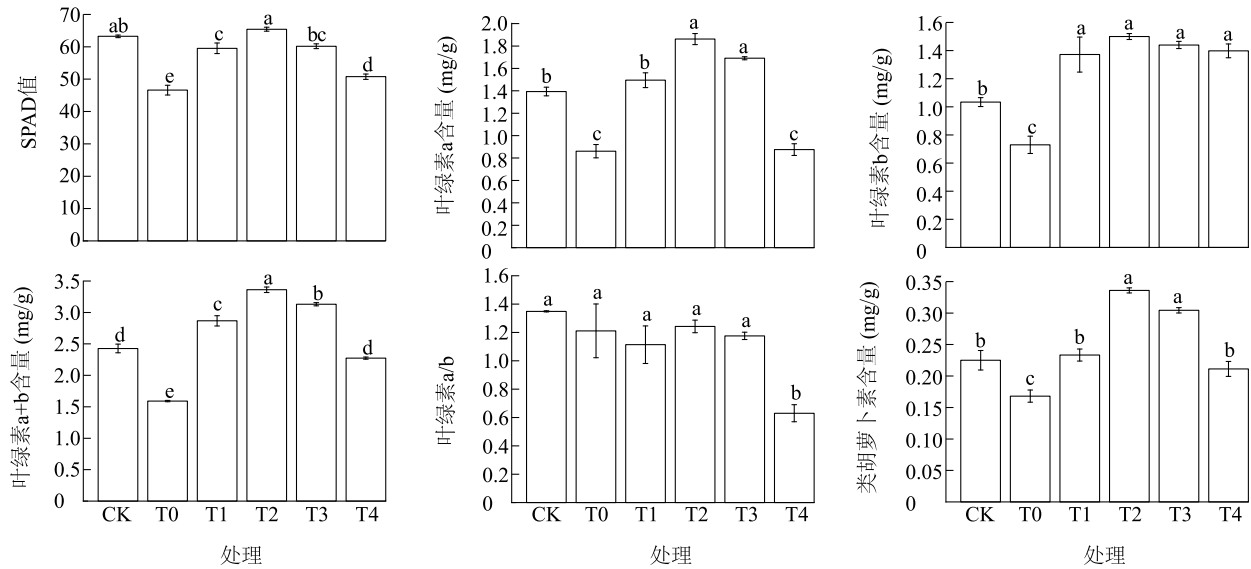
如图4所示,与对照相比,T0处理西瓜幼苗叶片光化学猝灭系数(qP)显著下降31.90%($P<0.05$),非光化学猝灭系数(NPQ)显著提高65.50%($P<0.05$)。与T0处理相比,T2处理光化学猝灭系数(qP)、PSⅡ最大光化学量子产量(F_v/F_m)分别显著提高54.92%、9.48%($P<0.05$),表明西瓜叶片光化学反应活跃,光合能力增强。与T0处理相比,T2处理西瓜幼苗叶片实际光合效率[$Y(II)$]、调节猝灭系数(qN)、总猝灭系数(qL)分别显著提高62.19%、74.87%、101.72%($P<0.05$),非光化学猝灭系数(NPQ)显著降低50.47%($P<0.05$),表明T2处理西瓜叶片对光能的吸收和利用效率提高。

2.5 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗细胞膜的影响

为了研究盐胁迫下褪黑素对西瓜幼苗细胞膜的影响,测量西瓜幼苗叶片相对电导率和丙二醛含量。如图5所示,与对照相比,T0处理幼苗叶片相对电导率显

著增加 77.07% ($P<0.05$), 丙二醛含量显著增加 59.12% ($P<0.05$)。与 T0 处理相比, T1~T4 处理西瓜幼苗叶片相对电导率和丙二醛含量显著降低 ($P<0.05$)。T1~T4 处理中, T2 处理西瓜幼苗叶片相对电

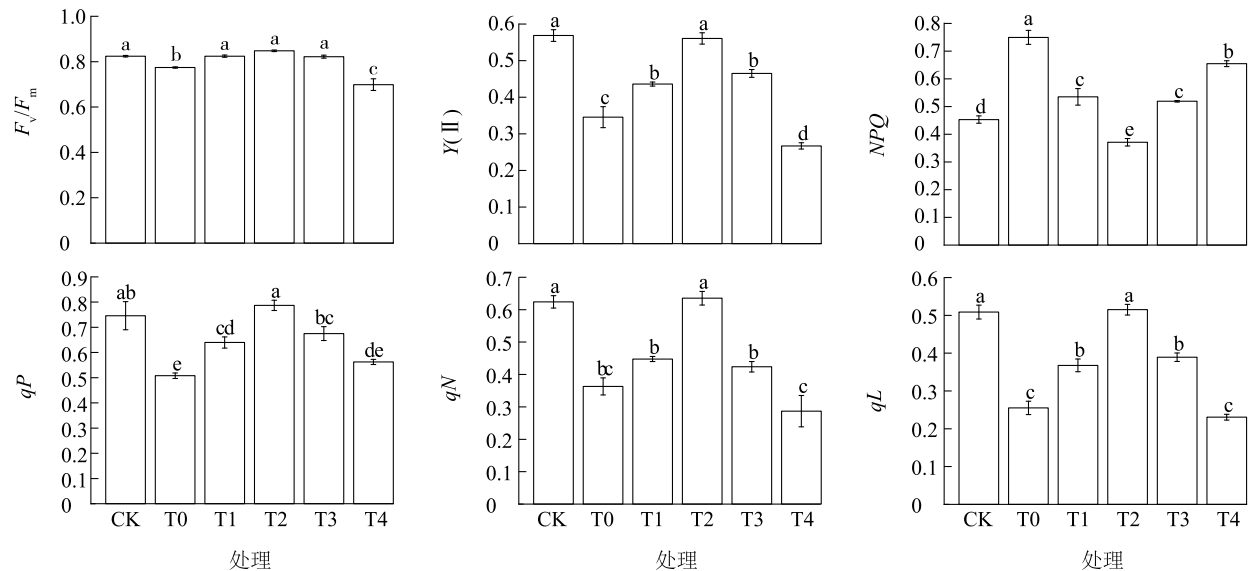
导率和丙二醛含量最低, 与 T0 处理相比, T2 处理幼苗叶片相对电导率和丙二醛含量分别显著下降 44.14%、32.66% ($P<0.05$)。



CK: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl; T0: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T1: 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T2: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T3: 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T4: 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图3 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗光合色素的影响

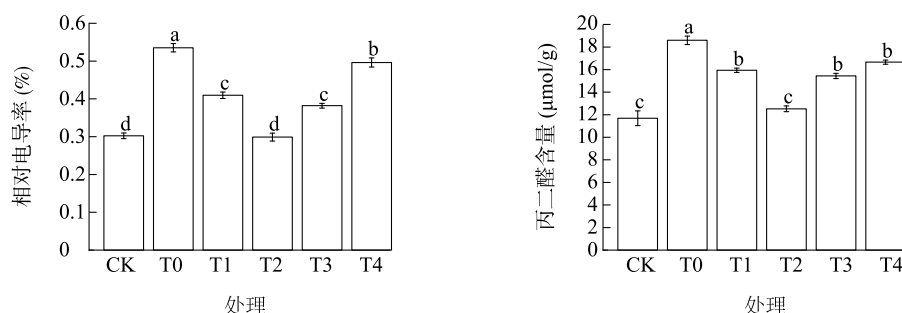
Fig.3 Effects of different concentrations of melatonin on photosynthetic pigments of watermelon seedlings under salt stress



CK: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl; T0: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T1: 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T2: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T3: 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl; T4: 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。 F_v/F_m : PS II 最大光化学量子产量; $Y(II)$: 实际光合效率; NPQ: 非光化学淬灭系数; qP : 光化学淬灭系数; qN : 调节淬灭系数; qL : 总淬灭系数。

图4 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of melatonin on chlorophyll fluorescence parameters of watermelon seedlings under salt stress



CK: 0 μmol/L褪黑素+0 mmol/L NaCl; T0: 0 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T1: 50 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T2: 100 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T3: 150 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T4: 200 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

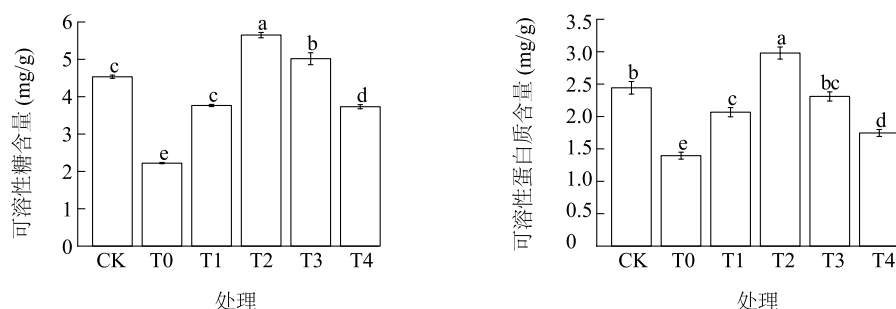
图5 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗细胞膜的影响

Fig.5 Effects of different concentrations of melatonin on cell membrane of watermelon seedlings under salt stress

2.6 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗可溶性糖和可溶性蛋白质的影响

如图6所示,与对照相比,T0处理西瓜幼苗可溶性蛋白质含量显著下降42.85% ($P < 0.05$),可溶性糖含量显著下降50.99% ($P < 0.05$)。T1~T4处

理中,T2处理西瓜幼苗可溶性蛋白质含量和可溶性糖含量最高。与T0处理相比,T2处理西瓜幼苗可溶性糖含量显著提高154.23% ($P < 0.05$),可溶性蛋白质含量显著提高113.42% ($P < 0.05$)。



CK: 0 μmol/L褪黑素+0 mmol/L NaCl; T0: 0 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T1: 50 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T2: 100 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T3: 150 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl; T4: 200 μmol/L褪黑素+120 mmol/L NaCl。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗可溶性糖和可溶性蛋白质的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of melatonin on soluble sugar and soluble protein of watermelon seedlings under salt stress

2.7 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

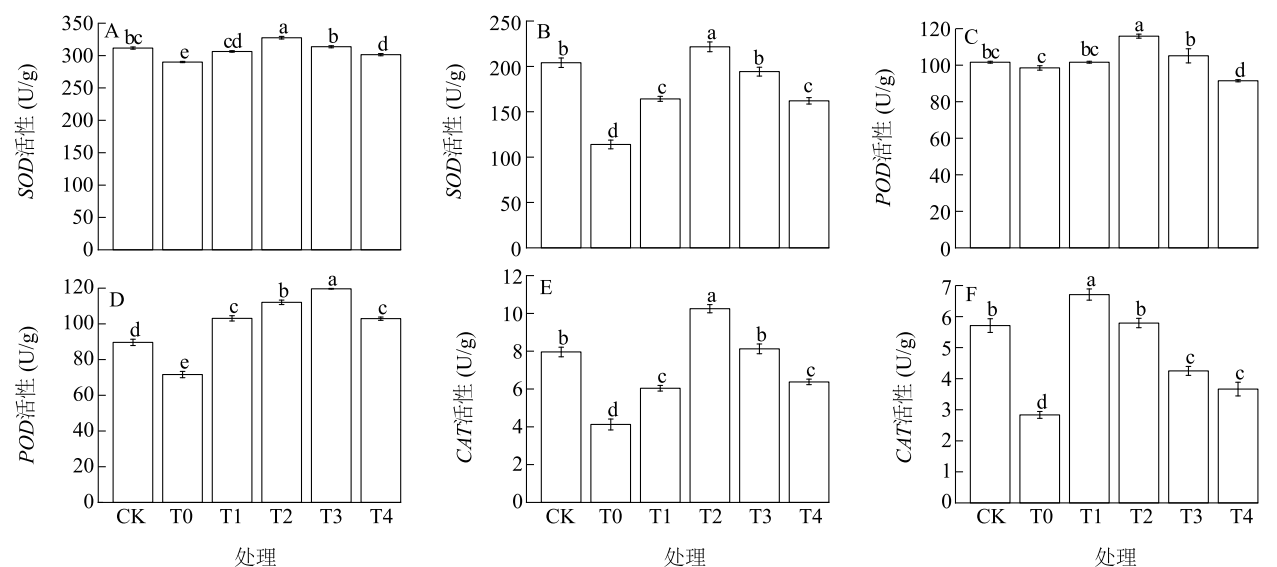
如图7所示,与对照相比,T0处理西瓜幼苗叶片、根系中超氧化物歧化酶(SOD)活性分别显著下降6.92%、44.12% ($P < 0.05$)。T1~T4处理中,T2处理西瓜幼苗叶片、根系中SOD活性最高,与T0处理相比,T2处理西瓜幼苗叶片、根系中SOD活性分别显著提高8.16%、94.34% ($P < 0.05$)。与T0处理相比,T2处理西瓜幼苗叶片中过氧化物酶(POD)活性显著提高17.66% ($P < 0.05$),T3处理西瓜幼苗根系中POD活性显著提高67.12%。与T0处理相比,T2处理西

瓜幼苗叶片中过氧化氢酶(CAT)活性显著提高148.48% ($P < 0.05$),T1处理西瓜幼苗根系中CAT活性显著提高136.77% ($P < 0.05$)。

2.8 各指标隶属函数综合分析

采用隶属函数法对6个处理的西瓜幼苗进行综合评价,首先利用主成分分析对32个指标降维计算出综合指标值 Cl_1 、 Cl_2 、 Cl_3 、 Cl_4 ;然后利用公式(1)计算出4个综合指标的隶属函数值 $U(X_1)$ 、 $U(X_2)$ 、 $U(X_3)$ 、 $U(X_4)$;利用公式(2)计算出4个主成分的权重,分别为0.735、0.163、0.070和0.032;最后利用公式(3)计算出6个处理的西瓜幼苗综合评价价值

(D)。由表 5 可知,根据 D 值大小,西瓜幼苗喷施褪黑素对盐胁迫的缓解效应由大到小为 $T2>T3>T1>T4>T0$ 。其中 $T2$ 处理 D 值最大,西瓜幼苗耐盐性最强。



A: 叶片中 SOD 活性;B: 根系中 SOD 活性;C: 叶片中 POD 活性;D: 根系中 POD 活性;E: 叶片中 CAT 活性;F: 根系中 CAT 活性。CK: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1: 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3: 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4: 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 不同浓度褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

Fig.7 Effects of different concentrations of melatonin on activities of antioxidant enzymes in watermelon seedlings under salt stress

表 5 隶属函数综合分析结果

Table 5 Comprehensive analysis results of membership function

处理	综合指标值				隶属函数值				D 值	排名
	Cl_1	Cl_2	Cl_3	Cl_4	$U(X_1)$	$U(X_2)$	$U(X_3)$	$U(X_4)$		
CK	4.531	-3.769	1.007	0.020	0.908	0	0.659	0.310	0.723	2
T0	-6.314	-1.681	-1.618	-0.811	0	0.361	0	0	0.059	6
T1	-0.190	0.540	-1.145	1.871	0.513	0.745	0.119	1.000	0.538	4
T2	5.633	1.733	-0.709	-0.556	1.000	0.952	0.228	0.095	0.909	1
T3	0.995	2.013	0.096	-0.745	0.612	1.000	0.430	0.025	0.643	3
T4	-4.655	1.164	2.368	0.221	0.139	0.853	1.000	0.385	0.323	5

CK: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+0 mmol/L NaCl;T0: 0 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T1: 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T2: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T3: 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl;T4: 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素+120 mmol/L NaCl。

3 讨论

3.1 褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗生长的影响

褪黑素能够有效减轻盐胁迫对植物生长造成的不利影响^[25]。李阳等^[26]研究结果表明,喷施 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素可以有效缓解盐胁迫对棉花株高、叶面积生长的抑制作用。本研究结果表明,褪黑素最佳浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$,对盐胁迫下的西瓜幼苗喷施 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素,西瓜幼苗株高、茎粗、叶面积、全

株鲜重和全株干重及根系指标均显著提高,这与范海霞等^[27]研究结果一致。

3.2 褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗光合色素的影响

植物通过光合色素吸收太阳辐射,引发一系列光反应,这是光合作用的基础^[28]。有研究结果表明,在盐胁迫下植物叶片的光合色素被降解,褪黑素对光合色素具有保护作用^[29]。孙浩月等^[30]研究结果表明,受到盐胁迫后玉米叶片中叶绿素含量下降,而叶面喷施褪黑素后叶绿素含量显著上升。Wang

等^[31]研究表明,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能够提高燕麦幼苗的株高和主根长,促进次生根发育,提升叶片光合色素含量。本研究结果表明,在NaCl胁迫下,叶面喷施褪黑素后,西瓜幼苗的SPAD值、叶绿素a含量、叶绿素b含量、类胡萝卜素含量呈先上升后下降的趋势,表明一定浓度的褪黑素可以在盐胁迫下保护植物叶绿体结构的完整性,促进植物光合作用。Li等^[32]发现,适宜浓度的褪黑素可以保护叶绿体结构,促进植株的光合作用,该结论与本研究结果一致。

3.3 褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数是反应植物光合作用强弱的重要指标。研究发现,植株在受到盐胁迫时 F_v/F_m 明显降低,而喷施褪黑素可有效增加,提高了甜菜、茶树的耐盐性^[33-34]。本研究结果表明,盐胁迫下西瓜幼苗 qP 、 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 qN 、 qL 下降,NPQ升高。叶面喷施适宜浓度的褪黑素可显著提高盐胁迫下西瓜幼苗的 qP 、 F_v/F_m 、 $Y(II)$ 、 qN 、 qL ,显著降低NPQ,这与顾秀容^[35]关于褪黑素处理对盐和聚乙二醇胁迫下西瓜叶绿素荧光特性和抗氧化系统的研究结果一致。表明叶面喷施褪黑素可以有效保护西瓜光合系统。

3.4 褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗细胞膜的影响

盐胁迫下,植物叶片细胞膜会发生过氧化反应,产生大量丙二醛,从而导致细胞内丙二醛含量增加^[36]。耿书德等^[37]研究表明,与对照相比,盐胁迫下西瓜幼苗叶片中相对电导率和丙二醛含量显著上升,而喷施褪黑素后盐胁迫下西瓜幼苗叶片中相对电导率和丙二醛含量显著下降。本研究结果表明,盐胁迫下随着褪黑素浓度的增加,西瓜幼苗丙二醛含量含量先下降后上升,表明适宜浓度的褪黑素可缓解盐胁迫对西瓜幼苗的伤害。这一结论与向警等^[38]的研究结果一致。

3.5 褪黑素对盐胁迫下西瓜幼苗抗氧化酶活性的影响

当植物受到盐胁迫时,细胞内的活性氧自由基会大量积累,对细胞造成损伤。为了减轻细胞受到的损伤,植物通过SOD、POD和CAT 3种抗氧化酶的协同作用清除自由基,从而使细胞内的活性氧自由基含量维持在较低水平。在本研究中,发现盐胁迫下西瓜幼苗的根和叶中的抗氧化酶活性显著降

低。然而,在叶面喷施适宜浓度褪黑素后,抗氧化酶的活性显著上升。这与Guo等^[13]、Sardar等^[39]、Zeng等^[40]的研究结果一致,表明适宜浓度的褪黑素可以增强盐胁迫下西瓜幼苗的抗氧化酶活性,减轻由盐胁迫引发的过氧化损伤,进而提升幼苗抵抗盐胁迫的能力。

4 结论

综上所述,盐胁迫下西瓜幼苗生长缓慢,根系受损,且光合色素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量及抗氧化酶活性降低,丙二醛含量和相对电导率增加。叶面喷施适宜浓度的褪黑素能够促进盐胁迫下西瓜幼苗的生长,减少氧化损伤,提高抗氧化酶活性,促进根系生长及光合作用效率。此外,叶面喷施适宜浓度的褪黑素还可以促进可溶性糖和可溶性蛋白质等渗透调节物质的积累,帮助植株缓解渗透压力,从而缓解植株的盐胁迫。在本研究中,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理对西瓜幼苗盐胁迫的缓解效果最佳。

参考文献:

- [1] LIANG W, MA X, WAN P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: a review [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [2] GUO X, ZHI W, FENG Y, et al. Seed priming improved salt-stressed sorghum growth by enhancing antioxidative defense [J]. PLoS One, 2022, 17(2): e0263036.
- [3] SONG Q, JOSHI M, JOSHI V. Transcriptomic analysis of short-term salt stress response in watermelon seedlings [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(17): 6036.
- [4] BORTOLINI L, MAUCIERI C, BORIN M. A tool for the evaluation of irrigation water quality in the arid and semi-arid regions [J]. Agronomy, 2018, 8(2): 23.
- [5] YE L, ZHAO X, BAO E, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on watermelon growth, elemental uptake, antioxidant, and photosystem II activities and stress-response gene expressions under salinity-alkalinity stresses [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 863.
- [6] LI C, WANG Z, XU Y, et al. Analysis of the effect of modified biochar on saline-alkali soil remediation and crop growth [J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5593.
- [7] ASFAW M D. Review on watermelon production and nutritional value in ethiopia [J]. Food Science and Quality Management, 2021, 10: 11-17.
- [8] BENMEZIANE F, DERRADJI. Composition, bioactive potential and food applications of watermelon (*Citrullus lanatus*) seeds-a

- review[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023,17(5):5045-5061.
- [9] 朱彪,饶丽仙,陈佳. 中卫市硒砂瓜产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技,2020(20):236-237,240.
- [10] AHMAD S, KAMRAN M, DING R, et al. Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings[J]. PeerJ,2019,7:e7793.
- [11] YE J, WANG S, DENG X, et al. Melatonin increased maize (*Zea mays* L.) seedling drought tolerance by alleviating drought-induced photosynthetic inhibition and oxidative damage[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2016,38(2):48.
- [12] SHI H T, WANG X, TAN D X, et al. Comparative physiological and proteomic analyses reveal the actions of melatonin in the reduction of oxidative stress in Bermuda grass (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)[J]. Journal of Pineal Research,2015,59(1):120-131.
- [13] GUO X, SHI Y, ZHU G, et al. Melatonin mitigated salinity stress on alfalfa by improving antioxidant defense and osmoregulation[J]. Agronomy,2023,13(7):1727.
- [14] LI J, ZHAO C, ZHANG M, et al. Exogenous melatonin improves seed germination in *Limonium bicolor* under salt stress[J]. Plant Signaling & Behavior,2019,14(11):1659705.
- [15] JIANG D, LU B, LIU L, et al. Exogenous melatonin improves salt stress adaptation of cotton seedlings by regulating active oxygen metabolism[J]. Peer J,2020,8:e10486.
- [16] 高立杨,刘兵,张瑞,等.褪黑素对盐碱复合胁迫下垂丝海棠光合及生理特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2020,55(2):90-97.
- [17] 魏茜雅,林欣琪,梁腊梅,等.褪黑素引发处理提高朝天椒种子萌发及幼苗耐盐性的生理机制[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1637-1647.
- [18] 李龙,李超男,毛新国,等.作物根系表型鉴定评价方法的现状与展望[J]. 中国农业科学,2022,55(3):425-437.
- [19] 赵世杰,许长成,邹琦,等.植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯,1994(3):207-210.
- [20] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [21] 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.
- [22] 刘家尧,刘新. 植物生理学实验教程[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [23] STRASSERF R J, SRIVASTAVA A, GOVINDJEE. Polyphasic chlorophyll a fluorescence transient in plants and cyanobacteria[J]. Photochemistry and Photobiology,1995,61(1):32-42.
- [24] 郝学明,王响铃,宋柏权,等.甜菜叶片 SPAD 值和光合色素的相关性研究[J]. 农学学报,2019,9(10):65-70.
- [25] 郭爱华. 外源褪黑素对盐胁迫下苦菜幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):153-157.
- [26] 李阳,陈静,刘绍东,等.外源褪黑素对盐胁迫下棉花幼苗生长及光合特性的影响[J]. 新疆农业科学,2021,58(8):1418-1426.
- [27] 范海霞,赵飒,李静,等.外源褪黑素对盐胁迫下金盏菊幼苗生长、光合及生理特性的影响[J]. 热带作物学报,2021,42(5):1326-1334.
- [28] 吴华鑫. 外源褪黑素对盐胁迫下‘金娃娃’萱草的缓解效应[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
- [29] LI J, LIU J, ZHU T, et al. The role of melatonin in salt stress responses[J]. International Journal of Molecular Sciences,2019,20(7):1735.
- [30] 孙浩月,吴洪斌,李明,等.褪黑素浸种对盐胁迫下芸豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 河南农业科学,2021,50(12):111-120.
- [31] WANG Q, LIANG X, XIANG D, et al. The physiological mechanism of melatonin enhancing the tolerance of oat seedlings under saline-alkali stress[J]. Agronomy,2023,13(9):2343.
- [32] LI H, CHANG J, CHEN H, et al. Exogenous melatonin confers salt stress tolerance to watermelon by improving photosynthesis and redox homeostasis[J]. Frontiers in Plant Science,2017,8:295.
- [33] LIU L, WANG Z, GAI Z, et al. Exogenous application of melatonin improves salt tolerance of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) seedlings[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2022,44(6):57.
- [34] LI J, YANG Y, SUN K, et al. Exogenous melatonin enhances cold,salt and drought stress tolerance by improving antioxidant defense in tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze)[J]. Molecules,2019,24(9):1826.
- [35] 顾秀容. 褪黑素预处理对盐和 PEG 胁迫下西瓜荧光特性和抗氧化系统的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [36] WANG L Y, LIU J L, WANG W X, et al. Exogenous melatonin improves growth and photosynthetic capacity of cucumber under salinity-induced stress[J]. Photosynthetica,2016,54:19-27.
- [37] 耿书德,吴燕,高青海. 盐胁迫下外源褪黑素浸种对西瓜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2022,50(2):52-55.
- [38] 向警,黄倩,鞠春燕,等.外源褪黑素对盐胁迫下水稻种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 植物生理学报,2021,57(2):393-401.
- [39] SARDAR H, RAMZAN M A, NAZ S, et al. Exogenous application of melatonin improves the growth and productivity of two broccolis (*Brassica oleracea* L.) cultivars under salt stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation,2023,42:5152-5166.
- [40] ZENG L, CAI J S, LI J J, et al. Exogenous application of a low concentration of melatonin enhances salt tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings[J]. Journal of Integrative Agriculture,2018,17:328-335.

(责任编辑:成纾寒)